



ESPERIMENTI DI FISICA
Visita 3bscientific.it

Meccanica
Termologia

Elettrologia
Ottica

Fisica atomica e nucleare
Fisica moderna



Dr. Johannes Selbach

GENTILE CLIENTE,

le pagine seguenti presentano oltre 100 esperimenti per moderne lezioni di fisica. La raccolta costituisce uno strumento efficace e completo per affrontare aree tematiche dalla fisica classica a quella moderna. Grazie a una suddivisione basata su tipologia di target e obiettivi, è possibile scegliere fra esperimenti di livello base, avanzato e specialistico.

Ciascun esperimento comprende:

- descrizione della funzione
- raffigurazione della struttura sperimentale
- rappresentazione dei principi teorici e sperimentali
- panoramica dei risultati delle misurazioni
- elenco dettagliato della strumentazione.

Informazioni e dettagli sui singoli strumenti sono reperibili sul nostro sito web www.3bscientific.com.

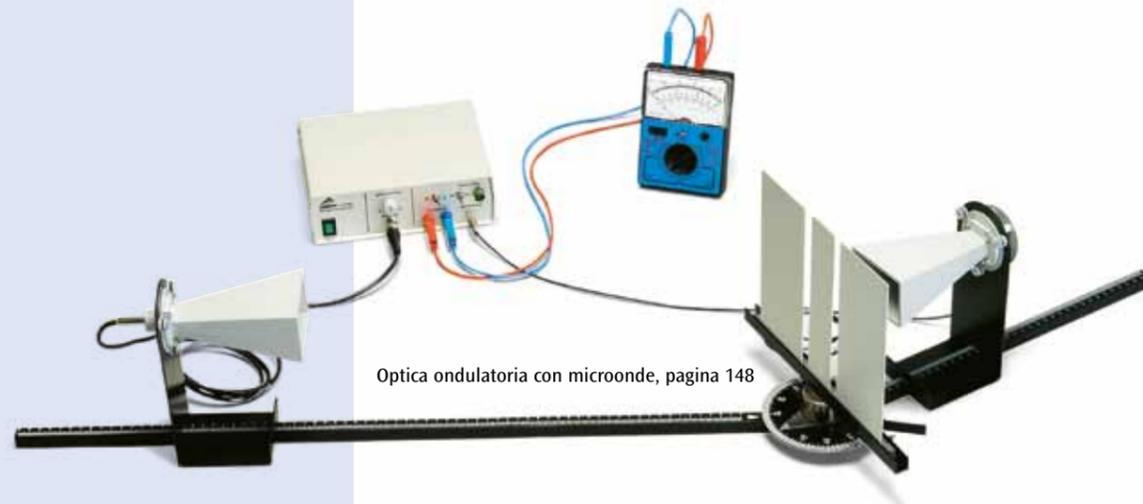
Siamo a vostra completa disposizione anche per consulenze telefoniche e via e-mail.

Riceveremo con piacere tutte le vostre domande, annotazioni e ordinazioni. Saremo inoltre lieti di elaborare per voi ulteriori apparecchiature su nuovi argomenti, rispondendo in maniera ancor più specifica alle vostre esigenze.

Cordiali saluti,

Dr. Johannes Selbach

Head of Product Management Natural Sciences



Optica ondulatoria con microonde, pagina 148

La qualità è il nostro impegno

3B Scientific offre eccellente qualità ad un ottimo prezzo. Il nostro quality management è conforme agli standard di ISO 9001 e di Worlddidac Quality Charter e la sua qualità viene regolarmente confermata da periti indipendenti.

C'è da fidarsi.



LEGENDA

1



Esperimento di livello base

2



Esperimento di livello avanzato

3



Esperimento di livello specialistico

CONTENUTO



MECCANICA

METODI DI MISURAZIONE

Sferometro (UE1010100):8
Determinazione dei raggi di curvatura sui vetri per orologio

Lunghezza e volume (UE1010200):10
Misurazione di un corpo di forma irregolare

Costante di gravitazione (UE1010300):12
Misurazione della forza gravitazionale e determinazione della costante di gravitazione con la bilancia di torsione di Cavendish

FORZE

Leva unilaterale e bilaterale (UE1020200):14
Conferma della legge sulle leve

Parallelogramma delle forze (UE1020300):16
Analisi sperimentale della somma vettoriale delle forze

Piano inclinato (UE1020400):18
Determinazione della forza resistente

Attrito statico e radente (UE1020500):20
Misurazione delle forze di attrito

SPINTA STATICA

Principio di Archimede (UE1020850):22
Determinazione della spinta statica in funzione della profondità di immersione

MOTO TRASLATORIO

Moto uniformemente accelerato (UE1030250):24
Misurazione della velocità istantanea in funzione dello spostamento

Moto uniformemente accelerato (UE1030260):26
Registrazione e valutazione di moti uniformemente accelerati sulla rotaia delle pulegge

Caduta libera (UE1030300):28
Determinazione dell'accelerazione di caduta

Moto del proiettile (UE1030400):30
Registrazione punto per punto delle parabole di lancio

Urti bidimensionali (UE1030600):32
Analisi di urti elastici ed anelastici di due corpi su un piano

Seconda legge di Keplero (UE1030700):34
Conferma della legge delle aree uguali per i moti originati da forze centrali

MOTO ROTATORIO

Moto rotatorio uniformemente accelerato (UE1040101):36
Conferma dell'equazione del moto di Newton

Momento d'inerzia (UE1040201):38
Determinazione del momento d'inerzia di un'asta del manubrio con masse supplementari

Momento d'inerzia (UE1040205):40
Determinazione del momento d'inerzia di diversi corpi di prova

Moti giroscopici (UE1040500):42
Precessione e nutazione di un giroscopio

OSCILLAZIONI E ONDE

Oscillazione armonica di un pendolo a filo (UE1050101):44
Misurazione del periodo di oscillazione di un pendolo a filo per vari pesi

Oscillazione ellittica di un pendolo a filo (UE1050121):46
Descrizione dell'oscillazione ellittica di un pendolo a filo come sovrapposizione di due componenti perpendicolari tra loro

Pendolo gravitazionale variabile (UE1050201):48
Misurazione del periodo di oscillazione di un pendolo a seconda della componente attiva dell'accelerazione di caduta

Pendolo di Foucault (UE1050250):50
Dimostrazione della rotazione terrestre con un pendolo di Foucault

Oscillazioni armoniche (UE1050311):52
Misurazione delle oscillazioni di una molla a elica con un sensore di movimento a ultrasuoni

Pendolo di torsione del Prof. Pohl (UE1050500):54
Misurazione e analisi di oscillazioni di torsione armoniche libere

Copyright © 2014, 3B Scientific GmbH, Hamburg. È vietata la riproduzione e pubblicazione non autorizzata dei contenuti del catalogo.

CONTENUTO

Pendolo di torsione del Prof. Pohl (UE1050550):.....	56
Misurazione e analisi di oscillazioni forzate	
Oscillazioni accoppiate (UE1050600):.....	58
Registrazione e analisi delle oscillazioni di due pendoli uguali accoppiati	
Onde meccaniche (UE1050700):.....	60
Analisi di onde stazionarie su una molla a elica e una corda tese	
ACUSTICA	
Velocità del suono nell'aria (UE1070310):.....	62
Misurazione dei tempi di propagazione degli impulsi sonori in un tubo di Kundt	
Velocità del suono nell'aria (UE1070320):.....	64
Generazione e misurazione di onde sonore stazionarie in un tubo di Kundt	
Propagazione del suono in corpi solidi (UE1070530):.....	66
Determinazione della velocità del suono per onde longitudinali e trasversali in corpi solidi	
Effetto Debye-Sears (UE1070550):.....	68
Determinazione della velocità delle onde ultrasonore nei liquidi	
MECCANICA DEI LIQUIDI E DEI GAS	
Viscosimetro a sfera cadente (UE1080350):.....	70
Determinazione della viscosità dinamica di una soluzione acquosa di glicerina	
Tensione superficiale (UE1080400):.....	72
Misurazione della tensione superficiale secondo il metodo del distacco	



DILATAZIONE TERMICA	
Dilatazione termica dei solidi (UE2010130):.....	74
Determinazione dei coefficienti di dilatazione di ottone, acciaio e vetro	
Anomalia dell'acqua (UE2010301):.....	76
Determinazione della temperatura del massimo di densità dell'acqua	
TRASFERIMENTO DI CALORE	
Conducibilità termica (UE2020100):.....	78
Misurazione della conducibilità in aste metalliche	
Cubo di Leslie (UE2020200):.....	80
Misurazione della radiazione termica di un cubo di Leslie	
ENERGIA INTERNA	
Energia interna e lavoro meccanico (UE2030300):.....	82
Aumento dell'energia interna attraverso il lavoro meccanico	
Energia interna e lavoro elettrico (UE2030400):.....	84
Aumento dell'energia interna attraverso il lavoro elettrico	
LEGGI DEI GAS	
Legge di Boyle-Mariotte (UE2040100):.....	86
Misurazione in aria a temperatura ambiente	
L'esponente adiabatico dell'aria (UE2040200):.....	88
Determinazione dell'esponente adiabatico C_p/C_v dell'aria secondo Rüchardt	
Gas reale e punto critico (UE2040300):.....	90
Analisi quantitativa di un gas reale e rappresentazione del punto critico	

CONTENUTO

CICLI	
Motore Stirling D (UE2060100):.....	92
Modello funzionale di un motore ad aria calda come motore termico	
Motore Stirling G (UE2060250):.....	94
Registrazione del diagramma $p-V$	
Pompa di calore (UE2060300):.....	96
Registrazione e analisi del diagramma pressione-entalpia di una pompa di calore a compressione	



ELETTROSTATICA	
Campo elettrico nel condensatore a piastre (UE3010700):.....	98
Misurazione del campo elettrico in un condensatore a piastre con il misuratore di campo elettrico	
Tensione sui condensatore a piastre (UE3010800):.....	100
Misurazione statica della tensione in funzione della distanza tra le piastre	
TRASPORTO DELLA CARICA E CORRENTE	
Gocce d'acqua cariche (UE3020100):.....	102
Dimostrazione della corrente elettrica che viene creata da gocce d'acqua in movimento e caricate	
Conduzione elettrica (UE3020200):.....	104
Determinazione della conduttività elettrica di rame e alluminio	
Il ponte di Wheatstone (UE3020300):.....	106
Determinazione di resistenze ohmiche	
Legge di Ohm (UE3020320):.....	108
Conferma della legge di Ohm	

Legge di Kirchhoff (UE3020330):.....	110
Misurazioni di tensione e corrente su collegamenti in serie e in parallelo di resistenze	
Divisore di tensione (UE3020340):.....	112
Misurazioni di tensione e corrente sul divisore di tensione non sotto carico e sotto carico	
Elettrolisi (UE3020700):.....	114
Determinazione della costante di Faraday	
CAMPO MAGNETICO	
Forza di Lorentz (UE3030300):.....	116
Misurazione della forza esercitata su un conduttore attraversato da corrente in un campo magnetico	
Campo magnetico di una bobina cilindrica (UE3030500):.....	118
Determinazione del campo magnetico di bobine cilindriche di diversa lunghezza	
Campo geomagnetico (UE3030700):.....	120
Determinazione delle componenti orizzontale e verticale del campo geomagnetico	
INDUZIONE	
Legge di induzione di Faraday (UE3040100):.....	122
Produzione di una sovratensione momentanea in un conduttore ad anello mediante l'uso di un magnete permanente in movimento	
Induzione in un conduttore ad anello in movimento (UE3040200):.....	124
Misurazione della tensione d'induzione in un conduttore ad anello spostato da un campo magnetico	
Pendolo di Waltenhofen (UE3040400):.....	126
Dimostrazione e analisi del funzionamento di un freno a corrente di Foucault	
Trasformatore (UE3040500):.....	128
Misurazioni su un trasformatore sotto carico e non sotto carico	
CIRCUITI DI CORRENTE CONTINUA E ALTERNATA	
Carica e scarica di un condensatore (UE3050101):.....	130
Analisi dell'andamento della tensione del condensatore durante la carica e la scarica di un condensatore	
Carica e scarica di un condensatore (UE3050105):.....	132
Misurazione dei tempi di carica e scarica	
Resistenza di un condensatore nel circuito a corrente alternata (UE3050111):.....	134
Determinazione della resistenza capacitiva in funzione di capacità e frequenza	

CONTENUTO

Carica e scarica di una bobina (UE3050201):.....	136
Analisi dell'andamento della corrente della bobina all'inserimento e al disinserimento di una tensione continua	
Resistenza di una bobina nel circuito a corrente alternata (UE3050211):..	138
Determinazione della resistenza induttiva in funzione di induttanza e frequenza	
Impedenza in corrente alternata (UE3050301):.....	140
Determinazione dell'impedenza in corrente alternata in un circuito con capacitori e resistori	
Impedenza in corrente alternata (UE3050311):.....	142
Determinazione dell'impedenza in corrente alternata in un circuito con induttori e resistori	
Impedenza in corrente alternata (UE3050321):.....	144
Determinazione dell'impedenza in corrente alternata in un circuito con induttori e capacitori induttiva e capacitiva	
Circuito oscillante LC (UE3050400):.....	146
Analisi del comportamento di risonanza di un circuito oscillante LC in serie	

OSZILLAZIONI E ONDE ELETTROMAGNETICHE

Optica ondulatoria con microonde (UE3060300):.....	148
Dimostrazione e analisi di interferenza, diffrazione e polarizzazione delle microonde	

TUBI ELETTRONICI

Diodo a tubo (UE3070100):.....	150
Registrazione della caratteristica di un diodo a tubo	

Triodo a tubo (UE3070200):.....	152
Registrazione del campo di caratteristiche di un triodo a tubo.	

Tubo a croce di Malta (UE3070300):.....	154
Dimostrazione della diffusione rettilinea di elettroni nello spazio privo di campo	

Tubo di Perrin (UE3070400):.....	156
Determinazione della polarità dei portatori di carica	

Tubo di Thomson (UE3070500):.....	158
Analisi della deviazione degli elettroni nel campo elettrico e magnetico.	

Tubo a fascio filiforme (UE3070700):.....	160
Determinazione della carica specifica dell'elettrone	

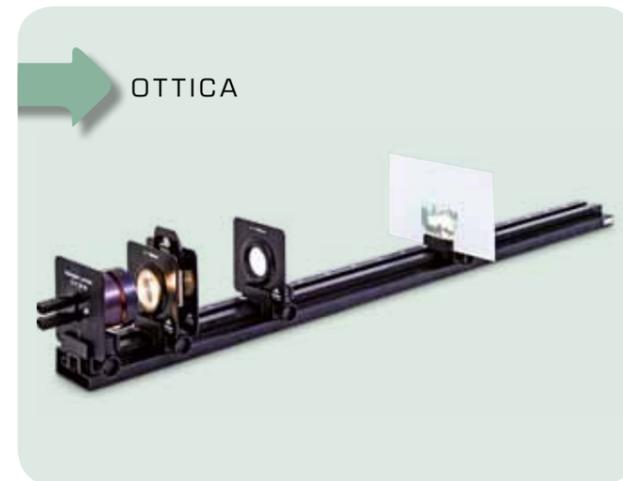
Oscilloscopio didattico (UE3070800):.....	162
Analisi dei principi fisici della rappresentazione oscilloscopica con risoluzione temporale dei segnali elettrici	

Oscilloscopio didattico II (UE3070850):.....	164
Dimostrazione della sovrapposizione indisturbata di campi magnetici nel vuoto	

ELETTRONICA

Transistor bipolare (UE3080200):.....	166
Misurazione delle caratteristiche rilevanti di un transistor npn	

Transistor ad effetto di campo (UE3080300):.....	168
Misurazione delle caratteristiche rilevanti di un transistor ad effetto di campo	



OTTICA GEOMETRICA

Equazioni delle lenti (UE4010100):.....	170
Determinazione della distanza focale di una lente secondo il metodo di Bessel	

COLORI

Spettri di trasmissione (UE4020400):.....	172
Registrazione e valutazione degli spettri di trasmissione di corpi trasparenti	

OTTICA ONDULATORIA

Diffrazione da fenditure multiple e reticoli (UE4030200):.....	174
Dimostrazione della natura ondulatoria della luce e determinazione della lunghezza d'onda	

Biprisma di Fresnel (UE4030300):.....	176
Creazione di un'interferenza fra due raggi con un biprisma Fresnel	

Anelli di Newton(UE4030350):.....	178
Osservazione di anelli di Newton in luce monocromatica	

Interferometro di Michelson (UE4030410):.....	180
Dimostrazione e analisi del funzionamento di un interferometro di Michelson	

Interferometro di Mach-Zehnder (UE4030520):.....	182
Illustrazione del cancellatore quantistico in un esperimento analogico	

POLARIZZAZIONE

Legge di Malus (UE4040100):.....	184
Conferma della legge di Malus per luce polarizzata linearmente	

CONTENUTO

Attività ottica (UE4040300):.....	186
Rotazione del piano di polarizzazione attraverso soluzioni zuccherine	

Effetto Faraday (UE4040600):.....	188
Dimostrazione dell'effetto Faraday e determinazione della costante di Verdet per il vetro flint	

INTENSITÀ DI RADIAZIONE

Legge del quadrato della distanza (UE4050100):.....	190
Conferma della legge del quadrato della distanza per l'intensità di radiazione di una sorgente luminosa	

Legge di Stefan-Boltzmann (UE4050200):.....	192
Conferma della dipendenza T^4 dell'intensità di radiazione	

VELOCITÀ DELLA LUCE

Determinazione della velocità della luce (UE4060100):.....	194
Determinazione della velocità della luce sulla base della durata di brevi impulsi luminosi	

FISICA DEL LASER

Laser Nd:YAG (UE4070310):.....	196
Configurazione e ottimizzazione di un laser Nd:YAG	

Laser Nd:YAG (UE4070320):.....	198
Q-switching del laser Nd:YAG con un modulo Cr:YAG	

Laser Nd:YAG (UE4070330):.....	200
Duplicazione della frequenza interna al risonatore in un laser Nd:YAG	



PRINCIPI DI FISICA ATOMICA

Costante di Planck (UE5010200):.....	202
Determinazione della costante di Planck secondo il metodo della forza controelettromotrice	

Microscopio a scansione per effetto tunnel (UE5010300):.....	204
Rappresentazione della struttura atomica della superficie di campioni di oro e grafite	

Diffrazione elettronica (UE5010500):.....	206
Osservazione della diffrazione degli elettroni sulla grafite policristallina e conferma della natura ondulatoria degli elettroni	

GUSCI ELETTRONICI

Spettri a righe (UE5020100):.....	208
Registrazione e valutazione della serie di Balmer dell'idrogeno e di altri spettri a righe nel campo visibile	

Spettri a righe (UE5020150):.....	210
Misurazione ad alta risoluzione di linee di assorbimento ed emissione	

Esperimento di Franck-Hertz sul mercurio (UE5020300):.....	212
Registrazione e analisi della curva di Franck-Hertz sul mercurio	

Esperimento di Franck-Hertz sul neon (UE5020400):.....	214
Registrazione e analisi della curva di Franck-Hertz sul neon e osservazione dell'emissione luminosa	

Potenziali critici (UE5020500):.....	216
Determinazione dei potenziali critici dell'atomo di elio	

RISONANZA MAGNETICA

Risonanza di spin elettronico (UE5030100):.....	218
Dimostrazione della risonanza di spin elettronico su DPPH	

Risonanza magnetica nucleare (UE5030200):.....	220
Dimostrazione e confronto della risonanza magnetica nucleare su glicerina, polistirolo e teflon	

FISICA DELLO STATO SOLIDO /

FENOMENI DI CONDUZIONE	
Conduzione elettrica in semiconduttori (UE6020100):.....	222
Determinazione della banda proibita del germanio	

Effetto Hall nei semiconduttori (UE6020200):.....	224
Analisi dei meccanismi della conduzione elettrica in germanio drogato mediante studio dell'effetto Hall	

Effetto Seebeck (UE6020500):.....	226
Registrazione delle caratteristiche di diversi termoelementi e determinazione della sensibilità	

FISICA DEI RAGGI RÖNTGEN / DIFFRATTOMETRIA

Riflessione di Bragg (UE7010100):.....	228
Determinazione di costanti reticolari di cristalli ionici	

FISICA DEI RAGGI RÖNTGEN /

SPETTROSCOPIA ENERGETICA	
Fluorescenza a raggi X (UE7020100):.....	230
Analisi non distruttiva dei composti chimici	

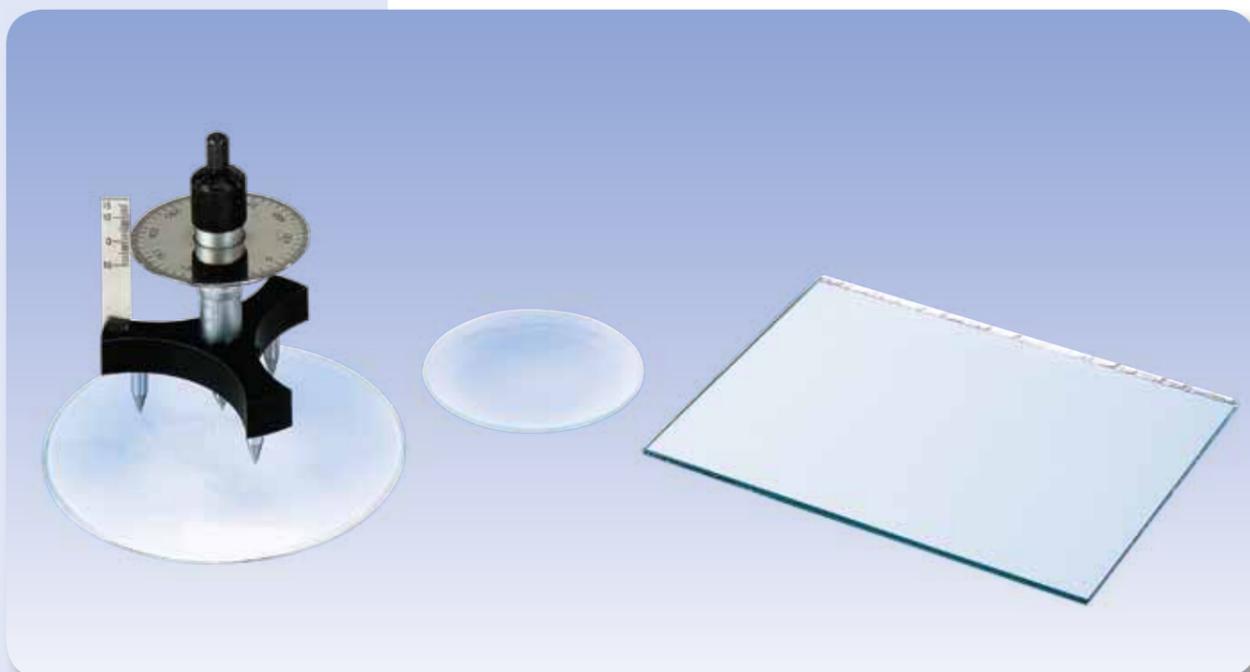
ALTRI ASSORTIMENTI

Sistema di apparecchi per esperimenti scolastici (SES).....	232
Biologia.....	236
Geologia.....	240

UE1010100

SFEROMETRO

UE1010100



FUNZIONI

- Misurazione delle altezze di bombatura h di due vetri per orologio ad una distanza definita s tra le punte di base dello sferometro.
- Calcolo dei raggi di curvatura R dei due vetri per orologio.
- Confronto del metodo per curvature convesse e concave.

SCOPO

Determinazione dei raggi di curvatura sui vetri per orologio

RIASSUNTO

Dall'altezza della bombatura h di una superficie sferica sopra o sotto un piano definito dai punti d'angolo di un triangolo equilatero è possibile stabilire il raggio di curvatura R della superficie sferica. Questa determinazione è possibile per curvature concave o convesse e concava della superficie sferica.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Sferometro di precisione	1002947
1	Specchio piano	1003190
1	Set di 10 vaschette in vetro da orologio, 80 mm	1002868
1	Set di 10 vaschette in vetro da orologio, 125 mm	1002869

1

BASI GENERALI

Lo sferometro consta di un treppiede con tre punte in acciaio come basi, che formano un triangolo equilatero di lato 50 mm. Attraverso il centro del treppiede viene condotta una vite micrometrica con punta di misura. Una scala verticale indica l'altezza h della punta di misura sopra o sotto il piano definito dalle punte di base. Lo spostamento della punta di misura può essere letto con una precisione di $1 \mu\text{m}$ mediante una scala su un disco circolare che gira con la vite micrometrica.

Tra la distanza r delle punte di base del centro dello sferometro, il raggio di curvatura cercato R e l'altezza della bombatura h vale la relazione

$$(1) \quad R^2 = r^2 + (R-h)^2$$

Invertendo, per R si ottiene quindi:

$$(2) \quad R = \frac{r^2 + h^2}{2 \cdot h}$$

La distanza r si calcola dal lato s del triangolo equilatero formato dalle punte di base:

$$(3) \quad r = \frac{s}{\sqrt{3}}$$

L'equazione condizionale per R è quindi:

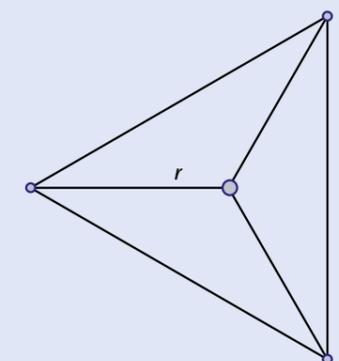
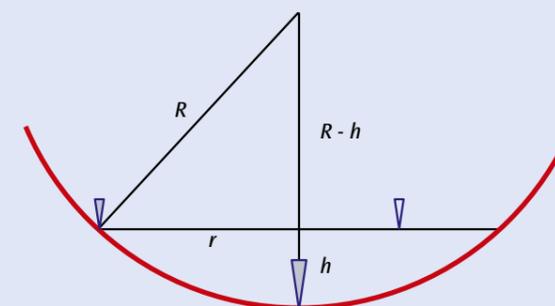
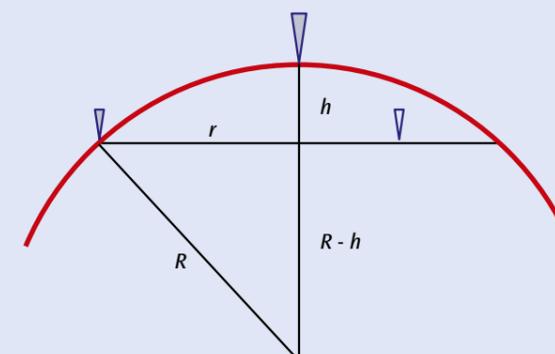
$$(4) \quad R = \frac{s^2}{6 \cdot h} + \frac{h}{2}$$

ANALISI

La distanza tra le punte di base s dello sferometro utilizzato ammonta a 50 mm. Per altezze di bombature h ridotte (4) può quindi essere semplificata in

$$R = \frac{s^2}{6 \cdot h} = \frac{2500\text{mm}^2}{6 \cdot h} \approx \frac{420\text{mm}^2}{h}$$

Sulla scala dello sferometro sono leggibili altezze di bombatura tra 10 mm e $1 \mu\text{m}$ con una precisione di lettura di $1 \mu\text{m}$. In questo modo, possono essere determinati raggi di curvatura da ca. 40 mm a ca. 400 mm

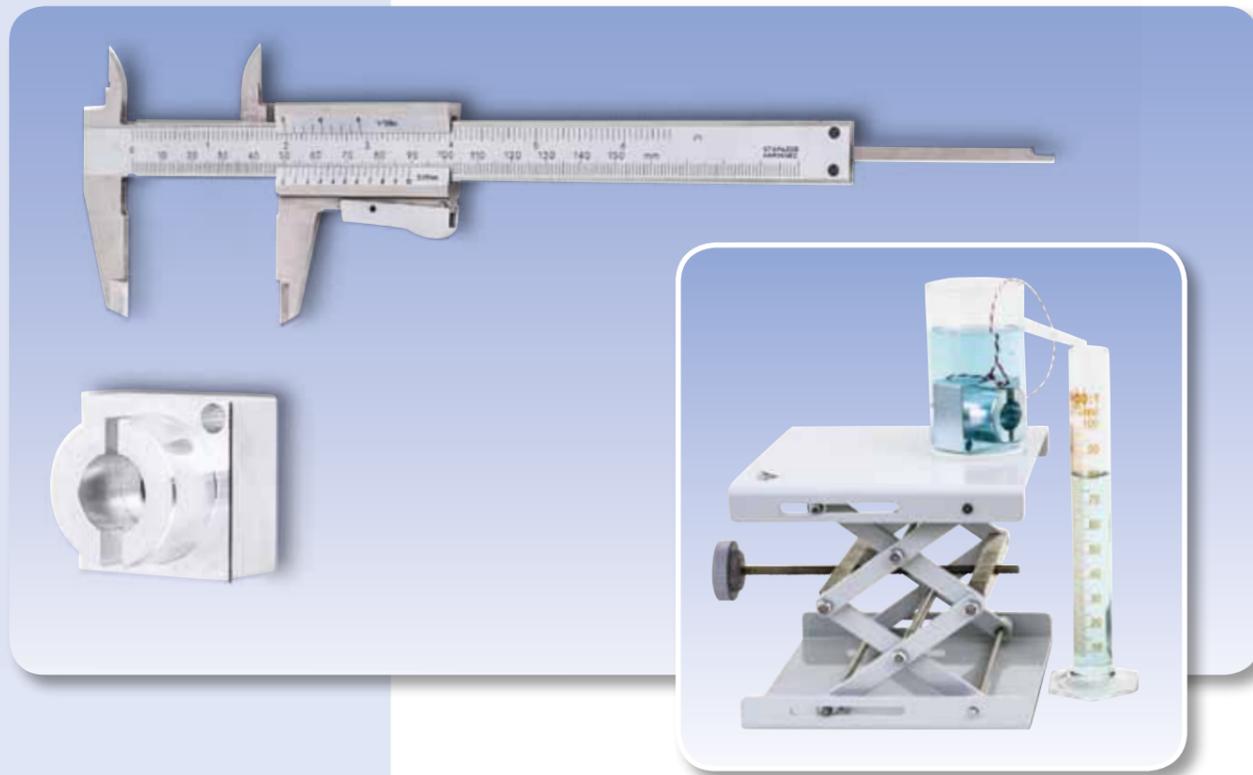


Rappresentazione schematica per la misurazione del raggio di curvatura con uno sferometro

In alto: Sezione trasversale per oggetto di misurazione con superficie convessa

Centro: Sezione trasversale per oggetto di misurazione con superficie concava

In basso: Osservazione dall'alto



FUNZIONI

- Determinazione della misura esterna di un corpo di forma irregolare.
- Determinazione della misura interna di un corpo di forma irregolare.
- Determinazione della misura in profondità di un corpo di forma irregolare.
- Calcolo e misurazione del volume.

SCOPO

Misurazione di un corpo di forma irregolare

RIASSUNTO

Per la misurazione precisa di lunghezze non troppo grandi si utilizzano i calibri a corsoio. Essi sono adatti per la misurazione di misure esterne, interne e in profondità, come viene dimostrato con l'esempio di un corpo di forma irregolare. Il calcolo del volume di un corpo dai dati acquisiti è relativamente complicato. Un'altra determinazione avviene secondo il metodo del traboccamento.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601
1	Oggetto per esercitazioni di misurazione	1006889
1	Vaso di troppopieno, trasparente	1003518
1	Cilindro graduato, 100 ml	1002870
1	Laborboy II	1002941
1	Corda sperimentale	1001055
1	Set di 10 becher, forma alta	1002873

1

BASI GENERALI

Per la misurazione precisa di lunghezze non troppo grandi si utilizzano i calibri a corsoio. Di norma sono composti da due grandi bracci di misura per la determinazione delle misure esterne, due becchi incrociati per la determinazione delle misure interne e un'asta per la misurazione in profondità di fori e intagli.

Per evitare errori sistematici di misurazione, il calibro a corsoio deve essere applicato in ogni caso non inclinato, per quanto possibile. La precisione di lettura viene classicamente aumentata di qualche frazione di millimetro con il cosiddetto nonio. I millimetri pieni vengono letti a sinistra dello zero del nonio. La frazione decimale è individuata quando una lineetta del nonio si copre con una lineetta della scala millimetrica.

Se è disponibile un recipiente di traboccamento, è possibile determinare il volume secondo il metodo del traboccamento. Il corpo viene immerso nel recipiente riempito con acqua provocando un traboccamento e facendo fluire il liquido in un cilindro graduato. Il volume di acqua spinto fuori dal recipiente corrisponde al volume V del corpo stesso.

ANALISI

Di norma si effettua più volte una misurazione e si calcola il valore medio dei valori determinati.

Per il calcolo del volume, il volume viene suddiviso in volumi parziali di corpi di forma regolare, che vengono sommati o sottratti ad es. nei fori.

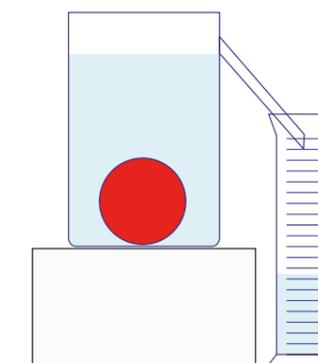
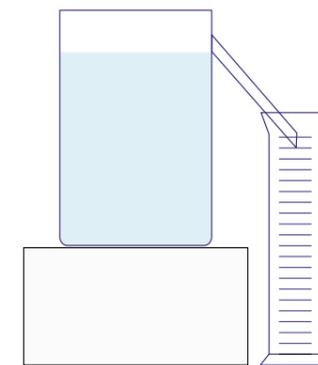


Fig. 6: Rappresentazione schematica del metodo di traboccamento

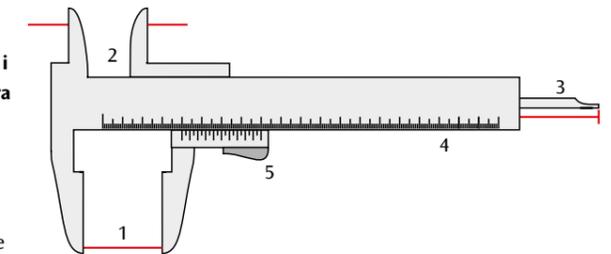


Fig. 1: Bracci di misura per misurazione esterna (1), becchi incrociati per misurazione interna (2), asta per la misurazione in profondità (3), scala millimetrica (4), cursore con nonio (5)

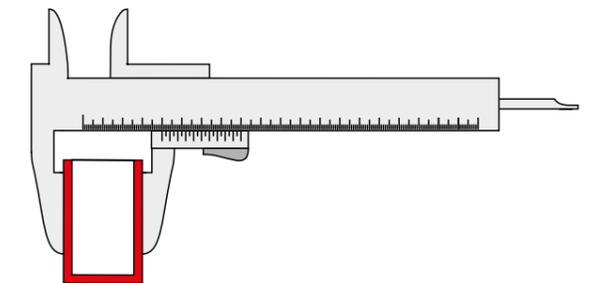


Fig. 2: Determinazione di una misura esterna

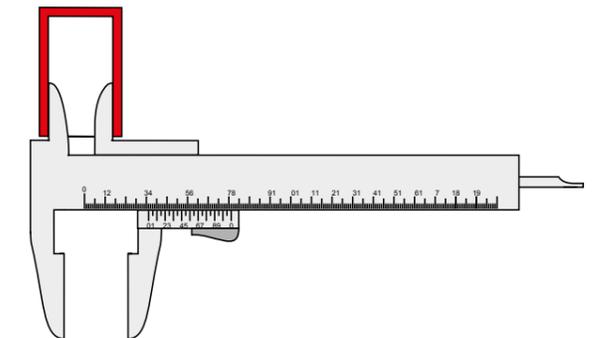


Fig. 3: Determinazione di una misura interna

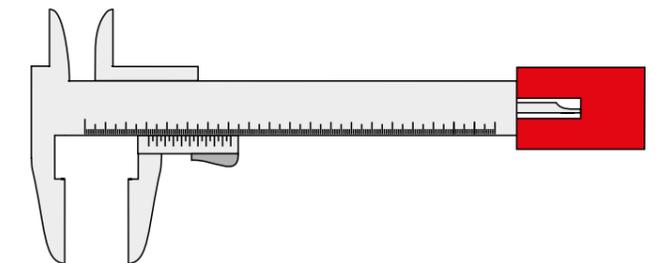


Fig. 4: Determinazione della profondità di foratura

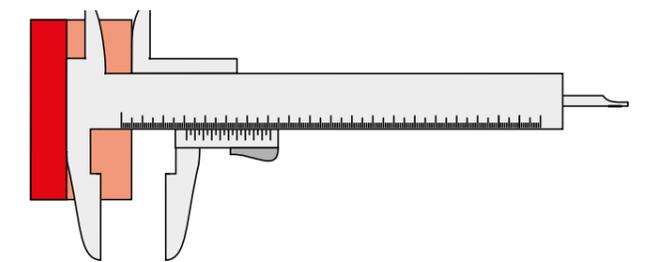
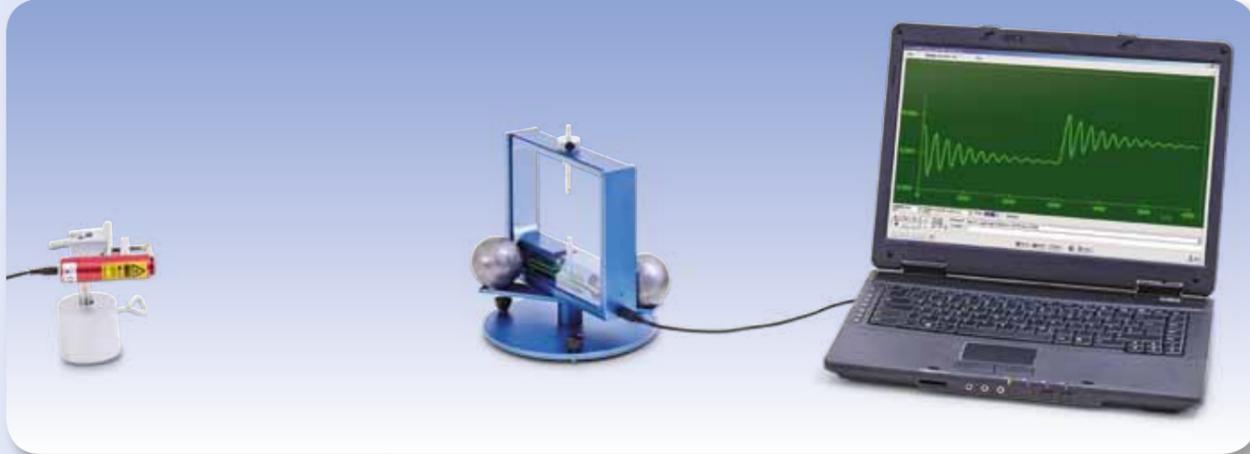


Fig. 5: Determinazione di un'altezza



FUNZIONI

- Determinazione della posizione di equilibrio di partenza del pendolo di torsione.
- Registrazione dell'oscillazione del pendolo di torsione intorno alla posizione finale di equilibrio e determinazione del periodo di oscillazione.
- Determinazione della posizione finale di equilibrio.
- Calcolo della costante di gravitazione G .

SCOPO

Misurazione della forza gravitazionale e determinazione della costante di gravitazione con la bilancia di torsione di Cavendish

RIASSUNTO

Il nucleo centrale della bilancia di torsione di Cavendish è rappresentato da un pendolo di torsione sensibile munito di due sfere di piombo piccole, a loro volta attratte da una coppia di sfere grandi, anch'esse di piombo. La posizione delle sfere di piombo più grandi determina pertanto la posizione di equilibrio del pendolo di torsione. Spostando le sfere grandi in una seconda posizione specularmente simmetrica alla prima rispetto alla massa delle sfere piccole, dopo un periodo di transizione il pendolo di torsione assume una nuova posizione di equilibrio. La costante di gravitazione si ricava dalle due posizioni di equilibrio e dalle misure geometriche della disposizione. Il fattore determinante è l'equilibrio fra la forza gravitazionale e il momento torcente di richiamo del filo di torsione. Le oscillazioni del pendolo di torsione vengono misurate con un sensore differenziale capacitivo, che sopprime completamente le percentuali di rumore e vibrazione nel segnale. Il filo in tungsteno è talmente sottile che il periodo di oscillazione del pendolo di torsione è dell'ordine di pochi minuti. Nell'arco di un'ora sono pertanto osservabili diverse oscillazioni intorno alla posizione di equilibrio.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Bilancia di torsione di Cavendish	1003337
1	Diodo laser, rosso	1003201
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Manicotto universale	1002830
1	Asta di supporto, 100 mm	1002932
Ulteriormente consigliato		
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601
1	Bilancia elettronica 5000 g	1003434

BASI GENERALI

Nella misurazione delle forze gravitazionali fra due masse nell'esperimento di laboratorio, tutte le masse circostanti hanno in linea di principio un effetto di disturbo. Nel caso della bilancia di torsione di Cavendish questo problema viene in massima parte aggirato, in quanto si eseguono due misurazioni con posizioni specularmente simmetriche delle masse.

Il nucleo centrale della bilancia di torsione di Cavendish è rappresentato da un pendolo di torsione sensibile munito di due sfere di piombo piccole, a loro volta attratte da una coppia di sfere grandi, anch'esse di piombo. La posizione delle sfere di piombo più grandi determina pertanto la posizione di equilibrio del pendolo di torsione. Spostando le sfere grandi in una seconda posizione specularmente simmetrica alla prima rispetto alla massa delle sfere piccole, dopo un periodo di transizione il pendolo di torsione assume una nuova posizione di equilibrio. La costante di gravitazione si ricava dalle due posizioni di equilibrio e dalle misure geometriche della disposizione. Il fattore determinante è l'equilibrio fra la forza gravitazionale e il momento torcente di richiamo del filo di torsione. La forza gravitazionale è data da

$$(1) \quad F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

G : costante di gravitazione

m_1 : massa di una sfera di piombo piccola,

m_2 : massa di una sfera di piombo grande,

d : distanza fra sfera piccola e sfera grande nella posizione di misurazione.

Quando le due sfere di piombo grandi si trovano in posizione di misurazione, essa devia il pendolo di torsione dalla posizione di origine. Per il momento deviante vale

$$(2) \quad M_1 = 2 \cdot F \cdot r$$

r : distanza delle sfere di piombo piccole dalla sospensione dell'asta

Deviando il pendolo di torsione di un angolo φ , agisce il momento torcente di richiamo

$$(3) \quad M_2 = D \cdot \varphi$$

D : costante di collegamento angolare del filo di tungsteno

del sottile filo di tungsteno cui l'asta del pendolo di torsione è appesa. Nella posizione di equilibrio, M_1 e M_2 coincidono.

La costante di collegamento angolare D si rileva dal periodo di oscillazione T con cui il pendolo di torsione oscilla intorno alla propria posizione di equilibrio.

$$(4) \quad D = J \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}$$

Il momento d'inerzia J risulta pertanto composto dal momento d'inerzia J_1 delle due sfere di piombo piccole e dal momento d'inerzia J_k dell'asta sospesa

$$(5) \quad J = 2 \cdot m_1 \cdot r^2 + \frac{m_B}{12} \cdot (a^2 + b^2)$$

m_B : massa dell'asta sospesa

a, b : lunghezza e larghezza dell'asta sospesa.

Per le due sfere di piombo grandi sono previste due posizioni di misurazione specularmente simmetriche, cui appartengono due angoli di deviazione φ e φ' così come due momenti devianti uguali e contrapposti. Da (2) e (3) segue pertanto un equilibrio.

$$(6) \quad 4 \cdot F \cdot r = D \cdot (\varphi - \varphi') = D \cdot \Delta\varphi$$

Nell'esperimento le oscillazioni del pendolo di torsione vengono misurate con un sensore differenziale capacitivo, che sopprime completamente le percentuali di rumore e vibrazione nel segnale. Il filo in tungsteno è talmente sottile che il periodo di oscillazione del pendolo di torsione è dell'ordine di pochi minuti. Nell'arco di un'ora sono pertanto osservabili diverse oscillazioni intorno alla posizione di equilibrio.

È possibile utilizzare uno specchio fissato al pendolo di torsione per realizzare un indice luminoso in grado di rendere osservabili a occhio nudo le oscillazioni. Ciò consente di semplificare notevolmente la necessaria regolazione e calibrazione della bilancia di torsione.

ANALISI

Dalle equazioni (1), (4), (5) e (6) si ottiene previa conversione:

$$G = \frac{\Delta\varphi}{m_2} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi^2}{T^2} \cdot \left(2 \cdot r + \frac{1}{12} \cdot \frac{m_B}{m_1} \cdot \frac{a^2 + b^2}{r} \right)$$

In questa sede, non si è ancora considerato che ciascuna delle due sfere di piombo piccole viene attratta anche dalle sfere di piombo grandi lontane e pertanto il momento torcente sul pendolo di torsione risulta leggermente inferiore a quanto finora calcolato. In tal senso, è possibile correggere senza problemi l'equazione (2), poiché tutte le distanze sono note.

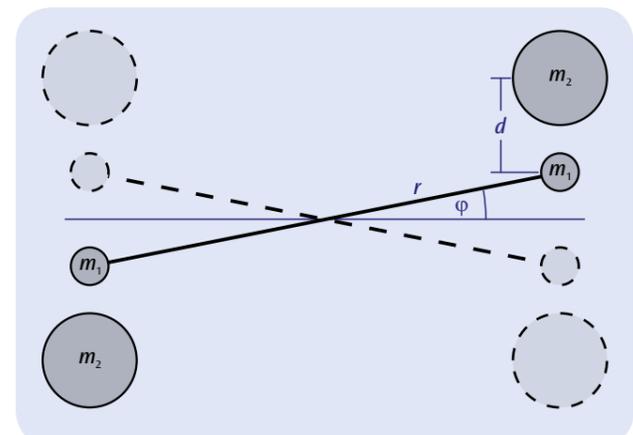


Fig. 1: Rappresentazione schematica della disposizione per la misurazione con la bilancia di torsione di Cavendish

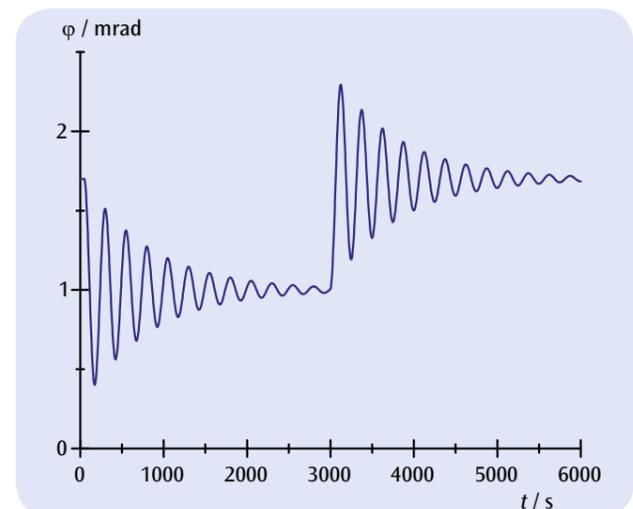


Fig. 2: Angolo di deviazione del pendolo di torsione in funzione del tempo con doppio cambio della posizione di misurazione per le sfere di piombo grandi



FUNZIONI

- Misurazione della forza F_1 in base al carico F_2 , al braccio del carico x_2 e al braccio della forza x_1 con leva unilaterale.
- Misurazione della forza F_1 in base al carico F_2 , al braccio del carico x_2 e al braccio della forza x_1 con leva bilaterale.

SCOPO

Conferma della legge sulle leve

RIASSUNTO

Dall'equilibrio dei momenti torcenti deriva la legge sulle leve che ha validità sia per le leve unilaterali che per quelle bilaterali. Rappresenta la base fisica per le trasmissioni meccaniche della forza di tutti i tipi.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Braccio di leva	1008539
1	Dinamometro di precisione 2 N	1003105
1	Dinamometro di precisione 5 N	1003106

1

BASI GENERALI

Una leva è un corpo rigido collocato in modo da poter ruotare intorno a un asse fisso e che serve per sollevare e spostare carichi. I bracci di leva sono i tratti tra il punto di rotazione e il punto di applicazione della forza o del carico. Il braccio ove è applicata la forza si dice braccio-potenza mentre quello ove il carico applica la sua forza resistente si dice braccio-resistenza. Nella leva unilaterale, la forza F_1 e il carico F_2 agiscono sullo stesso lato dell'asse di rotazione in direzione opposta l'una rispetto all'altra. Nella leva bilaterale, la forza F_1 e il carico F_2 agiscono su lati diversi dell'asse di rotazione nella stessa direzione.

Per entrambe le varianti dall'equilibrio dei momenti torcenti deriva la cosiddetta legge sulle leve:

$$(1) \quad F_1 \cdot x_1 = F_2 \cdot x_2$$

Rappresenta la base fisica per le trasmissioni meccaniche della forza di tutti i tipi.

ANALISI

Dai valori di misurazione si calcolano e si confrontano tra loro i prodotti $F_1 \cdot x_1$ e $F_2 \cdot x_2$

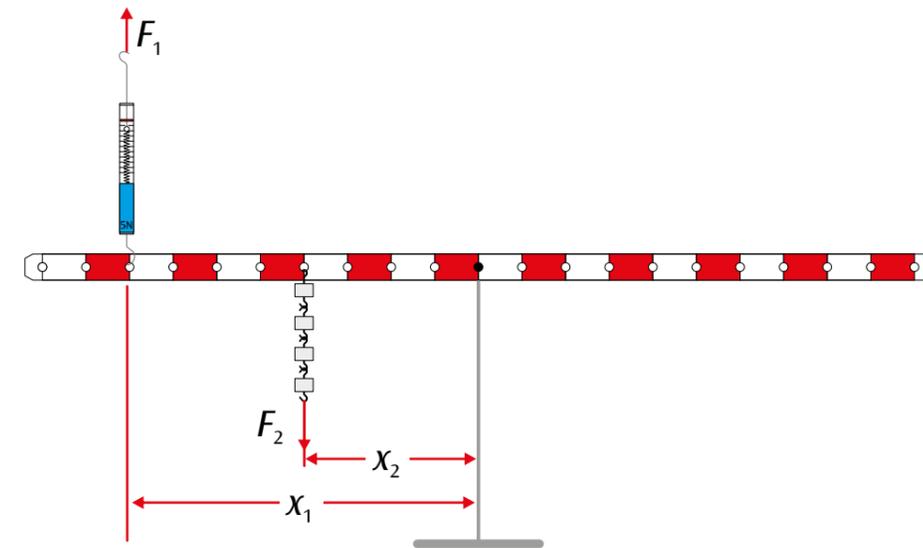


Fig. 1: Leva unilaterale

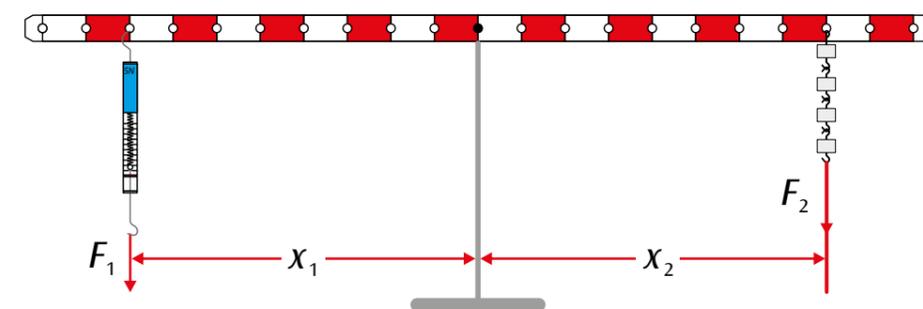


Fig. 2: Leva bilaterale


FUNZIONI

- Analisi grafica dell'equilibrio di tre forze singole qualsiasi.
- Analisi analitica dell'equilibrio in caso di allineamento simmetrico di F_1 e F_2 .

SCOPO

Analisi sperimentale della somma vettoriale delle forze

RIASSUNTO

Sul tavolo delle forze è possibile verificare in modo semplice e chiaro la somma vettoriale delle forze. A tale scopo il punto di applicazione di tre forze singole in equilibrio tra loro si trova esattamente nel centro. I valori delle singole forze vengono determinati in base alle masse sospese e la loro direzione viene letta come angolo sulla scala angolare. La valutazione del risultato sperimentale può essere effettuata in modo grafico o analitico.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tavolo delle forze	1000694

1
BASI GENERALI

Le forze sono vettori, cioè si sommano tra loro secondo le regole della somma vettoriale. Ai fini della somma - interpretata graficamente - il punto iniziale del secondo vettore viene disposto in corrispondenza del punto finale del primo vettore. La freccia tracciata dal punto iniziale del primo vettore al punto finale del secondo vettore rappresenta il vettore risultato. Se i due vettori sono interpretati come i lati di un parallelogramma, il vettore risultato è la diagonale (vedi fig. 1).

Sul tavolo delle forze è possibile verificare in modo semplice e chiaro la somma vettoriale delle forze. A tale scopo il punto di applicazione di tre forze singole in equilibrio tra loro si trova esattamente nel centro. I valori delle singole forze vengono determinati in base alle masse sospese e la loro direzione viene letta come angolo sulla scala angolare.

In caso di equilibrio delle forze la somma delle forze singole è

$$(1) \quad F_1 + F_2 + F_3 = 0$$

La forza $-F_3$ è quindi la somma delle forze singole F_1 e F_2 (vedi fig. 2)

$$(2) \quad -F_3 = F = F_1 + F_2$$

Per la componente del vettore parallela alla somma F vale

$$(3) \quad -F_3 = F = F_1 \cdot \cos \alpha_1 + F_2 \cdot \cos \alpha_2$$

e per la componente perpendicolare ad essa

$$(4) \quad 0 = F_1 \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot \sin \alpha_2$$

Le equazioni (3) e (4) descrivono la somma vettoriale in modo analitico. Per la verifica sperimentale è opportuno collocare la forza F_3 sull'angolo 0.

In alternativa all'interpretazione analitica, l'equilibrio delle forze può anche essere analizzato graficamente. A tale scopo inizialmente tutte le tre forze vengono disegnate a partire dal punto di applicazione centrale con il loro valore e il loro angolo. In seguito le forze F_2 e F_3 vengono spostate parallelamente, finché il relativo punto iniziale non si trova in corrispondenza della fine del vettore precedente. Come risultato è previsto il vettore nullo (vedere fig. 3). Nell'esperimento ciò viene riprodotto per tre forze singole qualsiasi in equilibrio tra loro.

L'interpretazione analitica nell'esperimento è limitata al caso speciale, in cui le due forze F_1 e F_2 sono simmetriche rispetto a F_3 .

ANALISI

Nel caso della simmetria ($F_1 = F_2$ e $\alpha_1 = -\alpha_2$) l'equazione (4) è ovviamente soddisfatta. A partire dall'equazione 4, l'equazione condizionale utilizzata nella fig. 4 per descrivere i dati misurati per la somma delle forze diventa

$$F = 2 \cdot F_1 \cdot \cos \alpha_1$$

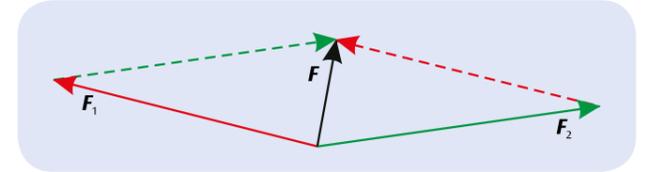


Fig. 1: Somma vettoriale di forze (Parallelogramma delle forze)

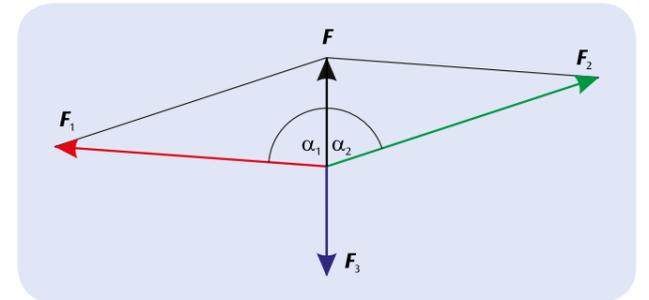
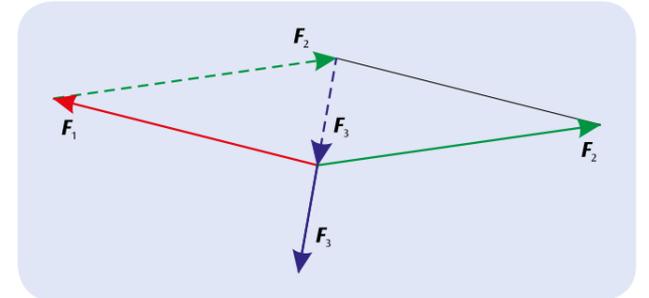
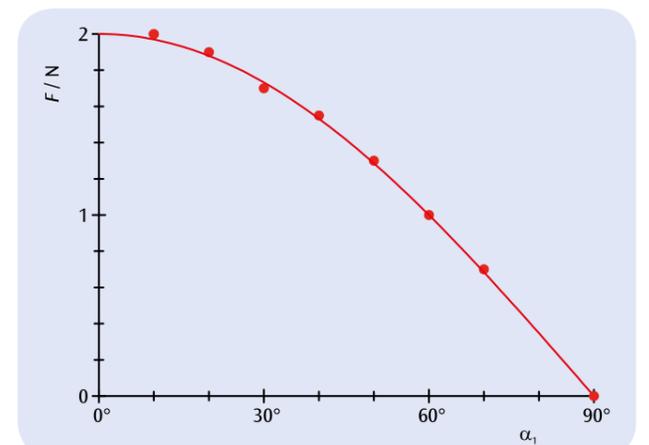

 Fig. 2: Determinazione della somma vettoriale di due forze F_1 e F_2 a partire dalla forza F_3 che mantiene l'equilibrio


Fig. 3: Analisi grafica dell'equilibrio di tre forze singole allineate in modo qualsiasi


 Fig. 4: Somma misurata e calcolata di due forze simmetriche in funzione dell'angolo di apertura α_1



FUNZIONI

- Misurazione della forza di trazione F_1 di un corpo in base all'angolo di inclinazione α sul piano inclinato.
- Rappresentazione del rapporto tra la forza di trazione F_1 e il peso G in funzione di $\sin \alpha$.

SCOPO

Determinazione della forza resistente

RIASSUNTO

Se un corpo sul piano inclinato deve essere tirato verso l'alto, non si deve superare il peso G del corpo, ma la forza resistente F_1 . Essa agisce parallelamente al piano e il suo valore è inferiore al peso. Ciò vale tanto più quanto più piccolo è l'angolo di inclinazione α del piano.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Piano inclinato	1003213
1	Dinamometro di precisione 5 N	1003106
1	Set di pesatura, da 1 g a 500 g	1010189

1

BASI GENERALI

Se un corpo sul piano inclinato deve essere tirato verso l'alto, non si deve superare il peso G del corpo, ma la forza resistente F_1 . Essa agisce parallelamente al piano e il suo modulo è inferiore a quello del peso. Come differenza vettoriale tra il peso e la forza resistente rimane la forza normale F_2 che agisce verticalmente rispetto al piano, vedere fig. 1.

Per i valori delle forze vale:

$$(1) \quad F_1 = G \cdot \sin \alpha$$

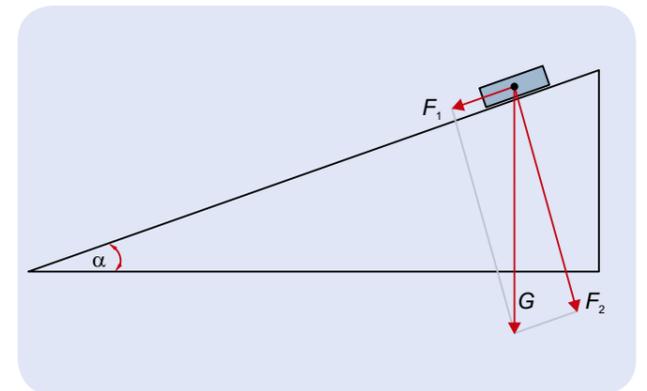
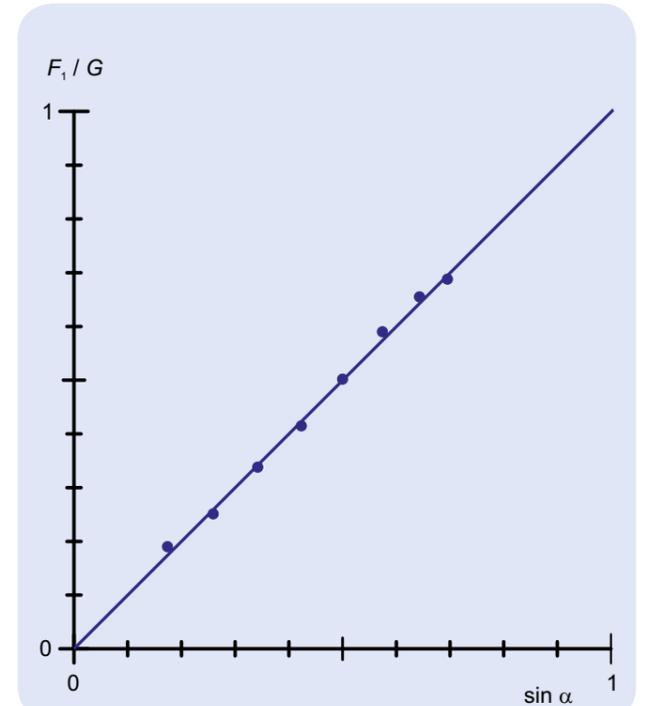
e

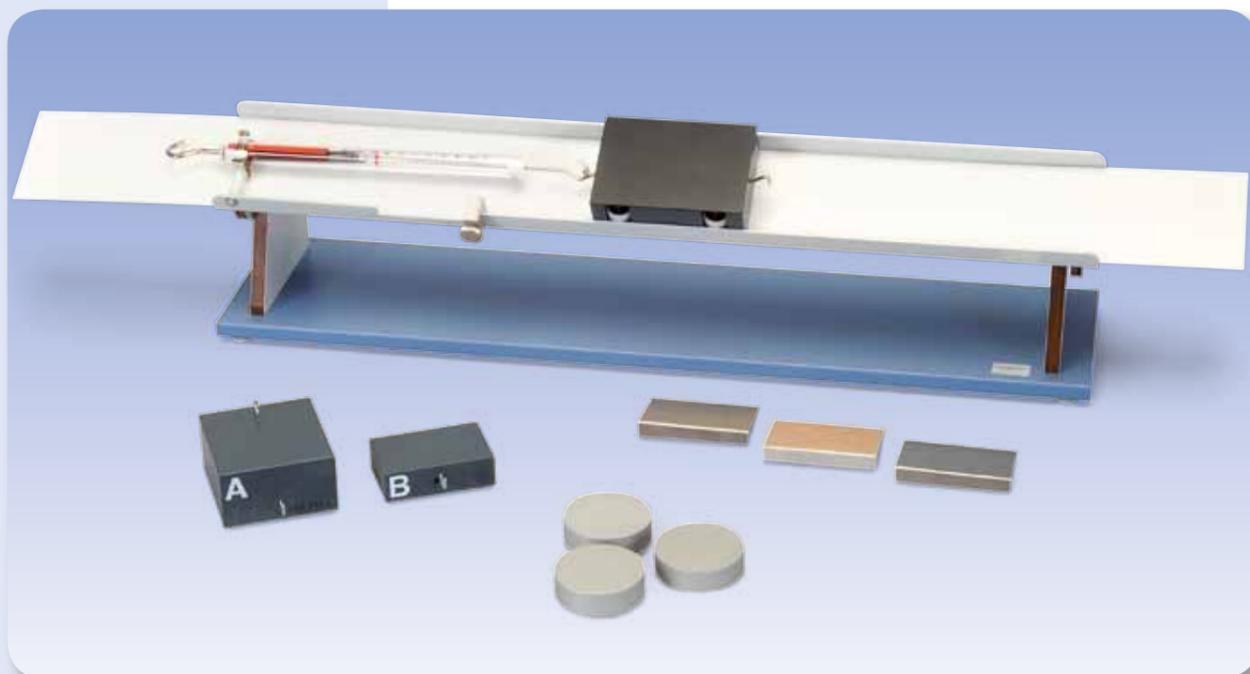
$$(2) \quad F_2 = G \cdot \cos \alpha.$$

La forza resistente è quindi tanto più piccola quanto più piccolo è l'angolo di inclinazione α del piano. Nell'esperimento il corpo è appeso a un filo che viene condotto attraverso una puleggia. La forza resistente viene compensata con delle masse su un piatto appeso all'altro capo del filo. Poiché l'attrito statico esercita una forza di modulo sconosciuto ma tale da opporsi all'inizio del moto, come valore misurato per la forza resistente viene assunto il valore medio tra la forza limite che non fa scivolare il corpo verso il basso e quella che non lo tira verso l'alto. Il peso del corpo viene determinato prima con un dinamometro. Anche il peso del piatto viene conteggiato. L'angolo di inclinazione α viene letto su una scala angolare.

ANALISI

Per l'analisi, le forze resistenti F_1 , determinate per diversi angoli di inclinazione α vengono messe in relazione con il peso G del corpo e inserite in un diagramma rapportate a $\sin \alpha$. I valori di misurazione si trovano su una retta attraverso l'origine, nei limiti della precisione di misurazione.


 Fig. 1: Scomposizione vettoriale del peso G nella forza resistente F_1 e forza normale F_2

 Fig. 2: Rapporto tra la forza resistente F_1 e il peso G come funzione di $\sin \alpha$



FUNZIONI

- Comparazione fra attrito statico e attrito radente.
- Misurazione della forza di attrito radente in funzione della superficie di appoggio.
- Misurazione della forza di attrito radente in funzione della combinazione di materiali.
- Misurazione della forza di attrito radente in funzione della forza di appoggio.

SCOPO

Misurazione delle forze di attrito

RIASSUNTO

Per misurare l'intensità della forza di attrito radente, si utilizza un misuratore di attrito ad indicatore mobile, che viene allontanato a velocità costante sotto il corpo fermo collegato ad un dinamometro. Per variare la forza di appoggio, la rotaia di attrito può essere inclinata con regolazione in continuo lungo l'asse longitudinale.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio di misurazione dell'attrito	1009942

1

BASI GENERALI

Per spostare un corpo fermo su una superficie piana, è necessario superare la forza resistente generata dall'attrito statico del corpo sulla superficie stessa. Qualora lo spostamento del corpo prosegua come moto radente costante, è necessario applicare una forza F_{Dyn} a compensare l'attrito dinamico radente. Tale forza è inferiore rispetto a quella necessaria al superamento dell'attrito statico F_{Stat} , in quanto il contatto superficiale del corpo radente con la base è meno marcato.

Entrambe le forze sono indipendenti dalle dimensioni della superficie di appoggio e sono sostanzialmente determinate dal tipo di materiale e dalla rugosità delle superfici contattate. Esse sono inoltre proporzionali alla forza di appoggio F_N , con la quale il corpo preme sulla base. Si introducono allora il coefficiente di attrito statico μ_{Stat} e il coefficiente di attrito radente μ_{Dyn} e si scrive

$$(1) \quad F_{Stat} = \mu_{Stat} \cdot F_N \quad \text{e} \quad F_{Dyn} = \mu_{Dyn} \cdot F_N$$

Per misurare l'intensità della forza di attrito radente, nell'esperimento si utilizza un misuratore di attrito ad indicatore mobile, che viene allontanato a velocità costante sotto il corpo per attrito fermo collegato ad un dinamometro. Le misurazioni vengono effettuate per diverse combinazioni di materiali e superfici di appoggio. Per variare la forza di appoggio, la rotaia di attrito può essere inclinata con regolazione in continuo lungo l'asse longitudinale.

ANALISI

Inclinando la rotaia di attrito di un angolo α , la forza di appoggio ammonterà, per un corpo di attrito con massa m

$$F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

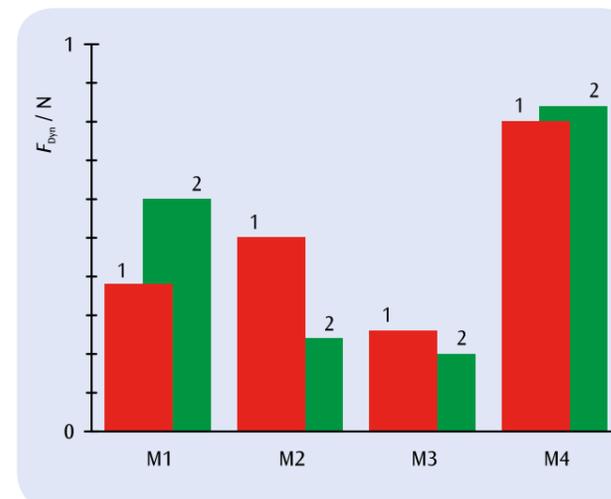


Fig. 1: Forza di attrito radente F_{Dyn} per quattro diversi materiali su base liscia (1) e su base ruvida (2)

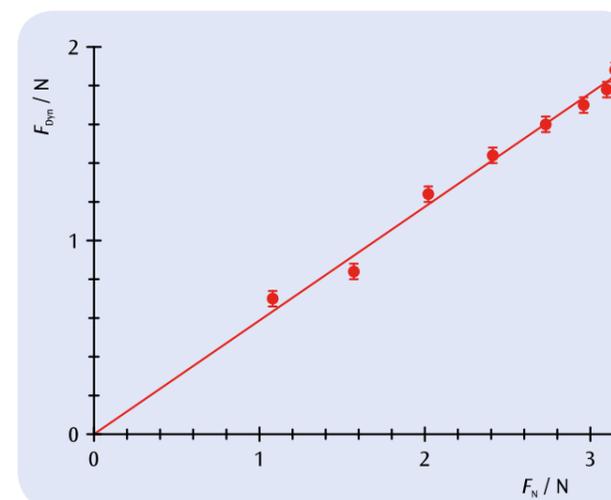


Fig. 2: Forza di attrito radente F_{Dyn} in funzione della forza di appoggio F_N

SCOPO

Determinazione della spinta statica in funzione della profondità di immersione

RIASSUNTO

Secondo il principio di Archimede, un corpo immerso in un liquido è soggetto a una spinta statica F_G la cui intensità corrisponde al peso del liquido spostato. Per un corpo immerso, di forma regolare, l'intensità della forza è proporzionale alla profondità h alla quale il corpo è immerso, finché questa è inferiore all'altezza H del corpo stesso.


FUNZIONI

- Misurazione della forza in un corpo immerso in acqua.
- Determinazione della spinta statica e conferma della proporzionalità tra spinta statica e profondità di immersione.
- Determinazione della densità dell'acqua.

1
APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Corpo da immersione Al 100 cm ³	1002953
1	Dinamometro di precisione 5 N	1003106
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601
1	Set di 10 becher, forma alta	1002873
1	Laborboy II	1002941
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 750 mm	1002935
1	Manicotto con gancio	1002828

BASI GENERALI

Secondo il principio di Archimede, un corpo immerso in un liquido è soggetto a una spinta statica F_G la cui intensità corrisponde al peso del liquido spostato.

Per un corpo da immersione regolare con sezione trasversale A e altezza H , immerso fino alla profondità h , si ha

$$(1) \quad F_G = \rho \cdot g \cdot A \cdot h, \text{ per } h < H$$

e

$$(2) \quad F_G = \rho \cdot g \cdot A \cdot H, \text{ per } h > H$$

Nell'esperimento si usa un parallelepipedo con peso F_0 che esercita una forza

$$(3) \quad F(h) = F_0 - F_G(h)$$

su un dinamometro, mentre è immerso in acqua fino alla profondità h .

ANALISI

I valori di misurazione per la spinta statica come funzione della profondità di immersione relativa h/H si trovano su una retta passante per l'origine con incremento $a = \rho \cdot g \cdot A \cdot H$

Dall'incremento si può quindi calcolare la densità dell'acqua.

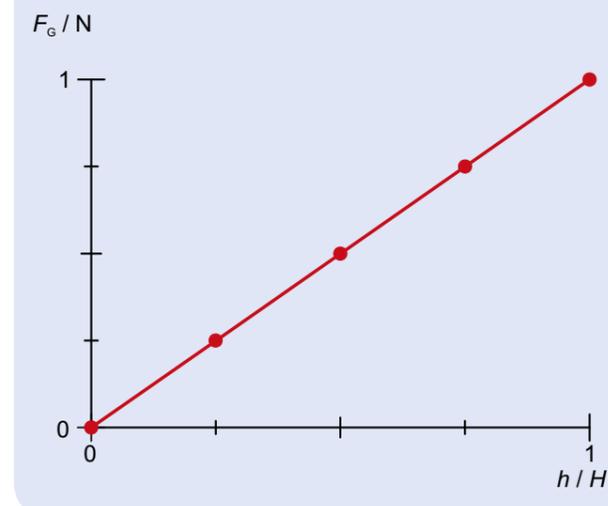


Fig. 1: Spinta statica F_G come funzione della profondità di immersione relativa h/H

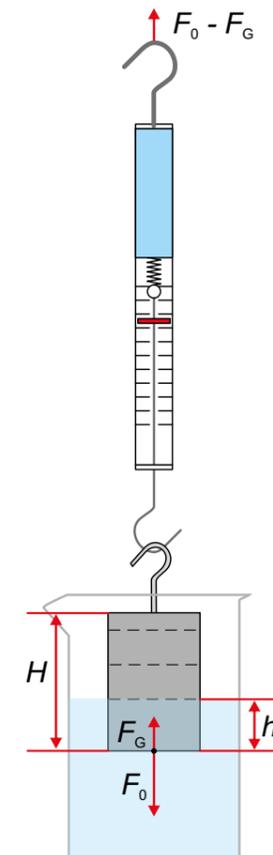
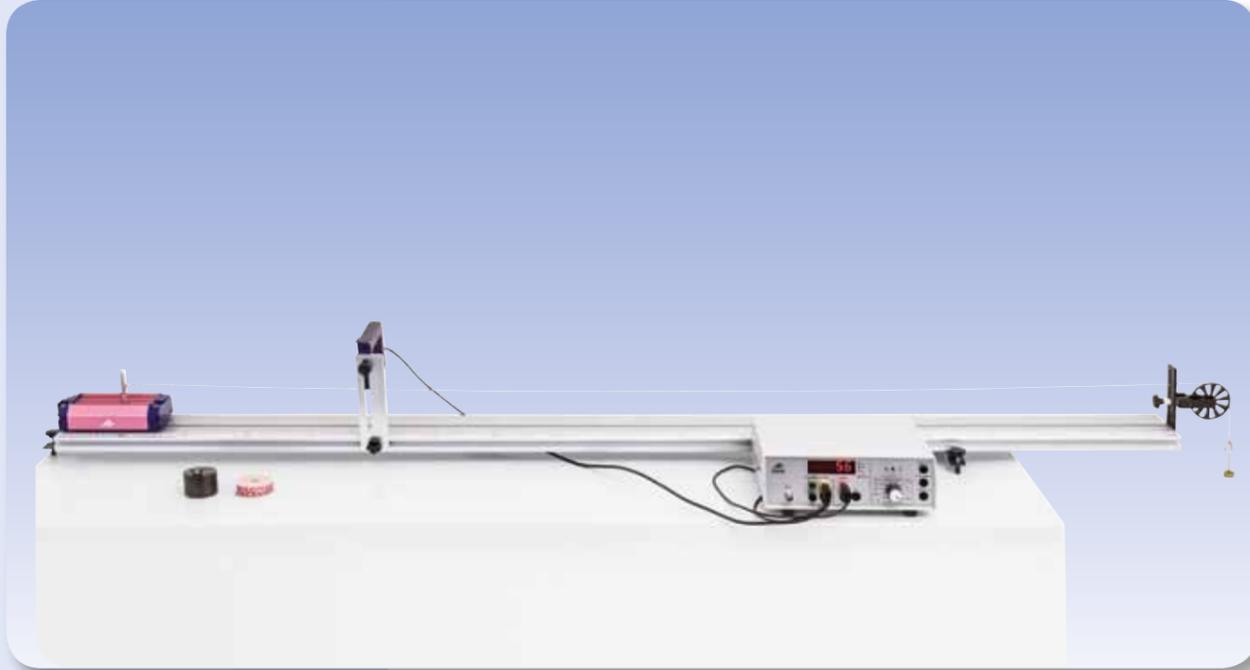


Fig. 2: Rappresentazione schematica





FUNZIONI

- Analisi del moto uniformemente accelerato in funzione della massa che produce l'accelerazione.
- Analisi del moto uniformemente accelerato in funzione della massa accelerata.

SCOPO

Misurazione della velocità istantanea in funzione del tratto percorso

RIASSUNTO

In un moto accelerato uniformemente, la velocità istantanea è tanto maggiore quanto più lungo è il tratto percorso o spostamento. Dal fattore di proporzionalità tra il quadrato della velocità e lo spostamento si calcola l'accelerazione. Nell'esperimento essa viene esaminata utilizzando un carrello sulla rotaia delle pulegge. Per misurare la velocità istantanea, un interruttore di larghezza nota fissato al carrello interrompe un fototraguardo. Il tempo di interruzione viene misurato con un contatore digitale.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Rotaia delle pulegge	1003318
1	Fotocellula	1000563
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032
1	Set pesi a fessura 10 x 10 g	1003227
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002849
1	Corda sperimentale	1001055

1

BASI GENERALI

Con un'accelerazione costante, la velocità istantanea v e lo spostamento s percorso nel tempo t aumentano. Quanto maggiore è il tratto percorso, tanto maggiore sarà la velocità.

Allo scadere del tempo t , la velocità istantanea è pari a

$$(1) \quad v(t) = a \cdot t$$

e lo spostamento è pari a

$$(2) \quad s(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Pertanto si ha

$$(3) \quad v(s) = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$$

e

$$(4) \quad v^2(s) = 2 \cdot a \cdot s$$

Per misurare la velocità istantanea

$$(5) \quad v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

nell'esperimento si utilizza un interruttore, fissato al carrello e di larghezza nota Δs , che ha la funzione di interrompere la barriera di un fototraguardo. Il tempo di interruzione Δt viene misurato con un contatore digitale.

ANALISI

Se si riportano i quadrati delle velocità istantanee determinate dai tempi di interruzione rispetto ai tratti percorsi, a velocità costante ci si aspetta un rapporto lineare secondo l'equazione 4. La pendenza della corrispondente retta passante per l'origine è pari al doppio del valore dell'accelerazione.

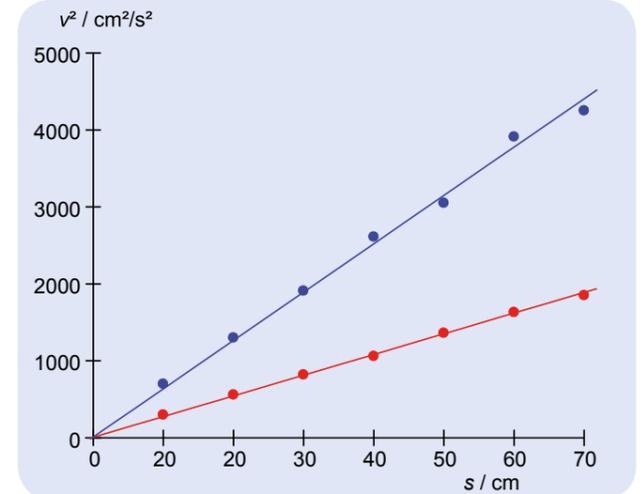


Fig. 2: Diagramma v^2 - s per $m_2 = 500$ g. $m_1 = 10$ g (rosso), 20 g (blu)

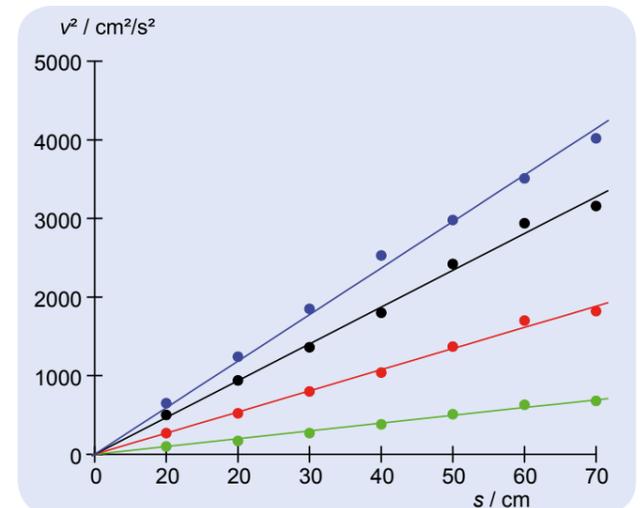


Fig. 3: Diagramma v^2 - s per $m_2 = 1000$ g. $m_1 = 10$ g (verde), 20 g (rosso), 30 g (nero), 40 g (blu)



Fig. 1: Rappresentazione schematica



FUNZIONI

- Registrazione dello spostamento in funzione del tempo.
- Determinazione della velocità istantanea in funzione del tempo.
- Determinazione dell'accelerazione istantanea in funzione del tempo.
- Determinazione dell'accelerazione media come parametro di adattamento e confronto con il quoziente ricavato dalla forza e dalla massa.

SCOPO

Registrazione e valutazione di movimenti moti uniformemente accelerati sulla rotaia delle pulegge

RIASSUNTO

In un moto uniformemente accelerato, la velocità istantanea è lineare rispetto al tempo e lo spostamento ha un rapporto quadratico rispetto ad esso. Queste dipendenze sono analizzate nell'esperimento sui moti sulla rotaia delle pulegge, che vengono registrati con una combinazione di una puleggia Super Pulley e di una fotocellula.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Rotaia delle pulegge	1003318
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544
1	Fotocellula	1000563
1	Filo, 100 m	1007112
1	Set pesi a fessura 10 x 10 g	1003227

1

BASI GENERALI

La velocità istantanea v e l'accelerazione istantanea a di un punto materiale sono definiti come rispettivamente la derivata prima e la derivata seconda dello spostamento s rispetto al tempo t . Queste definizioni possono essere riprodotte in modo sperimentale considerando invece delle derivate i relativi rapporti incrementali, e misurando i tempi t_n relativi ai punti del percorso s_n considerando piccoli incrementi dello spostamento. Vengono così creati i presupposti, per esempio, per analizzare a livello sperimentale l'andamento cronologico del moto uniformemente accelerato.

Con un'accelerazione costante a la velocità istantanea v aumenta in modo proporzionale al tempo t ; assumendo il punto materiale inizialmente fermo:

$$(1) \quad v = a \cdot t$$

Lo spostamento s aumenta in modo proporzionale al quadrato del tempo:

$$(2) \quad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

La causa di un'accelerazione costante è una forza costante F , se anche la massa accelerata m non varia:

$$(3) \quad a = \frac{F}{m}$$

Queste dipendenze sono esaminate nell'esperimento con un carrello sulla rotaia delle pulegge. Il carrello è soggetto ad un'accelerazione costante, perché tirato da un filo con forza costante. Questa forza è il peso di una massa appesa, vedere Fig. 1. La puleggia per il filo è predisposta come Super Pulley, ovvero con i suoi raggi interrompe la fotocellula. Un'interfaccia di misura collegata individua gli istanti t_n dell'interruzione e invia i dati ad un computer per la valutazione. Il software di valutazione calcola lo spostamento valutato in un determinato momento t_n e i relativi valori per la velocità istantanea e l'accelerazione istantanea

$$(4a) \quad s_n = n \cdot \Delta$$

$$(4b) \quad v_n = \frac{\Delta}{t_{n+1} - t_{n-1}}$$

$$(4c) \quad a_n = \frac{\frac{\Delta}{t_{n+1} - t_n} - \frac{\Delta}{t_n - t_{n-1}}}{\frac{t_{n+1} - t_{n-1}}{2}}$$

$\Delta = 20$ mm: Distanza raggi

Le misurazioni vengono eseguite per diverse combinazioni di forza di accelerazione F e di massa accelerata m .

ANALISI

Con il software di valutazione vengono rappresentate le tre grandezze s , v e a come funzione del tempo t . La validità delle equazioni (1) e (2) è verificata tramite l'adattamento delle funzioni corrispondenti in cui l'accelerazione a è accettata come parametro.

Si m_1 è la massa del carrello e m_2 la massa appesa al filo, poiché anche la massa m_2 viene accelerata, nell'equazione si avrà (3):

$$F = m_2 \cdot g \quad m = m_1 + m_2$$

Di conseguenza:

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot g$$

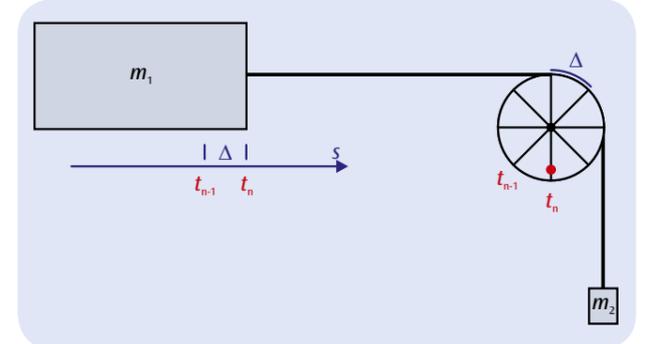


Fig. 1: Rappresentazione schematica del principio di misura

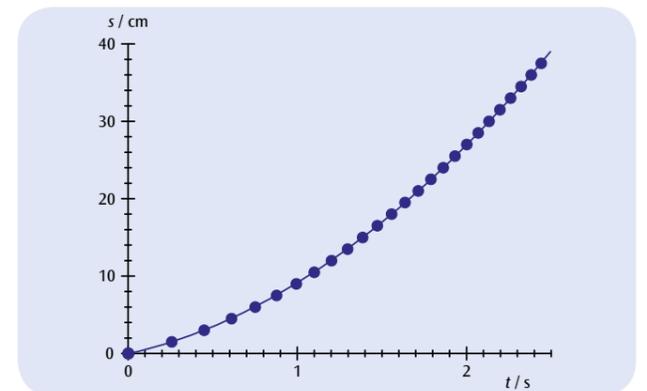


Fig. 2: Spostamento in funzione del tempo

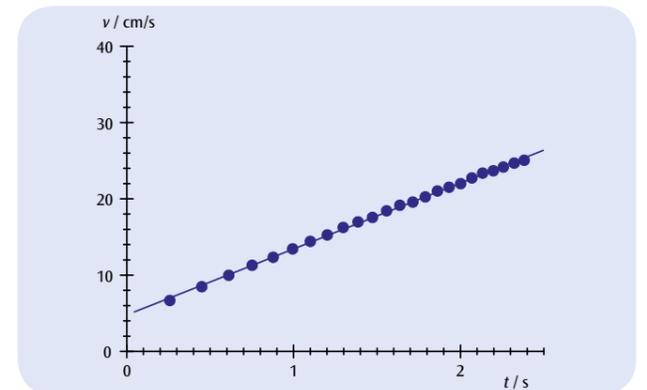


Fig. 3: Velocità in funzione del tempo

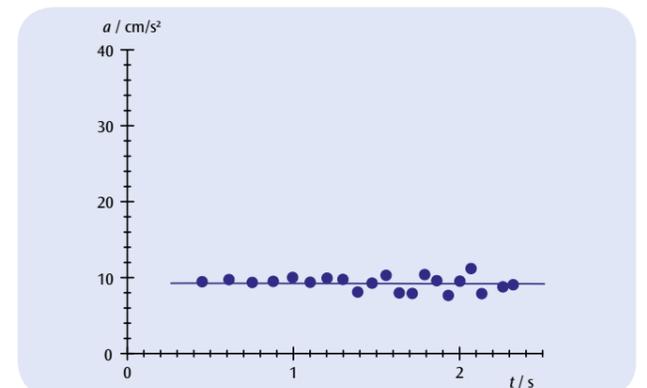
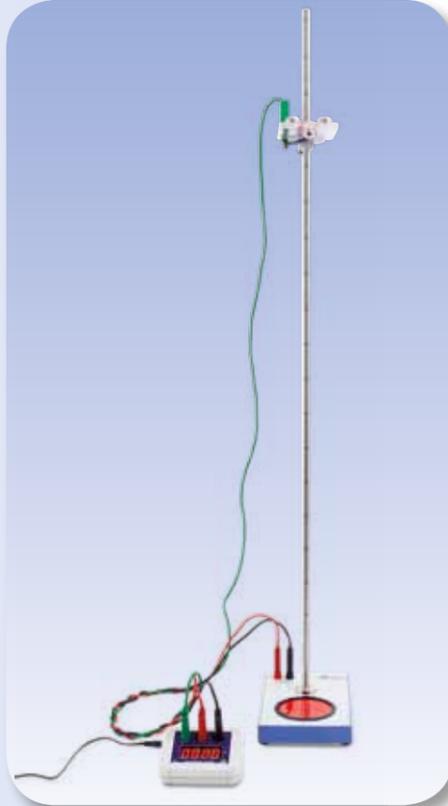


Fig. 4: Accelerazione in funzione del tempo



FUNZIONI

- Misurazione del tempo di caduta t di una sfera a seconda della distanza h tra dispositivo di sgancio e piatto di raccolta.
- Registrazione punto per punto del diagramma percorso-tempo di un movimento accelerato in maniera uniforme.
- Conferma della proporzionalità tra percorso di caduta e quadrato del tempo di caduta.
- Determinazione dell'accelerazione di caduta g .

SCOPO

Determinazione dell'accelerazione di caduta

RIASSUNTO

Durante la caduta libera, il percorso di caduta h è proporzionale al quadrato del tempo di caduta t . Sulla base del fattore di proporzionalità è possibile calcolare l'accelerazione di caduta g .

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per esperimenti di caduta libera	1000738
1	Contamillisecondi (115 V, 50/60 Hz)	1012833 o
	Contamillisecondi (230 V, 50/60 Hz)	1012832
1	Set di 3 cavi di sicurezza per esperimenti	1002848

1

BASI GENERALI

Se un corpo cade sul pavimento nel campo gravitazionale della terra da un'altezza h , è soggetto ad un'accelerazione costante g , nella misura in cui la velocità di caduta è ridotta e l'attrito è quindi trascurabile. Questo movimento di caduta viene chiamato caduta libera.

Nell'esperimento, una sfera di acciaio viene agganciata ad un dispositivo di sgancio. Durante lo sgancio viene contemporaneamente avviata anche la misurazione elettronica del tempo. Dopo aver coperto un percorso di caduta h , la sfera cade su un dispositivo di raccolta e arresta la misurazione del tempo di caduta t .

Poiché la sfera al momento $t_0 = 0$ inizia alla velocità $v_0 = 0$, il percorso coperto nel tempo t ammonta a

$$(1) \quad h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

ANALISI

Variante 1:

I tempi di caduta si trovano in un rapporto di 2 : 1, se i percorsi di caduta si trovano in un rapporto di 4 : 1. Il percorso di caduta è quindi proporzionale al quadrato del tempo di caduta.

Variante 2:

I risultati di misurazione per diversi percorsi di caduta vengono indicati come coppie di valori in un diagramma percorso-tempo. Il percorso di caduta coperto h non è una funzione lineare del tempo t , come conferma il confronto tra l'adeguamento di una linea retta e una parabola ai valori di misurazione. Per la linearizzazione, il percorso di caduta viene indicato come funzione del quadrato del tempo di caduta. La corrispondenza delle passanti per l'origine adattate ai valori di misurazione conferma (1). Dalla pendenza è possibile calcolare l'accelerazione di caduta.

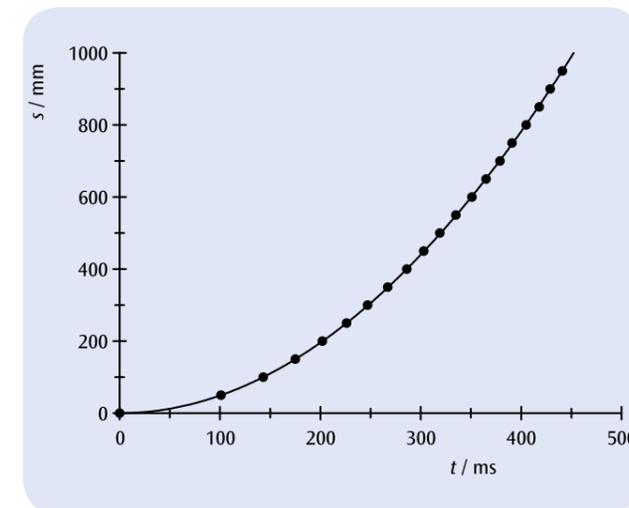


Fig. 1: Diagramma percorso-tempo della caduta libera

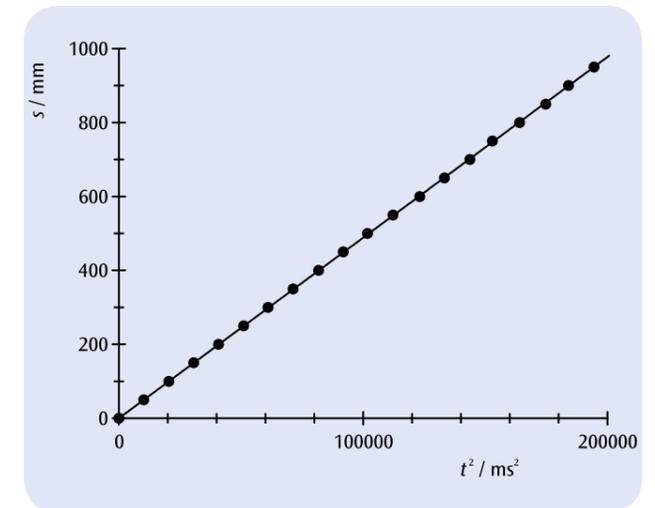
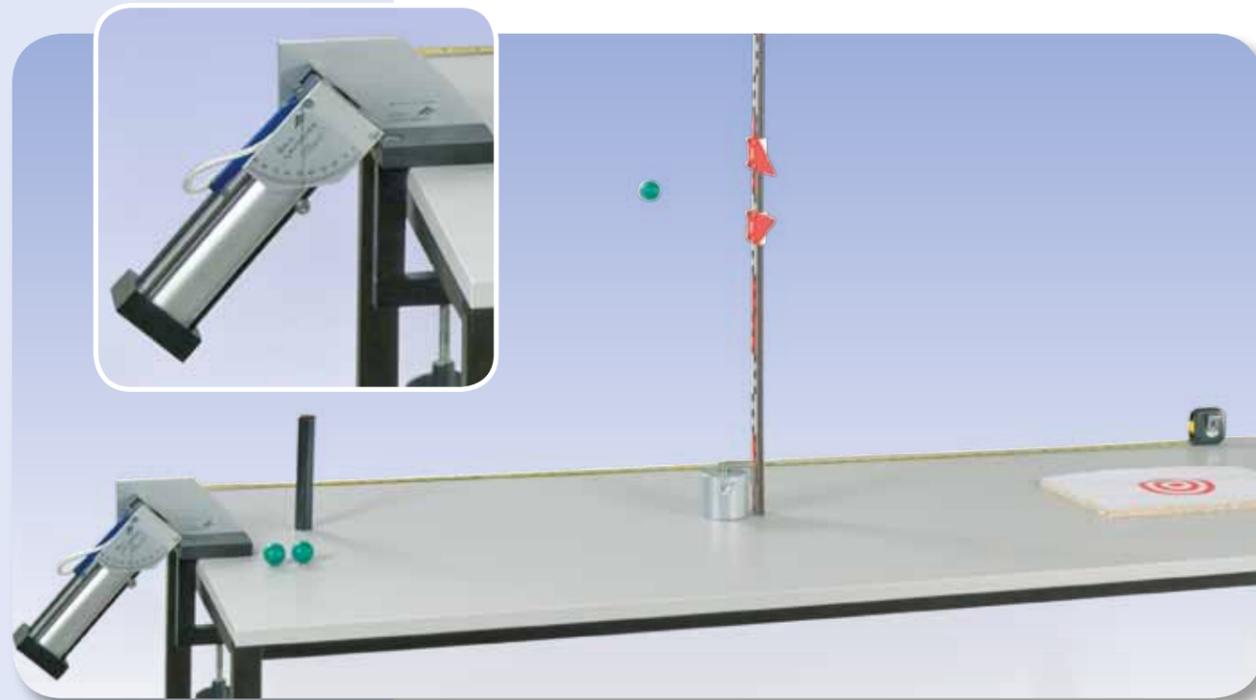


Fig. 2: Percorso di caduta come funzione del quadrato del tempo di caduta



FUNZIONI

- Determinazione della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di lancio.
- Calcolo della velocità di lancio sulla base della gittata massima.
- Registrazione punto per punto delle "parabole di lancio" in funzione dell'angolo e della velocità di lancio.
- Conferma del principio di sovrapposizione.

SCOPO

Registrazione punto per punto delle parabole di lancio

RIASSUNTO

Il movimento di una sfera lanciata nel campo gravitazionale con un'angolazione rispetto al piano orizzontale segue una curva di volo parabolica, la cui altezza e ampiezza dipendono dall'angolo e dalla velocità di lancio. La curva viene misurata punto per punto con l'impiego di una scala per altezza con due indicatori.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio di lancio	1002654
1	Supporto per apparecchio di lancio	1002655
1	Scala per altezza, 1 m	1000743
1	Set indicatori per scale	1006494
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603

1

BASI GENERALI

Il movimento di una sfera lanciata nel campo gravitazionale con un'angolazione rispetto al piano orizzontale è composto, secondo il principio di sovrapposizione, da un movimento a velocità costante nella direzione del lancio e da un movimento di caduta. Ne risulta una curva di volo parabolica, la cui altezza e ampiezza dipendono dall'angolo di lancio α e dalla velocità di lancio v_0 .

Ai fini del calcolo della curva di volo, per semplificare le cose si posiziona l'origine del sistema di coordinate al centro della sfera nel momento iniziale e si trascura l'attrito dell'aria sulla sfera. Quindi in direzione orizzontale la sfera mantiene la propria velocità iniziale

$$(1) \quad v_x(0) = v_0 \cdot \cos \alpha$$

e pertanto raggiunge, nel momento t , la distanza orizzontale

$$(2) \quad x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$$

In direzione verticale la sfera, sotto l'influsso del campo gravitazionale, è soggetta all'accelerazione di caduta g . All'istante t la sua velocità è pertanto

$$(3) \quad v_y(t) = v_0 \cdot \sin \alpha - g \cdot t$$

e la distanza verticale.

$$(4) \quad y(t) = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

La curva di volo della sfera ha forma parabolica in quanto soddisfa l'equazione:

$$(5) \quad y(x) = \tan \alpha \cdot x - \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x^2$$

All'istante

$$(6) \quad t_1 = \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

la sfera raggiunge il punto più elevato della parabola e all'istante

$$(7) \quad t_2 = 2 \cdot \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

ritorna nuovamente alla quota di partenza 0. L'altezza della parabola è quindi

$$(8) \quad h = y(t_1) = \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \cdot \sin^2 \alpha$$

e l'ampiezza

$$(9) \quad s = x(t_2) = 2 \cdot \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

Nell'esperimento si misurano punto per punto le curve di volo di una sfera di legno in funzione dell'angolo e della velocità di lancio con l'impiego di una scala per altezza con due indicatori.

ANALISI

In corrispondenza dell'angolo di lancio $\alpha = 45^\circ$ viene raggiunta l'ampiezza s_{\max} di tutte le curve di volo. Da essa è possibile calcolare la velocità di lancio. Grazie all'equazione 9, vale

$$v_0 = \sqrt{g \cdot s_{\max}}$$

Un'analisi accurata dei dati misurati indica che anche l'attrito dell'aria deve essere preso in considerazione e che le parabole si scostano leggermente dalla forma parabolica.

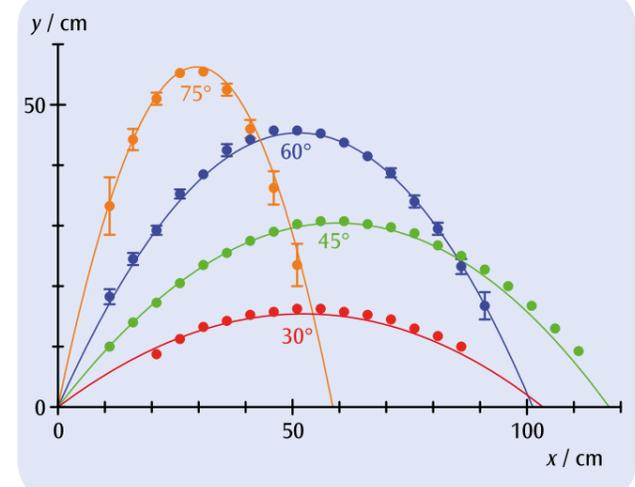


Fig. 1: Parabole di lancio misurate e calcolate tenendo conto dell'attrito dell'aria a velocità di lancio minima e a diversi angoli di lancio


SCOPO

Analisi di urti elastici ed anelastici di due corpi su un piano

RIASSUNTO

Al momento della collisione tra due corpi, essi sono soggetti alla conservazione dell'energia e dell'impulso. Con l'ausilio di queste grandezze conservate è possibile descrivere il moto dei corpi dopo l'urto. Nel caso bidimensionale, le velocità e gli impulsi dei corpi collidenti devono essere descritti in modo vettoriale. Il passaggio al sistema del centro di massa consente una descrizione particolarmente semplice. Nell'esperimento vengono portati in collisione due dischi di massa su una tavola a cuscino d'aria e le velocità vengono registrate con l'ausilio di un generatore di scintille.

FUNZIONI

- Determinazione delle velocità prima e dopo un urto.
- Conferma della conservazione dell'impulso con urti elastici e anelastici.
- Conferma della conservazione dell'energia con urti elastici e anelastici.
- Analisi del moto del centro di massa del sistema.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tavola a cuscino d'aria (230 V, 50/60 Hz)	1013210 o
	Tavola a cuscino d'aria (115 V, 50/60 Hz)	1012569
1	Coppia di dischi magnetici	1003364
Ulteriormente consigliato:		
1	Bilancia da laboratorio 610	1003419
1	Regolo, 50 cm	
1	Goniometro	

BASI GENERALI

Un urto descrive una breve interazione reciproca di due corpi. A questo proposito, si suppone che l'interazione reciproca avvenga solo in un intervallo di tempo breve e definito all'esterno del quale i corpi non interagiscono. In assenza di ulteriori forze, prima e dopo l'urto entrambi i corpi si muovono con velocità costante. Poiché sotto tali ipotesi il sistema composto dai due corpi è chiuso, il processo è soggetto alla conservazione dell'impulso e dell'energia.

Indichiamo le velocità dei corpi 1 e 2 prima dell'urto con i vettori v_1 e v_2 ; dopo l'urto con v'_1 o v'_2 . Gli impulsi corrispondenti con p_i e p'_i ($i = 1, 2$). Le masse sono costanti nel tempo e vengono indicate con m_1 e m_2 .

In virtù della conservazione dell'impulso, vale

$$(1) \quad m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2$$

Inoltre, in caso di urti elastici, si conserva tutta l'energia cinetica del sistema.

$$(2) \quad \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v'^2_1 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v'^2_2$$

Sia il corpo 2 in stato di riposo prima dell'urto. Senza perdere in generalità si può scegliere un sistema di riferimento tale che il corpo 1 si muova lungo l'asse x ($v_{1y} = 0$).

Inizialmente consideriamo un urto centrale con $d = 0$, vedere fig. 1. In questo caso i corpi si muovono lungo l'asse x e per le velocità dopo l'urto vale

$$(3) \quad v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

e

$$(4) \quad v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

Con masse identiche $m_1 = m_2$ risulta

$$(5) \quad v'_1 = 0$$

e

$$(6) \quad v'_2 = v_1$$

Con urti non centrali, in caso di masse identiche si dimostra che i corpi divergono con un angolo di 90° .

$$(7) \quad \theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$

Inoltre, consegue da (1) con $v_{1y} = 0$ e $m_1 = m_2$

$$(8) \quad v'_{1y} = -v'_{2y}$$

Il vettore di posizione del centro di massa è

$$(9) \quad r_s = \frac{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2}{m_1 + m_2}$$

Poiché l'impulso totale si conserva, la velocità del centro di massa è

$$(10) \quad v_s = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

costante. L'impulso totale corrisponde all'impulso di una massa $m_s = m_1 + m_2$ che procede con la velocità del centro di massa.

Il sistema del centro di massa è spesso conveniente per lo studio di un urto. In questo sistema, prima dell'urto, entrambe le masse si muovono l'una verso l'altra perché l'impulso totale è zero. Dopo un urto elastico si allontanano, perché l'impulso totale rimane zero, mentre dopo un urto perfettamente anelastico si determina un moto di rotazione intorno al centro di massa dei due corpi, ora solidali. In questo caso si conserva l'energia cinetica del sistema.

Nell'esperimento si fanno collidere due dischi massivi su una tavola a cuscino d'aria e il loro moto viene registrato con l'ausilio di un generatore di scintille.

ANALISI

Un'analisi dell'energia cinetica rivela perdite riconducibili alla produzione di un'onda sonora e a minime deformazioni che intervengono durante l'urto, a una rotazione sul proprio asse dei dischi che non viene qui presa in considerazione e al movimento dei tubi flessibili di alimentazione dell'aria.

Il modulo della velocità si calcola da

$$v = \Delta \cdot f.$$

Δ Distanza tra due punti,

f : Frequenza del generatore di scintille

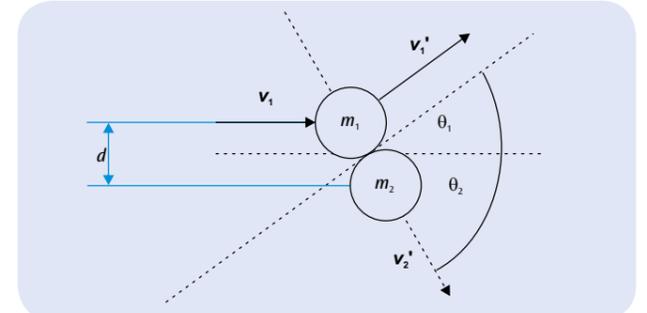


Fig. 1: Rappresentazione schematica dell'urto non centrale di due masse

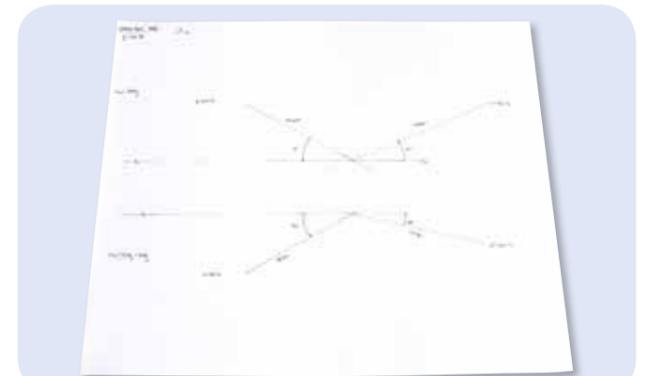
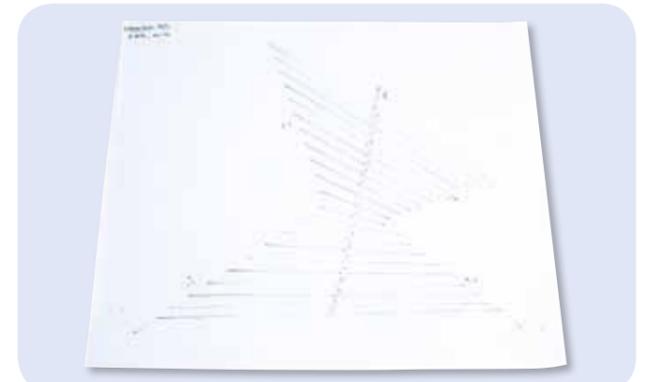

 Fig. 2: Registrazione e analisi di un urto non centrale di due masse differenti con velocità iniziali $v_1 \neq 0$ e $v_2 \neq 0$


Fig. 3: Posizione del Posizione del centro di massa S

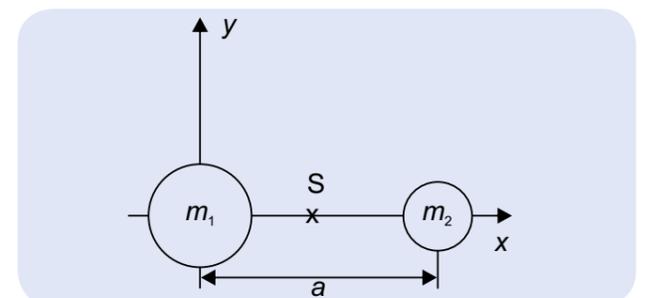


Fig. 4: Movimento del baricentro S prima e dopo l'urto


SCOPO

Conferma della legge delle aree uguali per i moti originati da forze centrali (seconda legge di Keplero)

RIASSUNTO

Come esempio di moto originato da forze centrali viene registrato il moto ellittico del corpo di un pendolo con il metodo delle impronte nella polvere. In base a esso si produce una traccia con segni in corrispondenza di momenti precisi, dalla cui distanza spaziale è possibile calcolare direttamente la velocità del corpo del pendolo. Inoltre, una semplice analisi grafica indica che la superficie descritta dal raggio vettore del corpo del pendolo per ogni intervallo di tempo è costante e pertanto indipendente dalla lunghezza del raggio vettore.

FUNZIONI

- Registrazione dell'oscillazione ellittica di un pendolo con il metodo delle impronte nella polvere.
- Confronto delle velocità del corpo del pendolo in corrispondenza della distanza minima e massima dalla posizione di riposo.
- Determinazione della superficie descritta dal raggio vettore del corpo del pendolo per ogni intervallo di tempo in corrispondenza della distanza minima e massima dalla posizione di riposo.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Kit per la registrazione mediante tracce di polvere	1000739
1	Pendolo con elettrodo di scrittura	1000780
2	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
2	Asta di supporto, 1000 mm	1002936
1	Asta di supporto, 750 mm	1002935
3	Manicotto universale	1002830

1
BASI GENERALI

Nel moto di un pianeta attorno al Sole l'impulso di rotazione resta costante in quanto la forza che agisce sul pianeta è sempre diretta verso il centro del moto. Da ciò è possibile dedurre direttamente che l'orbita planetaria deve trovarsi su un piano fisso. Da ciò deriva inoltre la seconda legge di Keplero, nota anche come legge delle aree uguali, in base alla quale il raggio di congiunzione tra il sole e il pianeta descrive aree uguali in intervalli di tempo uguali.

Ai fini della validità della legge delle aree uguali, la precisa dipendenza della forza centrale dalla distanza dal centro della forza non ha alcun ruolo. Essa definisce unicamente la forma della traiettoria attorno al centro di forza. Pertanto la legge delle aree uguali vale anche per le oscillazioni ellittiche di un pendolo attorno alla posizione di riposo, finché l'angolo di spostamento non è troppo grande. Il corpo del pendolo si muove quasi su un piano orizzontale (vedi fig. 1) e su ogni punto dell'orbita r agisce una forza di richiamo

$$(1) \quad F = -\frac{m \cdot g}{d} \cdot r$$

g : Accelerazione di caduta,
 d : Lunghezza del pendolo,
 m : Massa del corpo del pendolo

diretta verso la posizione di riposo del pendolo. Questa forza lascia inalterato il momento angolare

$$(2) \quad L = m \cdot r(t) \times \frac{\Delta r(t)}{\Delta t}$$

del corpo del pendolo. Pertanto anche la superficie descritta dal raggio vettore $r(t)$ per intervallo di tempo Δt

$$(3) \quad \Delta A = \frac{1}{2} |r(t) \times \Delta r(t)| = \frac{1}{2} \cdot r(t) \cdot \Delta r(t) \cdot \sin \alpha$$

è costante (vedi fig. 2).

Nell'esperimento, il moto del corpo del pendolo viene registrato secondo il metodo delle impronte nella polvere. A tale scopo, l'elettrodo di scrittura del corpo del pendolo scivola su una piastra isolata ricoperta di polvere di zolfo fine. Una tensione alla frequenza della tensione alternata di rete tra l'elettrodo di scrittura e la piastra provoca, a seconda della polarità, l'attrazione o la repulsione elettrostatica della polvere di zolfo. Si registra così una traccia con i segni prodotti nei vari momenti, dalla cui distanza spaziale è possibile calcolare direttamente la velocità del corpo del pendolo.

ANALISI

Per prima cosa si determina graficamente il centro della traccia registrata e le posizioni della traiettoria in corrispondenza delle quali la distanza dal centro è massima o minima.

Per queste posizioni della traiettoria viene definita l'area descritta dal raggio vettore in 10 periodi oscillatori della tensione alternata, e tale area, per semplificare le cose, viene calcolata come quella di un triangolo.

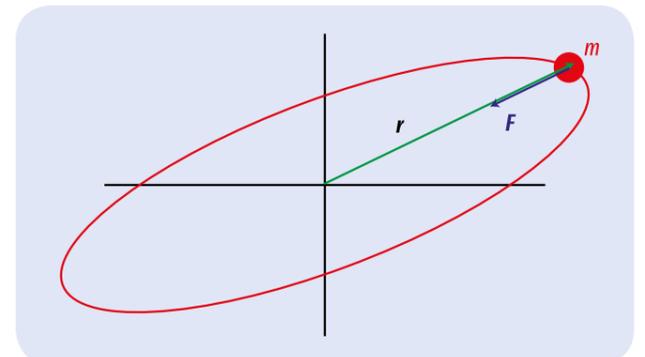


Fig. 1: Oscillazione ellittica del corpo del pendolo osservata dall'alto

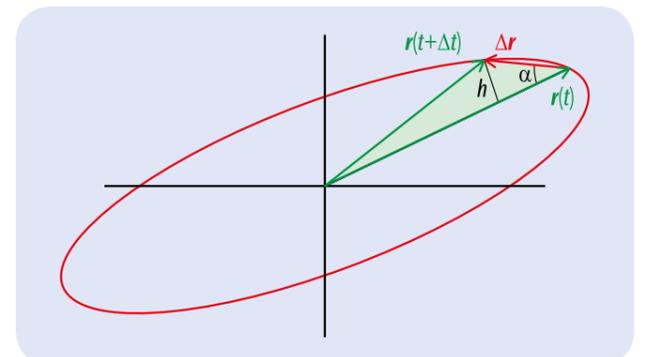
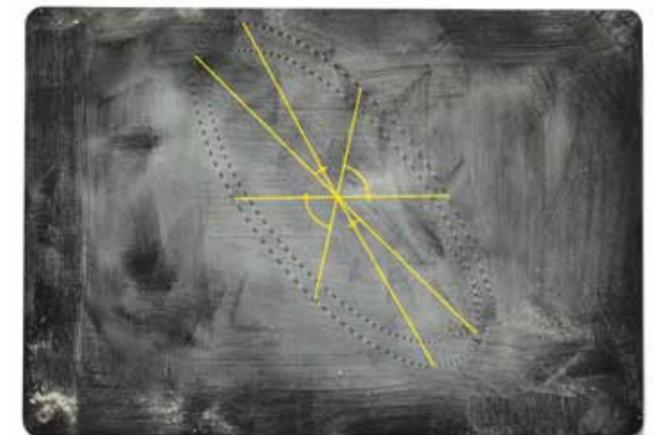

 Fig. 2: Superficie descritta dal raggio vettore del corpo del pendolo nell'intervallo di tempo Δt


Fig. 3: Esempio di misurazione con valutazione



FUNZIONI

- Registrazione punto per punto del diagramma angolo di rotazione-tempo di un moto di rotazione uniformemente accelerato.
- Conferma della proporzionalità tra angolo di rotazione e quadrato del tempo.
- Determinazione dell'accelerazione angolare di funzione del momento torcente in accelerazione e conferma dell'equazione del moto di Newton.
- Determinazione dell'accelerazione angolare in funzione del momento d'inerzia e conferma dell'equazione del moto di Newton.

SCOPO

Conferma dell'equazione del moto di Newton

RIASSUNTO

L'angolo di rotazione φ di un corpo rigido che ruota in modo uniformemente accelerato intorno ad un asse fisso aumenta in modo proporzionale al quadrato del tempo t . Sulla base del fattore di proporzionalità è possibile calcolare l'accelerazione angolare α che, a sua volta, secondo l'equazione del moto di Newton, dipende dal momento torcente di accelerazione e dal momento d'inerzia del corpo rigido.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Sistema rotante a sostentamento pneumatico (230 V, 50/60Hz)	1000782 o
	Sistema rotante a sostentamento pneumatico (115 V, 50/60Hz)	1000781
1	Sensore laser in reflex	1001034
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032

BASI GENERALI

La rotazione di un corpo rigido intorno ad un asse fisso può essere descritta in modo analogo ai moti traslatori unidimensionali. Si sostituisce il percorso s con l'angolo di rotazione φ , la velocità v con la velocità angolare ω , l'accelerazione a con l'accelerazione angolare α , la forza di accelerazione F con il momento torcente M che agisce sul corpo rigido, e la massa inerziale m con il momento d'inerzia J del corpo rigido intorno all'asse di rotazione.

1

In analogia con l'equazione del moto di Newton per i movimenti di traslazione vale: un corpo rigido girevole e con momento d'inerzia J è sottoposto ad un'accelerazione angolare α , sotto l'effetto del momento torcente

$$(1) \quad M = J \cdot \alpha$$

Se il momento torcente è costante, allora il corpo compie un moto rotatorio con accelerazione angolare uniforme.

Nell'esperimento, ciò viene verificato con un sistema rotante a sostentamento pneumatico e quindi con un attrito molto ridotto.

Si avvia nel momento $t_0 = 0$ con velocità angolare $= 0$ e ruota nel tempo t intorno all'angolo

$$(2) \quad \varphi = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t^2$$

Il momento torcente M si ottiene dalla forza peso di una massa in accelerazione m_M , che agisce sul corpo con distanza r_M rispetto all'asse di rotazione.

$$(3) \quad M = r_M \cdot m_M \cdot g$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2} : \text{Accelerazione di caduta}$$

Se sull'asta del sistema rotante si dispongono altre due masse m_j a distanza fissa r_j rispetto all'asse di rotazione, il momento d'inerzia aumenta secondo

$$(4) \quad J = J_0 + 2 \cdot m_j \cdot r_j^2$$

J_0 : Momento d'inerzia senza masse supplementari

Sia per l'accelerazione che per l'aumento dell'inerzia sono disponibili ogni volta più pesi. E' inoltre possibile variare le distanze r_M e r_j . In questo modo si può esaminare l'accelerazione angolare a conferma di (1) in funzione del momento d'inerzia e del momento torcente.

ANALISI

La proporzionalità dell'angolo di rotazione rispetto al quadrato del tempo è dimostrata dalla misurazione dei tempi rispetto agli angoli di rotazione $10^\circ, 40^\circ, 90^\circ, 160^\circ$ e 250° .

Per la misurazione dell'accelerazione angolare α in funzione dei parametri M e J viene misurato ogni volta il tempo t (90°) necessario ad una rotazione di 90° . In questo caso vale

$$\alpha = \frac{\pi}{t(90^\circ)^2}$$

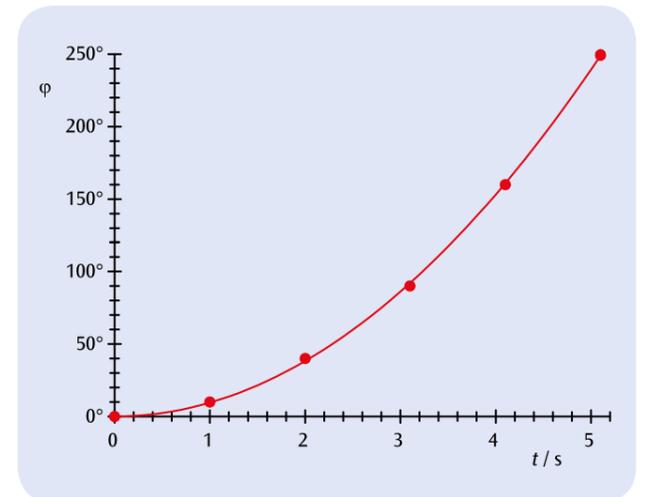


Fig. 1: Diagramma angolo di rotazione-tempo di un moto rotatorio uniformemente accelerato

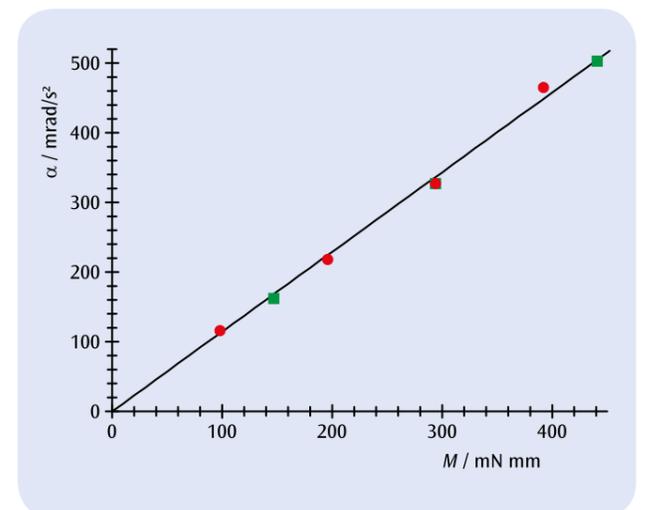


Fig. 2: Accelerazione angolare in funzione del momento torcente M

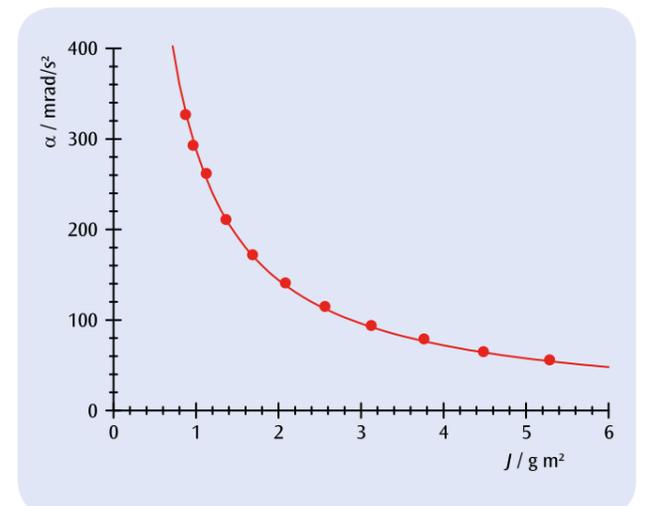


Fig. 3: Accelerazione angolare α in funzione del momento d'inerzia J



FUNZIONI

- Determinazione della costante di collegamento angolare D_r della molla di accoppiamento.
- Determinazione del momento d'inerzia J in funzione della distanza r dei pesi rispetto all'asse di rotazione.
- Determinazione del momento d'inerzia J in funzione della massa m dei pesi.

SCOPO

Determinazione del momento d'inerzia di un'asta del manubrio con masse supplementari

RIASSUNTO

Il momento d'inerzia di un corpo intorno al suo asse di rotazione dipende dalla distribuzione del peso all'interno del corpo rispetto all'asse. Questo è quanto viene esaminato su un'asta sulla quale sono disposti due pesi, simmetricamente rispetto all'asse di rotazione. Il periodo di oscillazione dell'asta collegata con una molla di accoppiamento è tanto maggiore quanto maggiore è il momento d'inerzia dell'asta del manubrio determinato dalle masse supplementari e dalla distanza tra loro.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Sistema rotante a sostentamento pneumatico (230 V, 50/60Hz)	1000782 o
	Sistema rotante a sostentamento pneumatico (115 V, 50/60Hz)	1000781
1	Set supplementare per sistema rotante a sostentamento pneumatico	1000783
1	Sensore laser in reflex	1001034
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032

1

BASI GENERALI

L'inerzia di un corpo rigido rispetto ad una variazione del suo moto di rotazione intorno ad un asse fisso è indicata dal momento d'inerzia J . Esso dipende dalla distribuzione del peso nel corpo rispetto all'asse di rotazione ed è tanto maggiore quanto maggiori sono le distanze rispetto all'asse di rotazione.

Questo viene esaminato nell'esperimento con l'esempio di un disco rotante con asta sulla quale sono disposti simmetricamente due pesi con massa m ad una distanza r rispetto all'asse di rotazione m . Il momento d'inerzia in questo caso è

$$(1) \quad J = J_0 + 2 \cdot m \cdot r^2$$

J_0 : Momento d'inerzia senza pesi

Se il disco rotante viene accoppiato elasticamente ad uno stativo mediante una molla elicoidale, il momento d'inerzia può essere determinato dal periodo di oscillazione del disco rotante intorno alla sua posizione di riposo. Vale

$$(2) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D_r}}$$

D_r : Costante di collegamento angolare della molla elicoidale

Ossia il periodo di oscillazione T è tanto maggiore quanto maggiore è il momento d'inerzia J del disco rotante con asta del manubrio, determinato dal peso m e dalla distanza r .

ANALISI

Da (2) si ottiene l'equazione condizionale per il momento d'inerzia:

$$J = D_r \cdot \frac{T^2}{4\pi^2}$$

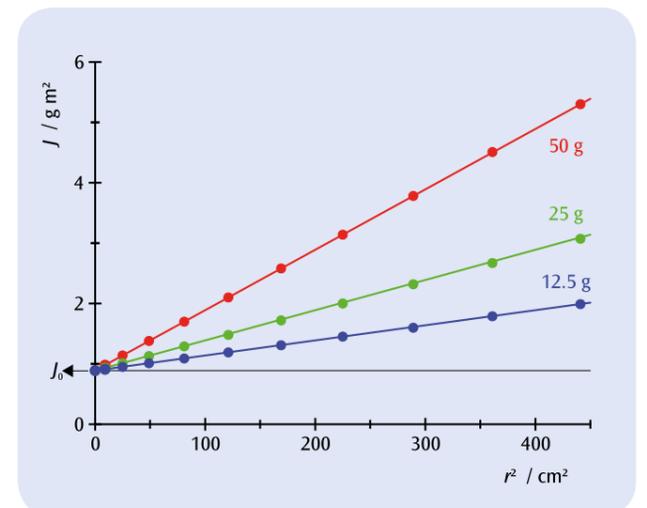


Fig. 1: Momento d'inerzia J del disco rotante con asta del manubrio per tre diverse masse supplementari m in base al quadrato della distanza r rispetto all'asse di rotazione



FUNZIONI

- Determinazione della costante di torsione D_r della molla di accoppiamento.
- Determinazione del momento d'inerzia J dell'asta del manubrio senza pesi
- Determinazione del momento d'inerzia J in funzione della distanza r dei pesi rispetto all'asse di rotazione.
- Determinazione del momento d'inerzia J per un disco e un disco spesso, una sferapiena, un cilindro pieno e un cavo.

SCOPO

Determinazione del momento d'inerzia di diversi corpi di prova

RIASSUNTO

Il momento d'inerzia di un corpo intorno a un dato asse di rotazione dipende dalla distribuzione del peso all'interno del corpo rispetto all'asse. Questo è quanto viene sperimentato usando un'asta dotata di due pesi mobili, un disco sottile, un disco spesso, una sfera piena, un cilindro pieno e un cavo. Il periodo di oscillazione dei corpi di prova dipende dalla distribuzione della massa e dalla loro geometria.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Asse di torsione	1008662
1	Fotocellula	1000563
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Base di supporto, 3 gambe, 185 mm	1002836
1	Dinamometro di precisione 1 N	1003104
1	Kit provini per asse di torsione	1008663

1

BASI GENERALI

L'inerzia di un corpo rigido rispetto ad una variazione del suo moto di rotazione intorno ad un asse fisso è indicata dal momento d'inerzia J . Esso dipende dalla distribuzione della massa nel corpo rispetto all'asse di rotazione ed è tanto maggiore quanto maggiori sono le distanze rispetto all'asse di rotazione.

In generale, il momento d'inerzia si definisce tramite l'integrale di volume:

$$(1) \quad J = \int_V r_i^2 \cdot \rho(r) \cdot dV$$

r_i : distanza dell'elemento di volume dall'asse di rotazione
 $\rho(r)$: Distribuzione della massa del corpo

Nel caso di un'asta sulla quale sono disposti simmetricamente due pesi con massa m ad una distanza r rispetto all'asse di rotazione, il momento d'inerzia è pari a:

$$(2) \quad J = J_0 + 2 \cdot m \cdot r^2$$

J_0 : Momento d'inerzia dell'asta senza pesi

I diversi corpi di prova possono essere fissati sull'asse di torsione. Il periodo di oscillazione T vale:

$$(3) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D_r}}$$

D_r : Costante di torsione della molla a elica

Ossia il periodo di oscillazione T è tanto maggiore quanto maggiore è il momento d'inerzia J .

La costante di torsione della molla a elica può essere definita con l'ausilio di un dinamometro a molla:

$$(4) \quad D_r = \frac{F \cdot r}{\alpha}$$

α : Deviazione dalla posizione di equilibrio

ANALISI

Da (3) si ottiene l'equazione per il momento d'inerzia:

$$J = D_r \cdot \frac{T^2}{4\pi^2}$$

Per la composizione con l'asta deve essere sottratto inoltre il momento d'inerzia dell'asta:

$$J(\text{masse}) = J(\text{asta} + \text{masse}) - J(\text{asta})$$

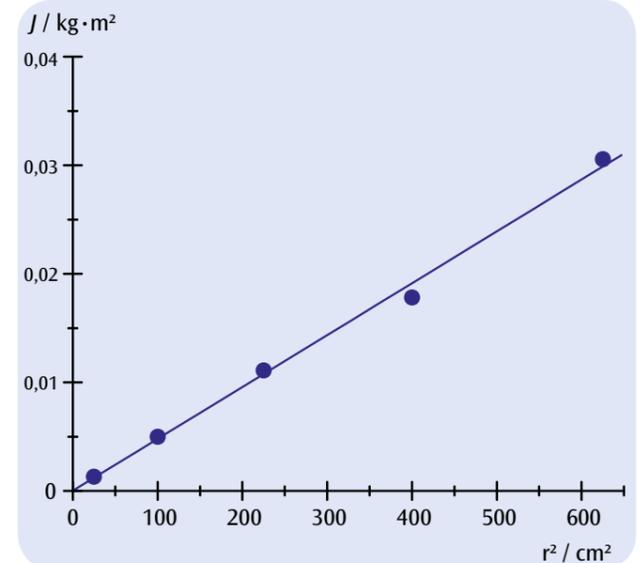


Fig. 1: Momento d'inerzia J dei pesi in relazione al quadrato della distanza delle masse r



FUNZIONI

- Conferma della proporzionalità tra la frequenza di rotazione f_R del disco e il periodo T_p della precessione del giroscopio e determinazione del momento d'inerzia dall'applicazione grafica f_R (T_p).
- Conferma della proporzionalità tra la frequenza della rotazione f_R e la frequenza di nutazione f_N tramite l'applicazione grafica f_N (f_R), ovvero dei periodo corrispondenti T_R (T_N).

SCOPO

Analisi sperimentale della precessione e nutazione di un giroscopio e determinazione del momento d'inerzia

RIASSUNTO

Un giroscopio compie un moto di precessione e nutazione oltre al suo moto di rotazione se una forza esterna e quindi un ulteriore momento torcente agisce sull'asse di rotazione oppure l'asse di rotazione del giroscopio che ruota a un basso numero di giri è sottoposto a una deviazione dalla sua posizione di equilibrio. Il periodo di precessione è inversamente proporzionale al periodo di rotazione e il periodo di nutazione è direttamente proporzionale al periodo di rotazione. La dipendenza del periodo di precessione dal periodo di rotazione consente la determinazione del momento d'inerzia del disco rotante.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Giroscopio	1000695
2	Fotocellula	1000563
1	Diodo laser, rosso	1003201
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544
3	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
3	Manicotto universale	1002830
3	Asta di supporto, 750 mm	1002935

BASI GENERALI

Un giroscopio è un corpo rigido che ruota attorno ad un asse fissato a un punto fisso. Se sull'asse interviene una forza esterna, il momento torcente modifica il momento angolare. Il giroscopio si muove quindi in direzione perpendicolare rispetto all'asse del corpo e alla forza incidente. Questo movimento viene definito precessione. Se un giroscopio che ruota a un basso numero di giri riceve

un urto contro il suo asse di rotazione, compie movimenti basculanti, chiamati nutazione. Generalmente, questi movimenti si sovrappongono.

Nell'esperimento viene utilizzato un giroscopio il cui disco grande ruota a basso attrito intorno a un asse di rotazione posto in punto di contatto. Una massa contraria viene regolata in modo che il punto di contatto coincida con il baricentro. Se il giroscopio si trova in equilibrio e il disco viene messo in rotazione, esso possiede un momento angolare costante L :

$$(1) \quad L = I \cdot \omega_R$$

I : Momento d'inerzia, ω_R : velocità angolare

Il momento d'inerzia del disco rotante del giroscopio vale:

$$(2) \quad I = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2$$

M : Massa del disco, R : Raggio del disco

Se l'asse di rotazione viene gravato da una massa supplementare m , allora il momento torcente provocato da un carico aggiuntivo causa una variazione τ del momento angolare:

$$(3) \quad \tau = m \cdot g \cdot r = \frac{dL}{dt}$$

r : Distanza del punto di supporto dell'asse di rotazione dal punto di applicazione della massa supplementare

L'asse di rotazione ruota quindi secondo la fig. 2 di un angolo

$$(4) \quad d\varphi = \frac{dL}{L} = \frac{m \cdot g \cdot r \cdot dt}{L}$$

e con movimento di precessione. Ne consegue quindi per la velocità angolare del moto di precessione:

$$(5) \quad \omega_p = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{m \cdot g \cdot r}{L} = \frac{m \cdot g \cdot r}{I \cdot \omega_R}$$

e con $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$:

$$(6) \quad \frac{1}{T_R} = f_R = \frac{m \cdot g \cdot r}{I} \cdot T_p$$

Se il disco di rotazione viene messo in rotazione senza un ulteriore momento torcente esterno e l'asse di rotazione viene urtato leggermente di lato, il giroscopio compie moti di nutazione. La velocità angolare della nutazione è quindi direttamente proporzionale alla velocità angolare della rotazione:

$$(7) \quad \omega_N = C \cdot \omega_R \quad \text{ovvero} \quad T_R = C \cdot T_N$$

C : Costante

Nell'esperimento, il moto di rotazione, precessione e nutazione viene rilevato con sensori fotoelettrici e i tracciati temporali degli impulsi vengono registrati e rappresentati con l'ausilio di 3B NETlog™ e 3B NETlab™.

ANALISI

I periodi di rotazione, precessione e nutazione vengono definiti tramite i tracciati temporali registrati degli impulsi. Secondo l'equazione (6), il periodo di precessione è inversamente proporzionale al periodo di rotazione e secondo l'equazione (7), il periodo di nutazione è direttamente proporzionale al periodo di rotazione. Nei diagrammi corrispondenti, i valori di misurazione si trovano pertanto su una retta passante per l'origine nei limiti della precisione di misurazione. Dalla pendenza di una delle rette adattate ai punti di misurazione $f_R(T_p)$, è possibile determinare il momento d'inerzia del disco rotante del giroscopio in maniera sperimentale e confrontarlo con quello calcolato in maniera teorica con l'equazione (2).

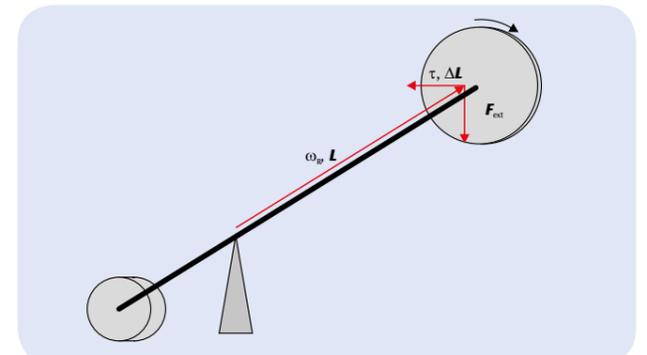


Fig. 1: Schizzo schematico del giroscopio per la precessione

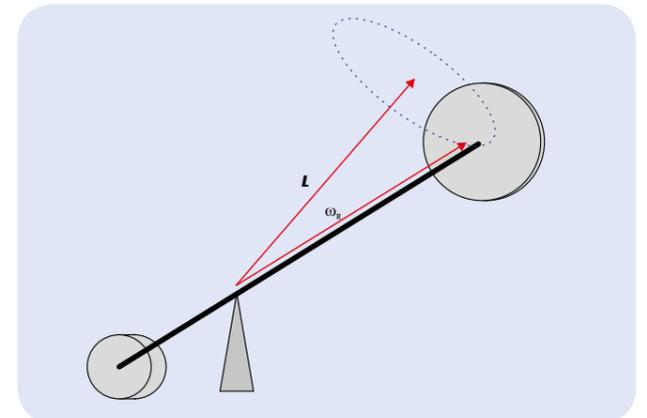
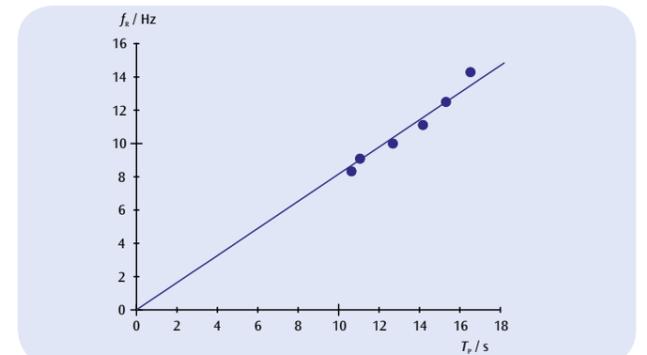
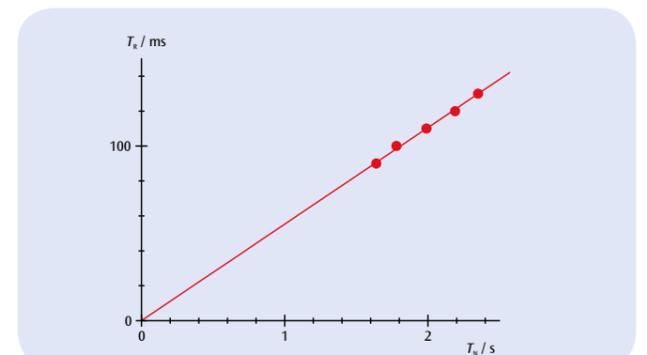


Fig. 2: Schizzo schematico del giroscopio per la nutazione


 Fig. 3: Frequenza di rotazione f_R del disco di rotazione in relazione al periodo di precessione T_p

 Fig. 4: Periodo di rotazione T_R in relazione al periodo di nutazione T_N


SCOPO

Misurazione del periodo di oscillazione di un pendolo a filo per vari pesi

FUNZIONI

- Misurazione del periodo di oscillazione T di un pendolo a filo in funzione della lunghezza del pendolo L .
- Misurazione del periodo di oscillazione T di un pendolo a filo in funzione del peso del pendolo m .
- Determinazione dell'accelerazione di caduta g .

RIASSUNTO

Il periodo di oscillazione T di un pendolo a filo dipende dalla lunghezza del pendolo L , ma non dal peso m . Ciò viene dimostrato in una serie di misurazioni in cui si registra il periodo di oscillazione di un pendolo a filo per mezzo di una fotocellula collegata a un contatore digitale.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set 4 sfere per pendolo	1003230
1	Corda sperimentale	1001055
1	Base di supporto, 3 gambe, 185 mm	1002836
1	Asta di supporto, 1500 mm	1002937
1	Asta di supporto, 100 mm	1002932
1	Manicotto con gancio	1002828
2	Manicotto universale	1002830
1	Fotocellula	1000563
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603
1	Bilancia elettronica 200 g	1003433

1
BASI GENERALI

Un pendolo a filo di peso m e lunghezza L oscilla in modo armonico attorno alla posizione di riposo fintanto che la deviazione rispetto a quest'ultima non è eccessiva. Il periodo di oscillazione T , ovvero il tempo impiegato per un movimento completo attorno alla posizione di riposo, dipende solo dalla lunghezza L e non dal peso m del pendolo.

Spostando il pendolo dalla posizione di riposo di un angolo φ , la forza di richiamo è pari a

$$(1a) \quad F_1 = -m \cdot g \cdot \sin \varphi .$$

o in buona approssimazione per piccoli angoli φ

$$(1b) \quad F_1 = -m \cdot g \cdot \varphi$$

La forza di inerzia della massa accelerata è uguale a

$$(2) \quad F_2 = m \cdot L \cdot \ddot{\varphi}$$

Le due forze sono identiche, da cui si ottiene l'equazione del moto dell'oscillatore armonico

$$(3) \quad \ddot{\varphi} + \frac{g}{L} \cdot \varphi = 0$$

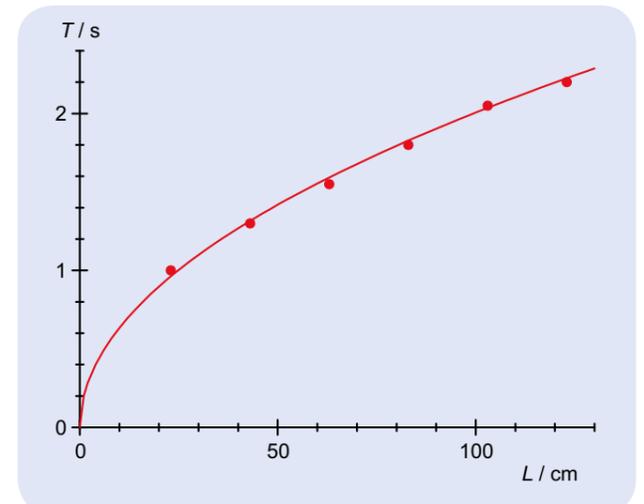
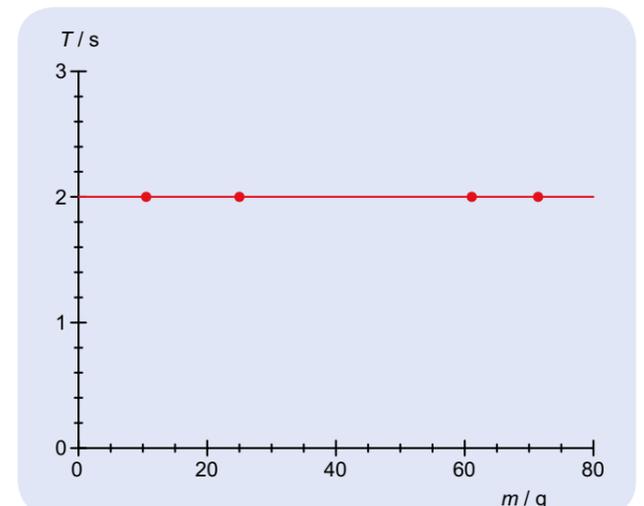
e per il periodo di oscillazione T segue

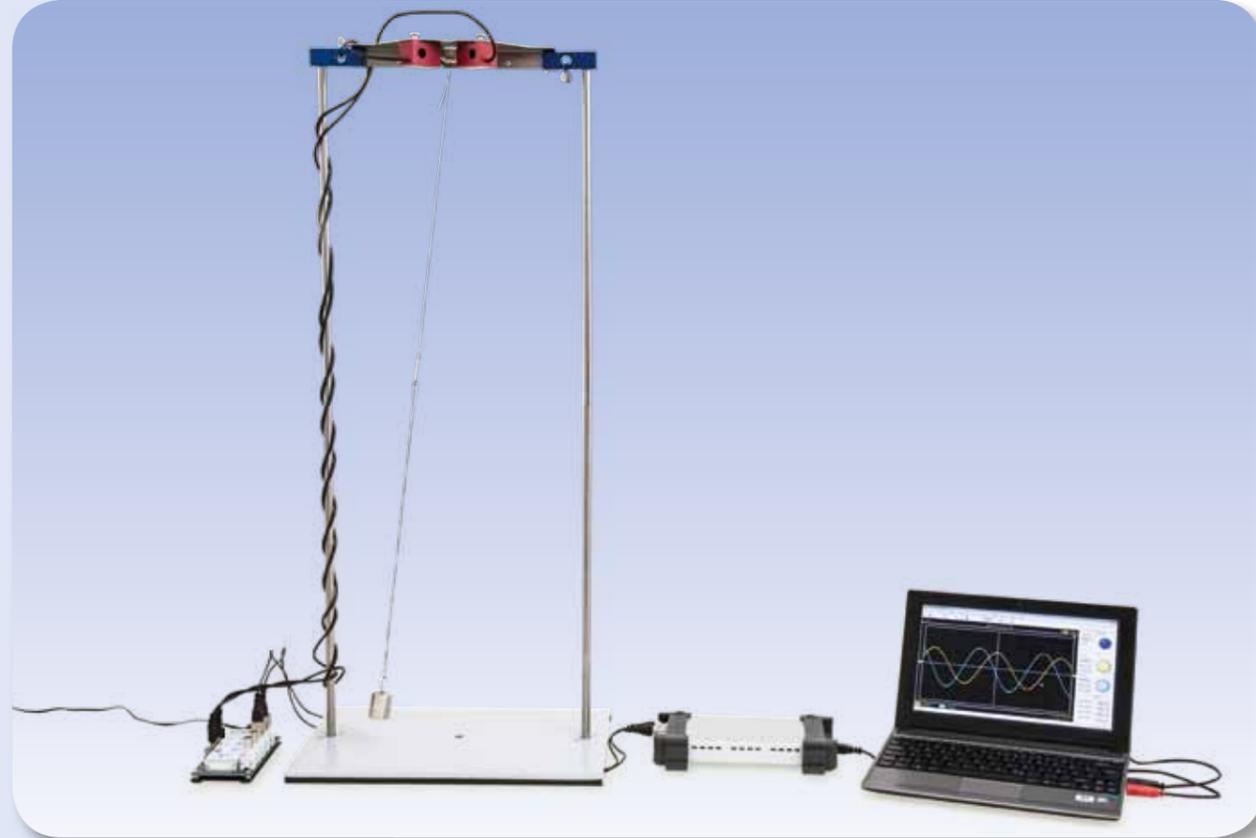
$$(4) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} .$$

Nell'esperimento si misura il periodo di oscillazione per varie lunghezze e pesi del pendolo utilizzando una fotocellula collegata a un contatore digitale. Tale contatore è programmato internamente in modo da arrestare la misurazione del tempo dopo ciascuna oscillazione completa.

ANALISI

I valori misurati sono rappresentati da un lato in un diagramma $T-L$ e dall'altro in diagramma $T-m$. I diagrammi dimostrano la prevista dipendenza del periodo di oscillazione dalla lunghezza del pendolo e l'indipendenza dal peso dello stesso.


 Fig. 2: Periodo di oscillazione T in funzione della lunghezza del pendolo L

 Fig. 3: Periodo di oscillazione T in funzione del peso del pendolo m


FUNZIONI

- Registrazione dell'oscillazione ellittica di un pendolo a filo in due componenti perpendicolari tra loro per diverse condizioni iniziali.

SCOPO

Descrizione dell'oscillazione ellittica di un pendolo a filo come sovrapposizione di due componenti perpendicolari tra loro

RIASSUNTO

A seconda della condizione iniziale, un pendolo a filo adeguatamente sospeso oscilla in piccole deviazioni tali per cui il corpo del pendolo viene a descrivere un'ellissi. Scomponendo il movimento in due componenti perpendicolari tra loro, si trova tra di esse una differenza di fase. Nell'esperimento si rappresenta questa correlazione misurando le oscillazioni per mezzo di due sensori di forza dinamici perpendicolari tra loro. Vengono valutate l'ampiezza delle componenti e la relativa differenza di fase.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pacchetto SW Pendolo a filo	1012854
1	Pacchetto SW Stativo	1012849
1	Pacchetto SW Sensori (115 V, 50/60 Hz)	1012850 o
	Pacchetto SW Sensori (230 V, 50/60 Hz)	1012851
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264

1
BASI GENERALI

A seconda della condizione iniziale, un pendolo a filo adeguatamente sospeso oscilla in piccole deviazioni tali per cui il corpo del pendolo viene a descrivere un'ellissi. Scomponendo il movimento in due componenti perpendicolari tra loro, si ha una differenza di fase.

Nell'esperimento si rappresenta questa correlazione misurando le oscillazioni per mezzo di due sensori di forza dinamici perpendicolari tra loro. Lo spostamento di fase è immediatamente riconoscibile rappresentando le oscillazioni con un oscilloscopio a due canali.

Si riconoscono subito in maniera evidente tre casi particolari:

- Se il pendolo oscilla sulla bisettrice tra i sensori di forza, si ha uno spostamento di fase $\varphi = 0^\circ$.
- In caso di oscillazioni perpendicolari alla bisettrice si ha $\varphi = 180^\circ$.
- Se il corpo del pendolo descrive una traiettoria circolare, si ha $\varphi = 90^\circ$.

ANALISI

Le oscillazioni vengono registrate e "bloccate" per mezzo di un oscilloscopio con memoria. Vengono valutate l'ampiezza delle componenti e la relativa differenza di fase.

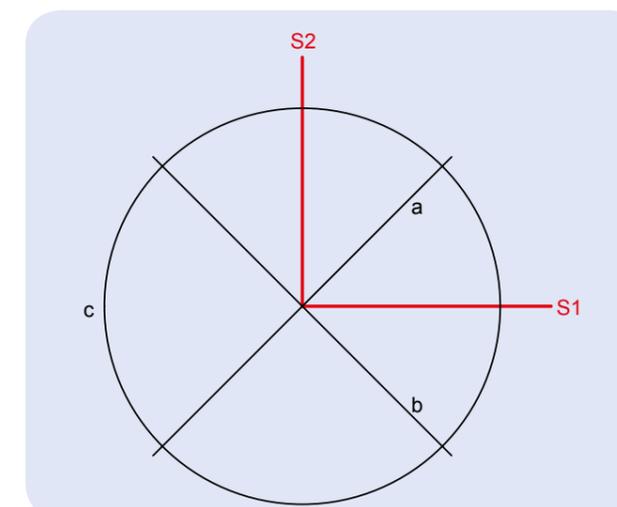


Fig. 1: Allineamento dei sensori S1 e S2 e direzioni di oscillazione esaminate del pendolo a filo

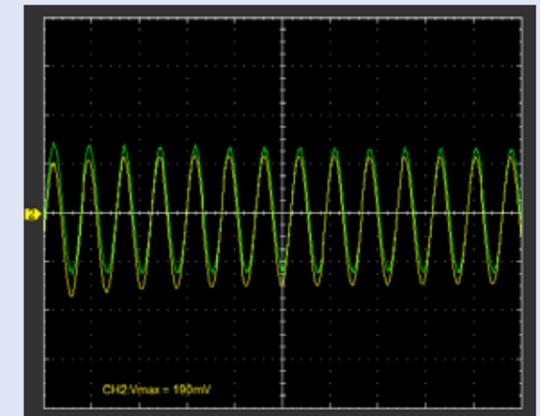


Fig. 1: Le componenti oscillatorie del pendolo a filo nell'oscillazione "sulla bisettrice"

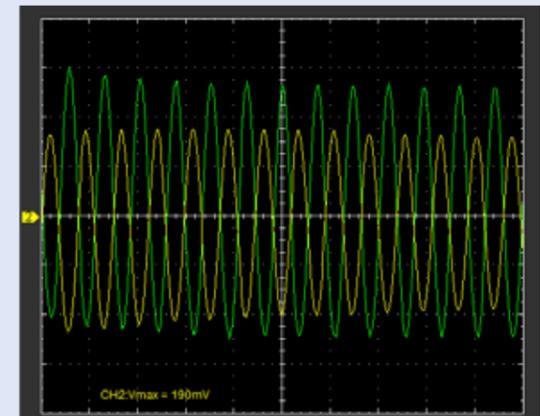


Fig. 2: Le componenti oscillatorie del pendolo a filo nell'oscillazione "perpendicolare alla bisettrice"

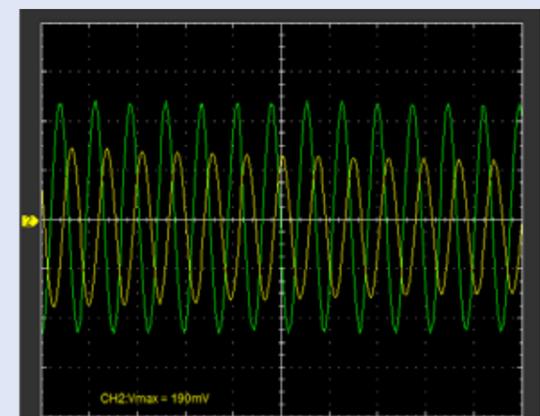


Fig. 3: Le componenti oscillatorie del pendolo a filo in oscillazioni circolari



FUNZIONI

- Misurazione del periodo di oscillazione T a seconda della componente efficace g_{eff} dell'accelerazione di caduta.
- Misurazione del periodo di oscillazione T per diverse lunghezze del pendolo L .

SCOPO

Misurazione del periodo di oscillazione di un pendolo a seconda della componente attiva dell'accelerazione di caduta

RIASSUNTO

Il periodo di oscillazione di un pendolo viene aumentato dall'inclinazione del suo asse di rotazione rispetto alla verticale, in quanto la componente attiva dell'accelerazione di caduta si riduce.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pendolo g variabile	1000755
1	Supporto fotocellula al pendolo	1000756
1	Fotocellula	1000563
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
1	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 470 mm	1002934

2

BASI GENERALI

Il periodo di oscillazione di un pendolo matematico è determinato dalla lunghezza del pendolo L e dall'accelerazione di caduta g . L'influenza dell'accelerazione di caduta può essere dimostrata se l'asse di rotazione, intorno al quale ruota il pendolo, è inclinato rispetto alla verticale.

In caso di asse di rotazione inclinato, la componente g_{par} parallela all'asse di rotazione dell'accelerazione g viene compensata dal supporto dell'asse di rotazione (vedi fig.1). La componente efficace rimanente g_{eff} è:

$$(1) \quad g_{\text{eff}} = g \cdot \cos \alpha$$

α : Angolo d'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto alla verticale.

Dopo la deviazione del pendolo dell'angolo φ dalla posizione di riposo, sulla massa sospesa m agisce una forza di richiamo

$$(2) \quad F = -m \cdot g_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi$$

Per piccole deviazioni, l'equazione del moto del pendolo è pertanto:

$$(3) \quad m \cdot L \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot g_{\text{eff}} \cdot \varphi = 0$$

Il pendolo oscilla quindi alla frequenza angolare:

$$(4) \quad \omega = \sqrt{\frac{g_{\text{eff}}}{L}}$$

ANALISI

Da (4) per il periodo di oscillazione del pendolo deriva

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g_{\text{eff}}}}$$

Pertanto, il periodo di oscillazione si riduce con l'accorciamento del pendolo, mentre aumenta con la diminuzione della componente attiva dell'accelerazione di caduta.

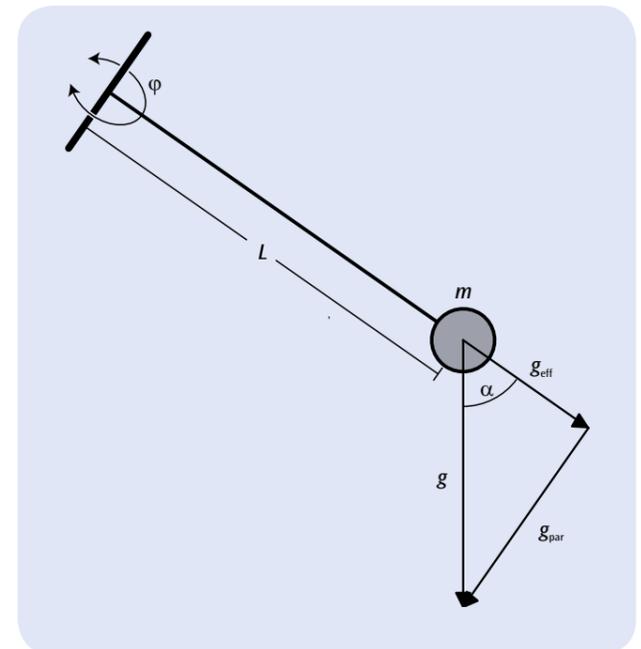


Fig. 1: Pendolo gravitazionale variabile (rappresentazione schematica)

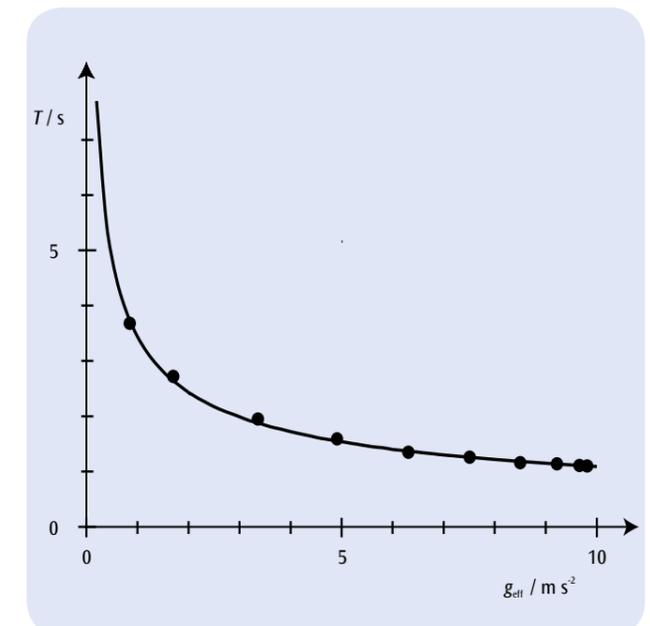


Fig. 2: Periodo di oscillazione del pendolo a seconda della componente efficace dell'accelerazione di caduta

La linea tracciata è stata calcolata con il valore $L = 30 \text{ cm}$

FUNZIONI

- Misurazione della direzione di oscillazione in funzione del tempo.
- Determinazione della velocità di rotazione.
- Determinazione della latitudine geografica.

SCOPO

Dimostrazione della rotazione terrestre con un pendolo di Foucault

RIASSUNTO

Il pendolo di Foucault è un semplice pendolo, composto da un peso di grande massa appeso a un filo molto lungo, utilizzato per dimostrare la rotazione terrestre. Nell'esperimento si usa un pendolo con lunghezza 1,2 m la cui direzione di oscillazione è determinabile con estrema precisione per mezzo di una proiezione in ombra. Per ottenere un tempo di osservazione più lungo, lo smorzamento dell'oscillazione può essere compensato mediante un'eccitazione elettromagnetica regolabile di continuo.



APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pendolo di Foucault (230 V, 50/60 Hz)	1000748 o
	Pendolo di Foucault (115 V, 50/60 Hz)	1000747
1	Cronometro digitale	1002811

2

BASI GENERALI

Il pendolo di Foucault è un semplice pendolo, composto da un peso di grande massa appeso a un filo molto lungo, utilizzato per dimostrare la rotazione terrestre. Il suo nome deriva da *Jean Foucault*, che nel 1851 scoprì, su un pendolo lungo 2 m, che la direzione di oscillazione cambia nel tempo. In seguito, l'esperimento venne ripetuto con pendoli sempre più lunghi e pesanti.

Siccome la Terra ruota attorno al proprio asse, nel sistema di coordinate riferito alla Terra del pendolo oscillante agisce una forza di Coriolis.

$$(1) \quad F = 2 \cdot m \cdot \Omega_0 \times v$$

m : massa del corpo del pendolo
 Ω_0 : vettore della velocità angolare della Terra
 v : vettore della velocità del pendolo oscillante

in direzione trasversale rispetto alla direzione di oscillazione. Essa genera una rotazione del piano di oscillazione con periodo che dipende dalla latitudine geografica φ del punto di sospensione. Spostando il pendolo di Foucault di un piccolo angolo α , il corpo del pendolo si muove esclusivamente sul piano orizzontale formato in Fig. 1 dall'asse N rivolto a nord e dall'asse E rivolto a est. Poiché il corpo del pendolo è appeso a un filo, si osservano solo deviazioni in senso orizzontale. Per questa ragione solo la componente verticale

$$(2) \quad \Omega(\varphi) = \Omega_0 \cdot \sin\varphi$$

del vettore Ω_0 è rilevante. L'equazione di moto del pendolo di Foucault oscillante è pertanto

$$(3) \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} e_p + 2 \cdot \Omega_0 \cdot \sin\varphi \cdot \frac{d\alpha}{dt} e_v + \frac{g}{L} \cdot \alpha \cdot e_p = 0$$

L : lunghezza del pendolo, g : accelerazione di caduta
 e_p : versore orizzontale parallelo alla direzione di oscillazione attuale
 e_v : versore orizzontale perpendicolare alla direzione di oscillazione attuale

la cui soluzione può suddividersi in una soluzione per l'angolo di deviazione α e una soluzione per il versore e_p parallelo alla direzione di oscillazione attuale:

$$(4a) \quad \alpha(t) = \cos(\omega \cdot t + \beta) \quad \text{con} \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$(4b) \quad e_p(t) = e_E \cdot \cos(\psi(t)) + e_N \cdot \sin(\psi(t))$$

con $\psi(t) = \Omega_0 \cdot \sin\varphi \cdot t + \psi_0$: direzione di oscillazione
 e_E : vettore unitario orizzontale verso est
 e_N : vettore unitario orizzontale verso nord

Con il passare del tempo, il piano di oscillazione ruota quindi con la frequenza indicata nell'equazione (2). Nell'emisfero settentrionale si ha una rotazione verso destra, in quello meridionale verso sinistra. La velocità di rotazione è massima ai poli, mentre in corrispondenza dell'Equatore non vi è alcuna deviazione.

Nell'esperimento si utilizza un pendolo costituito da un filo lungo 1,2 m. Per impedire oscillazioni ellittiche, ad ogni spostamento il filo del pendolo urta un anello di Charron. La direzione di oscillazione può essere letta con estrema precisione tramite una proiezione in ombra del filo su una scala

angolare. Già dopo pochi minuti è possibile osservare la rotazione del piano di oscillazione. Per ottenere un tempo di osservazione più lungo, lo smorzamento dell'oscillazione può essere compensato mediante un'eccitazione elettromagnetica regolabile di continuo.

ANALISI

L'angolo di orientamento ψ del piano di oscillazione dipende linearmente dal tempo, v. Fig. 2. La pendenza delle rette passanti per i punti di misura è il valore ricercato $\Omega(\varphi)$.

La latitudine geografica in gradi è calcolata dopo la conversione dell'equazione (2) secondo

$$\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{86400 \text{ s}}{360 \text{ grd}} \cdot \Omega(\varphi)\right)$$

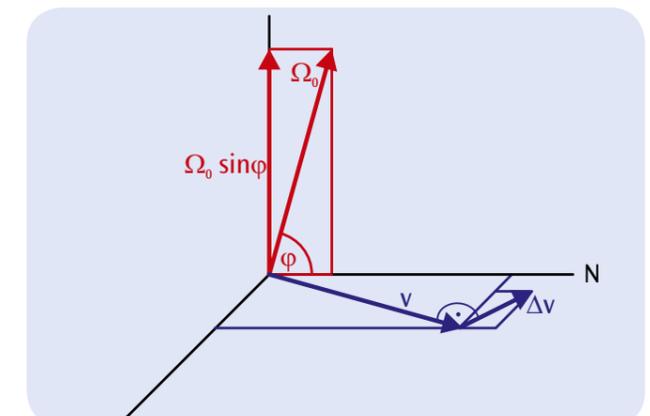


Fig. 1 Rappresentazione nel sistema di coordinate riferito alla Terra del pendolo di Foucault

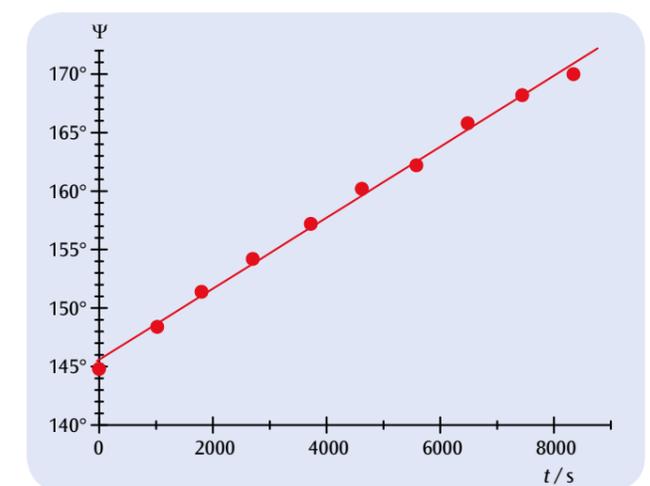


Fig. 2 Curva di misurazione rilevata alla latitudine geografica $\varphi = 50^\circ$


SCOPO

Misurazione delle oscillazioni di una molla ad elica con un sensore di movimento a ultrasuoni

RIASSUNTO

Le oscillazioni di un pendolo a molla a elica sono un classico esempio di un'oscillazione armonica. Vengono registrate nell'esperimento con un sensore di movimento a ultrasuoni che rileva la distanza dal sensore del peso appeso al pendolo.

FUNZIONI

- Registrazione dell'oscillazione armonica di una molla ad elica in funzione del tempo con un sensore di movimento a ultrasuoni.
- Determinazione del periodo di oscillazione T per diverse combinazioni di indice di rigidità k e peso m .

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set molle ad elica per verificare la legge di Hooke	1003376
1	Set pesi a fessura 10 x 10 g	1003227
1	Set pesi a fessura 5 x 50 g	1003229
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 1000 mm	1002936
1	Manicotto con gancio	1002828
1	Sensore di movimento ad ultrasuoni	1000559
1	3B NETlab™	1000544
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603

BASI GENERALI

Le oscillazioni hanno luogo quando un sistema spostato dalla posizione di equilibrio viene richiamato verso la posizione di equilibrio per mezzo di una forza. Si parla di oscillazioni armoniche quando la forza che riporta il sistema in posizione di riposo è proporzionale in qualsiasi momento alla deviazione dalla posizione di riposo. Le oscillazioni di una molla ad elica sono in merito un classico esempio. La proporzionalità tra deviazione e forza repulsiva viene descritta tramite la legge di Hooke.

1

Tra la deviazione x e la forza repulsiva F si applica quindi la relazione

$$(1) \quad F = -k \cdot x \quad \text{con} \\ k: \text{Indice di rigidità}$$

Per un peso m agganciato alla molla a elica si applica quindi l'equazione di movimento

$$(2) \quad m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x = 0,$$

finché si possono trascurare il peso della molla e gli smorzamenti dovuti alle forze di attrito.

Le soluzioni di questa equazione del moto hanno la forma comune

$$(3) \quad x(t) = A \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t + \varphi\right),$$

e l'esperimento di registrazione delle oscillazioni armoniche di una molla ad elica in funzione del tempo con il sensore di movimento a ultrasuoni consente di confermare che i dati si adattano alla funzione sinusoidale. Il sensore di movimento a ultrasuoni rileva la distanza dal sensore del peso agganciato alla molla. La grandezza misurata corrisponde quindi, ad eccezione di uno spostamento del punto zero compensabile tramite una funzione tara, direttamente ad una grandezza osservata nell'equazione 3, ovvero $x(t)$. Il periodo di oscillazione T viene definito come la distanza tra due passaggi attraverso lo zero della funzione sinusoidale nella stessa direzione, e si ricava da (3)

$$(4) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Per la conferma di (4) vengono eseguite misurazioni per le diverse combinazioni di peso m e indice di rigidità k e viene rispettivamente determinato il periodo di oscillazione dalla distanza dei passaggi attraverso lo zero nei dati registrati.

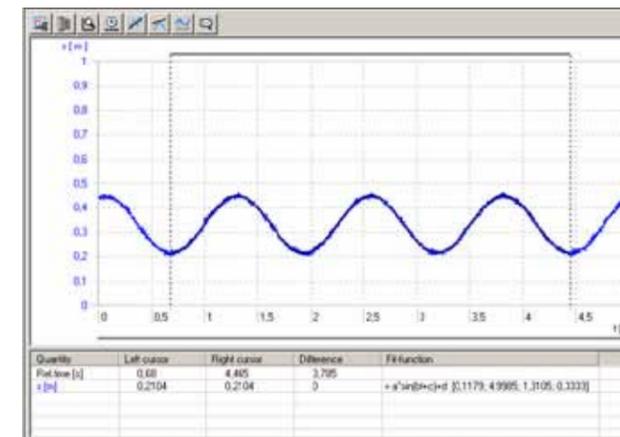


Fig. 1: Dati di oscillazione registrati dopo l'adattamento a di una funzione sinusoidale

ANALISI

Dall'equazione 4 risulta:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} \cdot m$$

I dati misurati vengono rappresentati per i diversi indici di rigidità k come parametro in un diagramma T^2 - m . Nei limiti della precisione di misurazione si trovano su rette passanti per l'origine le cui pendenze vengono valutate in un secondo diagramma.

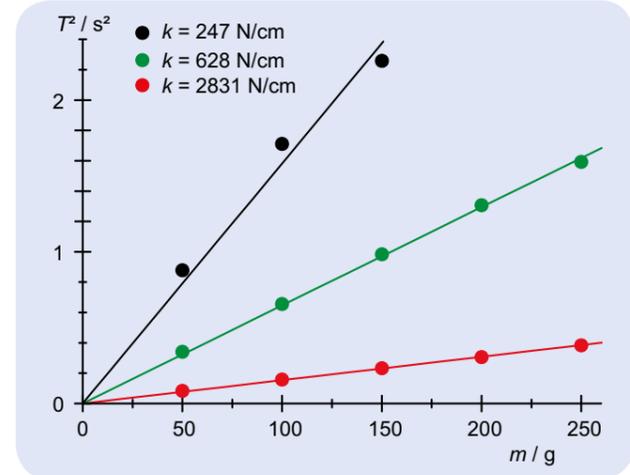


Fig. 2: T^2 come funzione di m

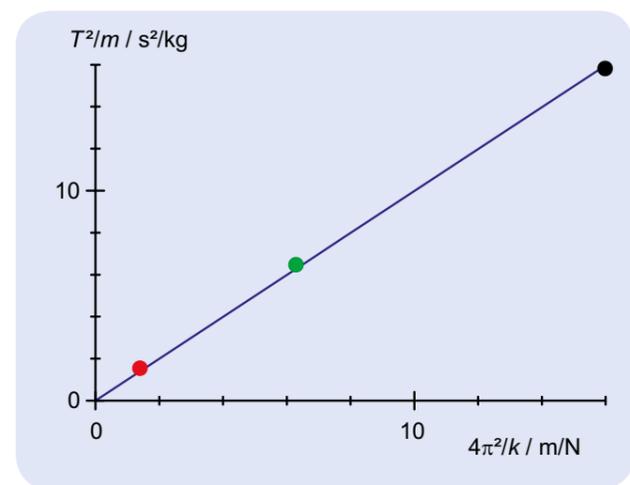
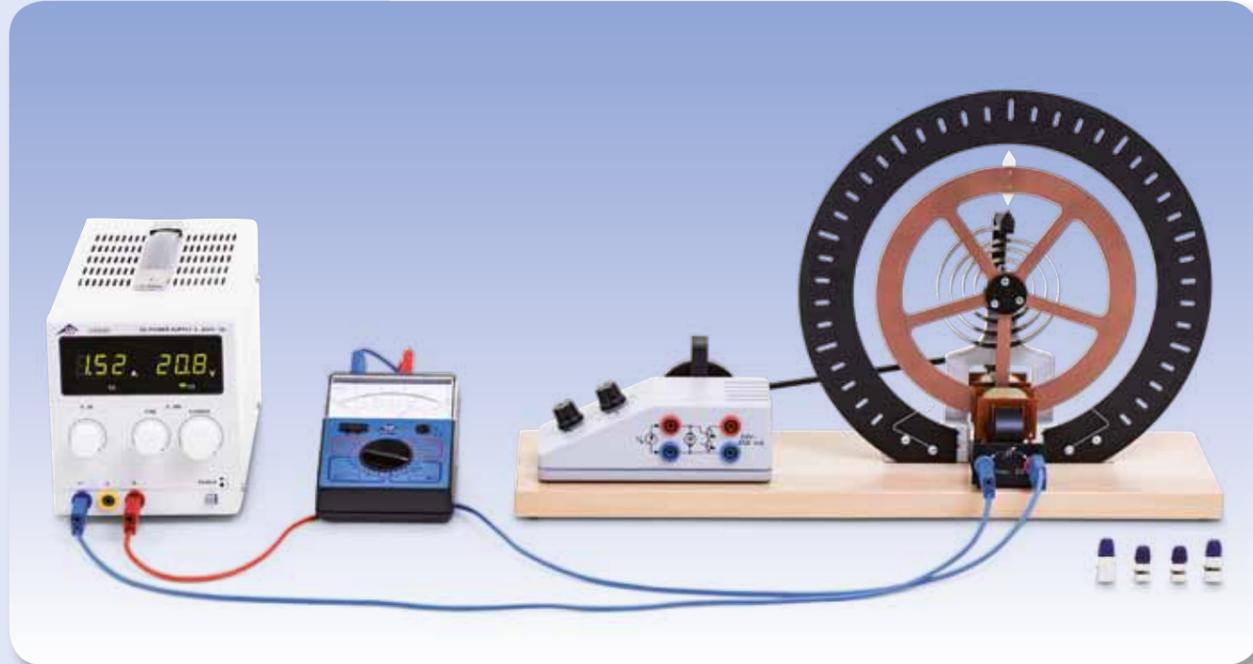


Fig. 3: $\frac{T^2}{m}$ come funzione di $\frac{4\pi^2}{k}$



FUNZIONI

- Misurazione del periodo di oscillazione T per diverse deviazioni e velocità iniziali.
- Determinazione della costante di smorzamento δ del pendolo di torsione smorzato.

SCOPO

Misurazione e analisi di oscillazioni armoniche di torsione libere

RIASSUNTO

Con il pendolo di torsione del Prof. Pohl è possibile studiare le oscillazioni armoniche di torsione libere. Il sistema è realizzato in modo che sul pendolo agiscano soltanto il momento torcente di richiamo di una molla a spirale e il momento torcente di smorzamento di un freno a corrente di Foucault con corrente regolabile. Durante l'esperimento viene dimostrata l'indipendenza del periodo di oscillazione dalla deviazione e dalla velocità iniziali, ed analizzato lo smorzamento dell'ampiezza delle oscillazioni.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pendolo di torsione di Pohl	1002956
1	Cronometro meccanico, 15 min	1003369
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

1

BASI GENERALI

Con il pendolo di torsione del Prof. Pohl è possibile studiare le oscillazioni armoniche di torsione libere. Il sistema prevede che sul pendolo agiscano soltanto il momento torcente di richiamo di una molla a spirale e il momento torcente di smorzamento di un freno a corrente di Foucault con corrente regolabile.

L'equazione del moto per l'angolo di deviazione φ di un'oscillazione smorzata libera del pendolo di torsione è la seguente:

$$(1) \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0$$

$$\text{con } \delta = \frac{k}{2J}, \quad \omega_0^2 = \frac{D}{J}$$

J : Momento d'inerzia

D : Indice di rigidezza

k : Coefficiente di smorzamento

Fintanto che lo smorzamento non è eccessivo e la condizione $\delta < \omega_0$ è soddisfatta, il risultato dell'equazione del moto è il seguente:

$$(2) \quad \varphi(t) = \varphi_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)$$

$$\text{con } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

A questo proposito, l'ampiezza iniziale φ_0 e l'angolo di sfasamento ψ sono parametri liberi, che dipendono dalla deviazione e della velocità del pendolo di torsione al momento $t = 0$. Il pendolo oscilla quindi con periodo

$$(3) \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Con il tempo, l'ampiezza di oscillazione diminuisce secondo la seguente equazione

$$(4) \quad \hat{\varphi}(t) = \varphi_0 \cdot e^{-\delta t}$$

Nell'esperimento vengono analizzate le oscillazioni per diversi fattori di smorzamento, ottenuti impostando il freno a corrente di Foucault su diverse intensità di corrente. Il periodo di oscillazione viene misurato utilizzando un cronometro. Si osserva quindi che, per un dato valore di smorzamento, il periodo di oscillazione non dipende dalla deviazione e dalla velocità iniziali.

Per determinare lo smorzamento vengono annotate le deviazioni in diminuzione del pendolo verso destra e verso sinistra; per praticità, la velocità iniziale del pendolo è assunta nulla.

ANALISI

Nell'equazione (4) l'ampiezza di oscillazione è definita come grandezza positiva, intendendo quindi il valore delle deviazioni a destra e sinistra. Se si traccia il logaritmo naturale di queste deviazioni rispetto al tempo, si ottiene una retta con pendenza $-\delta$. In pratica vengono riscontrati scostamenti rispetto al comportamento lineare, in quanto la forza di attrito non è, come presupposto, esattamente proporzionale alla velocità.

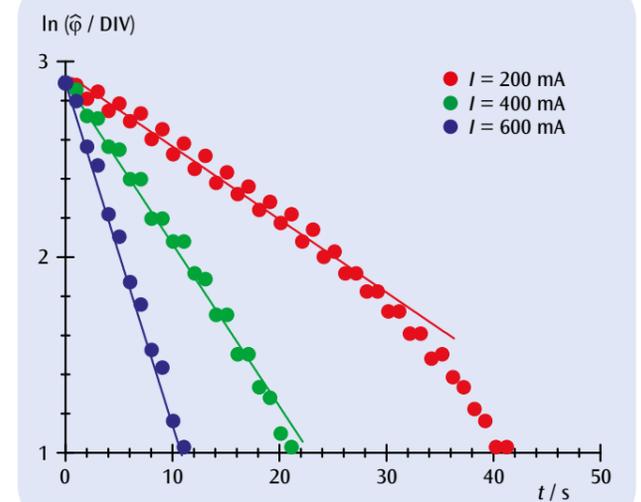
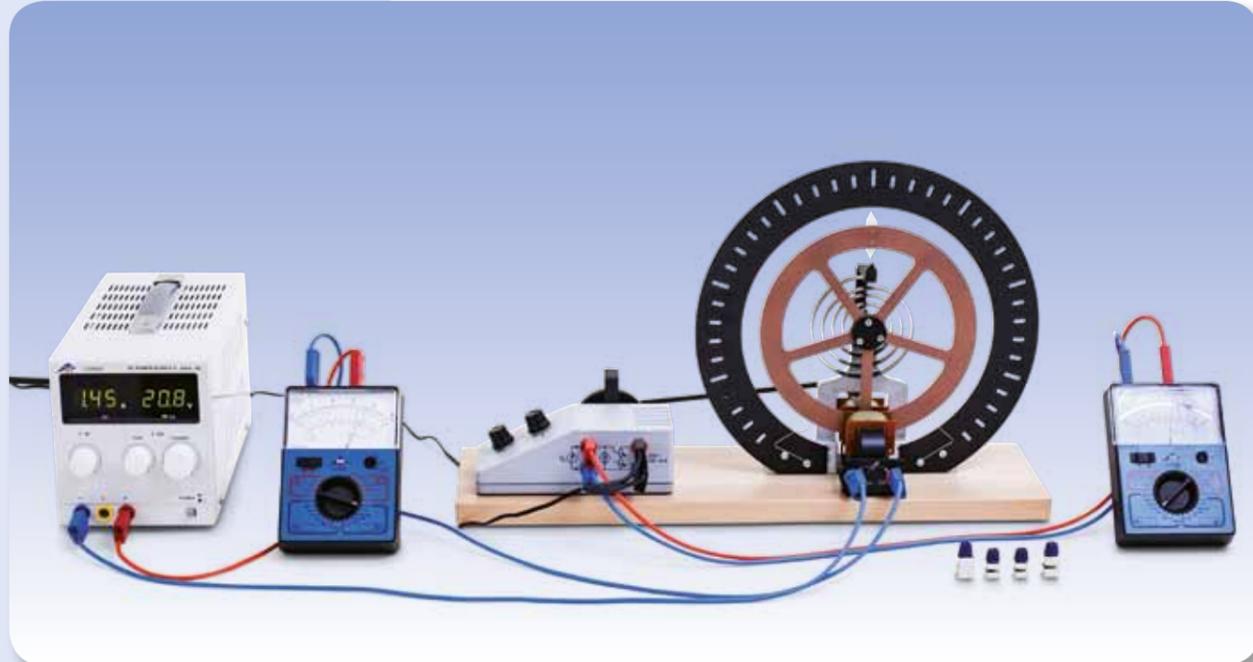


Fig. 1: $\ln(\hat{\varphi})$ come funzione del tempo con valori di smorzamento differenti

UE1050550

PENDOLO DI TORSIONE DEL PROF. POHL

UE1050550



FUNZIONI

- Misurazioni dell'ampiezza di oscillazioni forzate in funzione della frequenza di eccitazione per smorzamenti differenti.
- Osservazione dello spostamento di fase tra eccitazione e oscillazione per frequenze di oscillazione molto ridotte e molto elevate.

SCOPO

Misurazione e analisi di oscillazioni forzate

RIASSUNTO

Il pendolo di torsione del Prof. Pohl è adatto anche all'analisi delle oscillazioni forzate. A tale scopo il sistema oscillante è collegato a un'asta di eccitazione che, azionata da un motore a corrente continua con velocità regolabile, separa e comprime le molle a spirale in sequenza periodica. Nell'esperimento viene misurata l'ampiezza in funzione della frequenza di eccitazione per smorzamenti differenti, e osservato lo spostamento di fase tra eccitazione e oscillazione.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pendolo di torsione di Pohl	1002956
1	Cronometro meccanico, 15 min	1003369
1	Alimentatore a spina 24 V, 700 mA (230 V, 50/60 Hz)	1000681 o
	Alimentatore a spina 24 V, 700 mA (115 V, 50/60 Hz)	1000680
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
2	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Il pendolo di torsione del Prof. Pohl è adatto anche all'analisi delle oscillazioni forzate. A tale scopo il sistema oscillante è collegato a un'asta di eccitazione che, azionata da un motore a corrente continua con velocità regolabile, separa e comprime le molle a spirale in sequenza periodica.

L'equazione di moto per questo sistema è

$$(1) \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \cdot \varphi = A \cdot \cos(\omega_E \cdot t)$$

$$\text{con } \delta = \frac{k}{2J}, \quad \omega_0^2 = \frac{D}{J}, \quad A = \frac{M_0}{J}$$

J : Momento d'inerzia

D : Indice di rigidezza

k : Coefficiente di smorzamento

M_0 : Ampiezza del momento torcente esterno

ω_E : Frequenza dell'andamento periodico del momento torcente esterno

La soluzione di questa equazione del moto si compone di una soluzione dell'equazione omogenea e di una soluzione particolare o parte non omogenea. L'equazione omogenea è l'equazione del moto dell'oscillazione smorzata libera, analizzata nell'esperimento UE1050500. Con il tempo la sua soluzione si riduce in modo esponenziale, diventando trascurabile rispetto alla parte non omogenea dopo il cosiddetto tempo di assestamento.

La parte non omogenea

$$(2) \quad \varphi(t) = \varphi_E \cdot \cos(\omega_E \cdot t - \psi_E)$$

dipende invece dal momento torcente esterno e pertanto è presente finché esso viene applicato. La relativa ampiezza

$$(3) \quad \varphi_E = \frac{A_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_E^2)^2 + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega_E^2}}$$

crece quindi in proporzione a quanto la frequenza di eccitazione ω_E si avvicina alla frequenza propria ω_0 del pendolo di torsione. Con $\omega_E = \omega_0$ si parla di risonanza.

Lo spostamento di fase

$$(4) \quad \psi_E = \arctan\left(\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega_E}{\omega_0^2 - \omega_E^2}\right)$$

mostra che le deviazioni del pendolo dipendono dall'eccitazione. Con frequenze molto ridotte è vicino allo zero e cresce in presenza di frequenze maggiori, fino a raggiungere 90° alla frequenza di risonanza. Con frequenze di eccitazione molto elevate l'eccitazione e l'oscillazione possono arrivare a subire uno spostamento di fase di 180° .

ANALISI

Viene tracciato il grafico dei valori misurati di ampiezza delle oscillazioni smorzate rispetto alla frequenza di eccitazione. Ne risultano curve di misurazione differenti, che possono essere descritte dall'equazione (4) con il relativo parametro di smorzamento δ .

Si notano lievi scostamenti rispetto ai valori di smorzamento utilizzati per l'esperimento UE1050500. Ciò è riconducibile al fatto che la forza di attrito non è, come presupposto, esattamente proporzionale alla velocità.

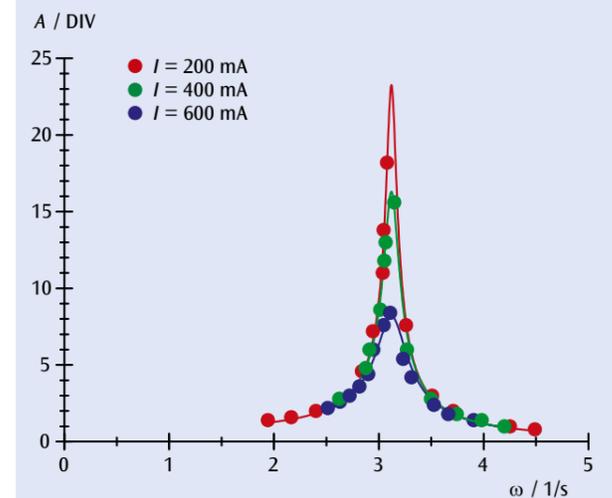
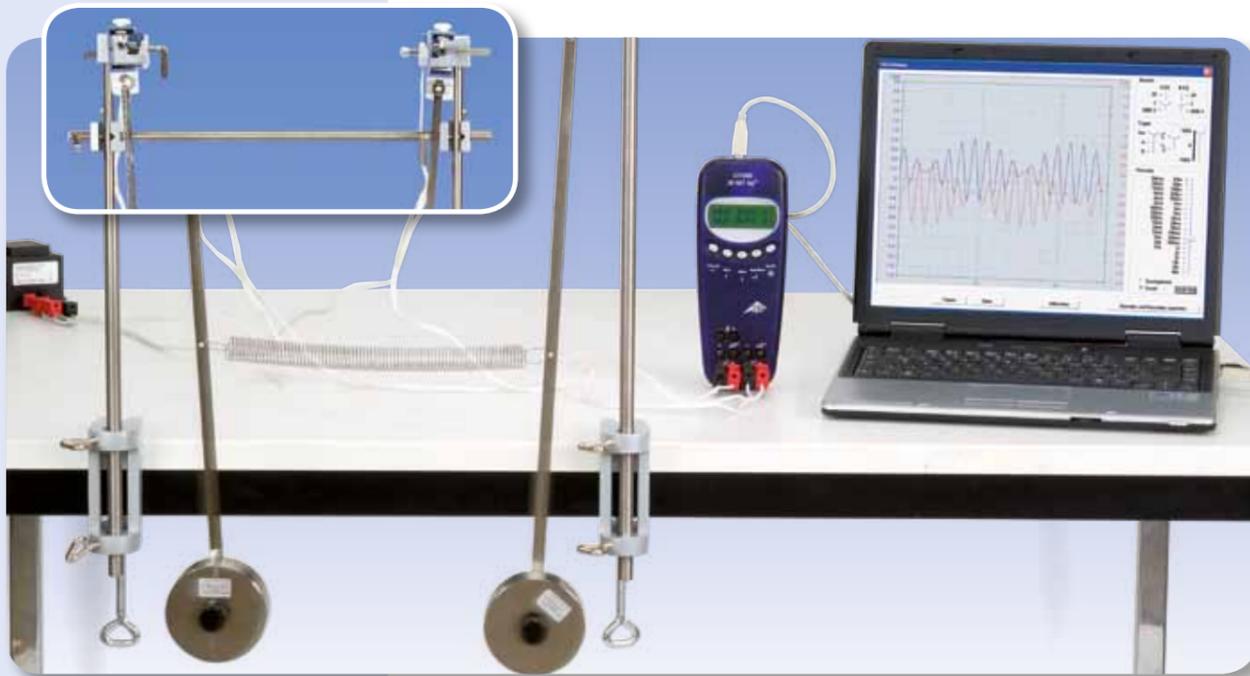


Fig. 1: Curve di risonanza con smorzamenti diversi



FUNZIONI

- Registrazione dell'oscillazione in fase e determinazione del suo periodo di oscillazione T_+ .
- Registrazione dell'oscillazione in opposizione di fase e determinazione del suo periodo di oscillazione T_- .
- Registrazione di un'oscillazione accoppiata e determinazione del suo periodo di oscillazione T come pure del periodo di fluttuazione T_Δ .
- Confronto dei valori misurati con i valori calcolati dai periodi di oscillazione propria T_+ e T_- .

SCOPO

Registrazione e analisi delle oscillazioni di due pendoli uguali accoppiati

RIASSUNTO

L'oscillazione di due pendoli uguali accoppiati è caratterizzata dal periodo di oscillazione e dal periodo di fluttuazione. A questo proposito, il periodo di fluttuazione è l'intervallo di tempo tra i due momenti in cui un pendolo oscilla di volta in volta con l'ampiezza minima. Entrambe le grandezze possono essere calcolate sulla base dei due periodi di oscillazione propria per l'oscillazione in fase e in opposizione di fase dei pendoli accoppiati.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
2	Pendolo ad asta con rivelatore d'angolo (230 V, 50/60 Hz)	1000763
	Pendolo ad asta con rivelatore d'angolo (115 V, 50/60 Hz)	1000762
1	Molle ad elica 3,0 N/m	1002945
2	Morsetto da tavolo	1002832
2	Asta di supporto, 1000 mm	1002936
1	Asta di supporto, 470 mm	1002934
4	Manicotto universale	1002830
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544

BASI GENERALI

Durante l'oscillazione di due pendoli accoppiati, l'energia di oscillazione viene trasferita alternativamente tra l'uno e l'altro. Se entrambi i pendoli sono uguali e se le loro oscillazioni vengono generate in modo che all'inizio un pendolo si trovi in posizione di riposo, mentre l'altro oscilla, il trasferimento di energia avviene addirittura completamente. Ciò significa che un pendolo si arre-

sta completamente, mentre l'altro oscilla con la massima ampiezza. Il tempo tra due arresti di un pendolo o, più in generale, tra due momenti in cui il pendolo oscilla con l'ampiezza minima viene definito periodo di fluttuazione T_Δ .

Le oscillazioni di due pendoli uguali accoppiati può essere descritta matematicamente come sovrapposizione di due oscillazioni proprie. Queste oscillazioni proprie sono osservabili se i due pendoli vengono sollecitati ad eseguire oscillazioni in fase o in opposizione di fase. Nel primo caso, i pendoli oscillano senza influire l'uno sull'altro, alla frequenza dei pendoli non accoppiati, mentre nel secondo caso oscillano sotto la massima influenza dell'accoppiamento alla massima frequenza propria. Tutte le altre oscillazioni possono essere rappresentate come sovrapposizioni di queste due oscillazioni proprie.

Le equazioni del moto dei pendoli hanno la forma:

$$(1) \quad \begin{aligned} L \cdot \varphi_1 + g \cdot \varphi_1 + k \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) &= 0 \\ L \cdot \varphi_2 + g \cdot \varphi_2 + k \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) &= 0 \end{aligned}$$

g : Accelerazione di caduta, L : Lunghezza del pendolo, k : Costante di accoppiamento

Scegliendo di introdurre le grandezze ausiliarie $\varphi_- = \varphi_1 - \varphi_2$ e $\varphi_+ = \varphi_1 + \varphi_2$ si ottengono quindi le equazioni del moto:

$$(2) \quad \begin{aligned} L \cdot \varphi_+ + g \cdot \varphi_+ &= 0 \\ L \cdot \varphi_- + (g + 2k) \cdot \varphi_- &= 0 \end{aligned}$$

Le cui soluzioni

$$(3) \quad \begin{aligned} \varphi_+ &= a_+ \cdot \cos(\omega_+ t) + b_+ \cdot \sin(\omega_+ t) \\ \varphi_- &= a_- \cdot \cos(\omega_- t) + b_- \cdot \sin(\omega_- t) \end{aligned}$$

con le frequenze angolari

$$(4) \quad \begin{aligned} \omega_+ &= \sqrt{\frac{g}{L}} \\ \omega_- &= \sqrt{\frac{g + 2k}{L}} \end{aligned}$$

corrispondono alle oscillazioni proprie descritte per l'eccitazione in fase o in opposizione di fase (ossia $\varphi_- = 0$ per l'oscillazione in opposizione di fase e $\varphi_+ = 0$ per l'oscillazione in fase).

Le deviazioni dei pendoli possono essere calcolate sulla base della somma o della differenza delle due grandezze ausiliarie e si ottiene la soluzione

$$(5) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{2} \cdot (a_+ \cdot \cos(\omega_+ t) + b_+ \cdot \sin(\omega_+ t) + a_- \cdot \cos(\omega_- t) + b_- \cdot \sin(\omega_- t)) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{2} \cdot (a_+ \cdot \cos(\omega_+ t) + b_+ \cdot \sin(\omega_+ t) - a_- \cdot \cos(\omega_- t) - b_- \cdot \sin(\omega_- t)) \end{aligned}$$

A questo proposito, i parametri a_+ , a_- , b_+ e b_- sono inizialmente grandezze a piacere che possono essere calcolate sulla base dello stato di oscillazione dei due pendoli al momento $t = 0$.

Più facile da interpretare è il seguente caso che viene generato quando il pendolo 1 al momento 0 dalla posizione di origine ha una deviazione angolare iniziale ψ_0 , mentre il pendolo 2 è a riposo nella posizione di origine.

$$(6) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\psi_0}{\omega_+} \cdot \sin(\omega_+ t) + \frac{\psi_0}{\omega_-} \cdot \sin(\omega_- t) \right) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\psi_0}{\omega_+} \cdot \sin(\omega_+ t) - \frac{\psi_0}{\omega_-} \cdot \sin(\omega_- t) \right) \end{aligned}$$

Per gli spostamenti dei due pendoli vale dunque quanto segue:

$$(7) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{\psi_0}{2} \cdot (\cos(\omega_+ t) + \cos(\omega_- t)) \\ \varphi_2 &= \frac{\psi_0}{2} \cdot (\cos(\omega_+ t) - \cos(\omega_- t)) \end{aligned}$$

Dopo la conversione matematica si ottiene

$$(8) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \psi_0 \cdot \cos(\omega_\Delta t) \cdot \cos(\omega t) \\ \varphi_2 &= \psi_0 \cdot \sin(\omega_\Delta t) \cdot \cos(\omega t) \end{aligned} \quad \text{con (9) } \quad \begin{aligned} \omega_\Delta &= \frac{\omega_- - \omega_+}{2} \\ \omega &= \frac{\omega_+ + \omega_-}{2} \end{aligned}$$

Questo corrisponde ad un'oscillazione dei due pendoli alla stessa frequenza angolare ω , in cui le ampiezze di oscillazione φ_1 e φ_2 vengono modulate con frequenza angolare ω_Δ :

$$(10) \quad \begin{aligned} \psi_1(t) &= \psi_0 \cdot \cos(\omega_\Delta t) \\ \psi_2(t) &= \psi_0 \cdot \sin(\omega_\Delta t) \end{aligned}$$

ANALISI

Da (4) è possibile calcolare i periodi T_+ e T_- dell'oscillazione propria in fase e in opposizione di fase:

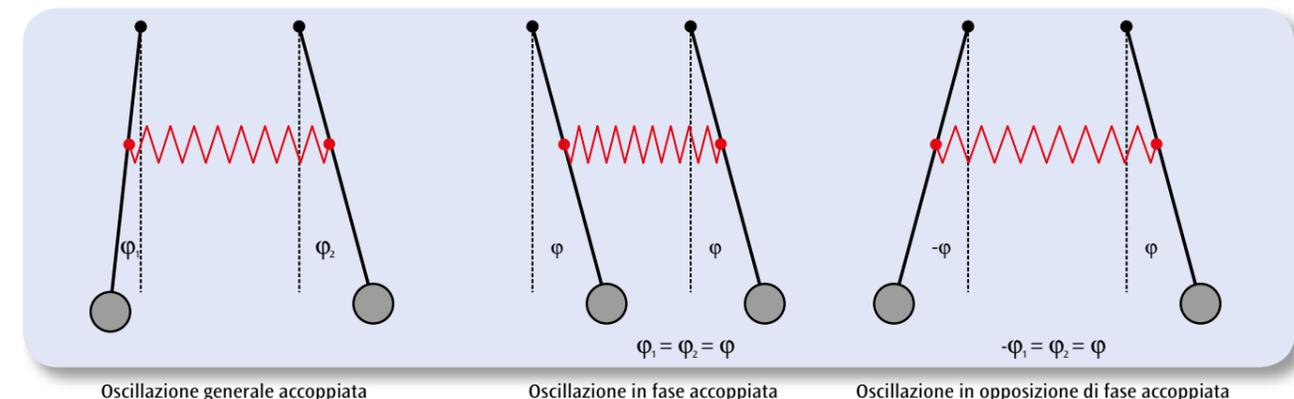
$$T_+ = \frac{2\pi}{\omega_+} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \text{e} \quad T_- = \frac{2\pi}{\omega_-} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g + 2k}}$$

Per il periodo T dell'oscillazione accoppiata vale secondo (9):

$$\frac{2\pi}{T} = \omega = \frac{\pi}{T_+} + \frac{\pi}{T_-} \quad \text{e quindi} \quad T = 2 \cdot \frac{T_+ \cdot T_-}{T_+ + T_-}$$

La modulazione dell'ampiezza descritta in (10) viene normalmente caratterizzata dal periodo di oscillazione T_Δ , vale a dire dal tempo tra due arresti dei pendoli:

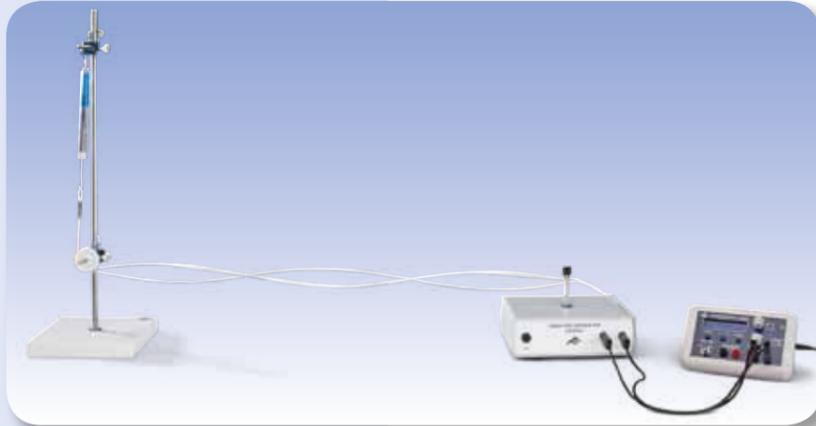
$$\frac{2\pi}{2T_\Delta} = \omega_\Delta = \frac{\pi}{T_-} - \frac{\pi}{T_+} \quad \text{e quindi} \quad T_\Delta = \frac{T_+ \cdot T_-}{T_+ - T_-}$$



Oscillazione generale accoppiata

Oscillazione in fase accoppiata

Oscillazione in opposizione di fase accoppiata



FUNZIONI

- Generazione di onde stazionarie longitudinali su una molla a elica e di onde stazionarie trasversali su una corda.
- Misurazione delle frequenze proprie f_n in funzione del numero n di nodi.
- Determinazione delle rispettive lunghezze d'onda λ_n e della velocità d'onda c .

SCOPO

Analisi di onde stazionarie su una molla a elica e una corda tese

RIASSUNTO

Le onde meccaniche si presentano in questi esempi su una molla a elica tesa sotto forma di onde longitudinali e su una corda tesa sotto forma di onde trasversali. In entrambi i casi, fissando saldamente un'estremità del mezzo portante, si generano onde stazionarie, poiché l'onda incidente si sovrappone all'onda riflessa sull'estremità fissa con la medesima ampiezza e la medesima lunghezza d'onda. Fissando anche l'altra estremità, le onde possono propagarsi solo se vengono soddisfatte le condizioni di risonanza. Nell'esperimento, la molla a elica e la corda vengono fissate a un'estremità. Alla distanza L , l'altra estremità è collegata con un generatore di vibrazioni, azionato tramite un generatore di funzione per oscillazioni di piccola ampiezza e frequenza regolabile f . Anche questa estremità può essere approssimativamente considerata fissa. Si misurano le frequenze proprie in funzione del numero di nodi delle onde stazionarie. Sulla base di questi dati si calcola la velocità dell'onda.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Accessorio per oscillazioni di molle	1000703
1	Accessorio per onde di una corda	1008540
1	Generatore di vibrazioni	1000701
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957 o
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Dinamometro di precisione 2 N	1003105
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75 cm, rosso/blu	1017718

BASI GENERALI

Le onde meccaniche si presentano in questi esempi su una molla a elica e su una corda tesa. Nel caso della molla a elica si parla di onde longitudinali, in quanto la deviazione avviene parallelamente alla direzione di propagazione. Le onde della corda sono invece onde trasversali. In entrambi i casi, fissando saldamente un'estremità del mezzo portante, si generano onde stazionarie, poiché l'onda incidente si sovrappone all'onda riflessa sull'estremità fissa con la medesima

ampiezza e la medesima lunghezza d'onda. Fissando anche l'altra estremità, le onde possono propagarsi solo se vengono soddisfatte le condizioni di risonanza.

Sia $\xi(x,t)$ la deviazione longitudinale o trasversale nel punto x lungo il mezzo portante al tempo t . Allora

$$(1) \quad \xi_1(x,t) = \xi_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

Sarà un'onda sinusoidale che viaggia sul mezzo portante verso destra. La frequenza f e la lunghezza d'onda λ sono legate dalla relazione

$$(2) \quad c = f \cdot \lambda$$

c : velocità dell'onda.

Se quest'onda proveniente da sinistra viene riflessa su un'estremità fissa a $x = 0$, si genera un'onda che viaggia verso sinistra

$$(3) \quad \xi_2(x,t) = -\xi_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

Entrambe le onde si sovrappongono generando l'onda stazionaria

$$(4) \quad \xi(x,t) = 2\xi_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \sin(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

Tali sovrapposizioni valgono in maniera totalmente indipendente dal tipo di onda e dal mezzo portante.

Qualora anche la seconda estremità sia fissata e si trovi a $x = L$, occorre che per tutti i tempi t la condizione di risonanza

$$(5) \quad \xi(L,t) = 0 = \sin(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L)$$

risulti soddisfatta. Ne consegue quindi per la lunghezza d'onda che

$$(6a) \quad \frac{2\pi}{\lambda_n} \cdot L = (n+1) \cdot \pi \quad \text{bzw.} \quad \lambda_n = 2 \cdot \frac{L}{n+1}$$

oppure $L = (n+1) \cdot \frac{\lambda_n}{2}$

e per la frequenza che, in base all'equazione (2),

$$(6b) \quad f_n = (n+1) \cdot \frac{c}{2 \cdot L}$$

In altre parole, la condizione di risonanza (5) richiede che la lunghezza L sia esattamente un multiplo intero della metà della lunghezza d'onda. La frequenza di risonanza deve essere adeguata a questa lunghezza d'onda. n è in questo caso il numero dei nodi di oscillazione. Se nella prima armonica si forma solo un ventre di oscillazione, esso è uguale a zero (v. Fig. 2). Nell'esperimento, il mezzo portante – costituito da una corda o una molla a elica – è fissato a un'estremità. L'altra estremità è collegata alla distanza L con un generatore di vibrazioni, azionato tramite un generatore di funzione per oscillazioni di piccola ampiezza e frequenza regolabile f . Anche questa estremità può essere approssimativamente considerata fissa.

ANALISI

Rapportando la frequenza di risonanza con il numero dei nodi di oscillazione, i punti di misura sono su una retta con pendenza

$$\alpha = \frac{c}{2 \cdot L}$$

Nota la lunghezza d'onda L si ricava la velocità dell'onda c . Essa dipende, a parametri altrimenti identici, dalla tensione F , come dimostra la Fig. 5 per le onde di una corda.

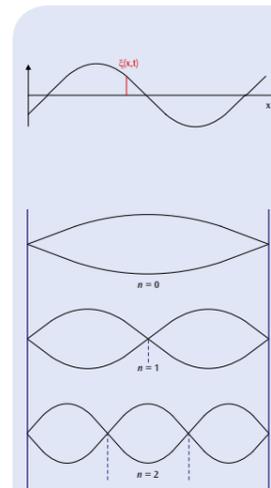


Fig. 1: Rappresentazione per la definizione della deviazione locale $x(x,t)$

Fig. 2: Onde stazionarie

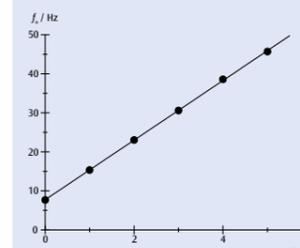


Fig. 3: Frequenza di risonanza in funzione del numero di nodi per le onde della molla a elica

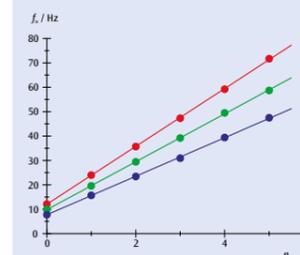


Fig. 4: Frequenza di risonanza in funzione del numero di nodi per le onde della corda

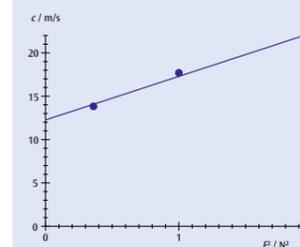
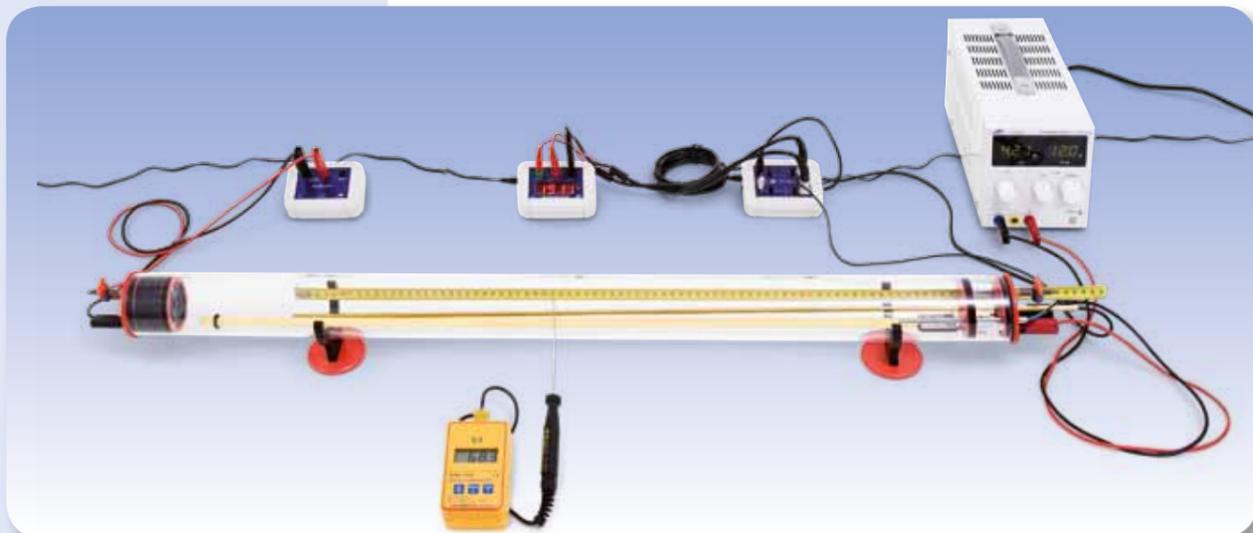


Fig. 5: Velocità c delle onde di una corda in funzione di F^2



FUNZIONI

- Misurazione del tempo di propagazione t di un impulso sonoro nell'aria a temperatura ambiente in funzione della distanza s tra due sonde microfono.
- Conferma della relazione lineare tra s e t .
- Misurazione del tempo di propagazione t di un impulso sonoro nell'aria in funzione della temperatura T ad una distanza fissa tra due sonde microfono.
- Determinazione della velocità del suono (velocità di gruppo) in funzione della temperatura.
- Confronto con il risultato della deduzione di Laplace.

SCOPO

Misurazione dei tempi di propagazione degli impulsi sonori in un tubo di Kundt

RIASSUNTO

Le onde sonore si diffondono nei gas come onde longitudinali. La velocità di gruppo coincide con la velocità di fase. Nell'esperimento si misura in un tubo di Kundt il tempo di propagazione di un impulso sonoro tra due sonde microfono e si calcola la risultante velocità del suono. Tra la temperatura ambiente e i 50°C si controlla la dipendenza dalla temperatura della velocità del suono. Il risultato della misurazione coincide con il risultato della deduzione di Laplace.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di Kundt E	1017339
1	Scatola impulsi K	1017341
1	Sonda microfono, lunga	1017342
1	Sonda microfono, corta	4008308
1	Scatola microfono (230 V, 50/60 Hz)	1014520 o
	Scatola microfono (115 V, 50/60 Hz)	1014521
1	Contatore di microsecondi (230 V, 50/60 Hz)	1017333 o
	Contatore di microsecondi (115 V, 50/60 Hz)	1017334
1	Barra calda K	1017340
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Termometro tascabile digitale rapido	1002803
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002849

Ulteriormente consigliato

altri gas tecnici

1

BASI GENERALI

Le onde sonore sono onde elastiche in un mezzo deformabile. La loro velocità dipende dalle caratteristiche di elasticità del mezzo. In gas semplici si diffondono esclusivamente come onde longitudinali e la velocità di gruppo coincide con la velocità di fase.

Seguendo una deduzione storicamente attribuita a Laplace, le onde sonore nei gas vengono considerate come variazioni di pressione e/o di densità adiabatiche. Per la velocità del suono si ottiene

$$(1) \quad c = \sqrt{\frac{C_p \cdot p}{C_v \cdot \rho}}$$

p : Pressione, ρ : Densità,
 C_p, C_v : Capacità termiche del gas

Per un gas ideale a temperatura assoluta T risulta

$$(2) \quad \frac{p}{\rho} = \frac{R \cdot T}{M}$$

$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{Mol} \cdot \text{K}}$: costante universale dei gas,

M : massa molare

Pertanto, la velocità del suono è data da

$$(3) \quad c = \sqrt{\frac{C_p \cdot R \cdot T}{C_v \cdot M}}$$

Per differenze di temperatura non troppo grandi ΔT rispetto ad una temperatura di riferimento T_0 , la velocità del suono dipende linearmente dalla variazione di temperatura ΔT :

$$(4) \quad c = \sqrt{\frac{C_p \cdot R \cdot T_0}{C_v \cdot M}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{2 \cdot T_0}\right)$$

Per l'aria secca considerata come gas ideale si trova in letteratura il seguente dato sulla velocità del suono:

$$(5) \quad c(T) = \left(331,3 + 0,6 \cdot \frac{\Delta T}{\text{K}}\right) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$$

Nell'esperimento si misura in un tubo di Kundt il tempo di propagazione t di un impulso sonoro tra due sonde microfono con distanza s . L'impulso sonoro è generato dal movimento brusco di una membrana dell'altoparlante comandato da un impulso di tensione a salita rapida. La misurazione ad alta risoluzione del tempo di propagazione con un contatore di microsecondi inizia quando l'impulso sonoro raggiunge la prima sonda microfono e si arresta quando si raggiunge la seconda sonda microfono alla distanza s . Con una barra calda, l'aria viene riscaldata nel tubo di Kundt per le misurazioni del tempo di propagazione in funzione della temperatura fino a 50°C. Durante il raffreddamento, la distribuzione della temperatura è sufficientemente omogenea, pertanto è sufficiente misurare la temperatura in un punto del tubo di Kundt.

Tramite un nipplo per tubi è possibile introdurre anche altri gas tecnici nel tubo di Kundt.

ANALISI

La velocità del suono si calcola dal quoziente del tratto percorso s e del tempo di propagazione t :

$$c = \frac{s}{t}$$

Nella Fig. 2 si osserva il reciproco dell'incremento lineare.

La dipendenza dalla temperatura della velocità del suono viene descritta dall'equazione 3 con i parametri

$$M = 28,97 \frac{\text{g}}{\text{Mol}}, \quad \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5}$$

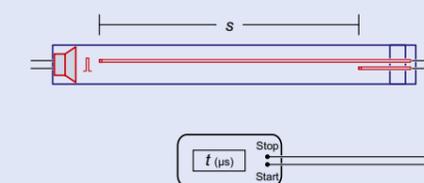


Fig. 1: Rappresentazione schematica della struttura sperimentale

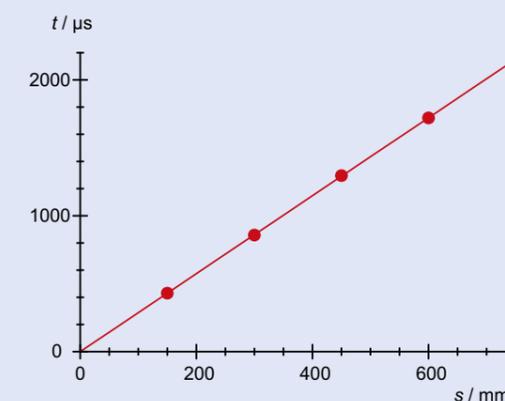


Fig. 2: Tempo di propagazione del suono t nell'aria in funzione del tratto percorso s a temperatura ambiente

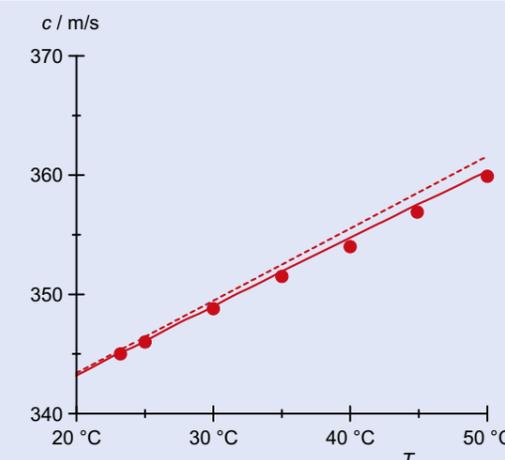
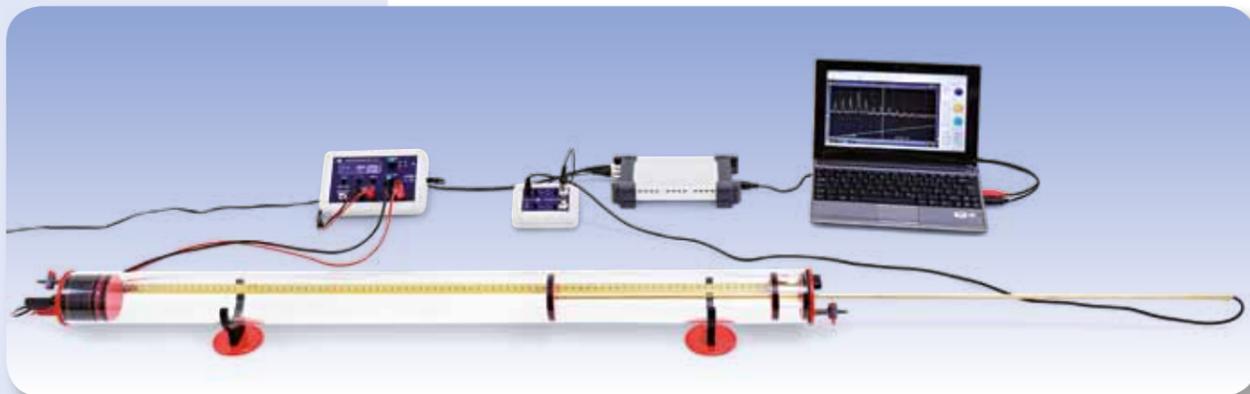


Fig. 3: Velocità del suono c nell'aria in funzione della temperatura T
Linea tracciata: secondo equazione 3
Linea tratteggiata: secondo equazione 5



FUNZIONI

- Generazione di onde sonore stazionarie in un tubo di Kundt s presso entrambe le estremità.
- Misurazione della frequenza fondamentale in funzione della lunghezza del tubo di Kundt.
- Misurazione della frequenza fondamentale e delle armoniche con lunghezza fissa.
- Determinazione della velocità dell'onda dalle frequenze di risonanza.

SCOPO

Generazione e misurazione di onde sonore stazionarie in un tubo di Kundt

RIASSUNTO

Le onde sonore si diffondono nei gas come onde longitudinali. La velocità di gruppo coincide con la velocità di fase. Nell'esperimento vengono generate onde stazionarie in un tubo di Kundt chiuso a entrambe le estremità e misurate la frequenza fondamentale in funzione della lunghezza del tubo nonché le frequenze fondamentale e dell'armonica con lunghezza fissa del tubo. La velocità dell'onda viene ricavata dalle frequenze di risonanza e rappresentata graficamente.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di Kundt E	1017339
1	Sonda microfono, lunga	1017342
1	Scatola microfono (115 V, 50/60 Hz)	1014521 o
1	Scatola microfono (230 V, 50/60 Hz)	1014520
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957 o
1	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002849
1	Cavo ad alta frequenza	1002746

BASI GENERALI

Il tubo di Kundt consente di generare onde stazionarie producendo con l'ausilio di un altoparlante presso un'estremità del tubo onde sonore aventi frequenza corrispondente a quella di risonanza, e che si riflettono all'altra estremità su una parete. Nota la lunghezza del tubo, dalla frequenza di risonanza e delle armoniche è possibile determinare la velocità d'onda.

Le onde sonore si propagano nell'aria e in altri gas come rapide variazioni di pressione e densità. Il modo più semplice per descriverle è mediante la pressione sonora, sovrapposta alla pressione atmo-

sferica. Le onde sonore si propagano nell'aria e in altri gas come rapide variazioni di pressione e densità. Il modo più semplice per descriverle è mediante la pressione sonora, sovrapposta alla pressione atmosferica. Per descrivere un'onda sonora, in alternativa alla pressione sonora p , è possibile utilizzare anche la velocità v , cioè la velocità media delle particelle nel luogo x nel mezzo oscillante al momento t . Pressione sonora e velocità sono legate ad es. dall'equazione di moto di Eulero

$$(1) \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$

ρ_0 : densità del gas.

All'interno del tubo di Kundt, le onde sonore si propagano lungo il tubo stesso. Esse possono pertanto essere descritte per mezzo di un'equazione d'onda unidimensionale valida sia per la pressione sonora sia per la velocità:

$$(2) \quad \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2}$$

ovvero

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2}$$

c : velocità del suono

Nell'esperimento si osservano onde armoniche riflesse all'estremità del tubo di Kundt. Come soluzioni dell'equazione d'onda vanno dunque considerate le sovrapposizioni di onde di andata e di ritorno:

$$(3) \quad p = p_{0>} \cdot e^{2\pi i \left(f t - \frac{x}{\lambda} \right)} + p_{0<} \cdot e^{2\pi i \left(f t + \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$p_{0>}$, $v_{0>}$: ampiezze delle onde di andata,

$p_{0<}$, $v_{0<}$: ampiezze delle onde di ritorno

f : frequenza, λ : lunghezza d'onda,

Dove

$$(4) \quad f \cdot \lambda = c$$

Applicando tali soluzioni nell'equazione (1) si ottiene, osservando separatamente onda di andata e onda di ritorno, la relazione

$$(5) \quad p_{0>} = v_{0>} \cdot Z \quad \text{ovvero} \quad p_{0<} = v_{0<} \cdot Z$$

La grandezza

$$(6) \quad Z = c \cdot \rho_0$$

si chiama impedenza caratteristica e corrisponde all'impedenza d'onda del mezzo. Svolge un ruolo importante nell'osservazione delle riflessioni di un'onda sonora su una parete con impedenza specifica W :

Vale

$$(7) \quad r_v = \frac{v_{0<}}{v_{0>}} = \frac{Z - W}{Z + W} \quad \text{e} \quad r_p = \frac{p_{0<}}{p_{0>}} = \frac{Z + W}{Z - W}$$

Nell'esperimento, W è notevolmente maggiore di Z e pertanto $r_v = 1$ e

$r_p = -1$.

Per semplificare, immaginando la parete a $x = 0$, da (3) ne deriva per la parte spaziale dell'onda sonora:

$$(8) \quad p = p_{0>} \cdot \left(e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} + e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

$$= 2 \cdot p_{0>} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

e

$$v = v_{0>} \cdot \left(e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} - e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

$$= -2 \cdot i \cdot v_{0>} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

Solo le componenti reali di questi termini hanno realtà fisica. Esse coincidono con le onde sonore stazionarie, la cui pressione sonora sulla parete (quindi a $x = 0$) mostra un ventre, mentre la velocità del suono un nodo di

oscillazione. Inoltre la velocità anticipa la pressione di uno spostamento di fase pari a 90° .

Le onde sonore vengono generate alla distanza L dalla parete con l'ausilio di un altoparlante che oscilla con frequenza f . Anche in questo caso si formano un ventre di oscillazione per la pressione e un nodo per la velocità del suono. Queste condizioni al contorno sono realizzabili solo se L è un multiplo intero di mezza lunghezza d'onda:

$$(9) \quad L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}$$

Per via di (3), le frequenze devono pertanto corrispondere alla condizione di risonanza

$$(10) \quad f_n = n \cdot \frac{c}{2 \cdot L}$$

Nell'esperimento la frequenza f dell'altoparlante viene continuamente variata, mentre un microfono sonda misura la pressione sonora sulla parete di riflessione. La risonanza si considera raggiunta quando il segnale del microfono indica la massima ampiezza.

ANALISI

In base a (9) fanno parte delle frequenze di risonanza rilevate f_n le lunghezze d'onda

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$$

A conferma di (3) e ai fini della determinazione della velocità d'onda, questi valori vengono rappresentati in un diagramma $f \cdot \lambda$.

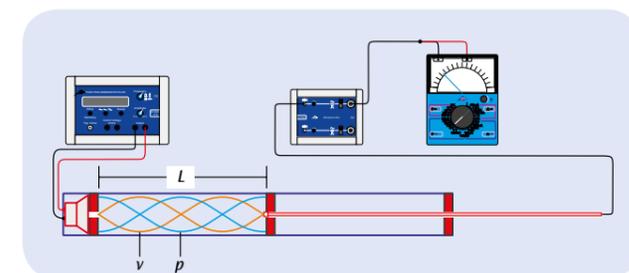


Fig. 1: Rappresentazione schematica della struttura sperimentale

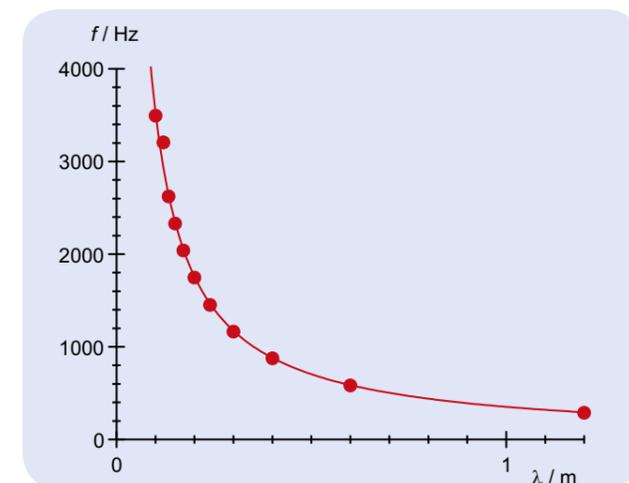
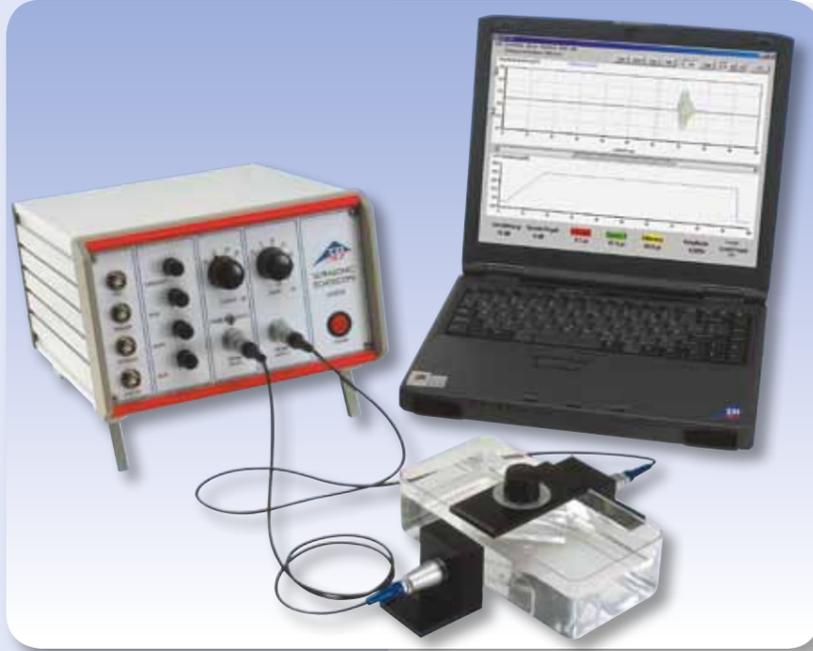


Fig. 2: Diagramma frequenza-lunghezza d'onda


SCOPO

Determinazione della velocità del suono per onde longitudinali e trasversali in corpi solidi

RIASSUNTO

Il suono si propaga nei corpi solidi sotto forma di onde longitudinali e trasversali. Le velocità del suono delle due onde sono molto diverse, in quanto la velocità del suono longitudinale è determinata dal modulo di elasticità del corpo solido, mentre la velocità del suono trasversale dipende dal modulo di taglio. Misurando le due velocità del suono, si possono determinare le costanti elastiche del corpo solido.

FUNZIONI

- Determinazione della velocità del suono per onde longitudinali in poliacrilico dai tempi di propagazione di un segnale a ultrasuoni da 1 MHz.
- Misurazione della trasmissione di onde sonore longitudinali e trasversali nel corpo solido mediante una piastra pianparallela, disposta inclinata.
- Determinazione delle velocità del suono per onde longitudinali e trasversali dagli angoli limite di riflessione totale.
- Determinazione del modulo di elasticità E , del modulo di taglio G e del numero di Poisson μ del corpo solido dalle due velocità del suono.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Ecoscopio ad ultrasuoni	1002580
2	Sonda ad ultrasuoni 1 MHz	1002581
1	Kit "Ultrasuoni in corpi solidi"	1002584
1	Piastra in alluminio su supporto campione con scala angolare	1002585
1	Kit 3 cilindri	1002588
1	Gel accoppiante per ultrasuoni	1008575

BASI GENERALI

Il suono si propaga nei gas e nei liquidi esclusivamente sotto forma di onde longitudinali. In questo caso la pressione oscilla intorno a un valore di equilibrio e crea aree alternativamente compresse ed espanse. Il suono attraversa i corpi solidi anche sotto forma di onde trasversali, in cui si verificano sollecitazioni di taglio. Queste si possono propagare in un corpo solido perché sono presenti le forze di taglio elastiche occorrenti alla trasmissione.

Le onde longitudinali e le onde trasversali hanno velocità diverse. Queste dipendono dalla densità ρ e dalle costanti elastiche del corpo solido. A questo proposito la velocità del suono dell'onda longitudinale è

$$(1) \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

E : Modulo di elasticità, μ : Numero di Poisson

maggiore di quella dell'onda trasversale

$$(2) \quad c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G : Modulo di taglio

2

Il modulo di elasticità E e il modulo di taglio G di un corpo solido sono correlati tra loro mediante il numero di Poisson μ :

$$(3) \quad \frac{E}{G} = 2 \cdot (1 + \mu)$$

Se sono note le due velocità del suono c_L e c_T è quindi possibile calcolare tutte le tre grandezze elastiche.

Nell'esperimento inizialmente si misurano i tempi di propagazione t per il passaggio di un segnale a ultrasuoni da 1 MHz attraverso tre cilindri di poliacrilico con lunghezza s differente e si traccia un diagramma $s-t$ (vedi fig. 1). Dalla pendenza delle rette passanti per i punti di misura risulta la velocità del suono longitudinale del poliacrilico.

In seguito nel percorso dei raggi viene collocato un catino riempito d'acqua e misurato il tempo di attraversamento. Introducendo ulteriormente una piastra sottile pianparallela di poliacrilico o di alluminio nel percorso dei raggi quest'ultimo tempo viene ulteriormente ridotto, in quanto il suono si propaga più rapidamente nel materiale della piastra che nell'acqua. Più precisamente, ora si misurano dietro il catino d'acqua due segnali a ultrasuoni separati, che possono essere ricondotti alla differenza del tempo di propagazione per la velocità del suono longitudinale e trasversale nel corpo solido (vedi fig. 2).

Se la piastra è inclinata di un angolo α rispetto al raggio incidente, secondo la legge di Snellius quest'ultimo viene rifratto in due raggi parziali con gli angoli β_L e β_T (vedi fig. 3)

$$(4) \quad \frac{c}{\sin \alpha} = \frac{c_L}{\sin \beta_L} = \frac{c_T}{\sin \beta_T}$$

c : Velocità del suono nell'acqua

Dal momento che le due velocità del suono c_L e c_T del corpo solido sono superiori alla velocità del suono c dell'acqua, compare infine - separatamente per onde longitudinali e trasversali - il fenomeno della riflessione totale, nel quale i segnali trasmessi scompaiono completamente. Dai due angoli limite α_L per le onde longitudinali e α_T per le onde trasversali si possono calcolare le relative velocità del suono:

$$(5) \quad c_L = \frac{c}{\sin \alpha_L} \quad \text{e} \quad c_T = \frac{c}{\sin \alpha_T}$$

ANALISI

a) I punti di misura ottenuti nella prima parte dalle misurazioni del tempo di propagazione nel diagramma $s-t$ non sono su una retta passante per l'origine, in quanto viene misurato insieme in modo sistematico anche il tempo di propagazione del segnale attraverso lo strato di adattamento e di protezione del trasduttore a ultrasuoni.

b) Dalle equazioni da 1 a 3 risulta l'equazione condizionale per il numero di Poisson μ

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{c_L}{c_T} \right)^2 - 1}{\left(\frac{c_L}{c_T} \right)^2 - 1}$$

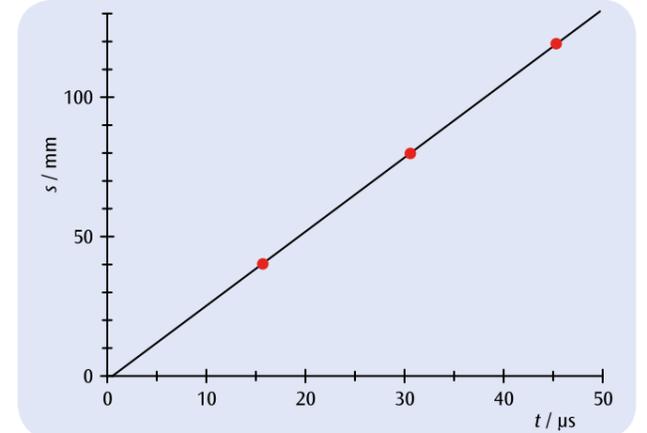


Fig. 1: Diagramma $s-t$ del segnale a ultrasuoni nel poliacrilico

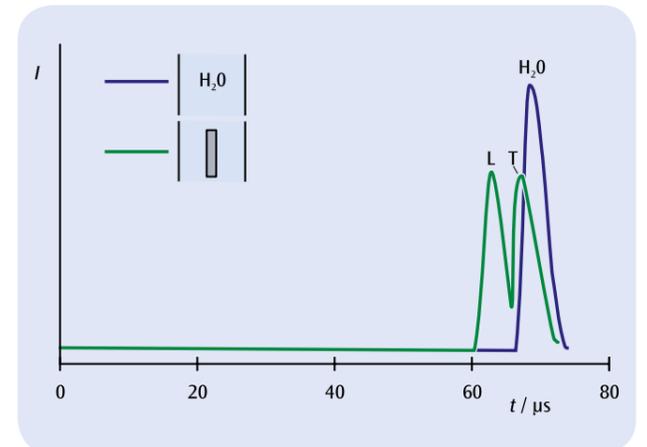


Fig. 2: Segnale a ultrasuoni dopo il passaggio attraverso il catino d'acqua (blu: senza piastra pianparallela, verde: con piastra pianparallela)

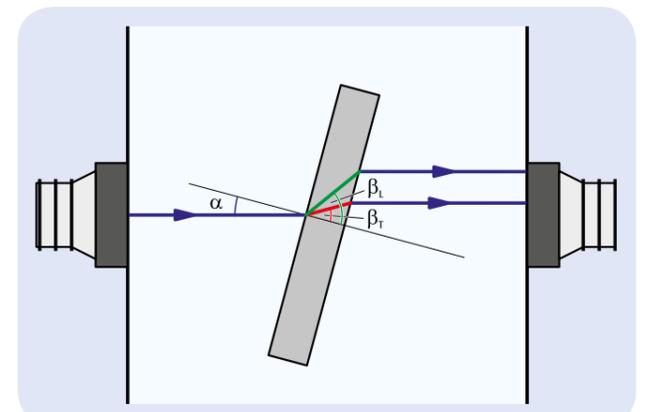


Fig. 3: Disposizione di misurazione per la determinazione della velocità del suono longitudinale e trasversale di un corpo solido dagli angoli limite della riflessione totale



FUNZIONI

- Osservazione della figura di diffrazione in presenza di una frequenza degli ultrasuoni fissa per due diverse lunghezze di onda luminosa.
- Osservazione della figura di diffrazione per diverse frequenze di ultrasuoni tra 1 e 12 MHz.
- Determinazione delle rispettive lunghezze d'onda e della velocità del suono.

SCOPO

Determinazione della velocità delle onde ultrasonore nei liquidi

RIASSUNTO

Le variazioni periodiche di densità di un'onda ultrasonora stazionaria all'interno di un liquido vengono utilizzate come reticolo ottico per la diffrazione di un raggio luminoso parallelo monocromatico che si propaga perpendicolarmente all'onda ultrasonora. Sulla base della figura di diffrazione, con la lunghezza dell'onda luminosa nota è possibile determinare la lunghezza dell'onda sonora nel liquido e utilizzarla per il calcolo della velocità del suono.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Generatore ultrasuoni cw con sonda	1002576
1	Recipiente campione completo	1002578
1	Diodo laser per l'effetto Debye-Sears, rosso	1002577
1	Diodo laser per l'effetto Debye-Sears, verde	1002579
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603
1	Gel accoppiante per ultrasuoni	1008575

3

BASI GENERALI

La diffrazione della luce nelle onde ultrasonore nei liquidi fu intuuta da Brillouin nel 1922 e confermata in modo sperimentale da Debye e Sears nonché da Lucas e Biquard nel 1932. Si basa sulla variazione periodica dell'indice di rifrazione nei liquidi che viene provocata da un'onda ultrasonora.

Su un'onda luminosa che penetra in un liquido in senso perpendicolare, questa disposizione agisce come reticolo di fase che si sposta alla velocità del suono. La sua costante reticolare corrisponde alla lunghezza d'onda delle onde ultrasonore e pertanto dipende dalla frequenza e dalla velocità del suono del mezzo irradiato. All'osservazione su uno schermo molto lontano il moto del reticolo di fase è trascurabile.

Nell'esperimento, un trasduttore orientato verticalmente accoppia onde ultrasonore con frequenze comprese tra 1 e 12 MHz nel liquido di prova. Un fascio luminoso monocromatico parallelo attraversa il liquido in direzione orizzontale e viene diffratto in corrispondenza del reticolo di fase. La figura di diffrazione contiene numerosi massimi di diffrazione disposti a distanza regolare.

Per l'angolo α_k del massimo di diffrazione del k -esimo ordine vale

$$(1) \quad \tan \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda_S}$$

λ_L : Lunghezza dell'onda luminosa, λ_S : Lunghezza dell'onda sonora

Pertanto la lunghezza dell'onda sonora λ_S può essere determinata dalla distanza tra i massimi di diffrazione. Inoltre, in base a

$$(2) \quad c = f \cdot \lambda_S$$

è possibile calcolare la velocità del suono c nel liquido, dal momento che anche la frequenza f dell'onda sonora è nota.

ANALISI

Viene misurata la distanza s tra il trasduttore a ultrasuoni e l'immagine di diffrazione, nonché la distanza x_{2k} tra i massimi di diffrazione $-k$ e $+k$. Entrambi i valori sono considerati nel calcolo dell'angolo α_k per il massimo di diffrazione del k -esimo ordine.

$$\tan \alpha_k = \frac{x_{2k}}{2 \cdot s}$$

L'equazione condizionale per la lunghezza dell'onda sonora λ_S è quindi

$$\lambda_S = \frac{2 \cdot k \cdot s}{x_{2k}} \cdot \lambda_L$$

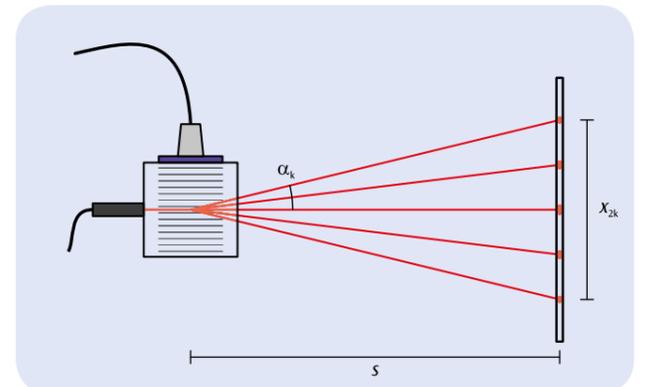


Fig. 1: Rappresentazione schematica della diffrazione della luce in un reticolo di fase prodotto da onde sonore in un liquido (effetto Debye-Sears)

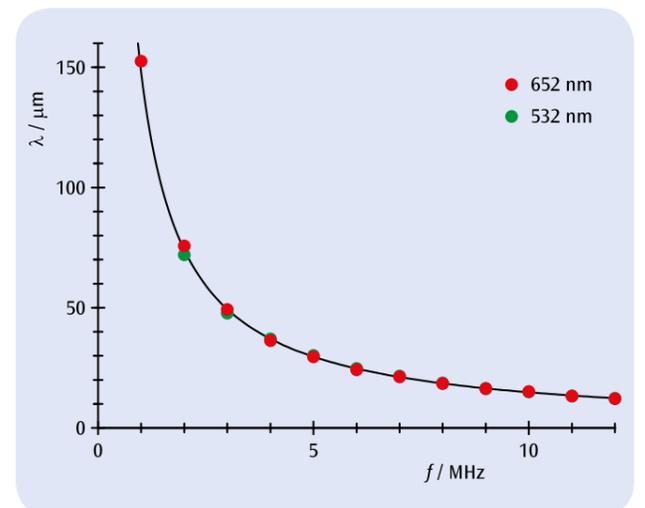


Fig. 2: Lunghezza dell'onda sonora λ_S nell'acqua in funzione della frequenza f



FUNZIONI

- Misurazione dei tempi di caduta di una sfera in una soluzione acquosa di glicerina in funzione della temperatura.
- Determinazione della viscosità dinamica e confronto con i dati di letteratura.
- Confronto della dipendenza dalla temperatura della viscosità dinamica con la relazione di Arrhenius-Andrade e determinazione dell'energia di attivazione.

SCOPO

Determinazione della viscosità dinamica di una soluzione acquosa di glicerina

RIASSUNTO

La viscosità dinamica è il fattore di proporzionalità che lega il gradiente di velocità allo sforzo di taglio applicato a un elemento fluido e rappresenta la resistenza allo scorrimento del fluido stesso. Per misurarla si può utilizzare un viscosimetro a sfera cadente, noto come viscosimetro di Höppler. Abbinato a un termostato a circolazione, esso consente anche di effettuare misurazioni in funzione della temperatura. Nell'esperimento, tali misurazioni avvengono in una soluzione acquosa di glicerina. La dipendenza dalla temperatura della viscosità viene descritta per mezzo della relazione di Arrhenius-Andrade.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Viscosimetro a sfera	1012827
1	Cronometro digitale	1002811
1	Termostato a circolazione/immersione (230 V; 50/60 Hz)	1008654 o
	Termostato a circolazione/immersione (115 V; 50/60 Hz)	1008653
2	Tubo di silicone 6 mm	1002622
1	Glicerina, 85 %, 250 ml	1007027
1	Imbuto	1003568
Ulteriormente consigliato:		
1	Set di 10 becher, forma bassa	1002872
2	Cilindro graduato, 100 ml	1002870
	Acqua distillata, 5 l	

2

BASI GENERALI

La viscosità di un fluido è riconducibile al legame reciproco fra le sue particelle. Più il legame è forte, più la mobilità delle particelle risulta ridotta. Affinché si manifesti un gradiente di velocità in un profilo di flusso, occorre pertanto la presenza di uno sforzo di taglio. Il fattore di proporzionalità fra il gradiente di velocità e lo sforzo di taglio rappresenta la resistenza allo scorrimento di un fluido ed è chiamato viscosità dinamica. I fluidi la cui viscosità dinamica non dipende dallo sforzo di taglio sono detti newtoniani.

La viscosità dinamica η della maggior parte dei fluidi diminuisce con l'aumentare della temperatura. Tale diminuzione è spesso spiegabile con la relazione di Arrhenius-Andrade.

$$(1) \quad \eta = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{E_A}{R \cdot T}\right)$$

E_A : energia di attivazione delle particelle del fluido
 T : temperatura assoluta

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}: \text{costante universale dei gas}$$

Per misurare la viscosità dinamica si esamina di frequente il comportamento di una sfera che, sotto l'influsso della gravitazione, affonda nel fluido. La caduta della sfera è frenata dalla forza di attrito espressa dalla legge di Stokes

$$(2) \quad F_1 = \eta \cdot 6\pi \cdot r \cdot v$$

r : raggio della sfera.

La sfera affonda pertanto con una velocità costante v . L'influsso della forza di gravità è attenuato dalla spinta verso l'alto della sfera nel fluido:

$$(3) \quad F_2 = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot g$$

ρ_0 : densità della sfera
 ρ : densità del fluido esaminato
 g : accelerazione di caduta.

Dall'equilibrio tra le forze F_1 e F_2 risulta pertanto:

$$(4) \quad \eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot \frac{t}{s}$$

s : tratto di misura,

t : tempo di caduta per il tratto di misura individuato.

In realtà, l'equazione (2) descrive la forza di attrito sulla sfera solo nei casi in cui il diametro del tubo di misura riempito con il fluido di prova sia sostanzialmente maggiore rispetto al diametro della sfera. Ciò richiederebbe tuttavia una grande quantità di fluido di prova. Nella pratica, per misurare la viscosità si usa quindi un viscosimetro a sfera cadente, noto come viscosimetro di Höppler, con un tubo di misura inclinato rispetto alla verticale in cui la sfera rotola e scivola lungo la parete del tubo. L'equazione per la determinazione della viscosità dinamica è in questo caso

$$(5) \quad \eta = t \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot K$$

Il fattore di calibrazione K di ciascuna sfera fornita è indicato singolarmente dal produttore. Per evitare eventuali errori sistematici è possibile girare il tubo di misura e misurare il tempo di caduta anche nella fase di ritorno. Nell'esperimento è stata presa in esame glicerina comunemente reperibile in commercio, per l'esattezza si tratta di una soluzione acquosa con una percentuale di glicerina pari all'85% circa. L'utilizzo in forma diluita deriva

dal fatto che la glicerina pura presenta un grado di viscosità troppo elevato per molte applicazioni. La viscosità viene misurata in funzione della temperatura. A tale scopo, il viscosimetro a sfera cadente è collegato a un termostato a circolazione. Diluendo in maniera mirata la soluzione di glicerina con acqua distillata è altresì possibile esaminare la dipendenza dalla concentrazione della viscosità.

ANALISI

Un confronto della viscosità misurata con i dati di letteratura conferma i dati di calibrazione del produttore.

L'equazione (1) può essere riscritta nella forma

$$\ln \eta = \ln \eta_0 + E_A \cdot \frac{1}{R \cdot T}$$

Si rappresenta quindi graficamente $y = \ln \eta$ rapportato a $x = \frac{1}{R \cdot T}$ e si determina l'energia di attivazione E_A in base alla pendenza delle rette risultanti.

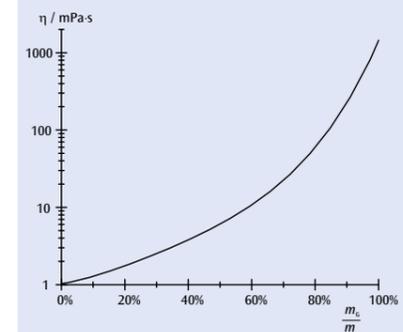


Fig. 1: Viscosità dinamica di una soluzione acquosa di glicerina a 20 °C in funzione della concentrazione in massa (dati di letteratura interpolati)

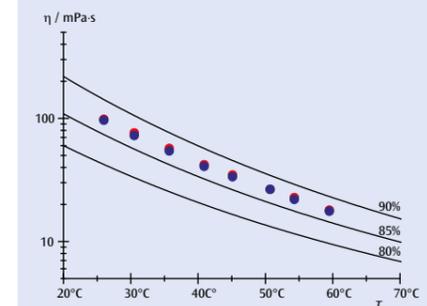


Fig. 2: Viscosità dinamica di una soluzione acquosa di glicerina in funzione della temperatura (confronto dei dati di misurazione e dei dati di letteratura interpolati)

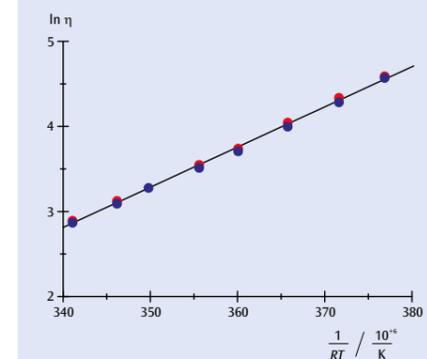


Fig. 3: Rappresentazione a conferma della relazione di Arrhenius-Andrade e per la definizione dell'energia di attivazione ($E_A = 47 \text{ kJ/mol}$)

SCOPO

Misurazione della tensione superficiale secondo il metodo del distacco

RIASSUNTO

Per la determinazione della tensione superficiale di un liquido, un tagliante viene immerso orizzontalmente nel liquido e lentamente sollevato verso l'alto, fuori dal liquido, misurando la forza di trazione. La lamina di liquido che si forma sul tagliante si distacca non appena viene superata una forza caratteristica. La tensione superficiale può essere calcolata sulla base di questa forza e della lunghezza del tagliante.

BASI GENERALI

La tensione superficiale di un liquido è una proprietà della superficie limite tra il liquido e l'aria limitrofa. Risulta dal fatto che su ogni molecola di liquido in superficie le forze della molecola a essa adiacente possono agire solo da un lato, mentre su una molecola all'interno del liquido agiscono forze da tutti i lati (vedi fig. 1). Sulla molecola in superficie viene pertanto esercitata nel complesso una forza verticale rispetto alla superficie verso l'interno del liquido. Per portare altre molecole in superficie al fine di ingrandire la superficie, è necessario fornire di energia.

Il quoziente

$$(1) \quad \sigma = \frac{\Delta E}{\Delta A}$$

tra la variazione di energia E necessaria a temperatura costante e la variazione A della superficie è definito tensione superficiale o densità dell'energia superficiale.

Per illustrare questa definizione è possibile per esempio osservare un tagliante ad anello inizialmente immerso completamente nel liquido. Sollevando successivamente lentamente il tagliante per farlo fuoriuscire dal liquido, in corrispondenza del suo bordo inferiore si solleva una lamina di liquido (vedi fig. 2). La superficie sul lato esterno e interno del tagliante varia nel complesso di

$$(2) \quad \Delta A = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \Delta x$$

R : Raggio dell'anello

quando il tagliante viene sollevato di un ulteriore tratto x . A tale scopo deve essere applicata una forza

$$(3) \quad F_0 = \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

Se nel sollevamento viene superata la forza F_0 , la lamina di liquido si distacca.

Nell'esperimento, un anello metallico con il bordo inferiore tagliante viene sospeso orizzontalmente a un dinamometro di precisione. L'anello metallico viene dapprima immerso completamente nel liquido analizzato, per es. acqua, e successivamente sollevato lentamente verso l'alto fuori dal liquido. La lamina di liquido si distacca quando la forza di trazione F supera il valore limite F_0 .

ANALISI

Da (1), (2) e (3) deriva

$$F_0 = \frac{\Delta E}{\Delta x} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma$$

L'equazione condizionale è quindi

$$\sigma = \frac{F_0}{4 \cdot \pi \cdot R}$$

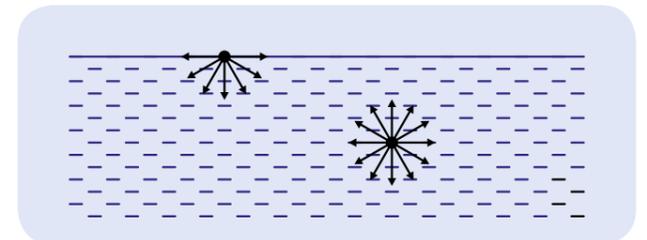


Fig. 1: Forze di interazione che agiscono su una molecola di liquido in superficie e su una molecola all'interno del liquido da parte delle rispettive molecole adiacenti

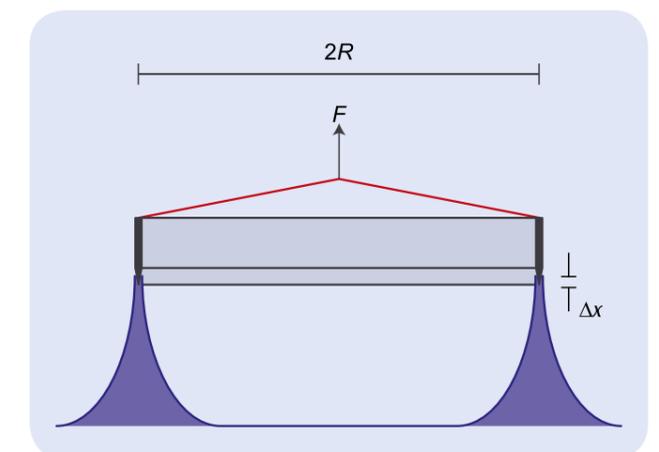


Fig. 2: Rappresentazione schematica


FUNZIONI

- Produzione di una lamina di liquido tra un tagliante ad anello e la superficie del liquido mediante lento sollevamento del tagliante fuori dal liquido.
- Misurazione della forza di trazione appena prima del distacco della lamina di liquido.
- Determinazione della tensione superficiale sulla base della forza di trazione misurata.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Anello per tensione superficiale	1000797
1	Dinamometro di precisione 0,1 N	1003102
1	Becher, da	1002872
1	Laborboy II	1002941
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 470 mm	1002934
1	Manicotto con gancio	1002828
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601



FUNZIONI

- Misurazione della dilatazione lineare termica di un tubi realizzati in ottone, acciaio e vetro.
- Determinazione dei coefficienti di dilatazione termica lineare di questi materiali e confronto con i valori di letteratura.

SCOPO

Determinazione del coefficiente di dilatazione termica dell'ottone, dell'acciaio e del vetro

RIASSUNTO

Se riscaldati, tutti i corpi solidi si dilatano in misura maggiore o minore. Nell'esperimento si fa scorrere acqua calda lungo tubi sottili realizzati in ottone, acciaio e vetro. La misurazione della dilatazione lineare avviene utilizzando un comparatore a quadrante. In base alla variazione della lunghezza si determinano i coefficienti di dilatazione lineare dei tre materiali.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per la dilatazione lineare D	1002977
1	Termostato a circolazione/immersione (230 V; 50/60 Hz)	1008654 o
	Termostato a circolazione/immersione (115 V; 50/60 Hz)	1008653
1	Comparatore a quadrante con adattatore	1012862
2	Tubo di silicone 6 mm	1002622

1

NOTA

Se è sufficiente analizzare la differenza di lunghezza tra temperatura ambiente e temperatura del vapore, si può usare un generatore di vapore al posto del termostato a circolazione. L'elenco accessori corrispondente è disponibile al numero UE2010135 (vedere Fig. 3).

BASI GENERALI

In un solido ogni atomo oscilla intorno alla propria posizione di equilibrio. L'oscillazione non è armonica, poiché l'energia potenziale, dal punto di equilibrio, cresce molto rapidamente se gli atomi si avvicinano e più lentamente se si allontanano. In presenza di temperature più elevate e quindi di un'energia di oscillazione maggiore, gli atomi riescono ad allontanarsi sempre di più l'uno dall'altro, ma non ad avvicinarsi di più; conseguentemente la loro distanza media cresce. Questo effetto si intensifica con l'aumentare della temperatura, pertanto al salire della temperatura il solido si dilata in misura sempre maggiore. In questo contesto è consuetudine osservare variazioni di lunghezza relative dalle quali si calcolano le variazioni di volume.

Il coefficiente di dilatazione lineare è definito come

$$(1) \quad \alpha = \frac{1}{L(\vartheta)} \cdot \frac{dL}{d\vartheta}$$

L: Lunghezza
 ϑ : Temperatura in °C

Dipende in maniera notevole dal materiale e, di norma, poco dalla temperatura. Ne consegue che

$$(2) \quad L(\vartheta) = L_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \vartheta)$$

$$L_0 = L(0^\circ\text{C})$$

si può approssimare, per temperature non eccessivamente elevate, con

$$(3) \quad L(\vartheta) = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta)$$

Nell'esperimento vengono eseguite misurazioni su tubi sottili di acciaio, ottone e vetro, che vengono riscaldati facendo scorrere acqua calda al loro interno. Un termostato a circolazione mantiene la temperatura dell'acqua costante. Poiché i tubi sono fissati solo su un lato all'apparecchio per la dilatazione lineare, applicando un comparatore a quadrante sull'altra estremità è possibile leggere la variazione di lunghezza rispetto alla temperatura di riferimento costituita dalla temperatura ambiente.

ANALISI

Nel range di temperatura analizzato vale $\alpha \cdot \vartheta \ll 1$. Pertanto l'equazione (3) deve essere modificata

$$\Delta L = L(\vartheta_1) \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta \text{ in } \Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1, L(\vartheta_1) = 600 \text{ mm}$$

I coefficienti di dilatazione lineare cercati possono essere determinati dalla pendenza delle rette di passanti per l'origine in Fig. 1. Se invece si prendono in considerazione anche temperature elevate, l'equazione approssimata (3) non è più applicabile. Quindi α non si dimostra costante, bensì dipendente dalla temperatura. Ciò si può notare – a un'osservazione più attenta – anche nel range di temperatura analizzato. Poiché le variazioni di lunghezza vengono misurate con una risoluzione di 0,01 mm, ad un'attenta analisi dei dati risulta che, in particolare per l'ottone, i valori di misurazione non seguono un andamento lineare e il coefficiente di dilatazione cresce debolmente con l'aumentare della temperatura.

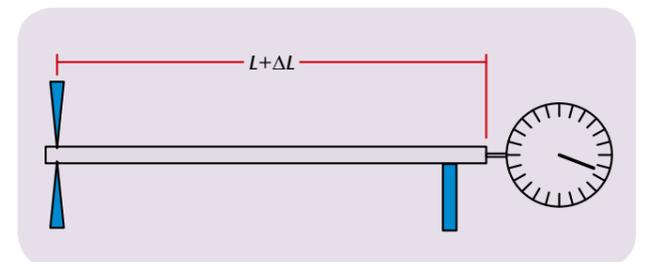


Fig. 1: Rappresentazione schematica della disposizione per la misurazione

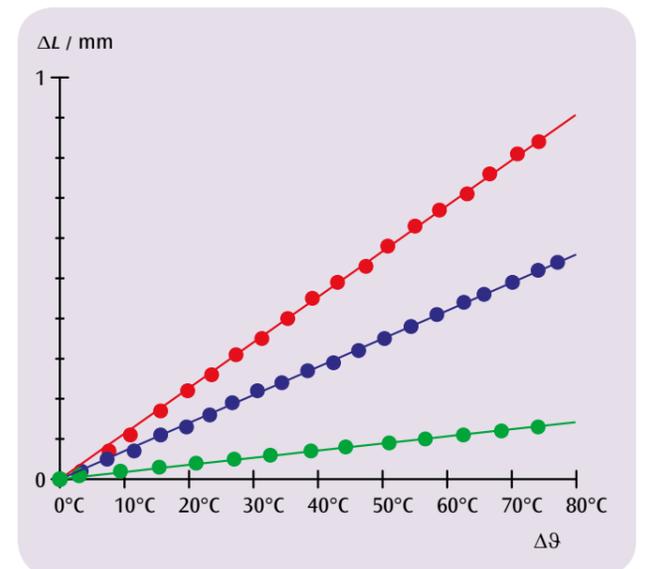


Fig. 2: Variazione di lunghezza per ottone (rosso), acciaio (blu) e vetro (verde) in funzione della differenza di temperatura



Fig. 3: Struttura con generatore di vapore



FUNZIONI

- Misurazione della dilatazione termica dell'acqua nell'intervallo di temperature compreso tra 0°C e 15°C.
- Dimostrazione dell'anomalia termica.
- Determinazione della temperatura del massimo di densità.

SCOPO

Determinazione della temperatura del massimo di densità dell'acqua

RIASSUNTO

Il volume dell'acqua inizialmente diminuisce ad un aumento della temperatura tra 0°C e ca. 4°C e aumenta solo a temperature superiori. La densità dell'acqua ha pertanto un massimo misurabile in questo intervallo.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per l'anomalia dell'acqua	1002889
1	Vasca di plastica	4000036
1	Agitatore magnetico	1002808
1	Termometro digitale, 1 canale	1002793
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
Ulteriormente consigliato:		
1	Imbuto	1003568
1	Tubo di silicone 6 mm	1002622
1	Asta di supporto, 470 mm	1002934
1	Morsetto di supporto con manicotto	1002829
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835

1

BASI GENERALI

L'acqua presenta una particolarità rispetto alla gran parte degli altri materiali. Fino ad una temperatura di ca. 4°C si ritira con aumentando la temperatura, e aumenta di volume solo a temperature superiori. Poiché la densità corrisponde al reciproco del volume di una quantità di materiale, l'acqua ha quindi un massimo di densità a ca. 4°C.

Nell'esperimento, la dilatazione dell'acqua viene misurata in un recipiente con tubo montante. A questo scopo, si misura l'altezza h a seconda della temperatura dell'acqua ϑ . Se si trascura il fatto che anche il recipiente di vetro si dilata con il riscaldamento, il volume totale dell'acqua nel recipiente e nel tubo montante è dato da:

$$(1) \quad V(\vartheta) = V_0 + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(\vartheta)$$

d : Diametro interno del tubo montante, V_0 : Volume del recipiente

Prendendo in considerazione la dilatazione del recipiente, (1) diventa

$$(2) \quad V(\vartheta) = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \vartheta) + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(\vartheta)$$

$\alpha = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$: Coefficiente di dilatazione lineare del vetro

ANALISI

Per la densità ρ dell'acqua vale pertanto sulla base di (1) e (2)

$$\frac{\rho(\vartheta)}{\rho(0^\circ\text{C})} = \frac{V_0 + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(0^\circ\text{C})}{V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \vartheta) + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(\vartheta)}$$

Secondo i dati della tabella, il massimo di questo rapporto è $\vartheta = 3,9^\circ\text{C}$.

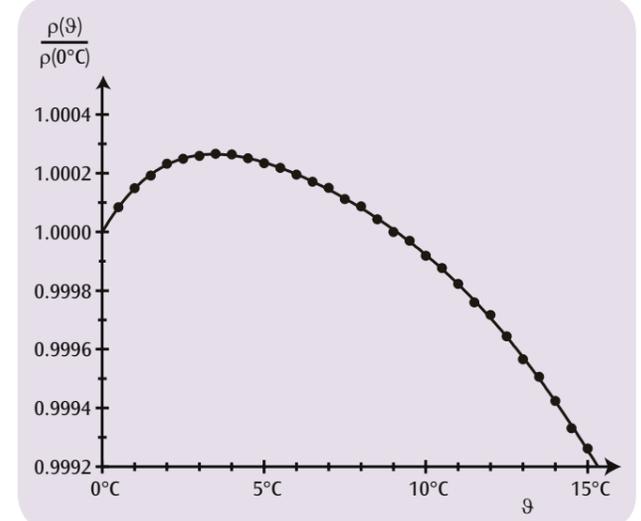


Fig. 1: Densità relativa dell'acqua a seconda della temperatura

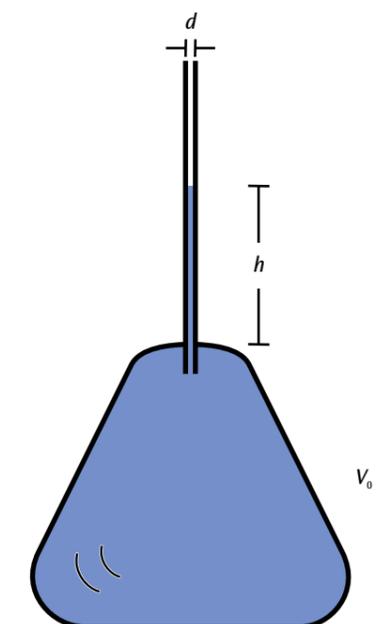


Fig. 2: Recipiente con tubo montante


SCOPO

Misurazione della conducibilità in aste metalliche

FUNZIONI

- Misurazione dell'andamento della temperatura lungo un'asta metallica, un'estremità della quale viene riscaldata e l'altra raffreddata, in stato stazionario e non stazionario.
- Misurazione del flusso di calore nello stato stazionario.
- Determinazione della conducibilità termica del materiale dell'asta.

RIASSUNTO

Nella conduzione termica il calore viene trasferito da una zona più calda a una più fredda per effetto dell'interazione reciproca di molecole o atomi contigui, senza che vi sia spostamento di materia. In un'asta metallica cilindrica, le cui estremità sono mantenute a temperature differenti, si genera dopo un determinato periodo di tempo un gradiente di temperatura lungo l'asta, per cui la temperatura partendo dall'estremità più calda diminuisce uniformemente avvicinandosi a quella dell'estremità più fredda, generando un flusso di calore costante. Il passaggio dallo stato non stazionario a quello stazionario viene osservato mediante serie di misurazioni ripetute, rilevando per ciascuna la temperatura nei punti di misurazione. Le aste metalliche vengono riscaldate elettricamente, in modo tale da poter determinare il flusso di calore nello stato stazionario in base alla potenza elettrica.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Kit conducibilità termica	1017329
1	Asta conduttiva termica Al	1017331
1	Asta conduttiva termica Cu	1017330
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Termometro tascabile digitale rapido	1002803
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718
1	Set di 10 becher, forma bassa	1002872

1
BASI GENERALI

Il calore può essere trasferito da una zona più calda a una più fredda mediante conduzione, irraggiamento e convezione. Nella conduzione termica tale trasferimento di energia avviene da una zona più calda a una più fredda per effetto dell'interazione reciproca di molecole o atomi contigui, senza che vi sia spostamento di materia. Se, ad esempio, si riscalda un'asta metallica gli atomi nell'estremità più calda oscillano più intensamente, ovvero con un'energia più elevata che nell'estremità fredda. L'energia viene trasferita agli atomi contigui per effetto degli urti, innescando l'effetto di conduzione lungo l'asta. In particolare, i metalli sono buoni conduttori termici, perché a questo effetto si aggiungono le collisioni tra elettroni liberi e atomi.

In un'asta con sezione trasversale A , le cui estremità sono mantenute a temperature differenti, si genera dopo un determinato periodo di tempo un gradiente di temperatura lungo l'asta, per cui la temperatura partendo dall'estremità più calda diminuisce uniformemente avvicinandosi a quella dell'estremità più fredda. Contemporaneamente nel tempo dt una quantità di calore dQ scorre nella sezione trasversale dell'asta, generando un flusso di calore costante P_Q :

$$(1) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

 P_Q : Flusso di calore (misurato in Watt)

 A : Sezione trasversale dell'asta

 λ : Conducibilità termica del materiale dell'asta

 T : Temperatura, x : Coordinate di spazio lungo l'asta

Prima di raggiungere il gradiente di temperatura costante, nell'asta si produce una distribuzione della temperatura nel tempo $T(x,t)$, che si avvicina gradualmente allo stato stazionario. Vale la seguente equazione differenziale

$$(2) \quad \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0$$

 c : Calore specifico e ρ : Densità del materiale dell'asta

Nello stato stazionario vale conformemente all'equazione (1)

$$(3) \quad \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \quad \text{e} \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}$$

Nell'esperimento un'estremità dell'asta viene riscaldata elettricamente. Una sorgente di calore alimentata elettronicamente fornisce all'asta conduttiva termica un flusso di calore, che può essere calcolato in base alla potenza elettrica

$$(4) \quad P_{el} = U \cdot I$$

mediante la misurazione della tensione di riscaldamento U e della corrente di riscaldamento I . La regolazione elettronica della corrente fa in modo che l'estremità dell'asta raggiunga in un tempo estremamente rapido la temperatura di 90 °C, che viene poi mantenuta costante.

Attraverso apposite lamelle di raffreddamento il calore viene ceduto all'altra estremità dell'asta raffreddata con acqua ghiacciata o con semplice acqua a temperatura ambiente. La potenza termica ceduta può essere determinata utilizzando un calorimetro.

Un manicotto isolante riduce la perdita di calore dell'asta conduttiva termica nell'ambiente e migliora la linearità del profilo di temperatura nello stato stazionario. Utilizzando un termometro elettronico istantaneo vengono misurate le temperature in determinati punti di misurazione lungo l'asta. Vengono utilizzate un'asta di alluminio e una di rame.

ANALISI

Il flusso di calore P_Q corrisponde alla potenza elettrica P_{el} meno una dispersione minima P_i : $P_Q = P_{el} - P_i$

$$\text{Pertanto si ha:} \quad \lambda = \frac{P_{el} - P_i}{A} \cdot \frac{L}{T(0) - T(L)}$$

(L : La distanza tra i punti di misurazione della temperatura selezionati)

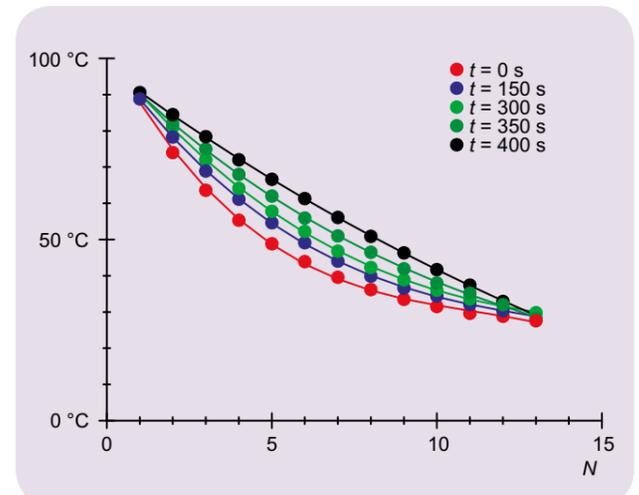


Fig. 1: Temperature lungo l'asta di alluminio in cinque serie di misur a una distanza temporale di 150 s



FUNZIONI

- Dimostrazione della radiazione termica di un cubo di Leslie con una termopila di Moll
- Misurazione relativa dell'intensità irradiata per quattro diverse superfici in funzione della temperatura.
- Conferma della dipendenza T^4 dell'intensità irradiata.

SCOPO

Misurazione della radiazione termica di un cubo di Leslie

RIASSUNTO

La radiazione emessa da un corpo dipende dalla temperatura del corpo e dalle sue caratteristiche superficiali. La legge di Kirchhoff afferma più precisamente che per tutti i corpi ad una data temperatura il rapporto di emissività rispetto alla capacità di assorbimento è uguale, e che corrisponde all'emissività E_{SB} del corpo nero a questa temperatura. Nell'esperimento, un cubo di Leslie viene riscaldato a temperature fino a 100°C inserendo acqua all'interno e misurando l'intensità irradiata in una misurazione relativa con una termopila di Moll.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Cubo di Leslie	1000835
1	Supporto girevole per cubo di Leslie	1017875
1	Termopila di Moll	1000824
1	Amplificatore di misura (230 V, 50/60 Hz)	1001022 o
	Amplificatore di misura (115 V, 50/60 Hz)	1001021
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Termometro tascabile digitale rapido	1002803
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002849
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
2	Piede a barilotto, 500 g	1001046
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603

1

BASI GENERALI

Lo scambio di calore di un corpo con l'ambiente avviene anche tramite emissione e assorbimento della radiazione termica. La radiazione dipende dalla temperatura del corpo e dalle sue caratteristiche superficiali come dimostrato da un cubo di Leslie.

L'intensità irradiata viene descritta dall'emissività E del corpo. La capacità di assorbimento A è il rapporto dell'intensità di radiazione assorbita rispetto a quella incidente. La capacità di assorbimento è particolarmente alta quando lo è anche l'emissività. La legge di Kirchhoff afferma più precisamente che per tutti i corpi ad una data temperatura il rapporto di emissività rispetto alla capacità di assorbimento è uguale e che corrisponde all'emissività E_{SB} del corpo nero a questa temperatura:

$$(1) \quad \frac{E(T)}{A} = E_{SB}(T) = \sigma \cdot T^4$$

σ : costante di Stefan-Boltzmann
 T : temperatura in Kelvin

La dipendenza dalla temperatura della capacità di assorbimento può essere di norma trascurata. Pertanto, l'emissività del corpo è pari a

$$(2) \quad E(T) = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

Se il corpo ha la stessa temperatura T_0 dell'ambiente, esso emette radiazioni con emissività

$$(3) \quad E(T_0) = A \cdot \sigma \cdot T_0^4$$

e con la stessa intensità con cui la assorbe dall'ambiente. Se la sua temperatura è superiore, l'intensità di radiazione assorbita dall'ambiente non varia, finché la temperatura ambiente resta costante. Pertanto, l'emissione di energia del corpo misurabile con un rivelatore di radiazione per unità di superficie e di tempo è pari a

$$(4) \quad \Delta E(T) = A \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

Nell'esperimento, un cubo di Leslie dotato di superfici rispettivamente bianca, nera, opaca e lucida viene riscaldato a temperature fino a 100°C introducendovi acqua; viene poi misurata l'intensità irradiata in una misurazione relativa con la termopila di Moll. I valori misurati per le quattro superfici diverse vengono seguiti durante l'intero processo di raffreddamento fino al raggiungimento della temperatura ambiente.

ANALISI

Rappresentando mediante i valori misurati la grandezza $x = T^4 - T_0^4$ si ottengono quattro rette passanti per l'origine, le cui pendenze corrispondono alla diversa capacità di assorbimento delle superfici.

Nel range di temperature analizzato, fino a 100°C, non vi è grande differenza tra la superficie nera e quella bianca, nonché tra la superficie opaca e quella lucida, nonostante la differenza per l'occhio umano sia notevole. Evidentemente, le superfici nel range di lunghezza d'onda a infrarossi non si differenziano di molto.

1: superficie bianca, 2: superficie nera,
 3: superficie opaca, 4: superficie lucida

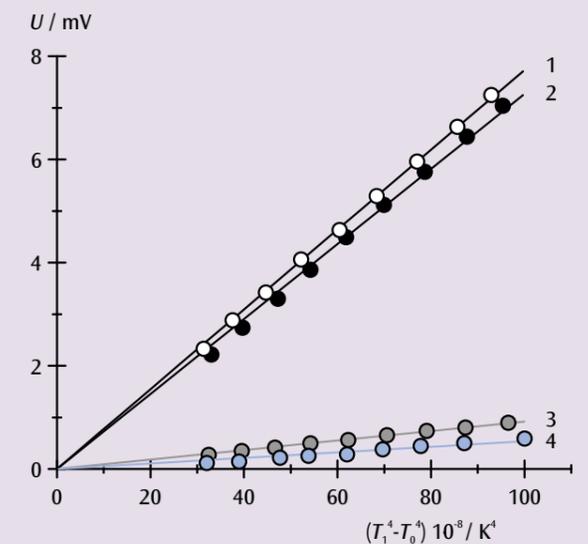


Fig. 1 Intensità irradiata del cubo di Leslie in funzione di $x = T^4 - T_0^4$


FUNZIONI

- Misurazione della temperatura del corpo in alluminio in funzione del numero di rotazioni sotto alla corda di attrito.
- Verifica della proporzionalità tra la variazione di temperatura e l'attrito e conferma del primo principio.
- Determinazione della capacità termica specifica dell'alluminio.

SCOPO

Verifica del primo principio della termodinamica

RIASSUNTO

Si analizza l'aumento dell'energia interna di un corpo in alluminio provocata dall'attrito. L'aumento può essere rilevata dall' aumento di temperatura del corpo a essa proporzionale, in quanto non si verifica alcuna variazione dello stato di aggregazione né alcuna reazione chimica. Per evitare il più possibile uno scambio di calore tra il corpo in alluminio e l'ambiente, la serie di misurazioni viene avviata a una temperatura leggermente inferiore alla temperatura ambiente e terminata in corrispondenza di una temperatura superiore nella stessa misura a quella ambiente.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per l'equivalente termico	1002658
1	Multimetro digitale P1035	1002781
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718

1
BASI GENERALI

In base al primo principio della termodinamica, la variazione ΔE dell'energia interna di un sistema è uguale alla somma del lavoro eseguito ΔW e del calore trasferito ΔQ . Può essere rilevata dalla variazione di temperatura del sistema ΔT a essa proporzionale, nel caso in cui non si verifichi alcuna variazione dello stato di aggregazione né alcuna reazione chimica.

Nell'esperimento si analizza l'aumento dell'energia interna di un corpo in alluminio provocata da lavoro meccanico. A tale scopo, il corpo cilindrico viene fatto ruotare attorno al proprio asse con una manovella e riscaldato dall'attrito di una corda che scorre sulla sua superficie esterna. La forza di attrito F corrisponde al peso esercitato da un peso sospeso all'estremità della corda di attrito che viene mantenuto in equilibrio dalla forza di attrito. In n rotazioni del corpo viene quindi eseguito il seguente lavoro di attrito

$$(1) \quad \Delta W_n = F \cdot \pi \cdot d \cdot n$$

d : Diametro del corpo

Mediante l'attrito, la temperatura del corpo aumenta dal valore iniziale T_0 al valore finale T_n . Contemporaneamente l'energia interna aumenta del valore

$$(2) \quad \Delta E_n = m \cdot c_{Al} \cdot (T_n - T_0)$$

m : Massa del corpo
 c_{Al} : Capacità termica specifica dell'alluminio

Al fine di evitare il più possibile uno scambio termico con l'ambiente, prima dell'inizio della misurazione il corpo viene raffreddato a una temperatura T_0 solo leggermente inferiore alla temperatura ambiente. La misurazione, inoltre, viene terminata non appena si raggiunge una temperatura finale T_n , superiore alla temperatura ambiente nella stessa misura.

In tal modo si garantisce che la variazione dell'energia interna corrisponda al lavoro eseguito. Ossia vale

$$(3) \quad \Delta E_n = \Delta W_n$$

ANALISI

Dalle equazioni 2 e 3 è possibile derivare la relazione

$$T_n = T_0 + \frac{1}{m \cdot c_{Al}} \cdot \Delta W_n$$

È quindi evidente che le temperature misurate T_n possono essere rappresentate in funzione del lavoro eseguito ΔW_n (vedi fig. 1).

I valori misurati in prossimità della temperatura ambiente si trovano su una retta dal cui incremento è possibile determinare la capacità termica dell'alluminio.

Al di sotto della temperatura ambiente le temperature misurate aumentano più rapidamente di questo incremento della retta, perché l'alluminio assorbe calore dall'ambiente. Al di sopra della temperatura ambiente viene invece ceduto calore all'ambiente.

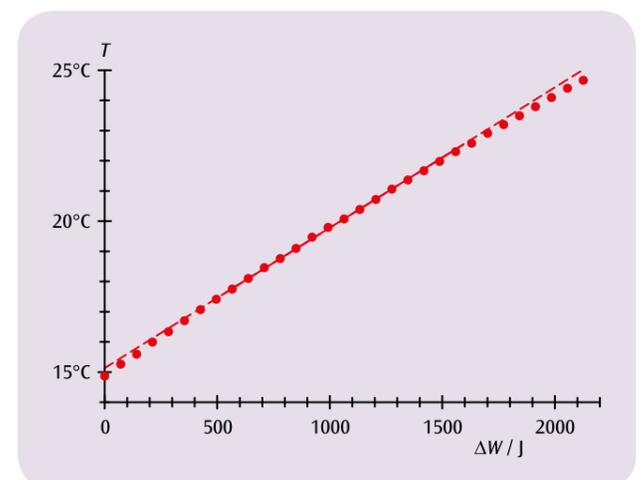


Fig. 1: Temperatura del corpo in alluminio in funzione del lavoro di attrito eseguito



FUNZIONI

- Misurazione della temperatura di un calorimetro in alluminio e in rame in funzione del lavoro elettrico eseguito.
- Verifica della proporzionalità tra la variazione di temperatura e il lavoro elettrico e conferma del 1° principio.
- Determinazione della capacità termica di rame e alluminio.

SCOPO

Aumento dell'energia interna attraverso il lavoro elettrico

RIASSUNTO

Si esamina l'aumento dell'energia interna di un calorimetro in rame e di uno in alluminio tramite il lavoro elettrico. Se lo stato di aggregazione non varia e non ha luogo alcuna reazione chimica, è possibile rilevare la variazione dell'energia interna dall'aumento della temperatura del sistema, che è proporzionale ad essa. Per evitare uno scambio di calore del calorimetro con l'ambiente si avvia la serie di misurazioni al di sotto della temperatura ambiente e la si termina ad una temperatura leggermente al di sopra della temperatura ambiente.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Calorimetro in rame	1002659
1	Calorimetro in alluminio	1017897
1	Sensore di temperatura	1017898
1	Coppia di cavi adattatori con spine di sicurezza da 4 mm/jack da 2 mm	1017899
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718
1	Multimetro digitale P1035	1002781
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311

1

BASI GENERALI

Anche un lavoro elettrico, anziché un lavoro meccanico, può aumentare l'energia interna di un sistema. Anche in questo caso la temperatura del sistema aumenta linearmente rispetto al lavoro eseguito, se lo stato di aggregazione non varia e non si innescano reazioni chimiche.

Nell'esperimento si esamina l'aumento dell'energia interna di un calorimetro in rame e di uno in alluminio tramite il lavoro elettrico. Quest'ultimo è proporzionale alla tensione U applicata rispetto alla corrente di attraversamento I e al tempo di misura t :

$$(1) \quad \Delta W_e(t) = U \cdot I \cdot t$$

Mediante il lavoro elettrico, la temperatura del calorimetro aumenta dal valore iniziale T_0 al valore finale T_n . Contemporaneamente l'energia interna aumenta quindi del valore

$$(2) \quad \Delta E(t) = m \cdot c \cdot (T(t) - T_0)$$

m : peso del calorimetro
 c : capacità termica specifica del materiale

Al fine di evitare il più possibile uno scambio termico con l'ambiente, prima dell'inizio della misurazione il calorimetro viene raffreddato a una temperatura T_0 solo leggermente inferiore alla temperatura ambiente. La misurazione viene terminata non appena si raggiunge una temperatura finale T_n , superiore alla temperatura ambiente nella stessa misura.

Sotto queste condizioni, la variazione dell'energia interna corrisponde al lavoro eseguito e vale:

$$(3) \quad \Delta E(t) = \Delta W_e(t)$$

ANALISI

Per la misurazione della temperatura T si utilizza un sensore di temperatura NTC misurandone la resistenza, che è sensibile alla temperatura. Vale

$$T = \frac{217}{R^{0.13}} - 151$$

Le temperature così misurate vengono rappresentate in funzione del lavoro elettrico. Dalla pendenza lineare è possibile determinare le capacità termiche dei calorimetri e, se la massa è nota possono essere calcolate le capacità termiche specifiche.

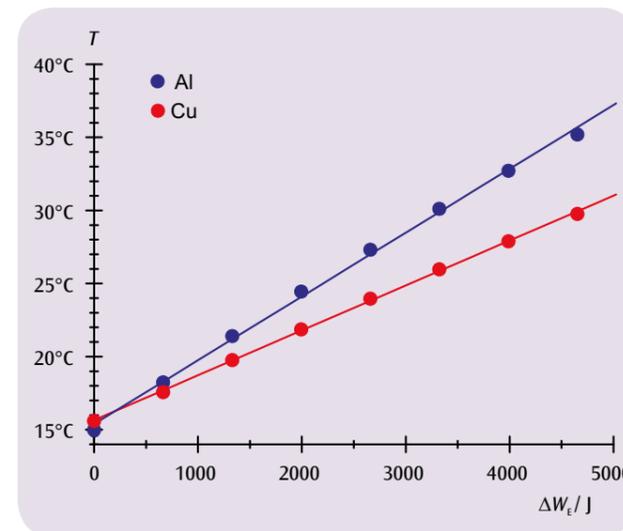


Fig. 1: Temperatura dei calorimetri in funzione del lavoro elettrico

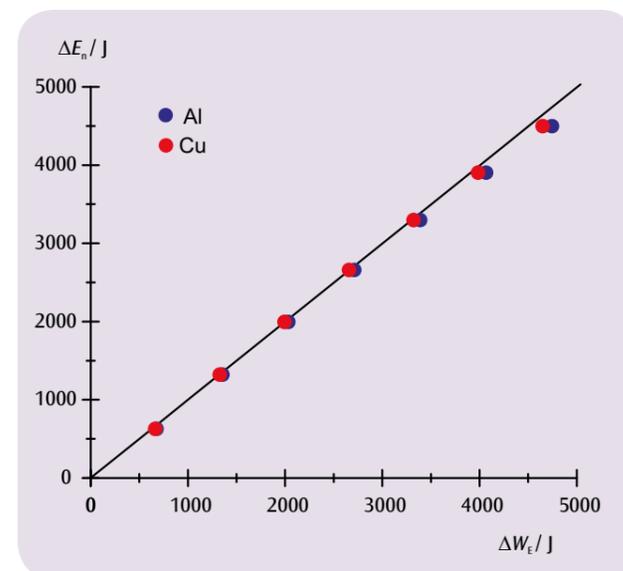
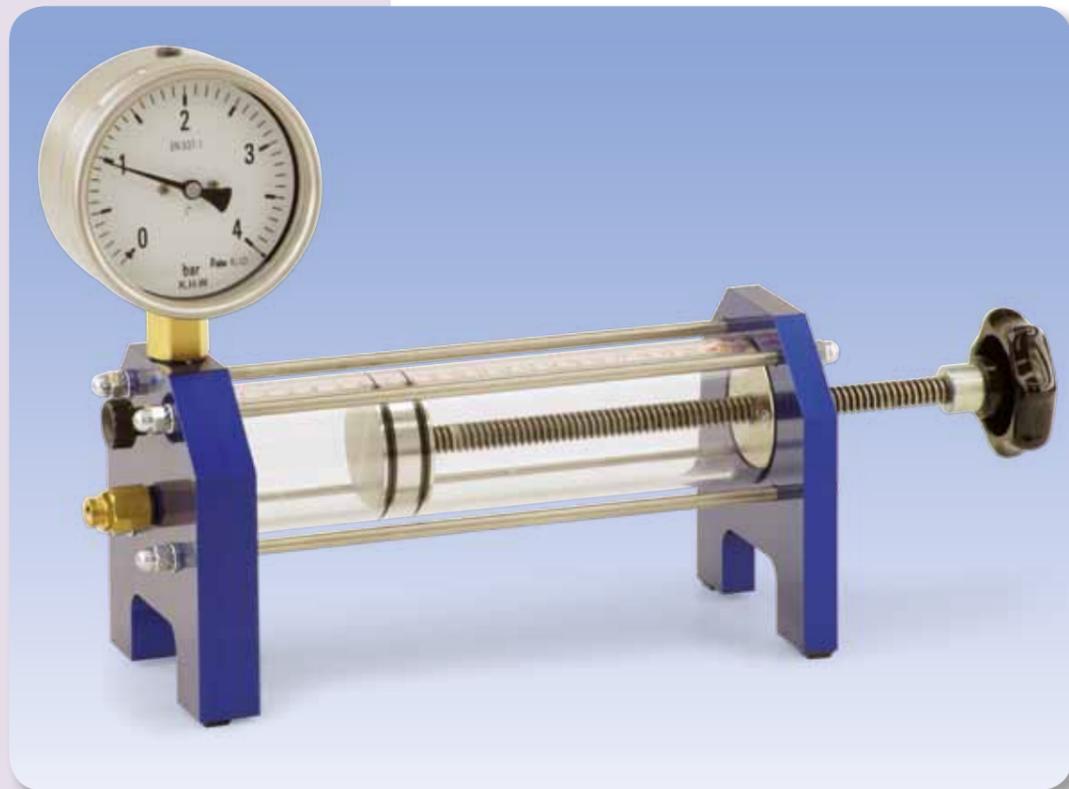


Fig. 2: Variazione dell'energia interna in funzione del lavoro elettrico eseguito



FUNZIONI

- Misurazione punto per punto della pressione p dell'aria racchiusa a temperatura ambiente in funzione della posizione s del pistone.
- Rappresentazione dei valori misurati per tre diverse quantità di aria in un diagramma pV .
- Conferma della legge di Boyle-Mariotte.

SCOPO

Misurazione in aria a temperatura ambiente

RIASSUNTO

La validità della legge di Boyle-Mariotte per i gas ideali viene dimostrata a temperatura ambiente in aria. A tale scopo, il volume in un contenitore cilindrico viene modificato mediante lo spostamento di un pistone e contemporaneamente viene misurata la pressione dell'aria in esso racchiusa.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio di Boyle-Mariotte	1017366

1

BASI GENERALI

Il volume di una quantità di gas dipende dalla pressione a cui si trova il gas e dalla sua temperatura. A temperatura costante, spesso il prodotto del volume e della pressione è costante. Questa legge scoperta da Robert Boyle ed Edme Mariotte vale per qualsiasi gas allo stato ideale, vale a dire quando la temperatura del gas si trova molto al di sopra della cosiddetta temperatura critica.

La legge scoperta da Boyle e Mariotte

$$(1) \quad p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

è un caso speciale della legge generale dei gas valida per tutti i gas ideali, che descrive la relazione tra la pressione p , il volume V la temperatura T riferita al punto zero assoluto e il numero di moli n di un gas:

$$(2) \quad p \cdot V = \text{const.}$$

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} : \text{Costante dei gas universale}$$

Dall'equazione (2) di validità generale è possibile derivare il caso speciale (1) supponendo che la temperatura T e il numero di moli contenute n non cambino.

Nell'esperimento si dimostra la validità della legge di Boyle-Mariotte a temperatura ambiente utilizzando l'aria come gas ideale. A tale scopo, il volume V all'interno di un contenitore cilindrico viene variato con lo spostamento di un pistone e contemporaneamente viene misurata la pressione p dell'aria in esso racchiusa. Il numero di moli contenuto n dipende dal volume iniziale V_0 nel quale, prima dell'inizio dell'esperimento, l'aria è penetrata dall'ambiente con la valvola aperta.

ANALISI

Poiché la sezione trasversale A del pistone è costante, il volume V dell'aria racchiusa è facilmente calcolabile dalla corsa di spostamento s del pistone. Per un'analisi accurata dei dati deve essere considerato anche l'inevitabile volume morto V_1 dell'aria nel manometro.

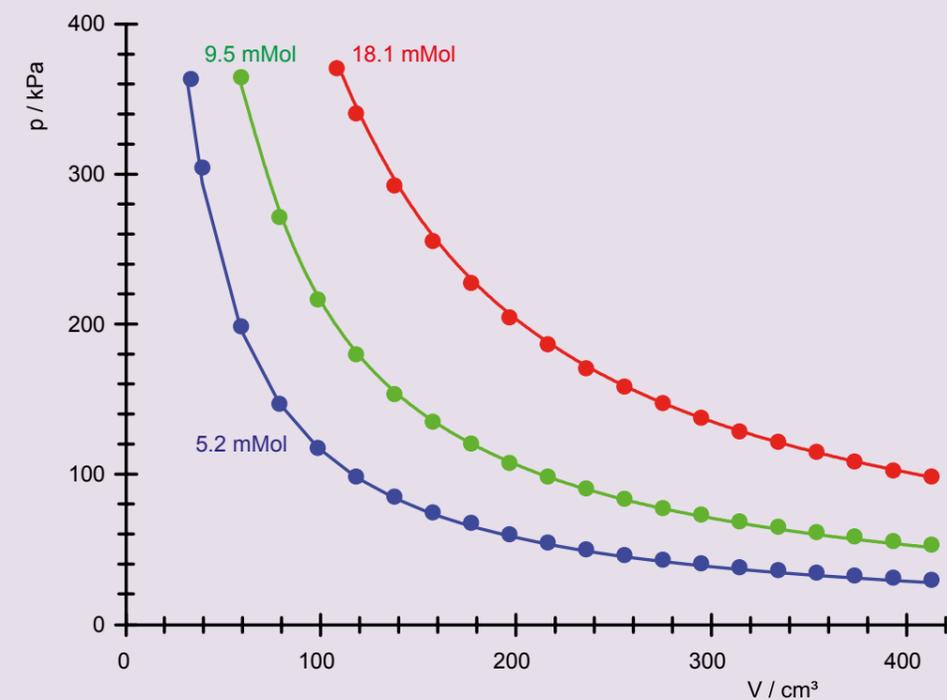


Fig. 1: Diagramma pressione-volume dell'aria a temperatura ambiente con tre diverse quantità di aria



SCOPO

Determinazione dell'esponente adiabatico C_p/C_v dell'aria secondo Rüchardt

RIASSUNTO

Nell'esperimento, un cilindro di alluminio in un tubo di vetro di precisione, posto verticalmente su una bottiglia di vetro, esegue oscillazioni armoniche sul cuscino d'aria creato dal volume d'aria definito. Dal periodo di oscillazione del cilindro di alluminio è possibile calcolare l'esponente adiabatico.

FUNZIONE

- Misurazione della durata di oscillazione del cilindro di alluminio.
- Determinazione della pressione di equilibrio nel volume d'aria racchiuso
- Determinazione dell'esponente adiabatico dell'aria e confronto con il valore di letteratura.

2

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Bottiglia di Mariotte	1002894
1	Tubo per oscillazioni	1002895
1	Cronometro meccanico, 15 min	1003369
1	Pompa manuale per vuoto	1012856
Ulteriormente consigliato:		
1	Barometro aneroido F	1010232
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601
1	Bilancia elettronica 200 g	1003433

BASI GENERALI

In una disposizione classica secondo Rüchardt, l'esponente adiabatico dell'aria si determina dalle oscillazioni verticali di un cilindro che poggia, all'interno di un tubo con sezione costante, su un volume d'aria, spingendolo verso l'alto. Una deviazione del cilindro dalla posizione di riposo crea una sovrappressione o una depressione nel volume dell'aria che riporta l'ampolla nella posizione di riposo. La forza repulsiva è proporzionale alla deviazione dalla posizione di riposo; il cilindro oscilla quindi armonicamente.

Poiché non ha luogo alcuno scambio termico con l'ambiente, le oscillazioni determinano un cambiamento di stato adiabatico nel volume di gas. Tra la pressione p e il volume V dell'aria racchiusa sussiste la relazione

$$(1) \quad p \cdot V^\gamma = \text{const.}$$

L'esponente adiabatico γ è il rapporto delle capacità termiche specifiche a pressione costante C_p e a volume costante C_v :

$$(2) \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Da (1) risulta per le variazioni di pressione e volume Δp e ΔV

$$(3) \quad \Delta p + \gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot \Delta V = 0.$$

Inserendo la sezione trasversale interna A del tubo, è possibile calcolare dalla variazione di pressione la forza repulsiva ΔF e dalla variazione di volume la deviazione Δs del cilindro dalla posizione di riposo. Pertanto risulta

$$(4) \quad \Delta F = -\gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot A^2 \cdot \Delta s = 0.$$

e quindi come equazione del moto per il cilindro oscillante

$$(5) \quad m \cdot \frac{d^2 \Delta s}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot A^2 \cdot \Delta s = 0$$

m : Peso del cilindro

Le soluzioni di questa classica equazione del moto di un oscillatore armonico sono oscillazioni con periodo

$$(6) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{V}{p} \cdot \frac{m}{A^2}},$$

da cui si calcola il coefficiente adiabatico, conoscendo le restanti grandezze. Nell'esperimento si posiziona un tubo di vetro di precisione con una sezione piccola A verticalmente nel tappo di gomma perforato di una bottiglia di vetro con un volume grande V e si fa scivolare nel tubo di vetro un idoneo cilindro di alluminio di peso noto m . Il cilindro di alluminio esegue oscillazioni armoniche sul cuscino d'aria creato dal volume d'aria racchiuso. Dal periodo di oscillazione del cilindro di alluminio è possibile calcolare l'esponente adiabatico.

ANALISI

Per la determinazione dell'esponente adiabatico segue da (6):

$$\gamma = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \frac{m}{A^2} \cdot \frac{V}{p}$$

Il volume di equilibrio V corrisponde al volume della bottiglia di vetro in quanto il volume del tubo di vetro di precisione può essere trascurato.

La pressione di equilibrio p risulta dalla pressione dell'aria esterna p_0 e dalla pressione che il cilindro di alluminio a riposo esercita sull'aria racchiusa:

$$p = p_0 + \frac{m \cdot g}{A}, \quad g: \text{accelerazione di caduta}$$

Come risultato si attende il valore $\gamma = \frac{7}{5} = 1,4$, in quanto l'aria è

composta fondamentalmente da molecole a due atomi con 5 gradi di libertà per l'assorbimento di energia termica.

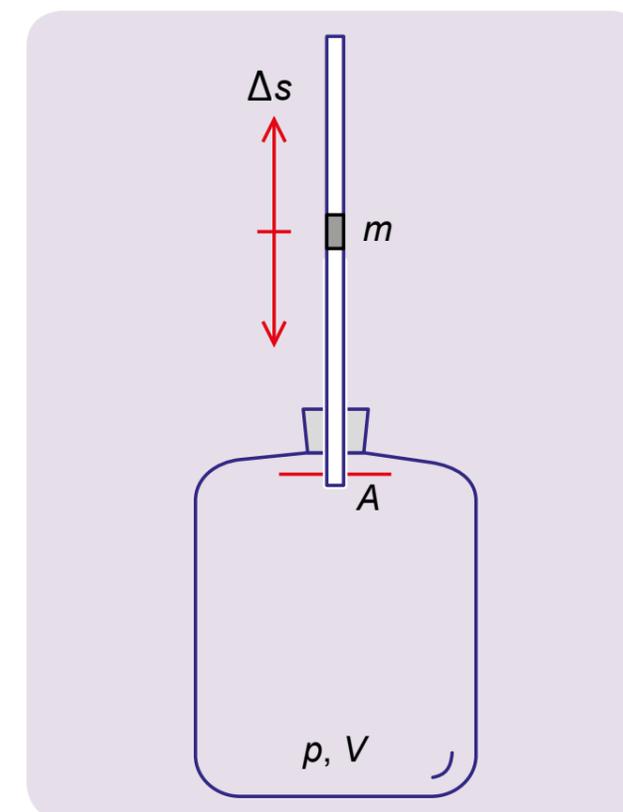


Fig. 1: Schema della preparazione sperimentale



FUNZIONI

- Osservazione dello stato liquido e gassoso dell'esafluoruro di zolfo.
- Registrazione delle isoterme nel diagramma p - V e nel diagramma pV - p .
- Osservazione delle deviazioni dei gas reali dallo stato di gas ideale.
- Rappresentazione del punto critico.
- Registrazione delle curve di pressione del vapore saturo.

SCOPO

Analisi quantitativa di un gas reale e rappresentazione del punto critico

RIASSUNTO

In una cella di misura con volume morto minimo viene analizzato esafluoruro di zolfo (SF_6) come gas reale. L'esafluoruro di zolfo è particolarmente indicato in quanto la sua temperatura critica ($T_c = 319$ K) e la sua pressione critica ($p_c = 37,6$ bar) sono comparativamente basse. Inoltre, è atossico e può essere utilizzato senza problemi durante le lezioni e i corsi di training.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per il punto critico	1002670
1	Termostato a circolazione/immersione (230 V; 50/60 Hz)	1008654 o
	Termostato a circolazione/immersione (115 V; 50/60 Hz)"	1008653
1	Termometro tascabile digitale rapido	1002803
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
2	Tubo di silicone 6 mm	1002622

Ulteriormente necessario:
Esafluoruro di zolfo (SF_6)

NOTA

Secondo i principi di "buona pratica di laboratorio", l'allacciamento del gas mediante una tubazione rigida è consigliato soprattutto in caso di utilizzo regolare dell'apparecchio per il punto critico o dell'allacciamento del gas. Per l'allacciamento di una corrispondente bombola di gas può essere utilizzato il raccordo filettato per tubi 1/8" (SW 11) fornito.

3

BASI GENERALI

Il punto critico di un gas reale è caratterizzato dalla temperatura critica T_c , dalla pressione critica p_c e dalla densità critica ρ_c . Al di sotto della temperatura critica la sostanza è gassosa se presente in volume elevato, liquida se in piccolo volume.

A valori intermedi è presente una miscela di liquido e gas, la cui componente gassosa, al cambiamento di stato isotermico, aumenta con l'aumentare del volume, mentre la pressione della miscela rimane costante. Poiché il liquido e il vapore hanno diversa densità, essi sono separati nel campo gravitazionale. Con l'aumento della temperatura, la densità del liquido diminuisce e quella del gas aumenta, finché entrambe le densità non raggiungono il valore della densità critica. Al di sopra della temperatura critica non si verifica più alcuna liquefazione.

Tuttavia, al cambiamento di stato isotermico, il gas segue la legge di Boyle-Mariotte solo quando si trova decisamente al di sopra della temperatura critica.

L'esafluoruro di zolfo (SF_6) è particolarmente indicato per le analisi delle proprietà dei gas reali in quanto la sua temperatura critica ($T_c = 319$ K) e la sua pressione critica ($p_c = 37,6$ bar) sono comparativamente basse. Inoltre, è atossico e può essere utilizzato senza problemi durante le lezioni e i corsi di training.

L'apparecchio per esaminare il punto critico è costituito da una cella di misura trasparente particolarmente ermetica e resistente alla pressione. Il volume nella cella di misurazione viene variato ruotando un volantino a regolazione fine, grazie al quale la variazione di volume può essere letta con una precisione pari a 1/1000 del volume massimo. La pressione viene creata da un sistema idraulico con olio di ricino di qualità idonea per applicazioni medicali. La cella di misura e il sistema idraulico sono separati da una guarnizione conica in gomma che si arrotonda in caso di variazione del volume. Grazie a questa costruzione, la differenza di pressione tra la cella di misura e la camera dell'olio è praticamente irrilevante. Un manometro misura pertanto la pressione dell'olio invece della pressione del gas senza richiedere un volume morto nella spazio gassoso. La cella di misura è avvolta da una camera d'acqua trasparente. Durante la prova, tramite un dispositivo a termostato (bagno d'acqua) viene impostata una temperatura costante in modo molto preciso e la temperatura può essere letta e controllata da un termometro digitale.

L'osservazione delle transizioni dalla fase gassosa a quella liquida e viceversa consente quindi di esaminare, grazie al volume morto minimo, sia la formazione della prima goccia di liquido che la scomparsa dell'ultima bolla di gas.

ANALISI

La pressione viene misurata punto per punto a temperatura costante in funzione del volume e il risultato è rappresentato in diagramma pV (diagramma di Clapeyron) o in un diagramma pV - p (diagramma di Amegat). Lo scostamento dallo stato di gas ideale è qui evidente.

La rappresentazione grafica consente di determinare facilmente i parametri del punto critico e rende accessibile una verifica sperimentale.

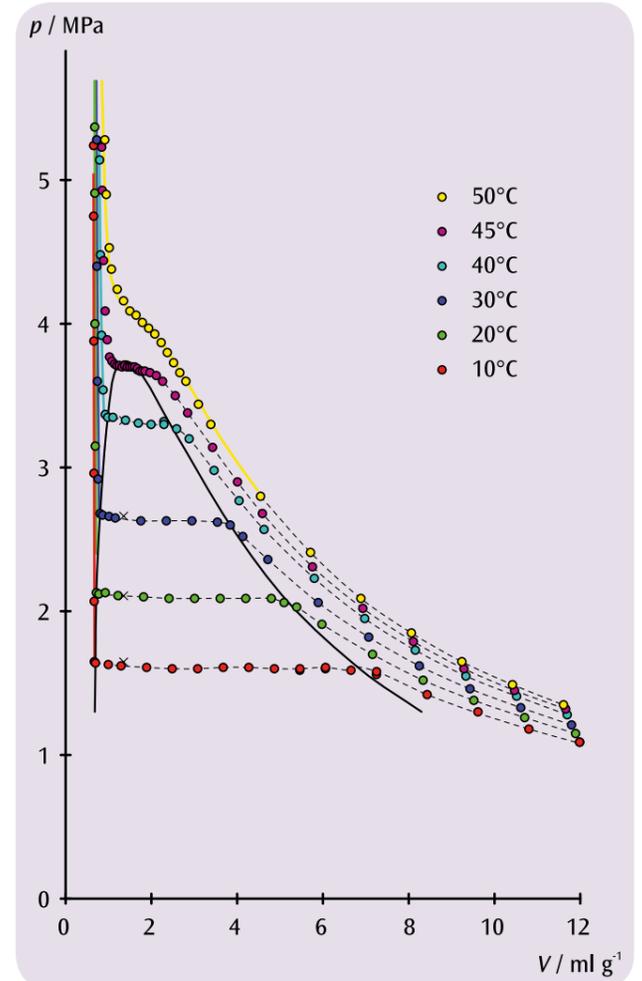


Fig. 1: Diagramma p - V dell'esafluoruro di zolfo



FUNZIONI

- Messa in funzione del motore ad aria calda come motore termico.
- Dimostrazione della trasformazione dell'energia termica in energia meccanica.
- Misurazione del regime minimo a seconda della potenza calorifica.

SCOPO

Osservazione di un modello funzionale di motore ad aria calda come motore termico

RIASSUNTO

Il motore ad aria calda è un classico esempio di motore termico. In un ciclo termodinamico, da un serbatoio ad alta temperatura viene alimentata energia termica che viene parzialmente trasformata in energia meccanica utilizzabile. Il resto dell'energia termica viene poi ceduto ad un serbatoio a bassa temperatura.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat n°
1	Motore Stirling D	1000817
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718
1	Cronometro meccanico, 15 min	1003369

BASI GENERALI

Il ciclo termodinamico del motore ad aria calda (R. Stirling, 1816) può essere suddiviso, a fini di semplificazione, nei processi di apporto del calore, espansione, cessione del calore e compressione. Questi processi sono illustrati schematicamente nella Fig. 1-4 per il modello funzionale analizzato.

Se il motore ad aria calda viene azionato senza carico meccanico, il motore gira ad un regime minimo che è limitato dall'attrito interno e che dipende dalla potenza calorifica apportata. Il regime diminuisce non appena la potenza meccanica viene eliminata. Questo può essere facilmente dimostrato esercitando una forza di attrito sull'albero a gomiti.

ANALISI

Apporto del calore:

Per l'apporto di calore, il pistone di compressione si sposta avanti e sposta l'aria verso il basso nell'area riscaldata del cilindro grande. In questa fase, il pistone di lavoro si trova nella posizione più bassa, in quanto il pistone di compressione precede il pistone di lavoro di 90°.

Espansione:

L'aria riscaldata si espande e sposta il pistone di lavoro verso l'alto. A questo proposito, il lavoro meccanico viene ceduto all'asta centrifuga tramite l'albero a gomiti.

Cessione del calore:

Mentre il pistone di lavoro si trova nel punto morto superiore, il pistone di compressione arretra e sposta l'aria nell'area superiore del grande cilindro per la cessione del calore all'ambiente.

Compressione:

L'aria raffreddata viene compressa dal pistone di lavoro che si sposta verso il basso. Il lavoro meccanico necessario a questo proposito viene svolto dall'asta centrifuga.

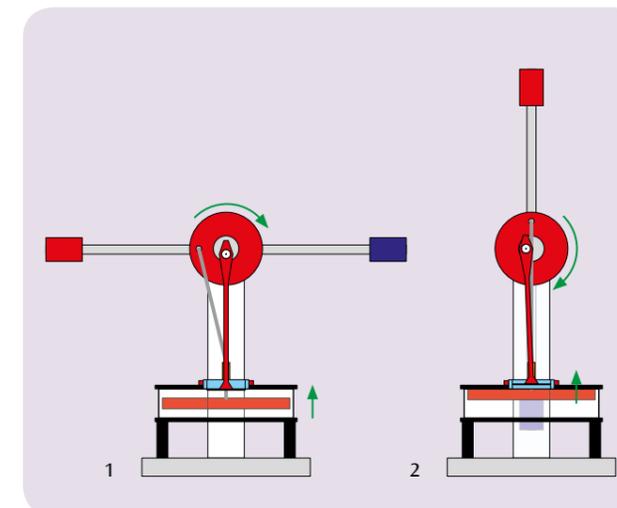


Fig. 1: Apporto del calore

Fig. 2: Espansione

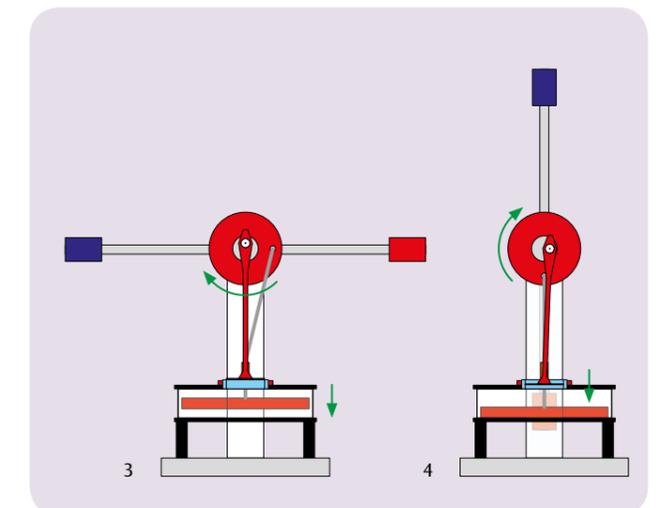


Fig. 3: Cessione del calore

Fig. 4: Compressione



FUNZIONI

- Registrazione del diagramma p - V .
- Determinazione della potenza meccanica di un ciclo completo e calcolo del lavoro meccanico.

SCOPO

Registrazione del diagramma p - V

RIASSUNTO

I cicli termodinamici possono essere rappresentati con una curva chiusa in un diagramma p - V . L'area racchiusa dalla curva corrisponde al lavoro meccanico svolto dal sistema sull'ambiente. In alternativa è possibile anche determinare la potenza meccanica di un ciclo completo e calcolarne il lavoro meccanico tramite l'integrazione temporale. Ciò viene in questo esperimento basato su un motore Stirling.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Motore Stirling G	1002594
1	Portasensori per motore Stirling G	1008500
1	Rilevatore di corsa	1000568
1	Sensore di pressione relativa ± 1000 hPa	1000548
1	3B NETlab™	1000544
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718

2

BASI GENERALI

I cicli termodinamici possono essere rappresentati con una curva chiusa in un diagramma p - V . L'area racchiusa dalla curva corrisponde al lavoro meccanico W svolto dal sistema sull'ambiente. In alternativa è possibile anche determinare la potenza meccanica P di un ciclo completo e calcolarne il lavoro meccanico tramite l'integrazione temporale.

Vale quindi

$$(1) \quad W = \oint p dV$$

oppure

$$(2) \quad W = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad \text{con} \quad P(t) = p \frac{dV}{dt}$$

Nell'esperimento viene utilizzata la seconda variante per determinare il lavoro meccanico che un motore Stirling in vetro ottimizzato per scopi didattici svolge per giro. Per rilevare la pressione p nel cilindro di lavoro è stato collegato un sensore di pressione relativa che rileva la differenza di pressione rispetto all'ambiente. Il volume V viene calcolato dal tratto percorso s del pistone di lavoro e dalla corrispondente sezione trasversale A . Il pistone di lavoro è collegato a tale scopo ad un rilevatore di corsa.

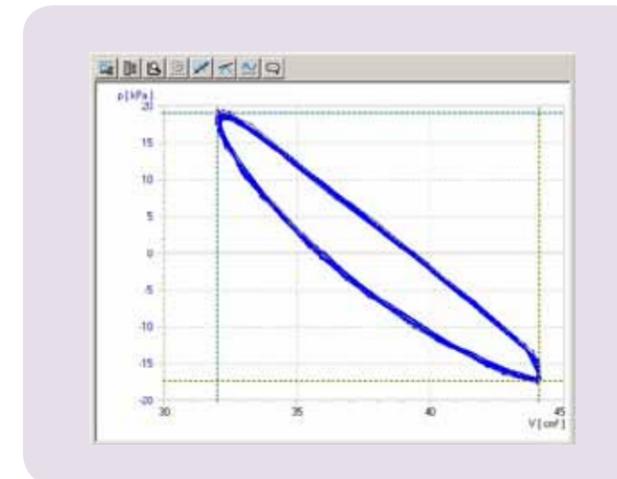


Fig. 1: Diagramma p - V del motore Stirling G

ANALISI

Per verificare il ciclo, i valori misurati vengono rappresentati in un diagramma p - V ; per determinare la potenza meccanica anche in un secondo diagramma come funzione del tempo. Nel secondo diagramma, i cicli del processo sono facili da identificare. Ciò è importante per la scelta dei limiti di integrazione per il calcolo del lavoro meccanico per ciclo, vedere (2).

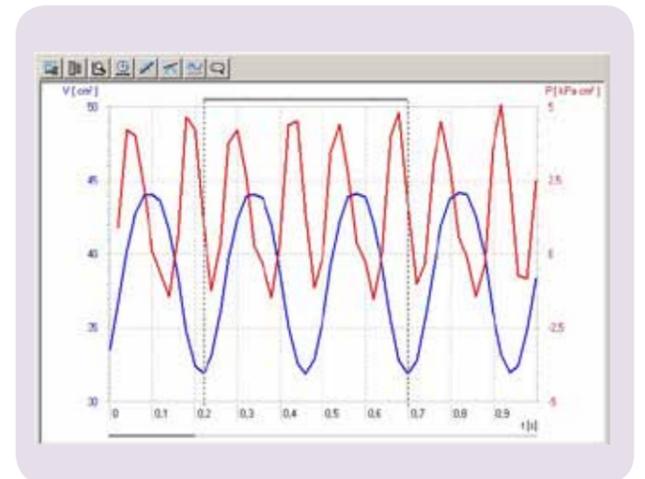


Fig. 2: Diagramma $p(t)$, $V(t)$ e $P(t)$ del motore Stirling G


SCOPO

Registrazione e analisi del diagramma pressione-entalpia di una pompa di calore a compressione

FUNZIONI

- Dimostrazione del funzionamento di una pompa di calore elettrica a compressione.
- Analisi quantitativa del corrispondente ciclo.
- Registrazione e analisi del diagramma pressione-entalpia.

RIASSUNTO

Una pompa di calore elettrica a compressione è costituita da un compressore con motore di azionamento, un condensatore, una valvola di espansione e un evaporatore. Il suo funzionamento si basa su un ciclo con transizione di fase che fa passare il mezzo di lavoro nella pompa e che, idealmente, può essere suddiviso nelle seguenti quattro fasi: compressione, condensazione, espansione con strozzamento ed evaporazione. L'efficienza teorica del ciclo idealizzato si calcola dalle entalpie specifiche rilevate nel diagramma di Mollier h_1 , h_2 e h_3 . Se sono state determinate le entalpie h_2 e h_3 del ciclo idealizzato, nonché la quantità di acqua condotta ΔQ_2 al serbatoio di acqua calda per intervallo di tempo Δt , è possibile valutare la corrente di massa del mezzo di lavoro.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pompa di calore D (230 V, 50/60 Hz)	1000820 o
	Pompa di calore D (115 V, 50/60 Hz)	1000819
2	Sensore di temperatura Pt100 a morsetto	1009922
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
Ulteriormente consigliato		
1	3B NETlab™	1000544

BASI GENERALI

Una pompa di calore elettrica a compressione è costituita da un compressore con motore di azionamento, un condensatore, una valvola di espansione e un evaporatore. Il suo funzionamento si basa su un ciclo con transizione di fase che fa passare il mezzo di lavoro nella pompa e che, idealmente, può essere suddiviso nelle seguenti quattro fasi: compressione, condensazione, espansione con strozzamento ed evaporazione.

2

Per la compressione, il mezzo di lavoro gassoso viene aspirato dal compressore, compresso senza variazione di entropia ($s_1 = s_2$) da p_1 a p_2 e surriscaldato, vedere Fig. 1 e Fig. 2. La temperatura sale pertanto da T_1 a T_2 . Per unità di massa si compie il lavoro meccanico di compressione $\Delta w = h_2 - h_1$. Nel condensatore, il mezzo di lavoro si raffredda e condensa. Il calore liberato (somma di quello dovuto alla variazione di temperatura e del calore di condensazione) è pari per unità di massa a $\Delta q_2 = h_2 - h_3$. Riscalda il serbatoio circostante.

Il mezzo condensato giunge alla valvola di espansione dove, mediante strozzamento (cioè senza lavoro meccanico), si ritrova in un ambiente con pressione inferiore e si espande. Anche la temperatura diminuisce poiché è necessario compiere un certo lavoro contro le forze molecolari di attrazione presenti nel mezzo (effetto Joule-Thomson). L'entalpia resta costante ($h_4 = h_3$).

Nell'evaporatore, con l'assorbimento di calore, il mezzo di lavoro evapora completamente. Ciò causa il raffreddamento del serbatoio circostante. Per unità di massa, il calore assorbito è pari a $\Delta q_1 = h_1 - h_4$.

Per rappresentare il ciclo di una pompa di calore a compressione si utilizza spesso il diagramma di Mollier del mezzo di lavoro. Vi è riportata la pressione p raffrontata all'entalpia specifica h del mezzo di lavoro (l'entalpia è una misura che esprime il contenuto termico del mezzo, in genere aumenta all'aumentare della pressione e della percentuale di gas).

Sono indicate le isoterme ($T = \text{cost.}$) e le isoentropiche ($S = \text{cost.}$), così come la percentuale relativa di massa della fase liquida del mezzo di lavoro. A sinistra della cosiddetta linea di ebollizione, il mezzo di lavoro è completamente condensato. A destra della cosiddetta linea di condensazione, il mezzo di lavoro è presente sotto forma di vapore surriscaldato e, fra le due linee, in forma di miscela liquido-gas. Le due linee si toccano nel punto critico.

Per la rappresentazione nel diagramma di Mollier, il ciclo idealizzato sopra descritto può essere determinato misurando le pressioni p_1 e p_2 dietro e davanti la valvola di espansione e la temperatura T_1 davanti al compressore e T_3 davanti alla valvola di espansione.

Nell'esperimento, i componenti sono montati su una pedana e collegati mediante un tubo di rame a formare un sistema chiuso. La disposizione razionale consente una lettura immediata del ciclo termodinamico della pompa di calore. L'evaporatore e il condensatore sono tubi di rame a spirale immersi in due diversi contenitori riempiti con acqua che fungono da serbatoi per la determinazione del calore assorbito o rilasciato. Due grandi manometri indicano i rapporti di pressione del refrigerante nei due scambiatori di calore. Due termometri analogici consentono la misurazione della temperatura nei due contenitori. Per la misurazione delle temperature nei tubi di rame davanti al compressore e alla valvola di espansione vengono impiegati sensori di temperatura con morsetto di misurazione adeguato. L'efficienza teorica del ciclo idealizzato si calcola dalle entalpie rilevate nel diagramma di Mollier h_1 , h_2 e h_3 :

$$(1) \quad \eta_{th} = \frac{\Delta q_2}{\Delta w} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Una volta determinate le entalpie h_2 e h_3 del ciclo idealizzato, nonché la quantità di acqua condotta ΔQ_2 al serbatoio di acqua calda per intervallo di tempo Δt , è possibile valutare la corrente di massa del mezzo di lavoro.

$$(2) \quad \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_2 - h_3}$$

ANALISI

T_1 e p_1 determinano il punto 1 nel diagramma di Mollier. Il punto d'intersezione delle isoentropiche con l'orizzontale $p_2 = \text{cost.}$ determina il Punto 2. Il punto d'intersezione dell'orizzontale con la linea di ebollizione determina il Punto 3 e la perpendicolare sull'orizzontale $p_4 = \text{cost.}$ il Punto 4.

La misurazione supplementare della temperatura T_3 fornisce una panoramica allargata dei processi in corso nella pompa di calore: T_3 non coincide con la temperatura rilevata sulla scala termica del manometro corrispondente. Tale scala termica è basata sulla curva della pressione di vapore del mezzo di lavoro. Dalla misurazione emerge dunque che il mezzo di lavoro davanti alla valvola di espansione non è una miscela di liquido e gas, bensì è completamente liquido.

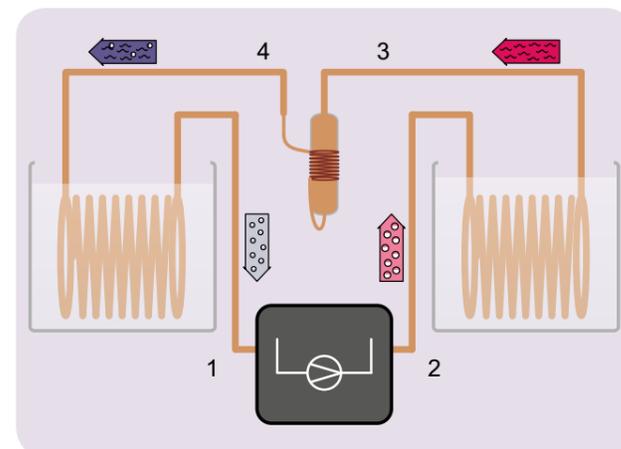


Fig. 1: Rappresentazione schematica della pompa di calore con compressore (1, 2), condensatore (2, 3), valvola di espansione (3, 4) ed evaporatore (4, 1)

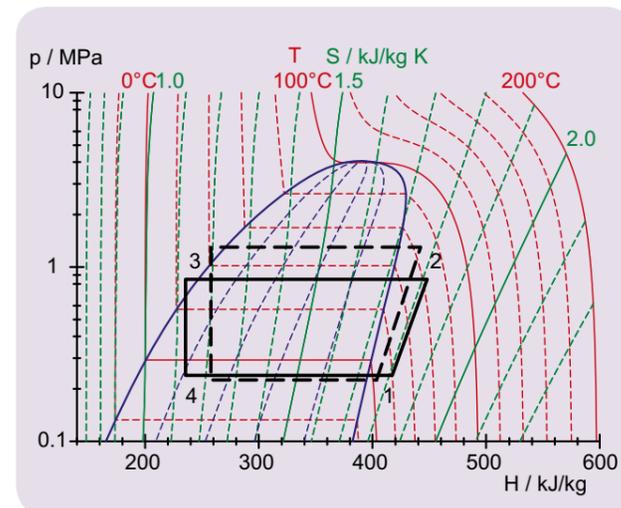


Fig. 2: Rappresentazione del ciclo idealizzato della pompa di calore nel diagramma di Mollier



FUNZIONI

- Misurazione del campo elettrico in un condensatore a piastre in funzione della distanza tra le piastre.
- Misurazione del campo elettrico in un condensatore a piastre in funzione della tensione applicata.

SCOPO

Misurazione del campo elettrico in un condensatore a piastre con il misuratore di campo elettrico

RIASSUNTO

Con il misuratore di campo elettrico è possibile misurare direttamente il campo elettrico in un condensatore a piastre. A tale scopo, una ruota ad alette rotante interrompe il flusso elettrico su una piastra elettrostatica facente parte di un condensatore a piastre. Gli impulsi di tensione così generati vengono amplificati e raddrizzati in una tensione di uscita proporzionale al campo elettrico E che agisce sulla piastra elettrostatica.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Misuratore di campo elettrico (230 V, 50/60 Hz)	1001030 o
	Misuratore di campo elettrico (230 V, 50/60 Hz)	1001029
1	Alimentatore CC 450 V (230 V, 50/60 Hz)	1008535 o
	Alimentatore CC 450 V (115 V, 50/60 Hz)	1008534
1	Multimetro digitale E	1006809
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

1

BASI GENERALI

Con il misuratore di campo elettrico è possibile misurare direttamente i campi elettrici: Davanti a una piastra elettrostatica con quattro settori a stella ruota una ruota ad alette della medesima forma che interrompe costantemente il flusso elettrico e quindi provoca periodicamente cariche elettrostatiche che si scaricano attraverso una resistenza ad alto valore ohmico. Gli impulsi di tensione così generati vengono amplificati e raddrizzati in una tensione di uscita proporzionale al campo elettrico E che agisce sulla piastra elettrostatica.

Nell'esperimento viene misurata l'intensità di campo elettrico

$$(1) \quad E = \frac{U}{d}$$

in un condensatore a piastre con il misuratore di campo elettrico. A tale scopo vengono modificate, da un lato, la tensione applicata U , e dall'altro la distanza tra le piastre d .

ANALISI

Nell'applicazione dell'equazione occorre tenere conto che la piastra elettrostatica è spostata di ca. 1 mm verso il basso rispetto alla piastra inferiore del condensatore. L'equazione 1 deve pertanto essere sostituita dall'equazione

$$E = \frac{U}{d_{\text{eff}}} = \frac{U}{d + 1 \text{ mm}}$$

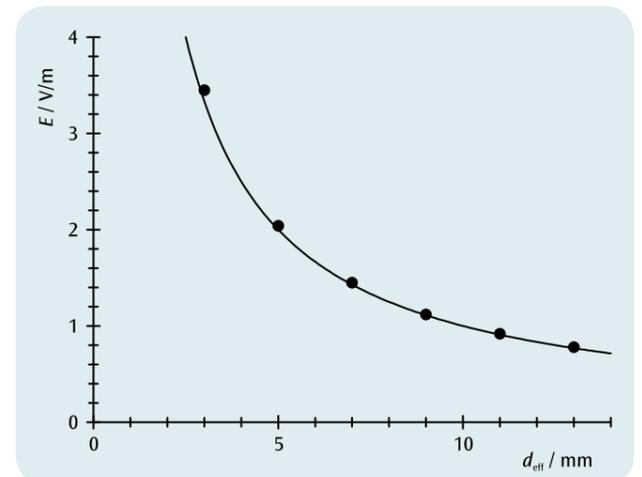


Fig. 1: Campo elettrico nel condensatore a piastre in funzione della distanza effettiva tra le piastre

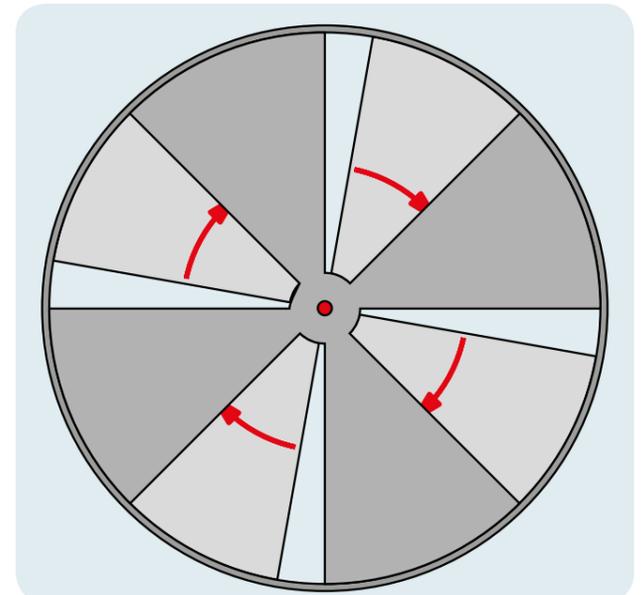


Fig. 2: Ruota ad alette rotante di misuratore di campo elettrico



FUNZIONI

- Misurazione statica della tensione su un condensatore a piastre in funzione della distanza tra le piastre.
- Conferma della proporzionalità tra la tensione e la distanza tra le piastre in caso di brevi distanze tra le piastre.

SCOPO

Misurazione statica della tensione in funzione della distanza tra le piastre

RIASSUNTO

Per aumentare la distanza tra le piastre cariche e separate da qualsiasi tipo di alimentazione di un condensatore a piastre occorre eseguire un lavoro meccanico. Questo può essere facilmente dimostrato come un aumento della tensione tra le piastre effettuando la misurazione con un voltmetro statico.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Misuratore di campo elettrico (230 V, 50/60 Hz)	1001030 o
	Misuratore di campo elettrico (230 V, 50/60 Hz)	1001029
1	Condensatore a piastre D	1006798
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 2,5 mm ²	1002841

1

BASI GENERALI

Le piastre cariche di un condensatore a piastre esercitano una forza di attrazione l'una sull'altra. Per aumentare la distanza tra le piastre di un condensatore carico e separato da qualsiasi alimentazione è pertanto necessario eseguire un lavoro meccanico. L'energia in tal modo fornita al condensatore può essere dimostrata come un aumento della tensione tra le piastre, purché sia garantito che durante la misurazione della tensione non possa fluire alcuna corrente tra le piastre.

Per una descrizione più accurata delle correlazioni viene considerato il campo elettrico omogeneo E tra le piastre del condensatore che portano le cariche Q e $-Q$. Vale

$$(1) \quad E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{A}$$

A : Superficie piastre,

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} : \text{Costante dielettrica del vuoto}$$

Nel caso in cui con la variazione della distanza tra le piastre d non possa fluire alcuna corrente, la carica Q e pertanto anche il campo elettrico E restano invariati.

In caso di distanze brevi, in presenza delle quali il campo elettrico può essere considerato omogeneo, per la tensione U sul condensatore e il campo elettrico E vale

$$(2) \quad U = E \cdot d$$

d : Distanza piastre

vale a dire, la tensione U è proporzionale alla distanza tra le piastre d . Nell'esperimento questo viene verificato con il misuratore di campo elettrico utilizzato come voltmetro statico. In tal modo si garantisce che attraverso il voltmetro non possa fluire alcuna corrente tra le piastre del condensatore e che sia mantenuta la carica Q sulle piastre del condensatore.

ANALISI

Dall'equazione 2 ci si attende nel diagramma $U(d)$ una retta di origine attraverso i punti di misurazione, il cui incremento corrisponde al campo elettrico costante E . Eventuali scostamenti sono da ricondurre al fatto che con una distanza tra le piastre crescente l'omogeneità del campo elettrico non è più garantita.

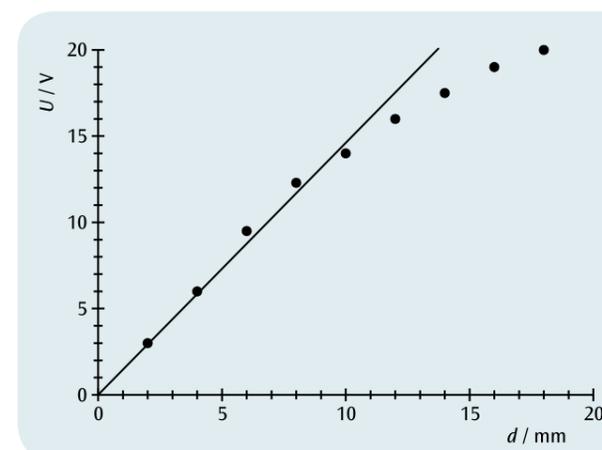


Fig. 1: Tensione U sul condensatore a piastre in funzione della distanza tra le piastre d



SCOPO

Dimostrazione della corrente elettrica che viene creata da gocce d'acqua in movimento e caricate

RIASSUNTO

Una corrente elettrica è formata da cariche che si spostano in un intervallo di tempo. Un flusso di corrente può essere rappresentato facilmente facendo ricorso a gocce d'acqua cariche. Per la misurazione sono usate una buretta e una tazza di Faraday, che viene collegata ad un elettrometro. La carica che si accumula nella tazza di Faraday in un determinato intervallo viene misurata tramite la tensione elettrica, che si accumula in un condensatore. In questo modo si determinano la carica per ogni goccia e la corrente.

FUNZIONI

- Misurazione della carica che tramite le gocce d'acqua cariche viene trasportata in un dato intervallo di tempo da una buretta ad una tazza di Faraday.
- Determinazione della corrente elettrica che viene creata da gocce d'acqua cariche in movimento.
- Determinazione della carica per ogni goccia.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Elettrometro (230 V, 50/60 Hz)	1001025 o
	Elettrometro (115 V, 50/60 Hz)	1001024
1	Accessorio per elettrometro	1006813
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Buretta, 10 ml	1018065
1	Filo di costantana 0,2 mm / 100 m	1000955
1	Alimentatore CC 450 V (230 V, 50/60 Hz)	1008535 o
	Alimentatore CC 450 V (115 V, 50/60 Hz)	1008534
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Cronometro digitale	1002811
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 1000 mm	1002936
2	Manicotto universale	1002830
1	Morsetto universale	1002833
1	Morsetto a pinza 4 mm, non isolato	1002844
1	Set di 3 cavi di sicurezza per esperimenti con apparecchio di caduta libera	1002848
2	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718
1	Palla di Peleo, standard	1013392
1	Set di 10 becher, forma bassa	1002872
Ulteriormente consigliato:		
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544

1

BASI GENERALI

Una corrente elettrica è formata dalla quantità di carica trasportata in un intervallo di tempo. Un flusso di corrente può essere rappresentato facilmente facendo ricorso a gocce d'acqua cariche.

Nell'esperimento un numero N di gocce cariche passa con una velocità approssimativa di una goccia al secondo da una buretta in una tazza di Faraday, la quale è collegata ad un elettrometro con condensatore. Tramite la carica Q accumulata nella tazza di Faraday viene caricato il condensatore e la tensione elettrica in aumento sul condensatore viene osservata e misurata con un multimetro analogico per un determinato intervallo di tempo t . L'ingresso ad alto valore ohmico dell'amplificatore operazionale nell'elettrometro garantisce che il condensatore non si scarichi.

L'osservazione del multimetro analogico indica che la tensione attraverso il condensatore aumenta dello stesso valore per ogni goccia d'acqua carica che giunge nella tazza di Faraday, vale a dire che ogni goccia d'acqua porta sempre la stessa carica

$$(1) \quad q = \frac{Q}{N}$$

La corrente trasportata è

$$(2) \quad I = \frac{Q}{t}$$

Come opzione, la tensione in aumento può anche essere rilevata e rappresentata graficamente tramite il 3B NETlog™ e il 3B NETlab™ in funzione del tempo t .

ANALISI

La carica accumulata nella tazza di Faraday Q viene determinata mentre si legge la tensione U e si calcola Q :

$$Q = C \cdot U \text{ con } C = 1 \text{ nF: capacità del condensatore}$$

Con l'aiusilio di 3B NETlog™ e 3B NETlab™ è possibile misurare l'andamento temporale $Q(t)$. È del tipo a scalino: i singoli scalini contrassegnano la carica q che giunge con ogni singola goccia per ogni intervallo di tempo Δt . Il fatto che ogni goccia d'acqua porti all'incirca la stessa carica è qui dimostrato dall'altezza costante degli scalini.

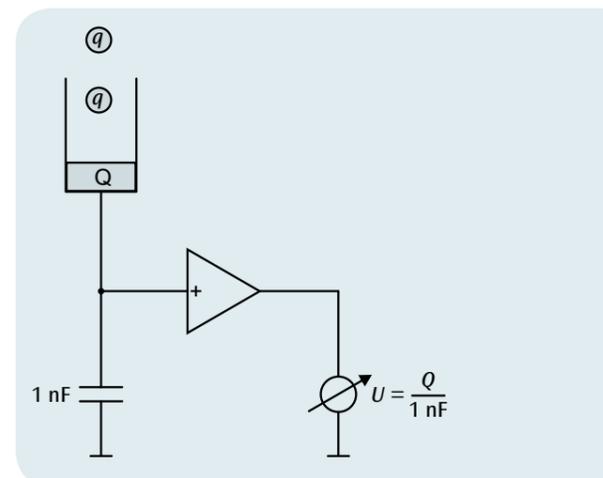


Fig. 1: Rappresentazione schematica della spiegazione del principio di misurazione

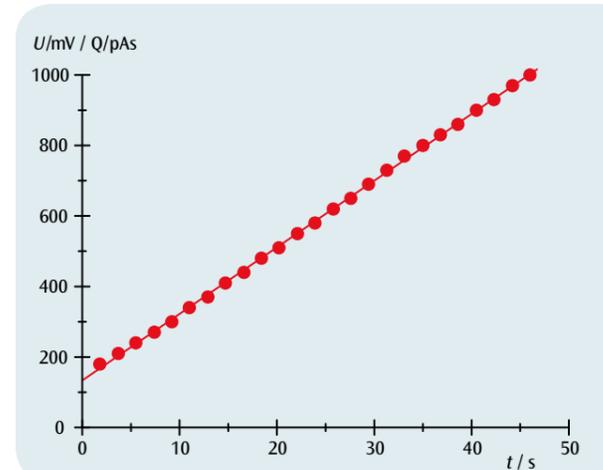


Fig. 2: Carica accumulata Q in funzione del tempo t



FUNZIONI

- Misurazione della caduta di tensione U in funzione della distanza d tra i punti di contatto con corrente fissa I .
- Misurazione della caduta di tensione U in funzione della corrente I con distanza fissa d tra i punti di contatto.
- Determinazione della conduttività elettrica di rame e alluminio e raffronto con i valori della letteratura.

SCOPO

Determinazione della conduttività elettrica di rame e alluminio

RIASSUNTO

La conduttività elettrica è una grandezza fortemente dipendente dal materiale. Essa è definita come fattore di proporzionalità tra la densità di corrente e il campo elettrico nel materiale analizzato. Nell'esperimento viene determinata in una misurazione con quattro conduttori di corrente e tensione su aste metalliche con sezioni e lunghezze note.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Asta conduttiva termica Al	1017331
1	Asta conduttiva termica Cu	1017330
1	Alimentatore CC 1-32 V, 0-20 A (115 V, 50/60 Hz)	1012858 o
	Alimentatore CC 1-32 V, 0-20 A (230 V, 50/60 Hz)	1012857
1	Microvoltmetro (230 V, 50/60 Hz)	1001016 o
	Microvoltmetro (115 V, 50/60 Hz)	1001015
1	Multimetro digitale E	1006809
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 2,5 mm ²	1002841



BASI GENERALI

La conduttività elettrica è una grandezza fortemente dipendente dal materiale. Essa è definita come fattore di proporzionalità tra la densità di corrente e il campo elettrico nel materiale analizzato. Nei metalli è determinata dalla densità numerica e dalla mobilità degli elettroni nella banda di conduzione e dipende dalla temperatura.

Dal rapporto

$$(1) \quad j = \sigma \cdot E$$

j : densità di corrente, E : campo elettrico

deriva per un conduttore metallico lungo con sezione A e lunghezza d una relazione tra la corrente I attraverso il conduttore e la tensione U lungo il percorso d :

$$(2) \quad I = j \cdot A = A \cdot \sigma \cdot \frac{U}{d}$$

Questa relazione viene usata nell'esperimento per determinare la conduttività delle aste metalliche in una misura su quattro conduttori. Per questo viene applicata su due alimentazioni la corrente I e misurata la caduta di tensione U derivante tra due punti di contatto ad una distanza d . Poiché è nota la sezione A è possibile calcolare σ .

Nell'esperimento sono state utilizzate le stesse aste metalliche, su cui è stata analizzata la conducibilità termica nell'esperimento UE2020100. Utilizzando due punte di misura è stata misurata la caduta di tensione tra i punti di misura, che possono essere anche usati per la misurazione della temperatura lungo le aste.

NOTA

Tramite un raffronto dei valori misurati con i valori ottenuti nell'esperimento UE2020100 per la conduttività termica si conferma la legge di Wiedemann-Franz. Essa descrive la proporzionalità della conduttività termica e elettrica dei metalli mediante un fattore di proporzionalità universale in funzione della temperatura.

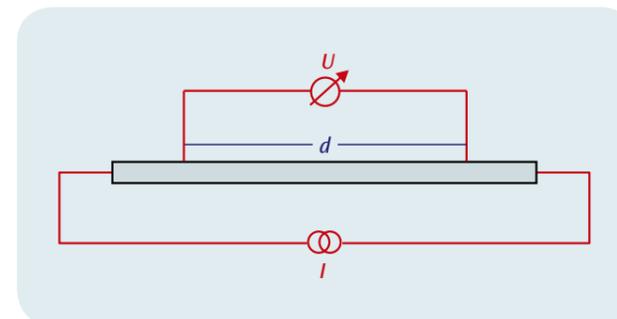


Fig. 3: Rappresentazione schematica della misurazione su quattro conduttori

ANALISI

I valori misurati con corrente fissa I sono stati rappresentati in un diagramma $U-d$. Le tensioni di contatto tra i punti di misura e l'asta metallica si notano anche per lo spostamento delle linee rette dall'origine. La pendenza delle rette che si delinea è conforme a (2)

$$\alpha = \frac{I}{A \cdot \sigma}$$

Poiché I e A sono noti, è possibile calcolare la conduttività:

$$\sigma = \frac{I}{A \cdot \alpha}$$

Nei diagrammi $U-I$ la pendenza è

$$\beta = \frac{d}{A \cdot \sigma}$$

e quindi

$$\sigma = \frac{d}{A \cdot \beta}$$

Un raffronto con i valori della letteratura per il rame puro e l'alluminio mostra che le aste metalliche utilizzate non sono costituite da materiale puro, ma da leghe di rame e alluminio.

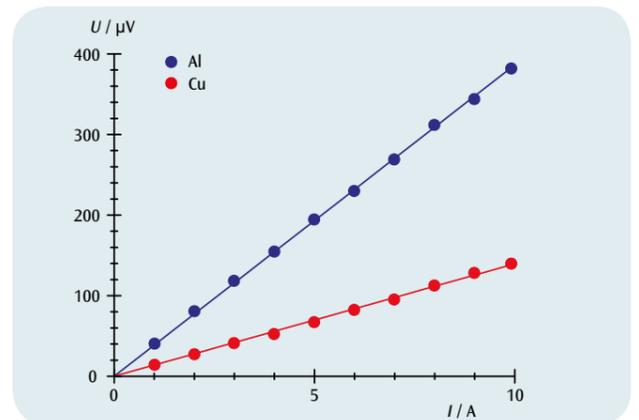


Fig. 1: Diagramma $U-I$ per il rame e l'alluminio

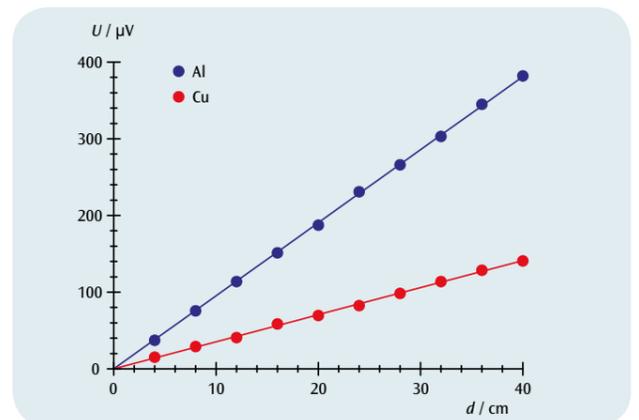
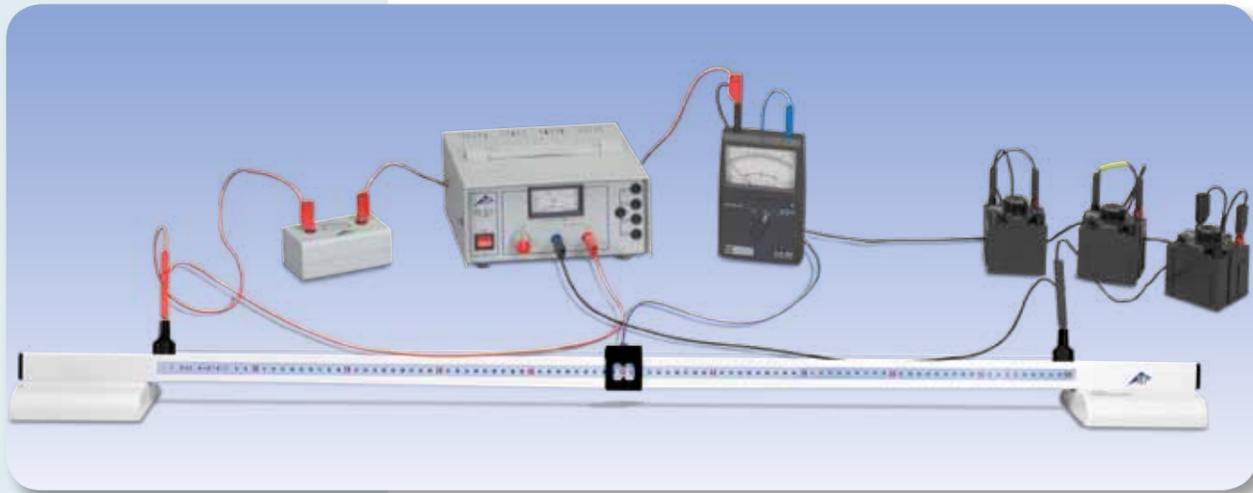


Fig. 2: Diagramma $U-d$ per il rame e l'alluminio



FUNZIONI

- Determinazione di resistenze ohmiche in un ponte di Wheatstone.
- Valutazione della precisione di misura.

SCOPO

Determinazione di resistenze ohmiche

RIASSUNTO

Le resistenze ohmiche vengono determinate in un collegamento in parallelo di due divisori di tensione collegati alla stessa sorgente di tensione continua. Il primo divisore di tensione è costituito dalla resistenza da misurare e dalla resistenza di riferimento, il secondo da un filo per resistenze di 1 m che viene diviso in due parti da un contatto strisciante. Il loro rapporto viene modificato finché la corrente trasversale I tra i due divisori di tensione è portata a zero.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Ponte di resistenze	1009885
1	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1002776 o
	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1002775
1	Galvanometro zero CA 403	1002726
1	Decade di resistenze 1 Ω	1002730
1	Decade di resistenze 10 Ω	1002731
1	Decade di resistenze 100 Ω	1002732
1	Resistenze di precisione 1 Ω	1009843
1	Resistenze di precisione 10 Ω	1009844
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

1

BASI GENERALI

Le resistenze ohmiche si determinano in maniera classica con il ponte di misura/bilanciamento che ha preso il nome da *Ch. Wheatstone* mediante il confronto con una resistenza di riferimento. A tale scopo si realizza un collegamento in parallelo di due divisori di tensione, collegati alla stessa sorgente di tensione continua. Il primo divisore di tensione è costituito dalla resistenza R_x da misurare e dalla resistenza di riferimento R_{ref} , il secondo invece dalle resistenze R_1 e R_2 , la cui somma durante il bilanciamento rimane inalterata (vedi fig. 1).

Il rapporto tra le resistenze R_1 e R_2 e, se necessario, anche la resistenza di riferimento R_{ref} vengono modificati finché la corrente trasversale I è portata a zero. Questo avviene esattamente quando i rapporti tra le resistenze di entrambi i divisori di tensione sono uguali. Da questa condizione di bilanciamento si ottiene la resistenza sconosciuta R_x

$$(1) \quad R_x = R_{ref} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

La precisione del risultato dipende dalla precisione della resistenza di riferimento R_{ref} e del rapporto tra le resistenze R_1/R_2 , nonché dalla sensibilità del galvanometro zero.

Nell'esperimento, il secondo divisore di tensione è costituito da un filo per resistenze di 1 m che viene diviso da un contatto strisciante in due parti dalla lunghezza s_1 e s_2 . Essendo la somma $R_1 + R_2$ costante, la resistenza di riferimento viene scelta possibilmente in modo tale che le due parti presentino all'incirca la stessa lunghezza e quindi la stessa resistenza.

ANALISI

Poiché le resistenze R_1 e R_2 sono rappresentate dalle parti del filo per resistenze, (1) viene convertito in

$$R_x = R_{ref} \cdot \frac{s_1}{s_2} = R_{ref} \cdot \frac{s_1}{1m - s_1}$$

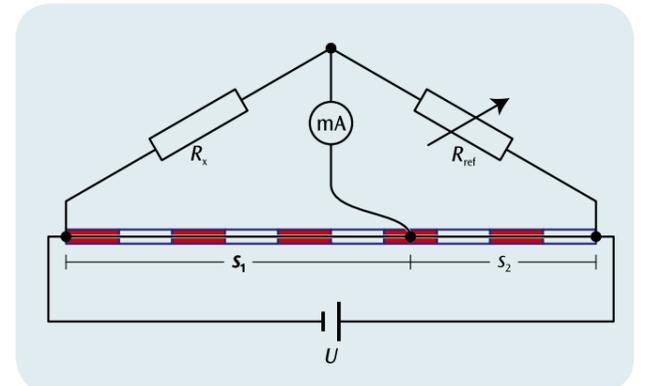
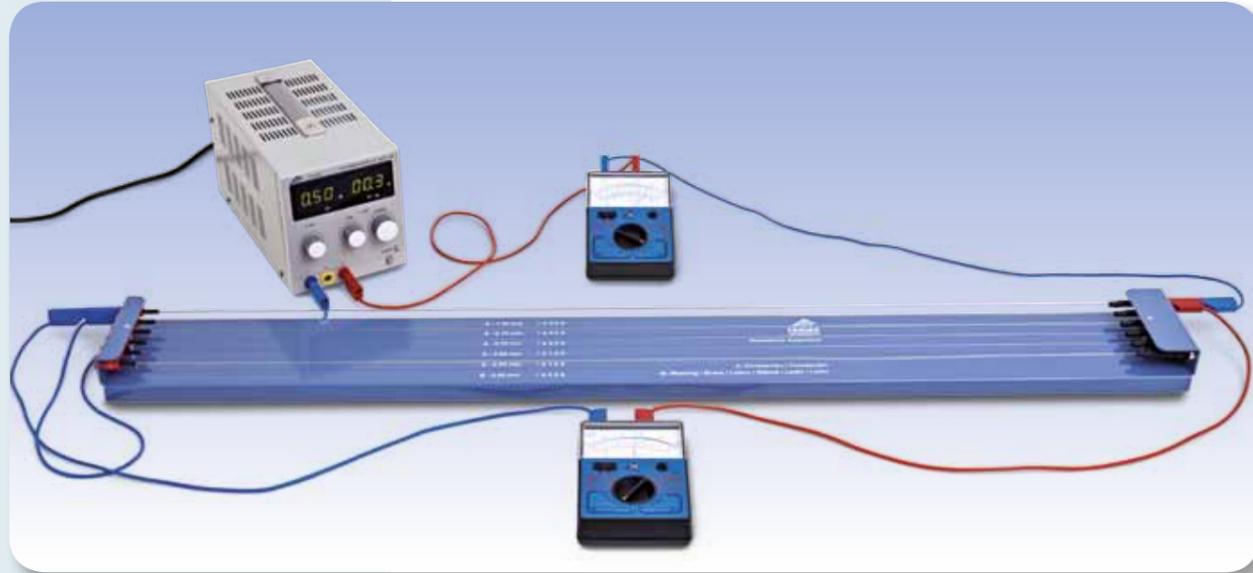


Fig. 1: Rappresentazione schematica del ponte di Wheatstone



FUNZIONI

- Conferma della legge di Ohm per un filo di costantana e uno di ottone.
- Conferma della legge di Ohm per fili di costantana di lunghezza diversa.
- Conferma della legge di Ohm per fili di costantana di spessore diverso.

SCOPO

Conferma della legge di Ohm

RIASSUNTO

In conduttori elettrici semplici, la corrente I è, proporzionale alla tensione applicata U . La costante di proporzionalità, ovvero la resistenza ohmica R , dipende dalla lunghezza x del conduttore, dalla sua sezione trasversale A e dal tipo di materiale. Questa relazione viene verificata su fili di costantana e di ottone.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio di resistenza	Cat. n°
1	Apparecchio di resistenza	1009949
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
2	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843



BASI GENERALI

Georg Simon Ohm dimostrò per primo nel 1825 che la corrente che fluisce attraverso un conduttore elettrico semplice è proporzionale alla tensione applicata.

Vale a dire che si applica la legge di Ohm

$$(1) \quad U = R \cdot I$$

ove la costante di proporzionalità R , è detta la resistenza del conduttore. Per un filo metallico con lunghezza x e sezione trasversale A , la resistenza R è data da

$$(2) \quad R = \rho \cdot \frac{x}{A}$$

In questo caso, la resistenza specifica ρ dipende dal materiale di cui è composto il filo. Per confermare queste relazioni fondamentali, nell'esperimento viene esaminata la proporzionalità tra corrente e tensione per fili metallici di spessore, lunghezza e materiale diversi. Inoltre si determina la resistività e la si confronta con i valori di letteratura.

ANALISI

La sezione trasversale A si calcola dallo spessore d del filo:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

I valori di misurazione vengono rappresentati in tre diagrammi $U-I$ in cui varia rispettivamente una delle tre grandezze ρ , x e d come parametro.

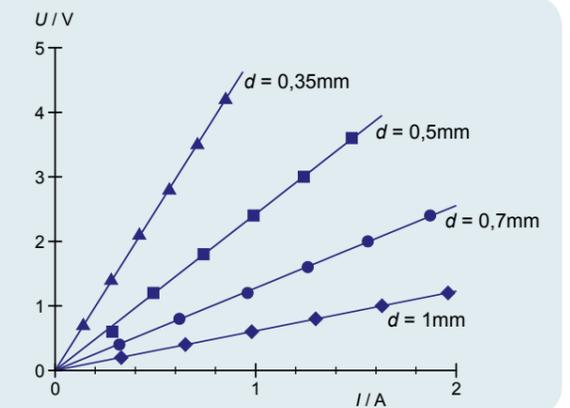


Fig. 3: Diagramma $U-I$ per filo di costantana di spessore diverso

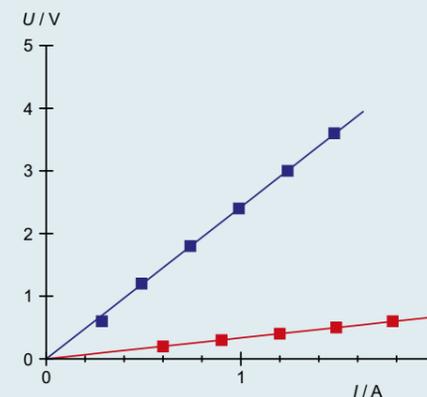


Fig. 1: Diagramma $U-I$ per filo di costantana (blu) e filo di ottone (rosso)

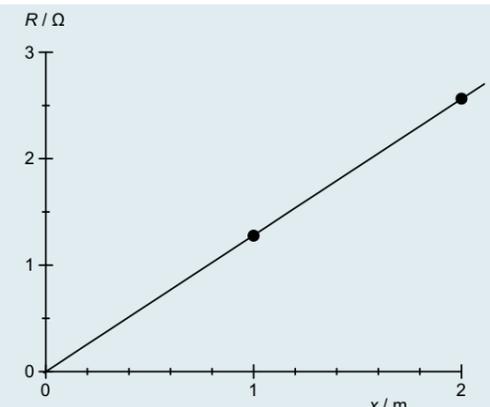


Fig. 4: Resistenza R come funzione della lunghezza

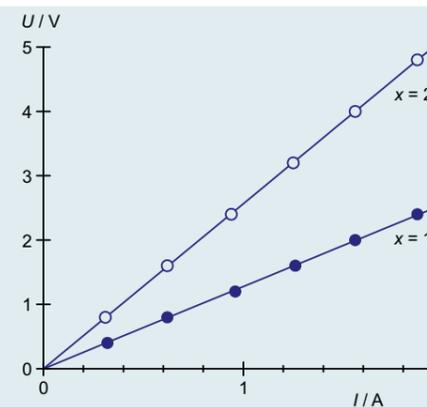


Fig. 2: Diagramma $U-I$ per filo di costantana di lunghezza diversa

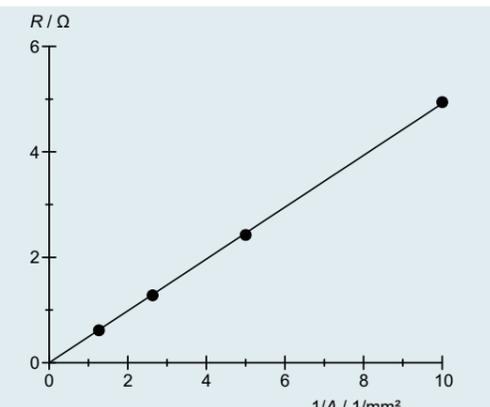
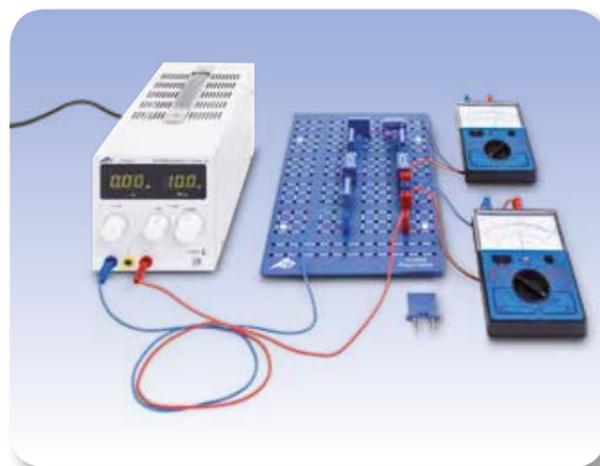
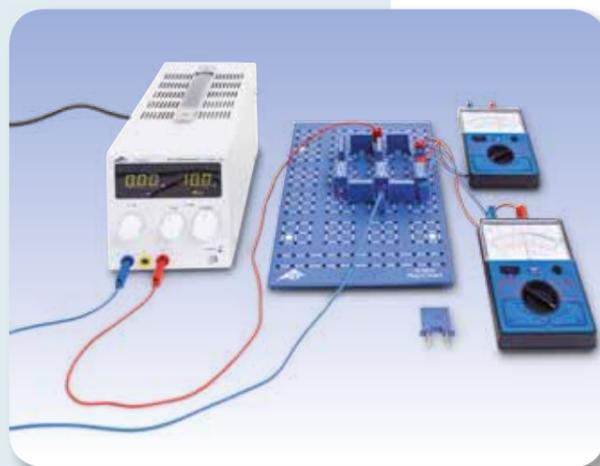


Fig. 5: Resistenza R come funzione del valore reciproco della sezione trasversale A



FUNZIONI

- Conferma delle leggi di Kirchhoff per un collegamento in serie di resistenze.
- Determinazione della resistenza totale di un collegamento in serie.
- Conferma delle leggi di Kirchhoff per un collegamento in parallelo di resistenze.
- Determinazione della resistenza totale di un collegamento in parallelo.

SCOPO

Misurazioni di tensione e corrente su collegamenti in serie e in parallelo di resistenze

RIASSUNTO

Le leggi di Kirchhoff sono di fondamentale importanza per il calcolo delle correnti e delle tensioni parziali in circuiti elettrici ramificati. In questo esperimento si dimostrano le leggi di Kirchhoff tramite misurazioni di correnti e tensioni parziali delle resistenze collegate in serie e in parallelo.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 220 Ω, 2 W, P2W19	1012912
1	Resistenza 330 Ω, 2 W, P2W19	1012913
1	Resistenza 470 Ω, 2 W, P2W19	1012914
1	Resistenza 1 kΩ, 2 W, P2W19	1012916
1	Resistenza 6,8 kΩ, 2 W, P2W19	1012921
1	Resistenza 10 kΩ, 0,5 W, P2W19	1012922
1	Resistenza 100 kΩ, 0,5 W, P2W19	1012928
1	Set di 10 connettori a nastro, P2W19	1012985
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
2	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

1

BASI GENERALI

Nel 1845, *Gustav Robert Kirchhoff* formulò le sue leggi, illustrando la relazione fra correnti e tensioni in circuiti elettrici composti da più circuiti parziali. La legge dei nodi afferma che su ogni punto di diramazione di un circuito elettrico, la somma delle correnti entranti è uguale a quella delle correnti uscenti. La legge delle maglie afferma che in ogni circuito parziale chiuso, in ogni maglia di una rete, la somma delle tensioni parziali sui conduttori è uguale alla tensione totale della sorgente di tensione. Per le maglie si definisce un senso di rotazione. Le correnti che fluiscono nel senso di rotazione e le tensioni che generano correnti con la stessa direzione devono essere considerate come positive. In caso contrario devono essere considerate come negative. Questi principi possono essere applicati ad es. su collegamenti in serie o in parallelo di resistenze.

Nel caso di un collegamento in serie di n resistenze, l'intensità di corrente I è uguale su ogni punto del circuito elettrico. Secondo la legge delle maglie, la somma delle tensioni parziali sulle resistenze è uguale alla tensione della sorgente di corrente attiva.

$$(1) \quad U = U_1 + \dots + U_n$$

Per la resistenza totale R_{ser} risulta:

$$(2) \quad R_{ser} = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + \dots + U_n}{I} = R_1 + \dots + R_n$$

Nel caso di un collegamento in parallelo di resistenze si generano i cosiddetti nodi del circuito elettrico. Le misurazioni sui nodi dimostrano che la somma delle correnti entranti è uguale alla somma di quelle uscenti. La tensione su ciascun nodo è uguale. Con il principio dei nodi è possibile calcolare correnti sconosciute in un nodo. La somma delle correnti parziali sulle resistenze singole è uguale alla corrente totale I e si ha:

$$(3) \quad I = I_1 + \dots + I_n$$

Per la resistenza totale R_{par} si ha di conseguenza:

$$(4) \quad \frac{1}{R_{par}} = \frac{I}{U} = \frac{I_1 + \dots + I_n}{U} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Nell'esperimento vengono esaminati un collegamento in serie e uno in parallelo di tre resistenze. Per la conferma dei principi di Kirchhoff vengono misurate la corrente totale e le correnti parziali, nonché la tensione totale e le tensioni parziali.

ANALISI

Dai valori misurati del collegamento in serie e in parallelo si calcola la rispettiva resistenza totale R e la si confronta con il valore teorico risultante dalle equazioni (2) e (4).

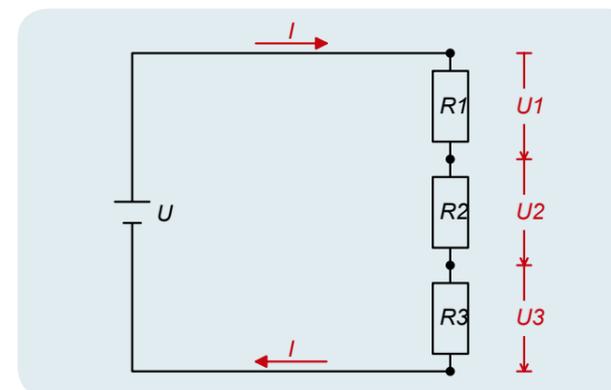


Fig. 1: Rappresentazione schematica delle leggi di Kirchhoff per un collegamento in serie di resistenze

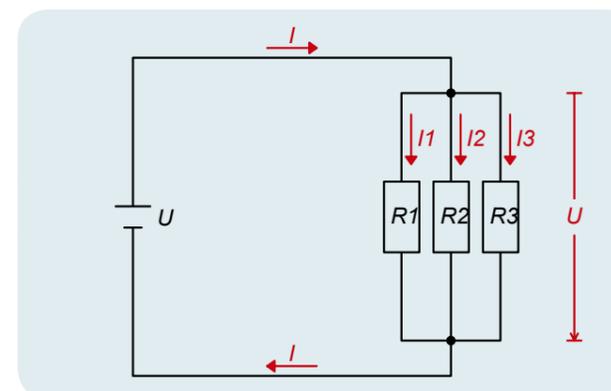
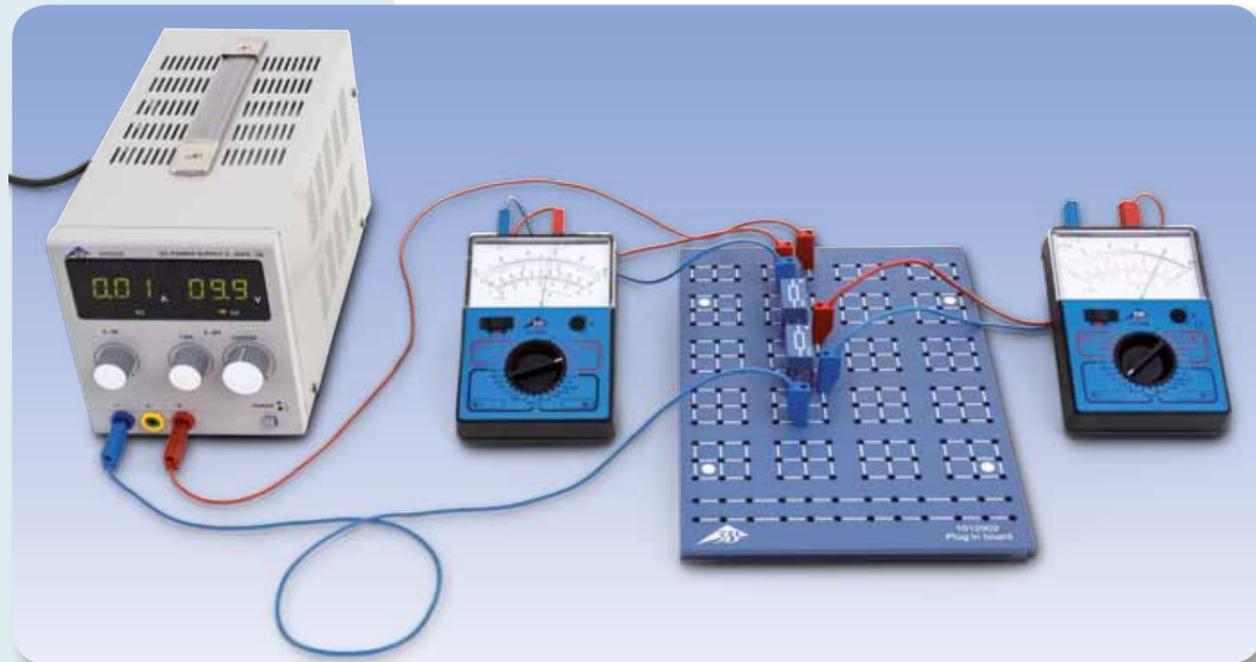


Fig. 2: Schema elettrico per il collegamento in parallelo delle resistenze



FUNZIONI

- Misurazioni di tensione e di corrente sul divisore di tensione non sotto carico in funzione della resistenza parziale R_2 .
- Misurazioni di tensione e di corrente sul divisore di tensione non sotto carico con resistenza totale costante $R_1 + R_2$.
- Misurazioni di tensione e di corrente sul divisore di tensione sotto carico in funzione della resistenza di carico R_L .

SCOPO

Misurazioni di tensione e corrente sul divisore di tensione non sotto carico e sotto carico

RIASSUNTO

Un divisore di tensione consiste nel caso più semplice in un collegamento in serie di due resistenze ohmiche sulle quali la tensione totale si suddivide in due tensioni parziali. Si parla di divisore di tensione sotto carico quando si deve considerare una resistenza di carico supplementare. Le correnti e le tensioni parziali vengono calcolate come per ogni altro collegamento in serie e in parallelo applicando le leggi di Kirchhoff. Nel caso del divisore di tensione non sotto carico, la tensione parziale varia a seconda della resistenza parziale tra il valore zero e la tensione totale. Una notevole differenza si ha nel caso del divisore di tensione sotto carico con resistenze di carico minime. In questo caso, la tensione parziale acquisisce indipendentemente dalla resistenza parziale valori molto bassi.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 47 Ω , 2 W, P2W19	1012908
2	Resistenza 100 Ω , 2 W, P2W19	1012910
1	Resistenza 150 Ω , 2 W, P2W19	1012911
1	Resistenza 470 Ω , 2 W, P2W19	1012914
1	Potenzimetro 220 Ω , 3 W, P4W50	1012934
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
2	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840



BASI GENERALI

Un divisore di tensione consiste nel caso più semplice in un collegamento in serie di due resistenze ohmiche sulle quali la tensione totale si suddivide in due tensioni parziali. Si parla di divisore di tensione sotto carico quando si deve considerare una resistenza di carico supplementare. Le correnti e le tensioni parziali vengono calcolate come per ogni altro collegamento in serie e in parallelo applicando le leggi di Kirchhoff.

Nel caso di un divisore di tensione non sotto carico, la resistenza totale è data da (vedere Fig. 1)

$$(1) \quad R = R_1 + R_2$$

Attraverso entrambe le resistenze scorre la stessa corrente

$$(2) \quad I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

U : tensione totale

Sulla resistenza R_2 diminuisce pertanto la tensione parziale

$$(3) \quad U_2 = I \cdot R_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Nel caso del divisore di tensione sotto carico occorre considerare anche la resistenza di carico R_L (vedere Fig. 2) e sostituire nelle equazioni soprastanti la resistenza R_2 con

$$(4) \quad R_p = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

Per la tensione parziale U_2 vale ora

$$(5) \quad U_2 = I \cdot R_p = U \cdot \frac{R_p}{R_1 + R_p}$$

Nell'esperimento, il divisore di tensione non sotto carico è costituito da resistenze discrete R_1 e R_2 , ma per R_2 sono stati utilizzati valori diversi. In alternativa viene impiegato un potenziometro in cui la resistenza totale $R_1 + R_2$ è inevitabilmente costante e la resistenza parziale R_2 viene determinata dalla posizione della presa centrale. La sorgente di tensione fornisce una tensione costante U che resta invariata per l'intero esperimento. Vengono misurate rispettivamente le tensioni e le correnti parziali.

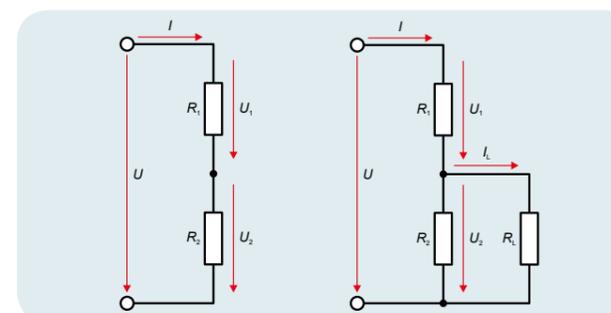


Fig. 1: Schema elettrico del divisore di tensione non sotto carico

Fig. 2: Schema elettrico del divisore di tensione sotto carico

ANALISI

Nel caso del divisore di tensione non sotto carico, la tensione parziale U_2 raggiunge la tensione totale U quando R_2 è notevolmente più grande di R_1 e raggiunge il valore zero quando R_2 diventa minima.

Nel caso del divisore di tensione sotto carico con grandi resistenze di carico, la resistenza parallela $R_p = R_2$ e la tensione parziale U_2 risulta da (3). Una notevole differenza rispetto al divisore di tensione non sotto carico si ha con resistenze di carico minime. Qui vale $R_p = R_L$ in quanto la corrente scorre principalmente attraverso la resistenza di carico e la tensione parziale U_2 acquisisce valori molto bassi indipendentemente da R_2 .

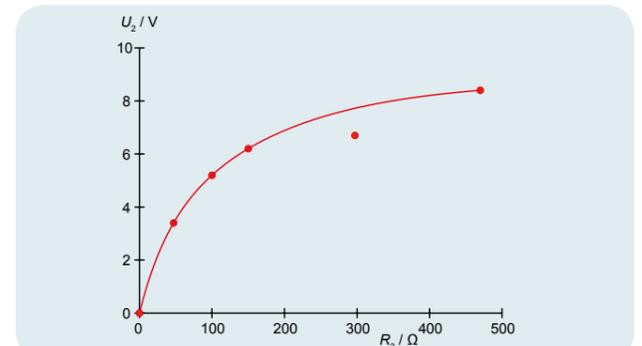


Fig. 3: Tensione parziale U_2 in funzione della resistenza parziale R_2 con divisore di tensione non sotto carico

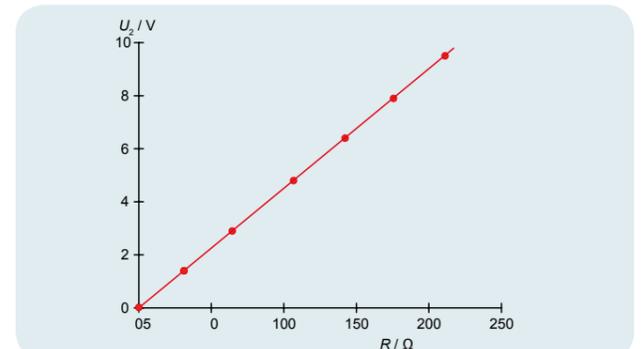


Fig. 4: Tensione parziale U_2 in funzione della resistenza parziale R_2 con divisore di tensione non sotto carico con resistenza totale costante $R_1 + R_2$

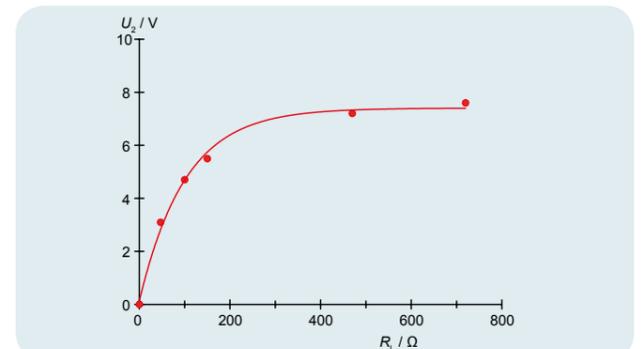


Fig. 5: Tensione parziale U_2 in funzione della resistenza di carico R_L con divisore di tensione sotto carico



FUNZIONI

- Produzione di idrogeno per elettrolisi e misurazione del volume di idrogeno V .
- Misurazione del lavoro elettrico W necessario con tensione fissa U_0 .
- Calcolo della costante di Faraday F .

SCOPO

Determinazione della costante di Faraday

RIASSUNTO

Per determinare la costante di Faraday, dall'acqua viene prodotta per elettrolisi una determinata quantità di idrogeno e ossigeno e viene misurata la carica trasportata nel processo.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Voltmetro di Hofmann	1002899
1	Misuratore di energia e di potenza con interfaccia (230 V, 50/60 Hz)	1003132 o
	Misuratore di energia e di potenza con interfaccia (115 V, 50/60 Hz)	1003131
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

Ulteriormente necessario:

Acido solforico, 1 mol/l

1

BASI GENERALI

Viene chiamata **elettrolisi** la separazione di un legame chimico per effetto della corrente elettrica. Il processo di conduzione elettrica è collegato a una separazione di materiali in cui la carica trasportata Q e la quantità di materiale separata n sono proporzionali l'una all'altra. La costante di proporzionalità viene definita **costante di Faraday** ed è una costante naturale universale.

Più precisamente, nella proporzionalità tra la carica Q e il numero di moli n della quantità di materiale separato deve essere considerata anche la valenza z degli ioni separati. Vale

$$(1) \quad Q = F \cdot n \cdot z$$

È quindi possibile determinare la costante di Faraday misurando, a valenza nota, la carica Q e il numero di mole n di un processo elettrolitico.

Nell'esperimento, dall'acqua viene prodotta per elettrolisi una determinata quantità di idrogeno e di ossigeno. Per determinare la carica Q trasportata nel processo viene misurato il lavoro elettrico

$$(2) \quad W = Q \cdot U_0$$

che viene impiegato per l'elettrolisi in presenza di una tensione costante U_0 .

Il numero di moli n_H degli ioni di idrogeno separati viene determinato in base al volume di idrogeno V_{H_2} raccolto a temperatura ambiente T e pressione esterna p . A tale scopo occorre tuttavia tenere presente che l'idrogeno viene raccolto in forma molecolare e che per ogni molecola di idrogeno raccolta sono stati separati due ioni di idrogeno. Dall'equazione di stato del gas ideale deriva pertanto:

$$(3) \quad n_H = 2 \cdot \frac{p \cdot V_{H_2}}{R \cdot T}$$

$$R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot K} : \text{Costante dei gas universale}$$

ANALISI

Per la valenza degli ioni di idrogeno vale $z_H = 1$. Dalle equazioni (1), (2) e (3) si ottiene quindi l'equazione condizionale

$$F = \frac{W}{U_0} \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot p \cdot V_{H_2} \cdot n_H} = \frac{W}{U_0} \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot p \cdot V_{H_2}}$$

A titolo di confronto, può essere determinato anche il volume V_{O_2} dell'ossigeno raccolto. Esso sarà pari solo alla metà del volume di idrogeno, in quanto per ogni molecola di acqua scissa si separano due ioni di idrogeno e uno di ossigeno. Pertanto la valenza degli ioni di ossigeno sarà $z_O = 2$.

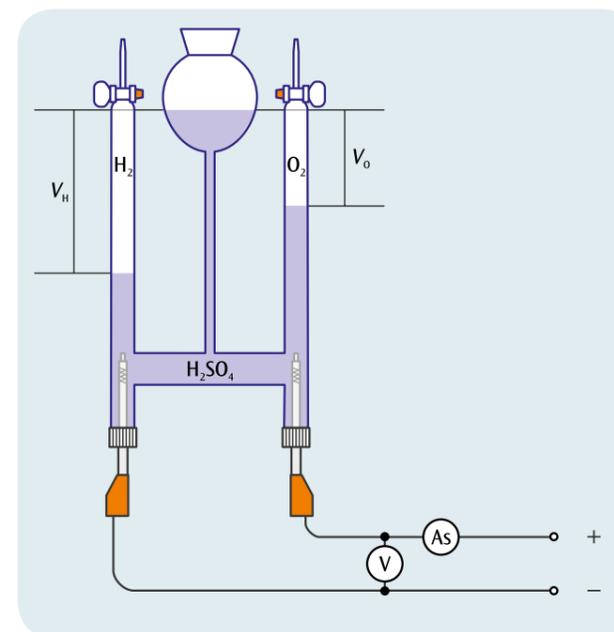
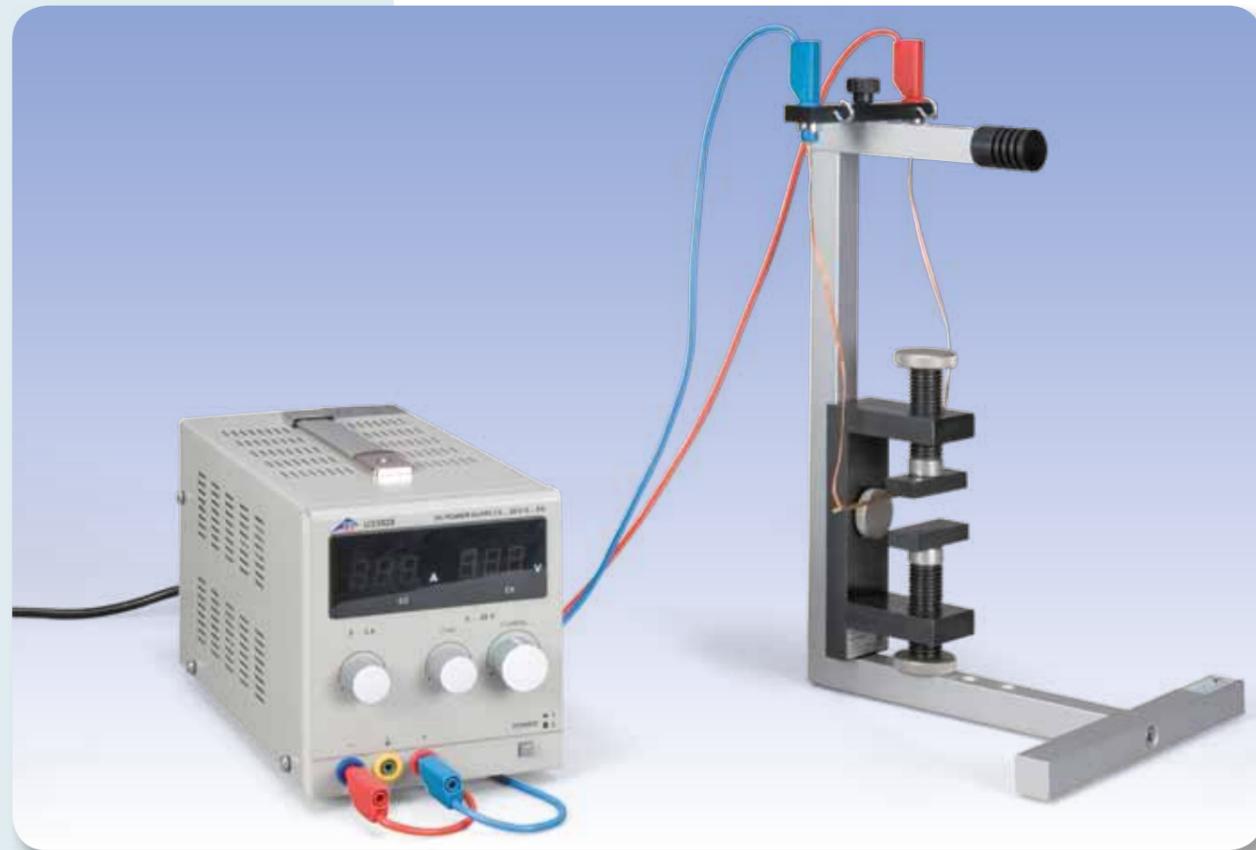


Fig. 1: Rappresentazione schematica



FUNZIONI

- Determinazione della direzione della forza di Lorentz.
- Determinazione della forza in funzione della corrente.
- Determinazione della forza in funzione della lunghezza efficace del conduttore.
- Determinazione della forza in funzione della distanza tra le espansioni polari del magnete permanente.

SCOPO

Misurazione della forza esercitata su un conduttore attraversato da corrente in un campo magnetico

RIASSUNTO

Viene misurata la forza di Lorentz esercitata su un'asta di rame attraversata da corrente, appesa in orizzontale come un'altalena a due conduttori di corrente verticali in un campo magnetico. Dopo l'inserimento della corrente l'altalena viene spostata dalla verticale di un determinato angolo con cui è possibile calcolare la forza di Lorentz. Vengono modificati la corrente attraverso il conduttore, il campo magnetico e la lunghezza efficace del conduttore nel campo magnetico.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Kit per elettromagnetismo	1002661
1	Magnete permanente con distanza tra i poli regolabile	1002660
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718

BASI GENERALI

Gli elettroni che si muovono in un campo magnetico vengono deviati perpendicolarmente al campo magnetico e alla direzione di movimento. La forza di deviazione, forza di Lorentz, esercitata su un singolo elettrone tuttavia non può praticamente essere rilevata con la tecnica di misurazione poiché anche in caso di campo magnetico forte e velocità elevata dell'elettrone è molto piccola. La situazione è diversa quando si colloca un conduttore attraversato da corrente in un campo magnetico omogeneo. Nel conduttore si muovono diversi portatori di carica con la stessa velocità di deriva v . Sul conduttore agisce una forza risultante dalla somma di tutte le forze di Lorentz esercitate sui singoli portatori di carica.

Se in un conduttore diritto, attraversato da corrente, con una lunghezza L e un'area della sezione A

$$(1) \quad N = n \cdot A \cdot L$$

n : Densità numerica

si muovono elettroni ad una velocità di deriva v in direzione del conduttore, la corrente attraverso il conduttore corrisponde a

$$(2) \quad I = n \cdot e \cdot A \cdot v$$

e : Carica fondamentale

Se il conduttore si trova in un campo magnetico B , su tutti gli elettroni "in deriva" agisce la forza di Lorentz

$$(3) \quad F = N \cdot e \cdot v \times B$$

Se il conduttore è allineato perpendicolarmente al campo magnetico, l'equazione (3) si può semplificare in

$$(4) \quad F = I \cdot B \cdot L$$

dove F è allineata perpendicolarmente al conduttore e al campo magnetico. Nell'esperimento viene misurata la forza di Lorentz F esercitata su un'asta di rame attraversata da corrente, appesa in orizzontale come un'altalena a due conduttori di corrente verticali in un campo magnetico (vedi fig. 1). Dopo l'inserimento della corrente l'altalena viene spostata dalla verticale per azione della forza di Lorentz F di un angolo φ , quindi per F si applica l'equazione di determinazione

$$(5) \quad F = m \cdot g \cdot \tan \varphi$$

$m = 6,23$ g: Massa dell'asta di rame

Il campo magnetico B viene generato da un magnete permanente di cui è possibile variare la distanza tra le espansioni polari d per modificare B . Ruotando le espansioni polari di 90° è inoltre possibile modificare la loro larghezza b nella direzione del conduttore e in questo modo anche la lunghezza efficace L del conduttore nel campo magnetico. La lunghezza efficace L del conduttore è leggermente maggiore della larghezza b delle espansioni polari, in quanto il campo magnetico disomogeneo "fuoriesce" dai bordi delle espansioni polari; ciò si verifica tanto più quanto maggiore è la distanza d delle espansioni polari. Con buona approssimazione si ottiene

$$(6) \quad L = b + d$$

ANALISI

L'angolo φ può essere ricavato dalla lunghezza di sospensione s e dallo spostamento orizzontale x dell'asta di rame:

$$\frac{x}{\sqrt{s^2 - x^2}} = \tan \varphi$$

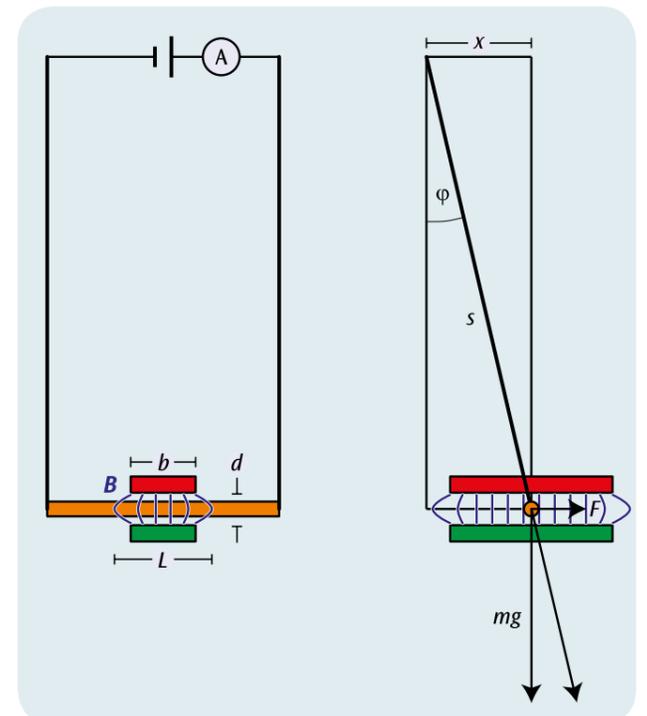


Fig. 1: Disposizione per la misurazione, vista laterale e anteriore

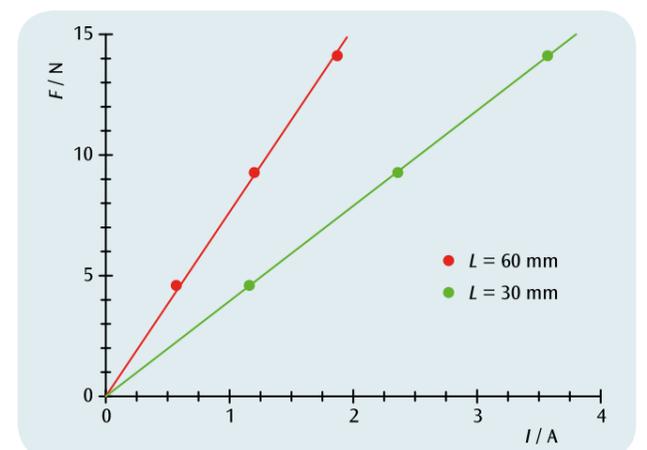
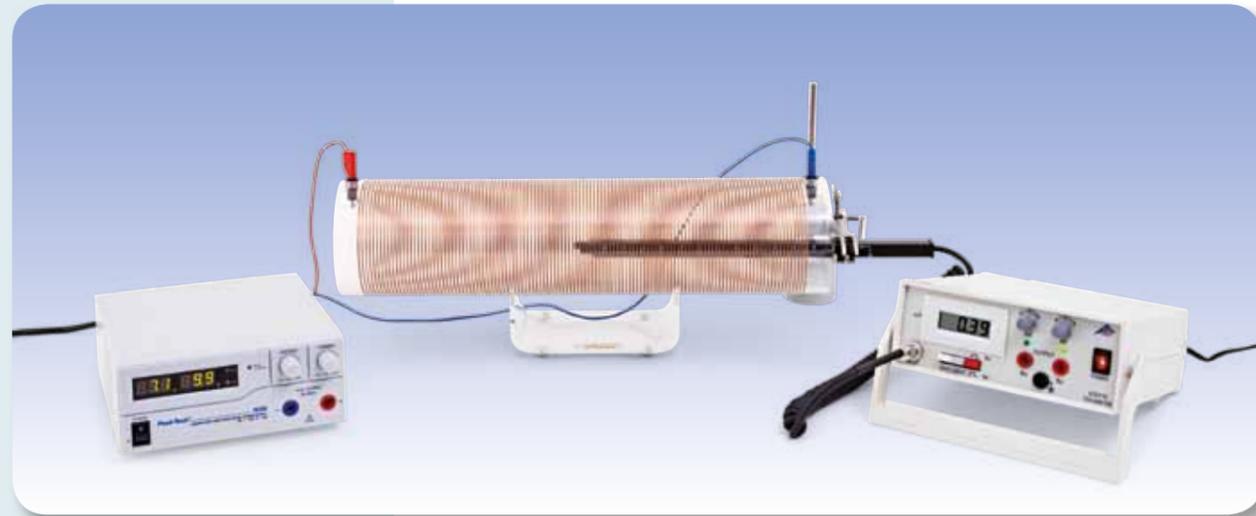


Fig. 2: Forza su un conduttore attraversato da corrente in funzione dell'intensità di corrente I per due diverse lunghezze del conduttore L . Gli incrementi della retta di origine tracciata sono proporzionali a L .



FUNZIONI

- Determinazione dell'intensità del campo magnetico B in una bobina cilindrica in funzione dell'intensità di corrente I .
- Misurazione dell'intensità del campo magnetico B in una bobina cilindrica in funzione dell'intensità di corrente I con densità delle spire variabile.
- Conferma della diretta proporzionalità tra l'intensità del campo magnetico e la densità delle spire per bobine lunghe.

SCOPO

Determinazione del campo magnetico di bobine cilindriche di diversa lunghezza

RIASSUNTO

L'intensità del campo magnetico all'interno di una bobina cilindrica lunga è direttamente proporzionale alla corrente della bobina e alla densità delle spire, ma indipendente dal raggio della bobina, purché quest'ultima abbia una lunghezza significativamente maggiore rispetto al suo diametro (bobina lunga). Ciò viene esaminato in questo esperimento con due bobine di diverso diametro e con una bobina con densità delle spire variabile.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Bobina di campo 100 mm	1000591
1	Bobina di campo 120 mm	1000592
1	Bobina a densità di spire variabile	1000965
1	Supporto per bobine cilindriche	1000964
1	Teslametro 200 mT (230 V, 50/60 Hz)	1003314 o
1	Teslametro 200 mT (115 V, 50/60 Hz)	1003313
1	Alimentatore CC 1-32 V, 0-20 A (115 V, 50/60 Hz)	1012858 o
1	Alimentatore CC 1-32 V, 0-20 A (230 V, 50/60 Hz)	1012857
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 2,5 mm ²	1002841
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Asta di supporto, 250 mm	1002933
1	Manicotto universale	1002830
1	Morsetto universale	1002833

1

BASI GENERALI

La legge di Biot-Savart descrive il rapporto fra l'intensità del campo magnetico B e la corrente elettrica I che percorre un conduttore di geometria qualsiasi. Viene calcolato il contributo all'intensità totale del campo magnetico fornito da ogni tratto infinitesimo del conduttore. Il campo totale viene calcolato integrando i contributi dell'intera geometria del conduttore. In alcuni casi, ad esempio con una bobina cilindrica lunga, ne deriva una soluzione analitica semplice.

Un tratto infinitesimo di conduttore s attraversato da una corrente I produce in base alla legge di Biot-Savart sul punto r l'intensità di campo magnetico

$$(1) \quad dB(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{ds \times r}{r^3}$$

B : Intensità del campo magnetico

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad \text{Permeabilità di vuoto}$$

All'interno di una bobina cilindrica l'intensità del flusso magnetico è orientata parallelamente all'asse del cilindro e misura

$$(2) \quad B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot I$$

N : Numero di spire, L : Lunghezza della bobina

se la lunghezza è grande rispetto al raggio. L'intensità del campo magnetico è pertanto indipendente dal diametro della bobina e proporzionale alla densità delle spire, ossia il numero di spire per unità di lunghezza, e alla corrente che attraversa la bobina.

Nell'esperimento viene misurata con un teslametro assiale l'intensità del campo magnetico al centro di bobine lunghe con correnti fino a 20 A. Viene dimostrata da una parte l'indipendenza dal diametro della bobina, dall'altra la proporzionalità rispetto alla corrente e alla densità delle spire. Per quest'ultima dimostrazione viene utilizzata una bobina con densità di spire variabile.

ANALISI

Le misurazioni confermano in tutti i casi il rapporto di proporzionalità dell'intensità di campo magnetico rispetto alla corrente I che attraversa la bobina.

La proporzionalità rispetto alla densità delle spire è confermata fintantoché la lunghezza della bobina misura almeno il triplo del raggio della stessa.



Fig. 1: Bobina con densità di spire variabile

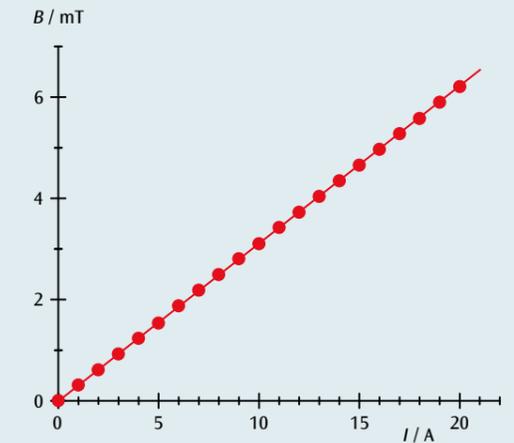


Fig. 2: Intensità del campo magnetico B in funzione della corrente I

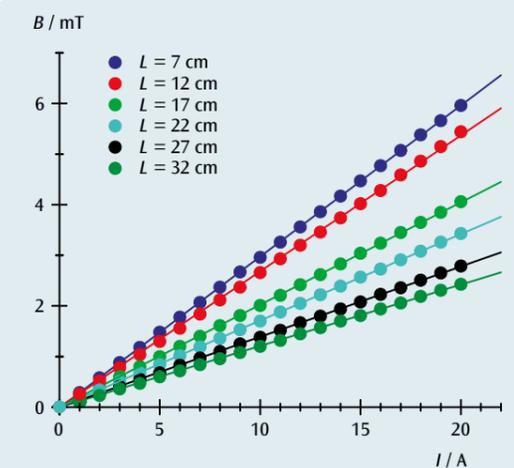


Fig. 3: Densità di flusso magnetico B in funzione della corrente I per bobina con densità delle spire variabile per lunghezze della bobina L diverse

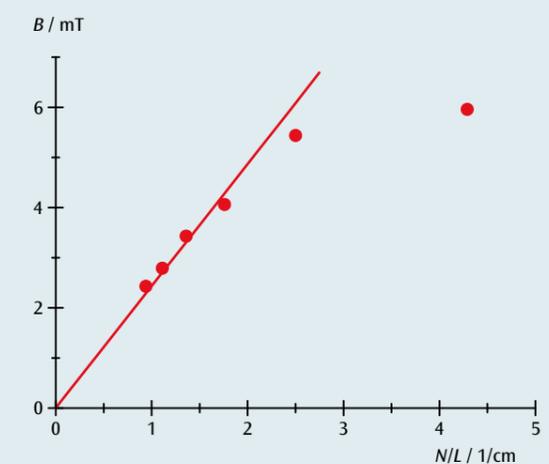


Fig. 4: Densità di flusso magnetico B in funzione della densità delle spire N/L con $I = 20$ A



FUNZIONI

- Misurazione dell'angolo di rotazione di un ago di bussola orientato parallelamente alla componente orizzontale del campo magnetico quando si sovrappone il campo magnetico orizzontale di una coppia di bobine di Helmholtz.
- Determinazione della componente orizzontale del campo geomagnetico.
- Misurazione dell'inclinazione e determinazione della componente verticale e del valore complessivo del campo geomagnetico.

SCOPO

Determinazione delle componenti orizzontale e verticale del campo geomagnetico

RIASSUNTO

Nell'esperimento vengono esaminati l'inclinazione e il valore, nonché le componenti orizzontale e verticale del campo geomagnetico nel punto di misurazione. La componente orizzontale del campo geomagnetico viene determinata in base alla rotazione effettuata dall'ago di una bussola quando si sovrappone il campo magnetico di una coppia di bobine di Helmholtz. Dopo aver misurato l'angolo di inclinazione è possibile calcolare anche la componente verticale e il valore complessivo del campo geomagnetico.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Bobine di Helmholtz da 300 mm	1000906
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro digitale P1035	1002781
1	Inclinatore e declinatorio	1006799
1	Reostato a corsoio 100 Ω	1003066
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

La terra è circondata da un campo geomagnetico, prodotto dalla cosiddetta geodinamo. In prossimità della superficie terrestre il campo è simile al campo magnetico generato da un dipolo, le cui linee di campo partono dall'emisfero terrestre meridionale per poi rientrare nell'emisfero settentrionale. L'angolo tra la direzione del campo geomagnetico e il piano l'orizzontale viene detto inclinazione. La componente orizzontale del campo geomagnetico corre essenzialmente parallelamente alla direzione nord-sud. Poiché la crosta terrestre è magnetizzata in modo diverso, si verificano scostamenti a livello locale; questo fenomeno è denominato declinazione.

Nell'esperimento vengono esaminati l'inclinazione e l'intensità, nonché la componente orizzontale e verticale del campo geomagnetico nel punto di misurazione.

Si applica la correlazione

$$(1) \quad B_v = B_h \cdot \tan \alpha$$

α : Inclinazione
 B_h : Componente orizzontale
 B_v : Componente verticale

e

$$(2) \quad B = \sqrt{B_h^2 + B_v^2}$$

È pertanto sufficiente determinare le grandezze B_h e α , per poter determinare anche le altre due.

L'inclinazione α viene rilevata utilizzando un inclinatore. Per determinare la componente orizzontale B_h lo stesso inclinatore sull'orizzontale viene orientato in modo tale che l'ago di bussola integrato che tende a disporsi parallelamente alla componente orizzontale sia puntato sullo 0. Una coppia di bobine di Helmholtz genera un campo magnetico orizzontale supplementare B_{HH} perpendicolare a B_h determinando la rotazione dell'ago di un angolo β . Come da Fig. 1, vale

$$(3) \quad \frac{B_{HH}}{B_h} = \tan \beta.$$

Ai fini del miglioramento dell'accuratezza del dato, questa misurazione viene eseguita per diversi angoli β .

ANALISI

Da (3) consegue che:

$$B_{HH} = B_h \cdot \tan \beta.$$

La componente orizzontale B_h corrisponde alla pendenza di una retta passante per l'origine che passa per i punti di misurazione in un diagramma B_{HH} - $\tan \alpha$. Il campo magnetico B_{HH} della coppia di bobine di Helmholtz può essere determinato in modo semplice. All'interno di una coppia di bobine esso è fortemente omogeneo e proporzionale all'intensità di corrente I che attraversa una singola bobina:

$$B_{HH} = k \cdot I \text{ con}$$

$$k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \cdot \frac{N}{R}$$

$N = 124$: Numero di spire, $R = 147,5$ mm: Raggio

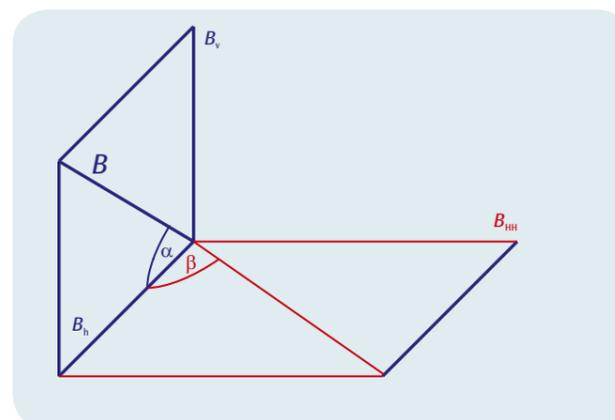


Fig. 1: Rappresentazione delle componenti dei campi magnetici esaminati nell'esperimento e definizione del relativo angolo

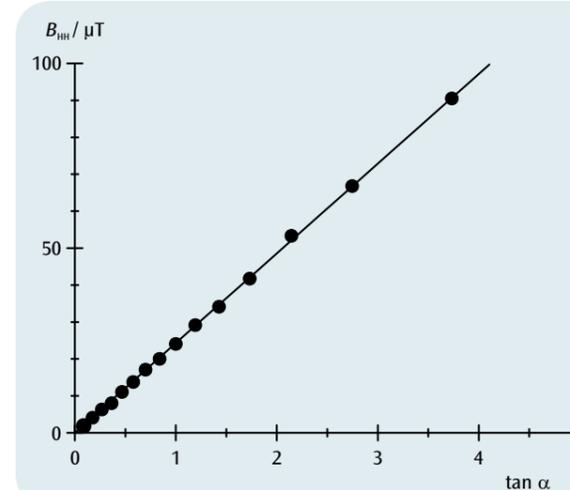
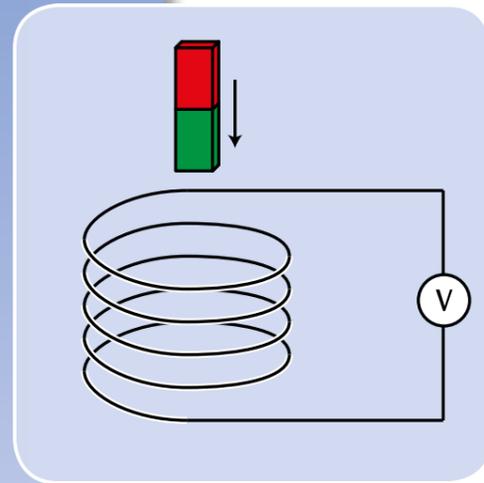


Fig. 2: Diagramma B_{HH} - $\tan \alpha$ per la determinazione della componente orizzontale del campo geomagnetico



SCOPO

Produzione di una sovratensione momentanea in un conduttore ad anello mediante l'uso di un magnete permanente in movimento

RIASSUNTO

Se un magnete permanente passa in successione attraverso diverse bobine d'induzione con caratteristiche costruttive identiche collegate in serie, in ogni bobina viene indotta una tensione, la cui ampiezza aumenta sempre più con il moto progressivo del magnete da una bobina all'altra, in quanto la velocità del magnete aumenta sempre più. Il flusso magnetico calcolabile mediante la tensione misurata raggiunge tuttavia lo stesso valore per tutte le bobine.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo con 6 bobine d'induzione	1001005
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75 cm, rosso/blu	1017718

FUNZIONI

- Osservazione del movimento di un magnete permanente attraverso diverse bobine d'induzione collegate in serie.
- Misurazione dell'andamento cronologico della tensione indotta.
- Calcolo dell'andamento cronologico del flusso magnetico.

2

BASI GENERALI

Qualsiasi variazione del flusso magnetico attraverso un conduttore ad anello chiuso induce in quest'ultimo una tensione elettrica. Una tale variazione viene provocata, per es., quando un magnete permanente viene spostato in un conduttore ad anello fisso.

In tal caso è istruttivo, oltre alla tensione indotta in funzione del tempo

$$(1) \quad U(t) = - \frac{d\Phi}{dt}(t)$$

Φ : Flusso magnetico

considerare anche la cosiddetta sovratensione momentanea

$$(2) \quad \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot dt = \Phi(t_1) - \Phi(t_2)$$

corrispondente alla differenza del flusso magnetico all'inizio (t_1) e alla fine (t_2) di un processo osservato.

Nell'esperimento, un magnete permanente cade attraverso un tubo con sei bobine d'induzione con caratteristiche costruttive identiche collegate in serie. Viene registrato l'andamento cronologico della tensione indotta (vedi fig. 1), la cui ampiezza aumenta sempre più con il moto progressivo del magnete da una bobina all'altra, in quanto la velocità del magnete aumenta sempre più.

Le superfici su cui agiscono tutti i segnali di tensione positivi e negativi sono identiche di valore e corrispondono al flusso massimo Φ del magnete permanente all'interno di una singola bobina.

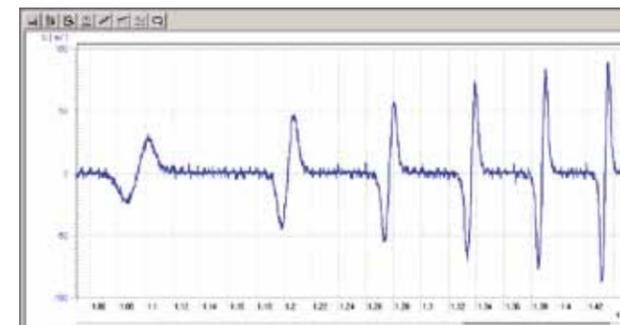


Fig. 1: Andamento cronologico della tensione indotta U

ANALISI

Il segno della tensione viene stabilito in modo che durante la fase di immersione del magnete venga indotta una tensione negativa nella bobina conduttrice.

La tensione indotta ritorna a zero quando il magnete raggiunge il centro della bobina e pertanto il flusso magnetico assume il suo valore massimo. Durante la successiva fase di uscita del magnete viene indotta una tensione positiva.

Dalla tensione misurata, utilizzando l'equazione 2 è possibile calcolare, tramite l'integrazione del flusso magnetico nel momento t :

$$\Phi(t) = \Phi(0) - \int_0^t U(t') \cdot dt'$$

Esso raggiunge, nell'ambito della precisione di misurazione, lo stesso valore per tutte le bobine (vedi fig. 2).

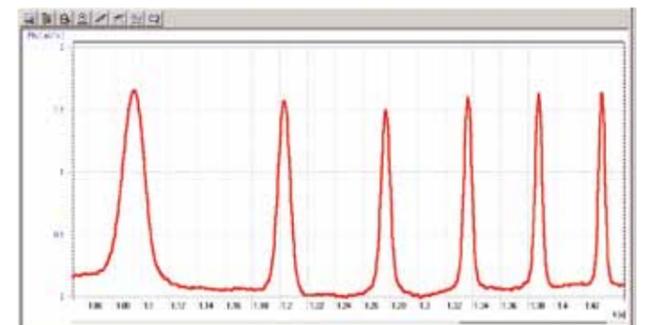
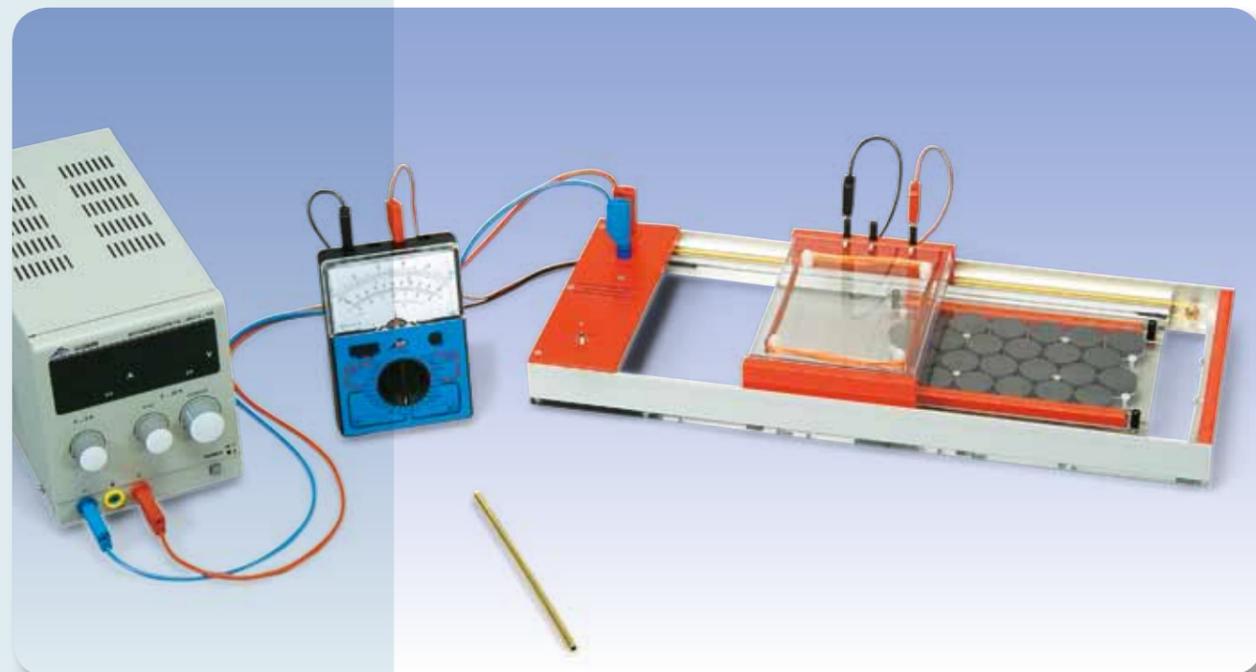


Fig. 2: Andamento cronologico del flusso magnetico

UE3040200 INDUZIONE IN UN CONDUTTORE AD ANELLO IN MOVIMENTO

FUNZIONI

- Misurazione della tensione d'induzione in base alla velocità del conduttore ad anello.
- Misurazione della tensione d'induzione in base al numero di spire del conduttore ad anello.
- Confronto della polarità della tensione d'induzione introducendo o estraendo il conduttore ad anello.
- Confronto della polarità della tensione d'induzione, variando la direzione di movimento.
- Misurazione della tensione d'induzione in un conduttore ad anello con superficie variabile e con una spira.

SCOPO

Misurazione della tensione d'induzione in un conduttore ad anello spostato da un campo magnetico

RIASSUNTO

La variazione di flusso necessaria all'induzione di una tensione all'interno di un conduttore ad anello può essere il risultato di uno spostamento del conduttore ad anello stesso. Tale situazione si verifica quando si introduce nel campo magnetico o si estrae dal campo magnetico a velocità costante un conduttore ad anello allineato verticalmente rispetto ad un campo magnetico omogeneo. Nel primo caso il flusso magnetico aumenta di valore, nel secondo caso diminuisce. Pertanto cambia la polarità della tensione indotta.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio a induzione	1000968
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843
1	Cronometro meccanico con addizione	1002810
Ulteriormente consigliato		
1	Amplificatore di misura (230 V, 50/60 Hz)	1001022 o
	Amplificatore di misura (115 V, 50/60 Hz)	1001021

1
BASI GENERALI

Per induzione elettromagnetica s'intende la formazione di una tensione elettrica lungo il conduttore ad anello, dovuta alla variazione del flusso magnetico che attraversa il conduttore ad anello. La variazione di flusso può essere il risultato di una variazione del campo magnetico oppure di uno spostamento del conduttore ad anello.

Per la deduzione di tali correlazioni di frequente si osserva un conduttore a forma di U con asta trasversale mobile, allineato verticalmente rispetto ad un campo magnetico omogeneo B (vedi fig. 1).

Il flusso magnetico attraverso la superficie limitata dall'asta trasversale è

$$(1) \quad \Phi = B \cdot a \cdot b$$

a : Larghezza, b : Lunghezza dell'anello

Se si sposta l'asta trasversale ad una velocità v il flusso magnetico cambia, perché cambia la lunghezza del conduttore ad anello. Il tasso di variazione

$$(2) \quad \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot a \cdot v$$

nell'esperimento può essere misurato come tensione

$$(3) \quad U = -B \cdot a \cdot v$$

nel campo μV , se viene impiegato l'amplificatore di misura qui ulteriormente consigliato.

La tensione indotta aumenta notevolmente quando un conduttore ad anello su telaio fisso con diverse spire viene spostato attraverso il campo magnetico. Se il telaio viene introdotto solo parzialmente nel campo magnetico, si ripresenta in modo corrispondente la situazione descritta in fig. 1. Lo spostamento del conduttore ad anello porta ad una variazione di flusso

$$(4) \quad \frac{d\Phi_1}{dt} = B \cdot N \cdot a \cdot v$$

N : Numero di spire

che può essere misurata come tensione indotta

$$(5) \quad U_1 = -B \cdot N \cdot a \cdot v$$

Non appena il conduttore ad anello viene introdotto completamente nel campo magnetico, la tensione si riavvera. Ciò cambia solo quando il conduttore ad anello esce dal campo magnetico. A questo punto, il flusso magnetico diminuisce e cambia la polarità della tensione indotta rispetto alla situazione iniziale. Un'inversione di polarità si verifica anche quando viene modificata la direzione di movimento del conduttore ad anello.

Nell'esperimento, viene modificata la tensione di alimentazione del motore che muove il conduttore ad anello. In questo modo vengono impostate diverse velocità costanti del conduttore ad anello. In più la direzione di movimento del motore può invertirsi. È disponibile inoltre una presa intermedia in modo che la tensione indotta possa essere misurata per tre diversi numeri di spire N .

UE3040200
ANALISI

Dato un tempo t necessario al conduttore ad anello per un transito completo e la relativa lunghezza del percorso L , è possibile calcolare la velocità

$$v = \frac{L}{t}$$

Velocità e tensione indotta vengono riportate in un diagramma $U-v$ in cui i valori misurati si trovano su una retta attraverso l'origine (vedi fig. 2).

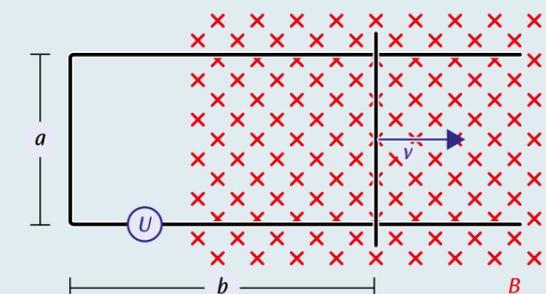


Fig. 1: Variazione del flusso magnetico mediante variazione della superficie dell'anello

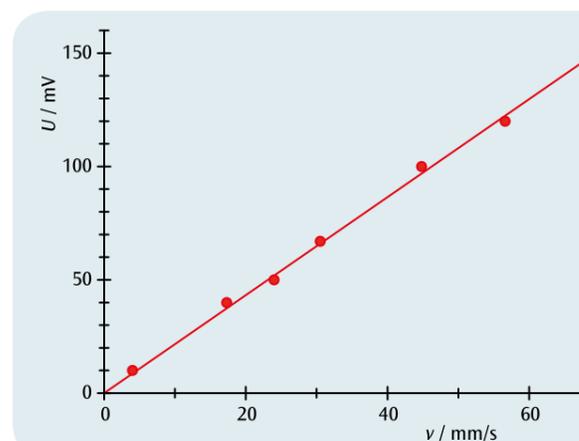


Fig. 2: Tensione indotta in base alla velocità del conduttore ad anello



FUNZIONI

- Analisi dello smorzamento magnetico di un pendolo di Waltenhofen nel campo magnetico disomogeneo.
- Dimostrazione dell'inibizione delle correnti di Foucault in un disco di metallo intagliato.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pendolo di Waltenhofen	1000993
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 750 mm	1002935
1	Manicotto universale	1002830
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Nucleo a U	1000979
1	Coppia di espansioni polari	1000978
1	Coppia di staffe di bloccaggio	1000977
2	Bobina D con 1200 spire	1000989
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

SCOPO

Dimostrazione e analisi del funzionamento di un freno a corrente di Foucault

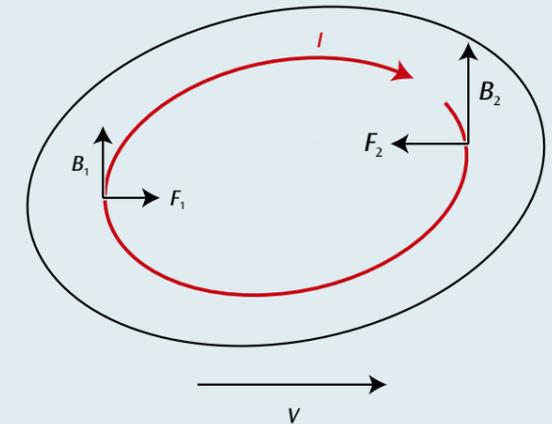
RIASSUNTO

In un disco di metallo che si sposta attraverso un campo magnetico disomogeneo vengono indotte correnti di Foucault. Su queste correnti di Foucault, il campo magnetico disomogeneo esercita una forza che inibisce il movimento del disco metallico.

BASI GENERALI

Se un disco di metallo si muove in un campo magnetico disomogeneo, in qualsiasi sezione del disco il flusso magnetico varia costantemente e sulla circonferenza della sezione viene indotta una tensione ad anello. Pertanto, nel disco di metallo scorrono prevalentemente correnti elettriche di Foucault. Nel campo magnetico queste vengono sottoposte a forze di Lorentz che nel complesso inibiscono il movimento del disco. Le correnti di Foucault vengono ridotte drasticamente se il disco di metallo viene intagliato, in modo che la corrente possa fluire da una sezione all'altra solo trasversalmente. In questo caso, il movimento del disco viene inibito solo minimamente.

La comparsa e l'inibizione delle correnti di Foucault possono essere dimostrate in maniera efficace con un pendolo di Waltenhofen. Si tratta di un disco di metallo parzialmente intagliato che oscilla in un campo magnetico disomogeneo.



Corrente di Foucault I in un disco di metallo spostato ad una velocità v in un campo magnetico disomogeneo B_1 , B_2 e con forze di Lorentz F_1 e F_2 su entrambe le diramazioni della corrente di Foucault. La forza rivolta contro il movimento è superiore alla forza in direzione di movimento.

ANALISI

Quando il lato non intagliato del disco di metallo oscilla nel campo magnetico disomogeneo, le oscillazioni vengono smorzate. L'intensità dello smorzamento è proporzionale alle dimensioni del campo magnetico. Le correnti di Foucault vengono indotte all'interno del disco di metallo. Su queste correnti, il campo magnetico disomogeneo nel suo complesso esercita una forza contro il movimento (cfr. legge di Lenz). Quando il lato intagliato del disco di metallo oscilla nel campo magnetico disomogeneo, lo smorzamento è solo minimo, in quanto qui le correnti di Foucault possono formarsi solo in maniera ridotta.



FUNZIONI

- Misurazione della tensione secondaria in funzione della tensione primaria con funzionamento a vuoto con numeri di spire fissi.
- Misurazione della corrente primaria in funzione della corrente secondaria con corto circuito e numeri interi di spire.
- Misurazione della tensione primaria, della corrente primaria, della tensione secondaria e della corrente secondaria con una determinata resistenza di carico.
- Determinazione della perdita di potenza e del rendimento.

SCOPO

Misurazioni su un trasformatore sotto carico e non sotto carico

RIASSUNTO

I trasformatori sono convertitori di tensione che si basano sulla legge di induzione di Faraday. Sono utilizzati in particolare per la trasmissione di potenza elettrica su lunghe distanze, per ridurre al minimo le perdite di potenza, tramite una trasformazione alle tensioni più elevate possibili con corrispondenti correnti basse. Nell'esperimento, dalle correnti e le tensioni misurate a vuoto, in cortocircuito e sotto carico è verificata la proporzionalità rispettivamente diretta e inversa dei rapporti di tensione e di corrente per il rapporto dei numeri interi delle spire e si calcolano la perdita di potenza e il rendimento.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
2	Bobina a bassa tensione D	1000985
1	Nucleo del trasformatore D	1000976
1	Alimentatore CA/CC 1/ 2/ 3/ ... 15 V, 10 A (230 V, 50/60 Hz)	1008691 o
1	Alimentatore CA/CC 1/ 2/ 3/ ... 15 V, 10 A (115 V, 50/60 Hz)	1008690
3	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Reostato a corsoio 10 Ω	1003064
1	Commutatore bipolare	1018439
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

BASI GENERALI

I trasformatori sono convertitori di tensione che si basano sulla legge di induzione di Faraday. Sono utilizzati in particolare per la trasmissione di potenza elettrica su lunghe distanze, per ridurre al minimo le perdite di potenza, tramite una trasformazione alle tensioni più elevate possibili con corrispondenti correnti basse.

Un trasformatore, nella versione più semplice, è costituito da due bobine accoppiate, la bobina primaria con numero di spire N_1 e la bobina secondaria con numero di spire N_2 , che racchiudono un'anima in ferro comune. Il flusso magnetico Φ_1 della bobina primaria attraversata dalla corrente I_1 attraversa completamente la bobina secondaria.

Qui di seguito viene considerato il trasformatore ideale, vale a dire quello senza perdita di potenza. Con il trasformatore non sotto carico nel circuito secondario non scorre corrente, vale a dire $I_2 = 0$. Se alla bobina primaria viene applicata una tensione alternata U_1 scorre la corrente a vuoto I_1 , che crea un flusso magnetico Φ_1 e che induce quindi una tensione U_{ind} . Questa tensione d'induzione è, per la legge delle maglie di Kirchhoff $U_1 + U_{ind} = 0$ uguale a U_1 :

$$(1) \quad U_{ind} = -L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} = -N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = -U_1.$$

L_1 : induttività della bobina primaria

Φ_1 : flusso magnetico creato da I_1

Poiché il flusso magnetico Φ_1 attraversa completamente la bobina secondaria, in quest'ultima viene indotta una tensione

$$(2) \quad U_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

Da (1) e (2) deriva infine:

$$(3) \quad \frac{U_2}{U_1} = -\frac{N_2}{N_1}.$$

Il segno meno indica che U_1 e U_2 con la stessa direzione delle spire sono sfasate di 180° o che con direzione delle spire opposta sono in fase. Con il trasformatore sotto carico nella bobina secondaria scorre una corrente $I_2 = U_2 / R$, dove R è la resistenza ohmica dell'utenza. Questa corrente crea un flusso magnetico Φ_2 , che a causa della legge di Lenz è contrapposto al flusso magnetico Φ_1 creato dalla corrente primaria I_1 . Poiché la tensione primaria U_1 rimane costante, la corrente primaria I_1 aumenta. Nel caso ideale la potenza ceduta dalla bobina secondaria P_2 è uguale alla potenza assorbita dalla bobina primaria P_1 :

$$(4) \quad P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = P_2.$$

Insieme con (3) ne consegue:

$$(5) \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Nell'esperimento viene innanzitutto collegato un voltmetro al lato secondario e con funzionamento a vuoto ($I_{2c} = 0$) vengono misurate la tensione secondaria U_{20} in funzione della tensione primaria U_{10} per un rapporto fisso di numeri interi di avvolgimenti $N_1/N_2 = 1/2$. Successivamente il lato secondario viene cortocircuitato tramite un voltmetro ($U_{2c} = 0$) e viene misurata la corrente primaria I_{1c} in funzione della corrente secondaria I_{2c} per un rapporto fisso di numeri interi di avvolgimenti $N_1/N_2 = 1/2$. Infine viene collegata una resistenza di carico $R = 2 \Omega$ sul lato secondario e vengono misurate la tensione primaria U_1 , la corrente primaria I_1 , la tensione secondaria U_2 e la corrente secondaria I_2 per una rapporto fisso di numeri interi di avvolgimenti $N_1/N_2 = 1/2$.

ANALISI

Dall'equazione (3) si ricavano i valori delle tensioni

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$$

e dall'equazione (5) lo stesso per le correnti

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

Quindi le pendenze nei diagrammi delle figure 2 e 3 sono determinati dai rapporti dei numeri di spire.

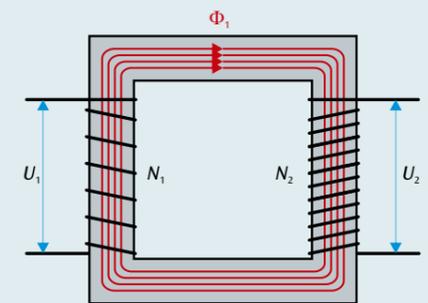


Fig. 1: Rappresentazione schematica per il trasformatore

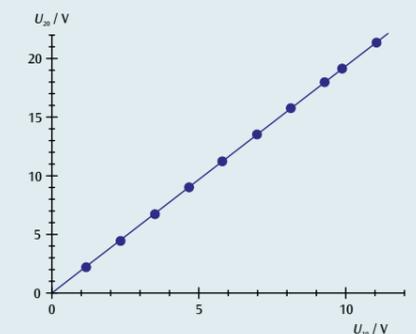


Fig. 2: Tensione secondaria U_{20} in funzione della tensione primaria U_{10} con funzionamento a vuoto ($I_{20} = 0$), $N_1 = 36$, $N_2 = 72$

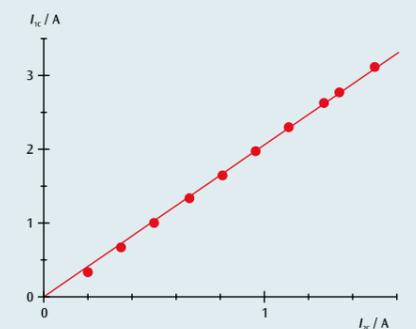
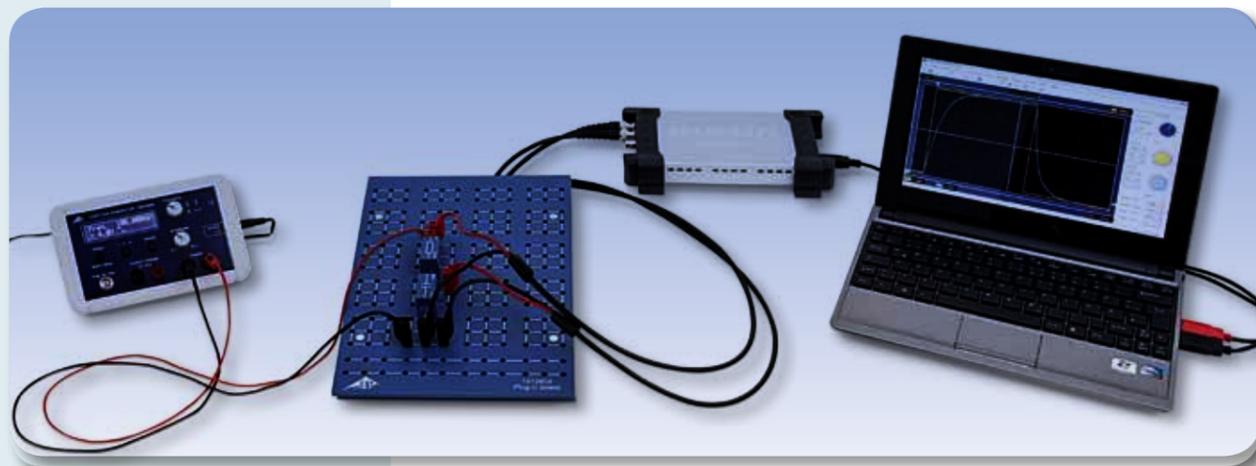


Fig. 3: Corrente primaria I_{1c} in funzione della corrente secondaria I_{2c} con cortocircuito ($U_{2c} = 0$), $N_1 = 36$, $N_2 = 72$



FUNZIONI

- Misurazione della tensione del condensatore durante la carica e la scarica tramite accensione e spegnimento di una tensione continua.
- Determinazione del tempo di dimezzamento durante la carica e la scarica.
- Analisi della dipendenza del tempo di dimezzamento da capacità e resistenza.

SCOPO

Analisi dell'andamento della tensione durante la carica e la scarica di un condensatore

RIASSUNTO

In un circuito a corrente continua attraverso un condensatore passa corrente solo durante l'accensione o lo spegnimento. Tramite la corrente, il condensatore viene caricato all'accensione, fino al raggiungimento della tensione applicata, e scaricato allo spegnimento, finché la tensione non ha raggiunto lo zero. L'andamento della tensione del condensatore può essere rappresentato come funzione esponenziale, ovvero nel tempo di dimezzamento $T_{1/2}$, la tensione del condensatore si riduce della metà. Lo stesso tempo trascorre per la diminuzione dalla metà ad un quarto e da un quarto ad un ottavo. Il tempo di dimezzamento è proporzionale a capacità e resistenza.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 470 Ω, 2 W, P2W19	1012914
1	Resistenza 1 kΩ, 2 W, P2W19	1012916
1	Resistenza 2,2 kΩ, 2 W, P2W19	1012918
3	Condensatore 1 μF, 100 V, P2W19	1012955
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840
1	Set di 10 connettori a nastro, P2W19	1012985



BASI GENERALI

In un circuito a corrente continua, attraverso un condensatore passa corrente solo durante l'accensione o lo spegnimento. Tramite la corrente, il condensatore viene caricato all'accensione, fino al raggiungimento della tensione applicata, e scaricato allo spegnimento, finché la tensione non ha raggiunto lo zero. L'andamento della tensione del condensatore può essere rappresentato come funzione esponenziale.

Per un circuito a corrente continua con capacità C , resistenza R e tensione continua U_0 vale all'accensione

$$(1) \quad U(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}})$$

e allo spegnimento

$$(2) \quad U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}}$$

con

$$(3) \quad T_{1/2} = \ln 2 \cdot R \cdot C$$

$T_{1/2}$ è il tempo di dimezzamento; vale a dire entro il tempo $T_{1/2}$ la tensione del condensatore si riduce della metà. Lo stesso tempo trascorre per la diminuzione dalla metà ad un quarto e da un quarto ad un ottavo. Nell'esperimento viene verificato questo comportamento. A tale scopo viene registrato l'andamento temporale della tensione del condensatore con un oscilloscopio con memoria. Poiché la tensione continua U_0 è fissata a 8 V, è possibile rilevare facilmente la metà, un quarto e un ottavo di questo valore.

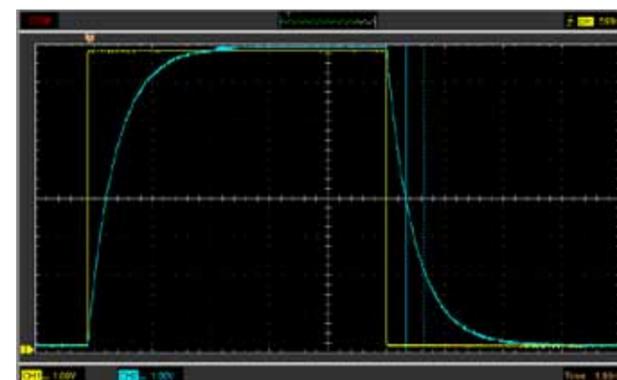


Fig. 1: Tensione del condensatore registrata sull'oscilloscopio durante la carica e la scarica

ANALISI

La corrispondenza dei valori determinati dalle diverse sezioni della curva di carica e/o di scarica per il tempo di dimezzamento conferma l'andamento esponenziale previsto, vedere (1) e (2). La rappresentazione dei tempi di dimezzamento determinati in funzione della resistenza e/o della capacità mostra che i valori misurati possono essere adattati a una retta passante per l'origine, vedere (3).

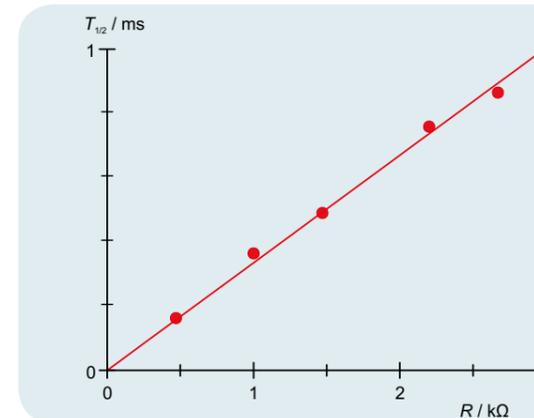


Fig. 2: Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ in funzione della resistenza R

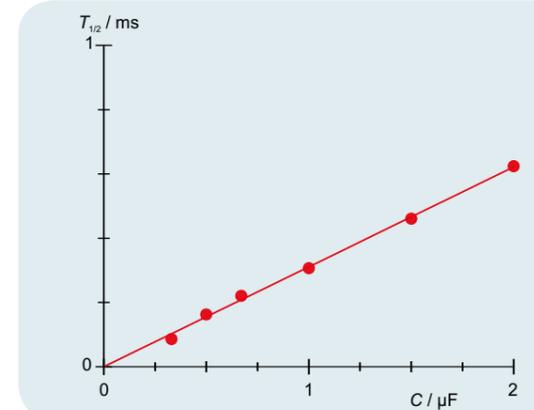


Fig. 3: Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ in funzione della capacità C

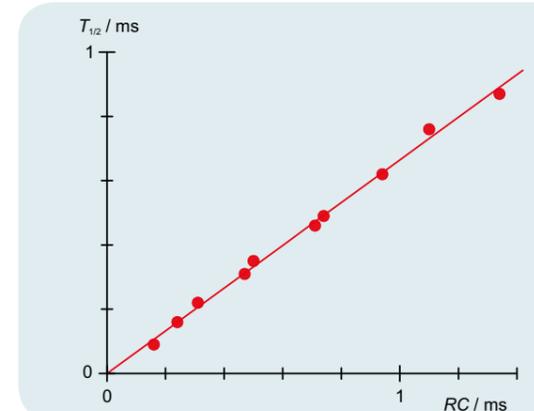


Fig. 4: Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ in funzione del prodotto $R \cdot C$



FUNZIONI

- Registrazione punto per punto dell'andamento della tensione del condensatore in fase di carica attraverso la misurazione dei tempi di carica.
- Registrazione punto per punto dell'andamento della tensione del condensatore in fase di scarica attraverso la misurazione dei tempi di scarica.
- Determinazione delle capacità e delle resistenze interne attraverso la misurazione dei tempi di carica e scarica nonché confronto con parametri esterni noti.

SCOPO

Misurazione dei tempi di carica e scarica

RIASSUNTO

La curva di scarica di un condensatore viene analizzata punto per punto misurando i tempi di carica fino al raggiungimento delle tensioni di confronto predefinite. Allo stesso modo viene misurata anche la curva di carica. Dai valori misurati si ricavano i dati delle resistenze e dei condensatori coinvolti.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio di carica e di scarica (230 V, 50/60 Hz)	1017781 o
	Apparecchio di carica e di scarica (115 V, 50/60 Hz)	1017780
1	Condensatore 1000 µF, 16 V, P2W19	1017806
1	Resistenza 10 kΩ, 0,5 W, P2W19	1012922
Ulteriormente consigliato:		
1	Multimetro digitale P1035	1002781

1

BASI GENERALI

In un circuito a corrente continua, attraverso un condensatore passa corrente solo durante l'accensione o lo spegnimento. Tramite la corrente, il condensatore viene caricato all'accensione, fino al raggiungimento della tensione applicata, e scaricato allo spegnimento, finché la tensione non ha raggiunto lo zero.

Per un circuito a corrente continua con capacità C , resistenza R e tensione continua U_0 vale all'accensione

$$(1) \quad U(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

e allo spegnimento

$$(2) \quad U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

con la costante di tempo

$$(3) \quad \tau = R \cdot C$$

Per verificare tale correlazione, nell'esperimento vengono misurati i tempi necessari al raggiungimento delle tensioni di confronto predefinite. Il cronometro viene pertanto avviato con la fase di carica o scarica e successivamente arrestato per mezzo di un comparatore non appena la tensione di confronto risulta raggiunta. La misurazione di diverse tensioni di confronto consente di analizzare punto per punto la curva di carica e scarica. Interessante dal punto di vista pratico è anche il tempo

$$(4) \quad t_{5\%} = -\ln(5\%) \cdot R \cdot C \approx 3 \cdot R \cdot C$$

in cui la tensione del condensatore in fase di scarica raggiunge il 5% del valore di default U_0 e in fase di carica raggiunge il 95% del valore finale U_0 . Tramite la misurazione di $t_{5\%}$ è possibile monitorare ad es. i parametri R e C .

ANALISI

Con resistenza esterna nota R_{ext} , la capacità esterna C_{ext} viene calcolata in base a (4) dal tempo $t_{5\%}$:

$$C_{ext} = \frac{t_{5\%}}{3 \cdot R_{ext}}$$

La capacità esterna così determinata viene collegata in parallelo alla capacità interna ignota C_{int} ai fini del rilevamento in un confronto dei tempi di carica e scarica.

Le tre resistenze interne ancora ignote $R_{int,i}$ si ottengono infine dai rispettivi tempi di carica e scarica:

$$R_{int,i} = \frac{t_{5\%,i}}{3 \cdot C_{int}}$$

con $i = 1, 2, 3$

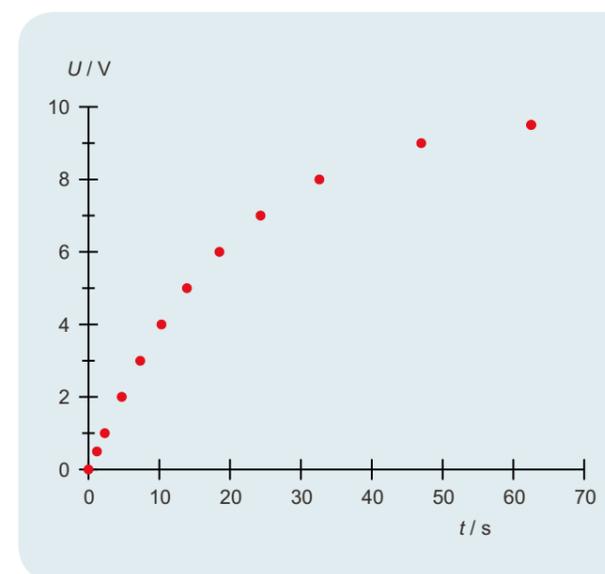


Fig. 1: Curva di carica di una coppia RC interna

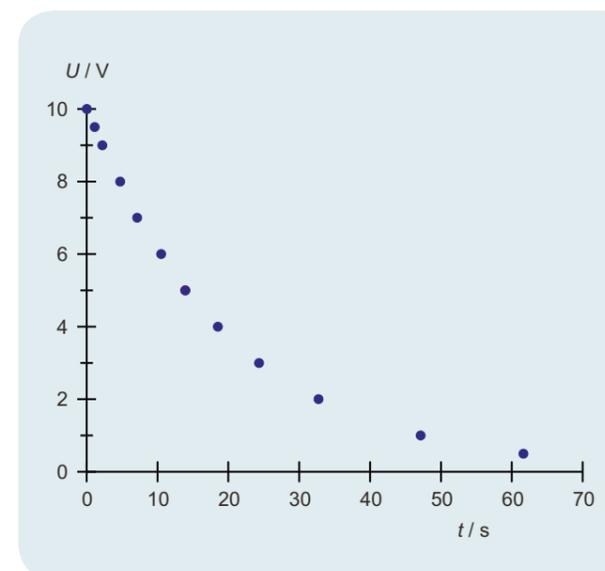
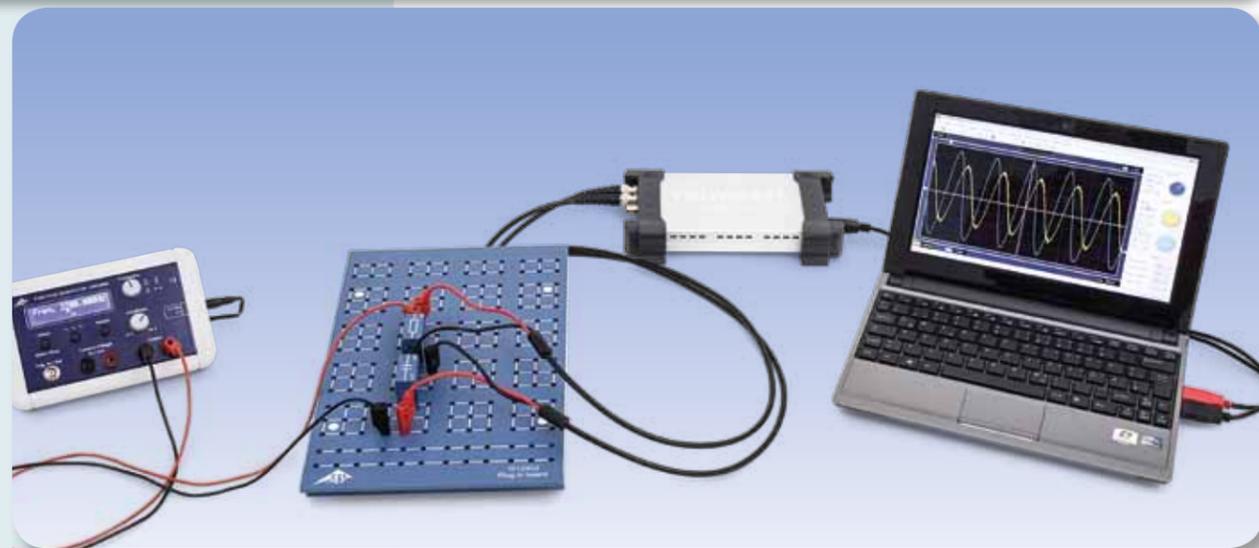


Fig. 2: Curva di scarica di una coppia RC interna

UE3050111

RESISTENZA DI UN CONDENSATORE NEL CIRCUITO A CORRENTE ALTERNATA



FUNZIONI

- Determinazione di modulo e fase della resistenza capacitiva in funzione della capacità.
- Determinazione di modulo e fase della resistenza capacitiva in funzione della frequenza.

SCOPO

Determinazione della resistenza capacitiva in funzione di capacità e frequenza

RIASSUNTO

Qualsiasi variazione della tensione su un condensatore provoca una corrente attraverso il condensatore. Se viene applicata tensione alternata, fluirà corrente alternata con uno spostamento di fase rispetto alla tensione. Nell'esperimento, un generatore di funzione fornisce tensione alternata con frequenze fino a 3 kHz. Un oscilloscopio a due canali registra corrente e tensione, in modo da rilevare ampiezza e fase di entrambe le grandezze. La corrente attraverso il condensatore corrisponde alla caduta di tensione di una resistenza di misura il cui valore è trascurabile rispetto alla resistenza capacitiva.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 1 Ω, 2 W, P2W19	1012903
1	Resistenza 10 Ω, 2 W, P2W19	1012904
3	Condensatore 1 μF, 100 V, P2W19	1012955
1	Condensatore 0,1 μF, 100 V, P2W19	1012953
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

2

BASI GENERALI

Qualsiasi variazione della tensione su un condensatore provoca una corrente attraverso il condensatore. Se viene applicata tensione alternata, fluirà corrente alternata con uno spostamento di fase rispetto alla tensione. Matematicamente, questa relazione è descrivibile con più semplicità utilizzando corrente, tensione e impedenza come grandezze complesse e osservandone le parti reali.

Dall'equazione del condensatore segue direttamente

$$(1) \quad I = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

I : Corrente, U : Tensione, C : Capacità

L'applicazione di una tensione

$$(2) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

provoca quindi la corrente

$$(3) \quad I = i \cdot \omega \cdot C \cdot U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

ed è possibile assegnare alla capacità C la "resistenza complessa", o reattanza

$$(4) \quad X_c = \frac{U}{I} = \frac{1}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}$$

Solo la parte reale di queste grandezze è misurabile, quindi

$$(5a) \quad U = U_0 \cdot \cos \omega t$$

$$(6a) \quad I = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= I_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$(7a) \quad X_c = \frac{U_0}{I_0} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Nell'esperimento, un generatore di funzione fornisce tensione alternata con frequenze fino a 3 kHz. Un oscilloscopio a due canali registra corrente e tensione, in modo da rilevare ampiezza e fase di entrambe le grandezze. La corrente attraverso il condensatore corrisponde alla caduta di tensione di una resistenza di misura il cui valore è trascurabile rispetto alla resistenza capacitiva.

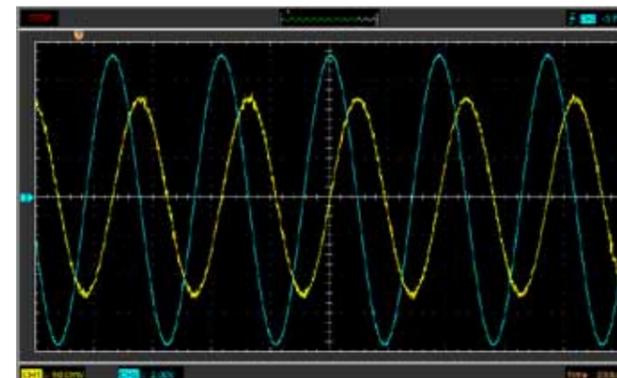


Fig. 1: Condensatore nel circuito a corrente alternata: andamento di corrente e tensione

UE3050111

ANALISI

Secondo l'equazione (4), la resistenza capacitiva X_c è proporzionale al reciproco della frequenza f e al reciproco della capacità C . Nei diagrammi corrispondenti, i valori di misurazione si trovano pertanto su una retta passante per l'origine nei limiti della precisione di misura. La corrente nel condensatore precede la tensione nel condensatore nella fase di 90°, in quanto la corrente di carica (segno positivo) e la corrente di scarica (segno negativo) sono al massimo quando la tensione raggiunge il proprio passaggio attraverso lo zero.

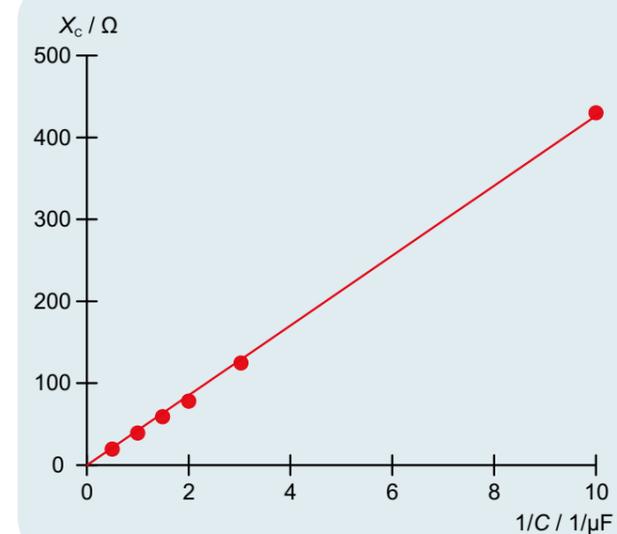


Fig. 2: Resistenza capacitiva X_c come funzione del reciproco della capacità C

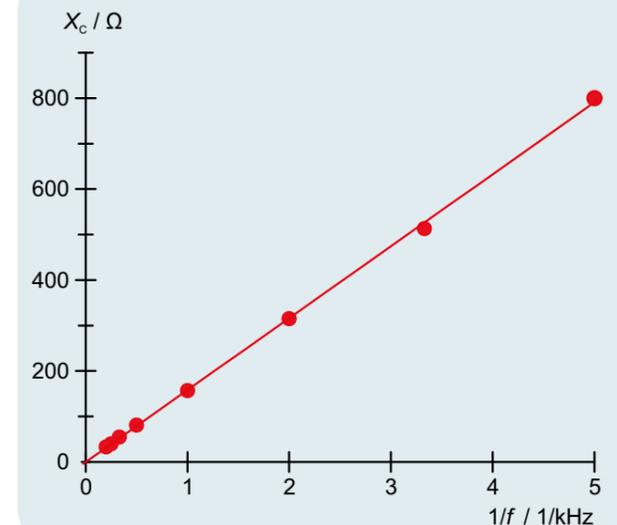
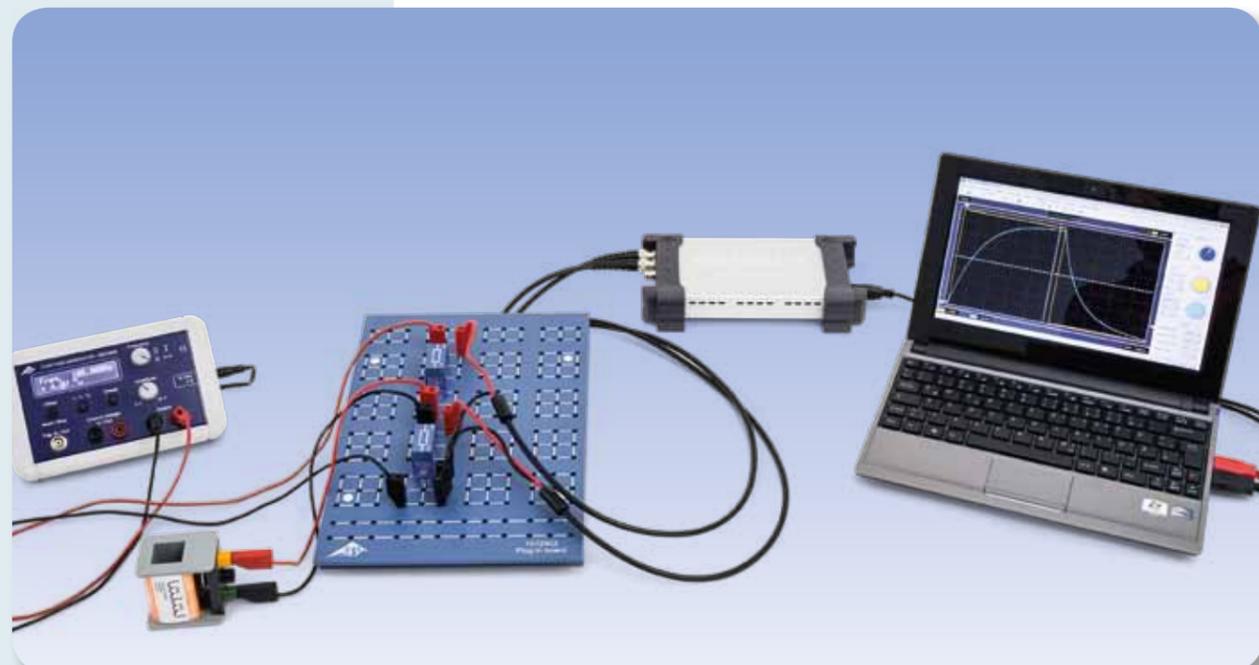


Fig. 3: Resistenza capacitiva X_c come funzione del reciproco della frequenza f



FUNZIONI

- Misurazione della corrente della bobina all'inserimento e al disinserimento di una tensione continua.
- Determinazione del tempo di dimezzamento all'inserimento e al disinserimento di una tensione continua.
- Analisi della dipendenza del tempo di dimezzamento da induttanza e resistenza.

SCOPO

Analisi dell'andamento della corrente della bobina all'inserimento e al disinserimento di una tensione continua

RIASSUNTO

Il comportamento di una bobina in un circuito a corrente continua varia non appena la tensione continua viene inserita o disinserta. La variazione di corrente viene ritardata dall'autoinduzione nella bobina, finché non si raggiunge all'inserimento il valore massimo e al disinserimento il valore zero. L'andamento della corrente della bobina può essere rappresentato come funzione esponenziale, ovvero nel tempo di dimezzamento $T_{1/2}$, la corrente della bobina si riduce della metà. Lo stesso tempo trascorre per la diminuzione dalla metà ad un quarto e da un quarto ad un ottavo. Il tempo di dimezzamento è proporzionale a induttanza e resistenza.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 1 Ω , 2 W, P2W19	1012903
1	Resistenza 10 Ω , 2 W, P2W19	1012904
1	Resistenza 22 Ω , 2 W, P2W19	1012907
1	Resistenza 47 Ω , 2 W, P2W19	1012908
1	Resistenza 150 Ω , 2 W, P2W19	1012911
1	Set di 10 connettori a nastro, P2W19	1012985
2	Bobina S con 1200 spire	1001002
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
1	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

1

BASI GENERALI

Il comportamento di una bobina in un circuito a corrente continua varia non appena la tensione continua viene inserita o disinserta. La variazione di corrente viene ritardata dall'autoinduzione nella bobina, finché non si raggiunge all'inserimento il valore massimo e al disinserimento il valore zero. L'andamento della corrente della bobina può essere rappresentato come funzione esponenziale.

Per un circuito a corrente continua con induttanza L , resistenza R e tensione continua U_0 vale all'accensione

$$(1) \quad I(t) = I_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}})$$

e allo spegnimento

$$(2) \quad I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}}$$

con

$$(3) \quad T_{1/2} = \ln 2 \cdot \frac{L}{R}$$

$T_{1/2}$ è il tempo di dimezzamento; vale a dire nel tempo $T_{1/2}$ la corrente della bobina si riduce della metà. Lo stesso tempo trascorre per la diminuzione dalla metà ad un quarto e da un quarto ad un ottavo.

Nell'esperimento viene verificato questo comportamento. A tale scopo viene registrato l'andamento temporale della corrente della bobina con un oscilloscopio con memoria. Viene misurata la corrente come caduta di tensione su una resistenza di misura collegata in serie R_M . La corrente I_0 è selezionata in modo tale da rilevare facilmente la metà, un quarto e un ottavo di questo valore.

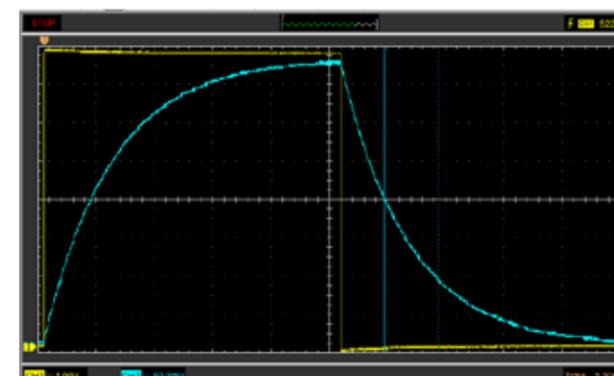


Fig. 1: Corrente della bobina registrata sull'oscilloscopio durante la carica e la scarica

ANALISI

La corrispondenza dei valori determinati dalle diverse sezioni della curva di carica e/o di scarica per il tempo di dimezzamento conferma l'andamento esponenziale previsto, vedere (1) e (2). La rappresentazione dei tempi di dimezzamento determinati in funzione della resistenza e/o dell'induttanza mostra che i valori misurati si adattano a una retta passante per l'origine, vedere (3).

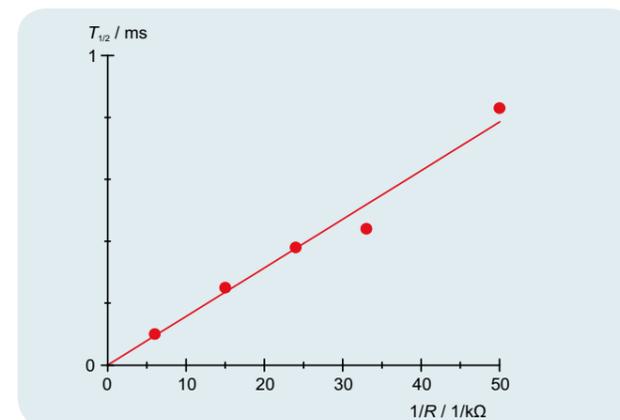


Fig. 2: Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ come funzione del reciproco della resistenza R

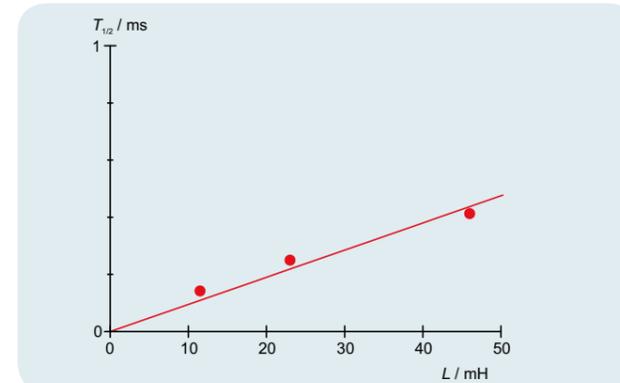


Fig. 3: Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ in funzione dell'induttanza L

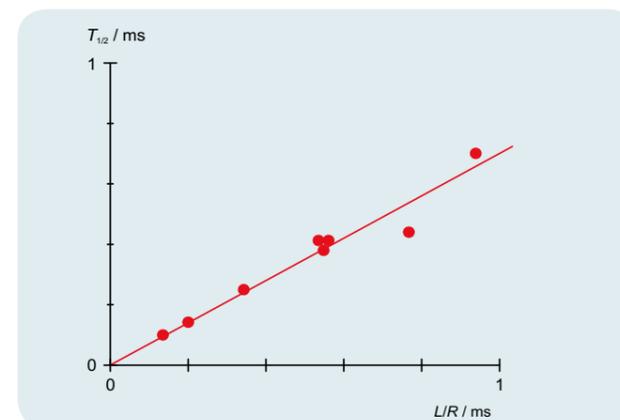
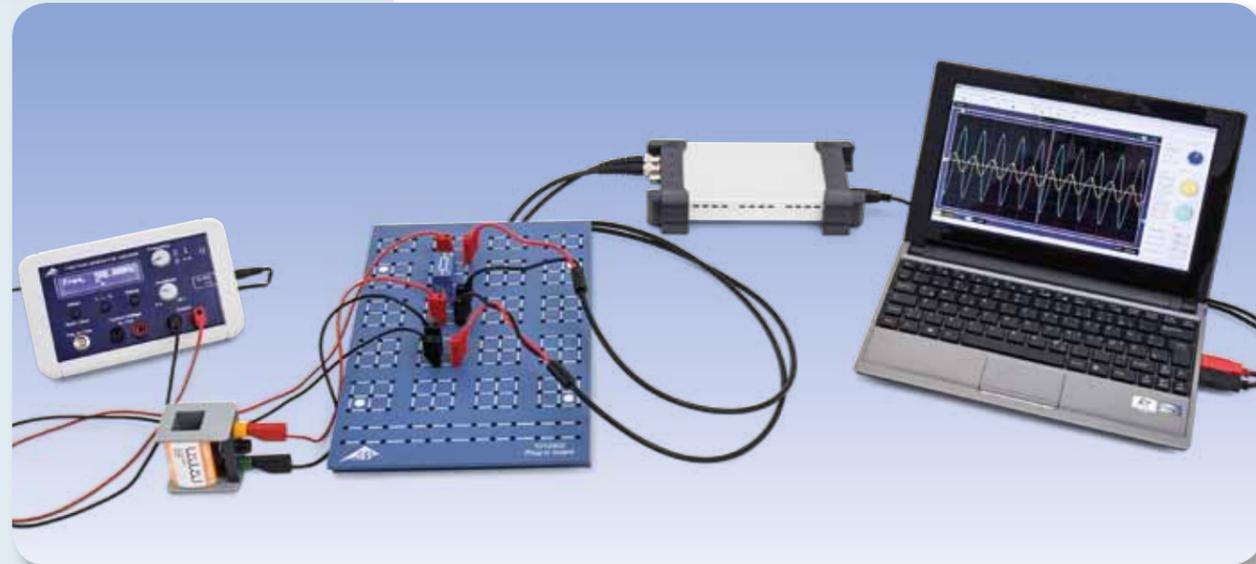


Fig. 4: Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$ in funzione di $\frac{L}{R}$



FUNZIONI

- Determinazione di modulo e fase della resistenza induttiva in funzione dell'induttanza.
- Determinazione di modulo e fase della resistenza induttiva in funzione della frequenza.

SCOPO

Determinazione della resistenza induttiva in funzione di induttanza e frequenza

RIASSUNTO

Qualsiasi variazione della corrente causata da una bobina induce una tensione. In presenza di corrente alternata, la tensione alternata viene indotta con uno spostamento di fase rispetto alla corrente. Matematicamente, questa relazione è descrivibile con più semplicità utilizzando corrente, tensione e impedenza come grandezze complesse e osservandone le parti reali. Nell'esperimento, un generatore di funzione fornisce tensione alternata con frequenze fino a 2 kHz. Un oscilloscopio a due canali registra corrente e tensione, in modo da rilevare ampiezza e fase di entrambe le grandezze. La corrente generata dalla bobina corrisponde alla caduta di tensione di una resistenza di misura il cui valore è trascurabile rispetto alla resistenza induttiva.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
2	Bobina S con 1200 spire	1001002
1	Resistenza 10 Ω, 2 W, P2W19	1012904
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840



BASI GENERALI

Qualsiasi variazione della corrente generata da una bobina induce una forza controelettrica che agisce in direzione opposta alla variazione di corrente. Nei circuiti a corrente alternata, la tensione della bobina precede pertanto la corrente generata dalla bobina. Matematicamente, questa relazione è descrivibile con più semplicità utilizzando corrente, tensione e impedenza come grandezze complesse e osservandone le parti reali.

La relazione corrente - tensione per una bobina è la seguente:

$$(1) \quad U = L \cdot \frac{di}{dt}$$

i : Corrente, U : Tensione, L : Induttanza

Con una tensione

$$(2) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

la corrente è quindi data da

$$(3) \quad i = \frac{U_0}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L} \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

È possibile pertanto assegnare all'induttanza L la "resistenza complessa", o reattanza

$$(4) \quad X_L = \frac{U}{i} = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L$$

Solo la parte reale di queste grandezze è misurabile, quindi

$$(5a) \quad U = U_0 \cdot \cos \omega t$$

$$(6a) \quad i = \frac{U_0}{2\pi \cdot f \cdot L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = i_0 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$(7a) \quad X_L = \frac{U_0}{i_0} = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Nell'esperimento, un generatore di funzione fornisce tensione alternata con frequenze fino a 2 kHz. Un oscilloscopio a due canali registra corrente e tensione, in modo da rilevare ampiezza e fase di entrambe le grandezze. La corrente generata dalla bobina corrisponde alla caduta di tensione di una resistenza di misura il cui valore è trascurabile rispetto alla resistenza induttiva.

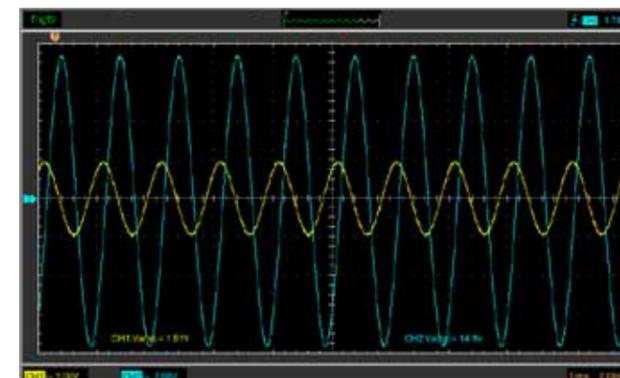


Fig. 2: Bobina nel circuito a corrente alternata: andamento di corrente e tensione

ANALISI

Secondo l'equazione (4), la resistenza induttiva X_L è proporzionale alla frequenza f e all'induttanza L . Nei diagrammi corrispondenti, i valori misurati si trovano pertanto su una retta passante per l'origine nei limiti della precisione di misurazione.

La corrente generata dalla bobina ritarda la tensione dalla bobina nella fase di 90°, poiché ogni variazione di corrente induce una forza contro-elettromotrice.

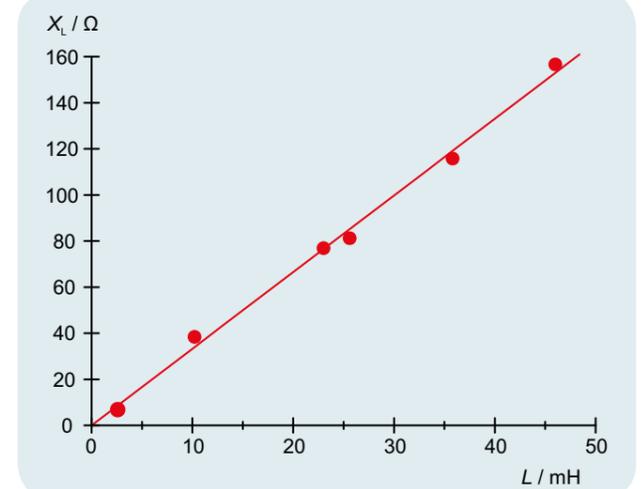


Fig. 3: Resistenza induttiva X_L come funzione dell'induttanza L

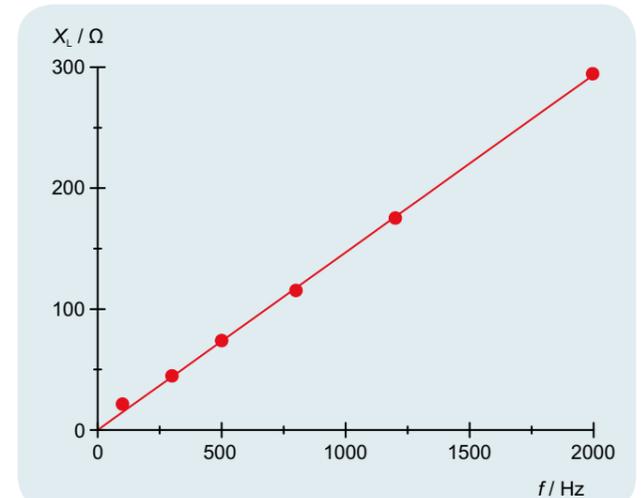


Fig. 4: Resistenza induttiva X_L come funzione della frequenza f



FUNZIONI

- Determinazione di modulo e fase dell'impedenza totale in funzione della frequenza con collegamento in serie.
- Determinazione di modulo e fase dell'impedenza totale in funzione della frequenza con collegamento in parallelo.

SCOPO

Determinazione dell'impedenza in corrente alternata in un circuito con capacitori e resistori

RIASSUNTO

Nei circuiti a corrente alternata occorre considerare oltre alle resistenze ohmiche anche gli elementi capacitivi. La combinazione di entrambe può essere collegata in serie o in parallelo. Da ciò dipendono le ampiezze e la fase di corrente e tensione. Nell'esperimento ciò viene analizzato con un oscilloscopio. A tale scopo, un generatore di funzione fornisce tensioni alternate tra 50 e 2000 Hz.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 1 Ω, 2 W, P2W19	1012903
1	Resistenza 100 Ω, 2 W, P2W19	1012910
1	Condensatore 10 μF, 35 V, P2W19	1012957
1	Condensatore 1 μF, 100 V, P2W19	1012955
1	Condensatore 0,1 μF, 100 V, P2W19	1012953
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
1	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

BASI GENERALI

Ai circuiti a corrente alternata con capacitori si assegna, per motivi di semplicità, una "resistenza complessa" o impedenza in quanto in questo caso, oltre alle ampiezze di corrente e tensione, occorre considerare anche le relazioni di fase tra di esse. I collegamenti in serie e in parallelo di resistori e capacitori sono quindi descrivibili facilmente. Anche la tensione e la corrente vengono considerate come grandezze complesse. Solo la loro parte reale è misurabile.



La reattanza capacitiva di un condensatore con capacità C in un circuito a corrente alternata con frequenza f è

$$(1) \quad X_c = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C},$$

con $\omega = 2\pi \cdot f$

Pertanto, il collegamento in serie del condensatore con una resistenza ohmica R ha l'impedenza totale

$$(2) \quad Z_s = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} + R,$$

mentre al collegamento in parallelo è possibile assegnare l'impedenza totale

$$(3) \quad Z_p = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C + \frac{1}{R}}.$$

Nella notazione comune

$$(4) \quad Z = Z_0 \cdot \exp(i \cdot \varphi)$$

risulta

$$(5) \quad Z_s = \frac{\sqrt{1 + (\omega \cdot C \cdot R)^2}}{\omega \cdot C} \cdot \exp(i \cdot \varphi_s)$$

e

$$\text{con } \tan \varphi_s = -\frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}$$

$$(6) \quad Z_p = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C \cdot R)^2}} \cdot \exp(i \cdot \varphi_p)$$

con $\tan \varphi_p = -\omega \cdot C \cdot R$

Nell'esperimento, un generatore di funzione crea tensioni alternate con frequenze regolabili f tra 50 e 2000 Hz. La tensione U e la corrente I vengono rappresentate su un oscilloscopio; I corrisponde alla caduta di tensione su una resistenza dinamica piccola. Vengono quindi misurate le parti reali di una tensione presente sulla rispettiva impedenza Z

$$(7) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t)$$

e della corrente generata

$$(8) \quad I = \frac{U_0}{Z_0} \cdot \exp(i \cdot (\omega \cdot t - \varphi)) = I_0 \cdot \exp(i \cdot (\omega \cdot t - \varphi))$$

Sull'oscilloscopio vengono rilevate rispettivamente le ampiezze I₀ e U₀, nonché lo spostamento di fase φ.

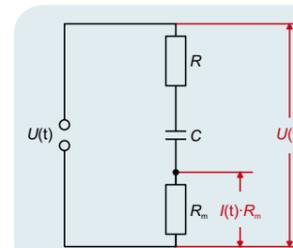


Fig. 1: Disposizione di misurazione per il collegamento in serie

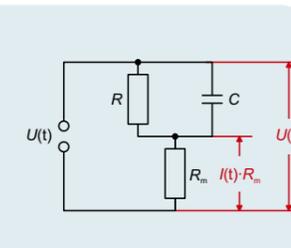


Fig. 2: Disposizione di misurazione per il collegamento in parallelo

ANALISI

Il valore dell'impedenza totale $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$ viene rappresentato in funzione della frequenza f e/o in funzione della reattanza capacitiva $X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$. Alle basse frequenze, il collegamento in serie acquisisce il valore della reattanza capacitiva e il collegamento in parallelo quello della resistenza ohmica. Lo spostamento di fase è compreso tra 0° e -90° ed è pari a -45° se la resistenza ohmica e capacitiva sono uguali.

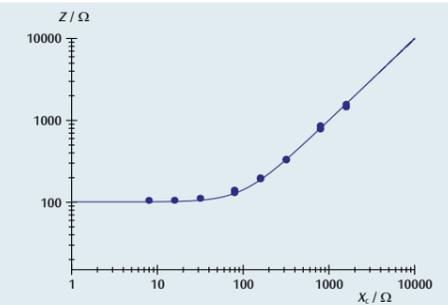


Fig. 3: Impedenza totale con collegamento in serie

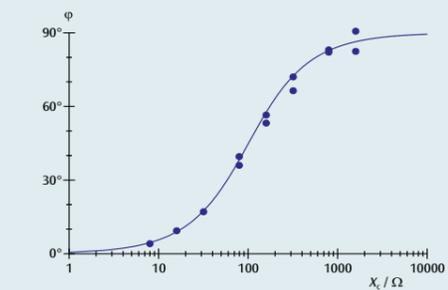


Fig. 4: Spostamento di fase con collegamento in serie

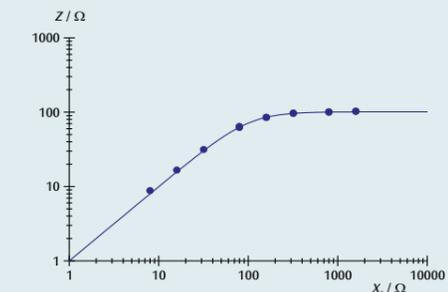


Fig. 5: Impedenza totale con collegamento in parallelo

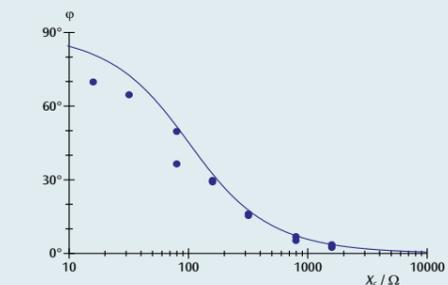
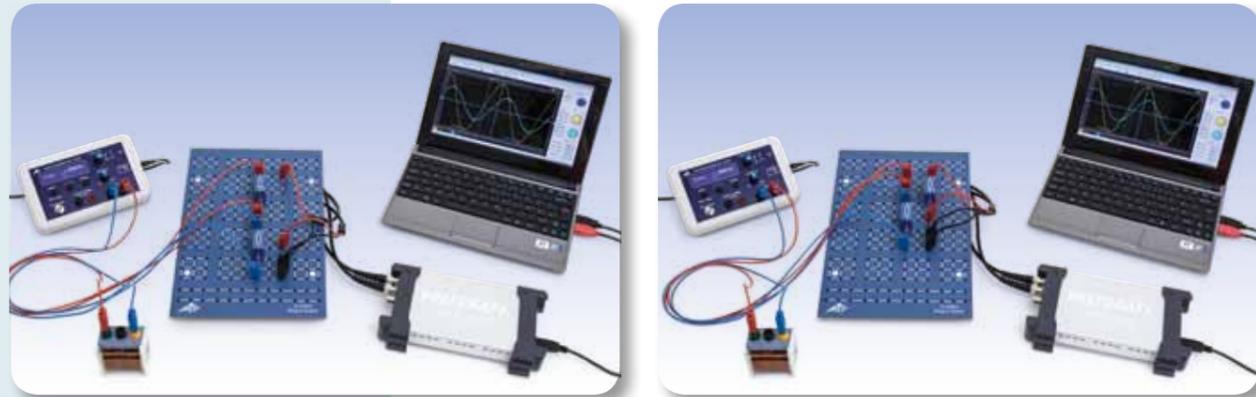


Fig. 6: Spostamento di fase con collegamento in parallelo



FUNZIONI

- Determinazione di modulo e fase dell'impedenza totale in funzione della frequenza con collegamento in serie.
- Determinazione di modulo e fase dell'impedenza totale in funzione della frequenza con collegamento in parallelo.

SCOPO

Determinazione dell'impedenza in corrente alternata in un circuito con induttori e resistori

RIASSUNTO

Nei circuiti a corrente alternata occorre considerare oltre alle resistenze ohmiche anche gli elementi induttivi. La combinazione di entrambi può essere collegata in serie o in parallelo. Da ciò dipendono le ampiezze e la fase di corrente e tensione. Nell'esperimento ciò viene analizzato con un oscilloscopio e a tale scopo un generatore di funzione fornisce tensioni alternate comprese tra 50 e 10000 Hz.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Resistenza 1 Ω, 2 W, P2W19	1012903
1	Resistenza 100 Ω, 2 W, P2W19	1012910
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840
1	Bobina S con 600 spire	1001000
1	Bobina S con 1200 spire	1001002

2

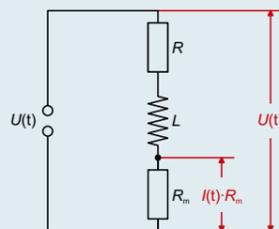


Fig. 1: Disposizione di misurazione per il collegamento in serie

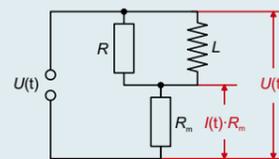


Fig. 2: Disposizione di misurazione per il collegamento in parallelo

BASI GENERALI

Ai circuiti a corrente alternata con induttori si assegna, per motivi di semplicità, una "resistenza complessa" o impedenza in quanto, in questo caso, oltre alle ampiezze di corrente e tensione, occorre considerare anche le relazioni di fase tra di esse. I collegamenti in serie e in parallelo di resistori e induttori sono quindi descrivibili facilmente. Anche la tensione e la corrente vengono considerate come grandezze complesse. Solo la loro parte reale è misurabile.

La reattanza induttiva di una bobina con induttanza L in un circuito a corrente alternata con frequenza f è

$$(1) \quad X_L = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L$$

con $\omega = 2\pi \cdot f$

Pertanto, il collegamento in serie della bobina con una resistenza ohmica R ha l'impedenza totale

$$(2) \quad Z_s = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L + R,$$

mentre al collegamento in parallelo è possibile assegnare l'impedenza totale

$$(3) \quad Z_p = \frac{1}{\frac{1}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L} + \frac{1}{R}}$$

Nella notazione comune

$$(4) \quad Z = Z_0 \cdot \exp(i \cdot \varphi).$$

risulta

$$(5) \quad Z_s = \sqrt{(2\pi \cdot f \cdot L)^2 + R^2} \cdot \exp(i \cdot \varphi_s)$$

$$\text{con} \quad \tan \varphi_s = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{R}$$

e

$$(6) \quad Z_p = \frac{2\pi \cdot f \cdot L \cdot R}{\sqrt{(2\pi \cdot f \cdot L)^2 + R^2}} \cdot \exp(i \cdot \varphi_p)$$

con

$$\tan \varphi_p = \frac{R}{2\pi \cdot f \cdot L}$$

Nell'esperimento, un generatore di funzione crea tensioni alternate con frequenze regolabili f tra 50 e 10000 Hz. La tensione U e la corrente I vengono rappresentate su un oscilloscopio; I corrisponde alla caduta di tensione su una resistenza dinamica piccola. Vengono quindi misurate le parti reali di una tensione presente sulla rispettiva impedenza Z

$$(7) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

e della corrente generata

$$(8) \quad I = \frac{U_0}{Z_0} \cdot \exp(i \cdot (2\pi \cdot f \cdot t - \varphi)) \\ = I_0 \cdot \exp(i \cdot (2\pi \cdot f \cdot t - \varphi))$$

Sull'oscilloscopio vengono rilevate rispettivamente le ampiezze I_0 e U_0 , nonché lo spostamento di fase φ .

ANALISI

Il valore dell'impedenza totale $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$ viene rappresentato in funzione

della frequenza f e/o in funzione della reattanza induttiva $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$. Con una reattanza induttiva grande, il collegamento in serie acquisisce il valore della reattanza induttiva e il collegamento in parallelo quello della resistenza ohmica. Lo spostamento di fase è compreso tra 0° e 90° ed è pari a 45° se la resistenza ohmica e induttiva sono uguali.

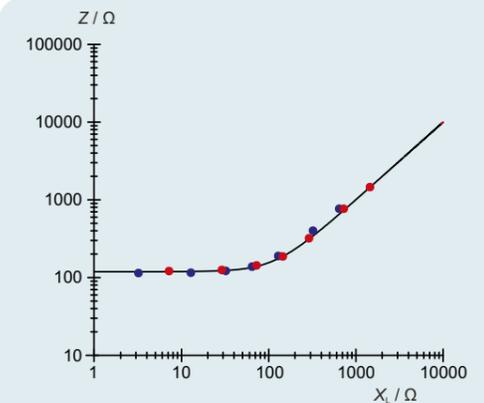


Fig. 3: Impedenza totale con collegamento in serie

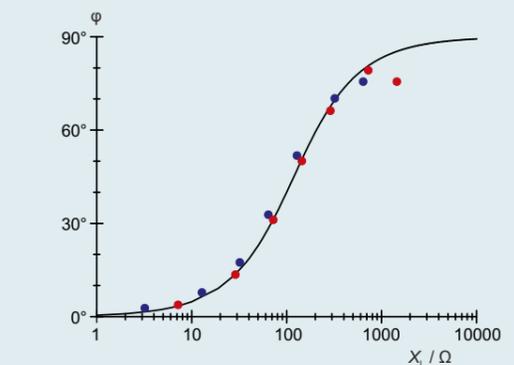


Fig. 4: Spostamento di fase con collegamento in serie

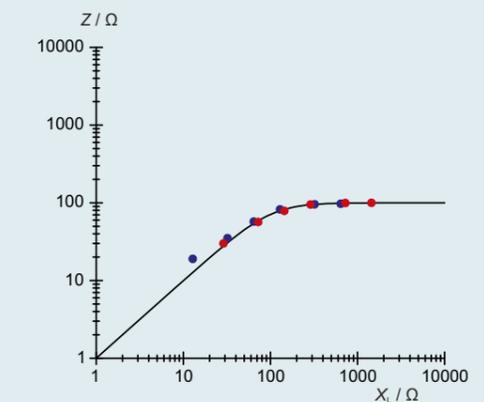


Fig. 5: Impedenza totale con collegamento in parallelo

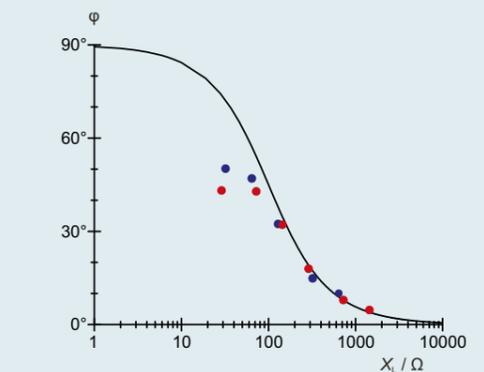


Fig. 6: Spostamento di fase con collegamento in parallelo



FUNZIONI

- Determinazione dell'impedenza nei collegamenti in serie e in parallelo di una resistenza capacitiva e induttiva in funzione della frequenza
- Determinazione della frequenza di risonanza in funzione di induttanza e capacità.
- Osservazione del cambiamento dello spostamento di fase tra corrente e tensione alla frequenza di risonanza.

SCOPO

Determinazione dell'impedenza in corrente alternata in un circuito con induttori e capacitori induttiva e capacitiva

RIASSUNTO

Circuiti di corrente alternata con induttori e capacitori mostrano un comportamento di risonanza. Alla frequenza di risonanza, la reattanza del collegamento in serie di induttore e capacitore diventa uguale a zero, la reattanza del collegamento in parallelo al contrario diventa infinitamente grande. Nell'esperimento ciò viene analizzato con un oscilloscopio e a tale scopo un generatore di funzione fornisce tensioni alternate comprese tra 50 e 20.000 Hz.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Condensatore 1 μF, 100 V, P2W19	1012955
1	Condensatore 4,7 μF, 63 V, P2W19	1012946
1	Bobina S con 600 spire	1001000
1	Bobina S con 1200 spire	1001002
1	Resistenza 10 Ω, 2 W, P2W19	1012904
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957
1	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

BASI GENERALI

Le reattanze induttive in circuiti a corrente alternata aumentano con l'aumentare della frequenza della corrente alternata, mentre le reattanze capacitive diminuiscono. Pertanto, i collegamenti in serie o in parallelo di reattanze capacitive e induttive mostrano un comportamento di risonanza. Si parla di circuiti oscillanti in quanto la corrente e la tensione oscillano tra capacità e induttanza. Una resistenza ohmica aggiuntiva smorza questa oscillazione.

2

Per il calcolo dei collegamenti in serie o in parallelo si attribuisce, per semplicità, ad un'induttanza L la reattanza complessa

$$(1) \quad X_L = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L$$

f : frequenza della corrente alternata

e ad una capacità C la reattanza complessa

$$(2) \quad X_C = \frac{1}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}$$

Per l'impedenza totale in un collegamento in serie senza resistenza ohmica si applica quindi

$$(3) \quad Z_S = i \cdot \left(2\pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right),$$

mentre il collegamento in parallelo si calcola come segue.

$$(4) \quad \frac{1}{Z_P} = -i \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot L} - 2\pi \cdot f \cdot C \right)$$

Alla frequenza di risonanza

$$(5) \quad f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

scompare quindi l'impedenza Z_S del collegamento in serie di reattanza induttiva e capacità; ovvero le tensioni su entrambe le reattanze singole sono uguali ed opposte. Il valore dell'impedenza Z_P del collegamento in parallelo diventa al contrario infinitamente grande, ovvero le correnti singole sono uguali e opposte. Alla frequenza di risonanza inoltre lo spostamento di fase tra corrente e tensione varia il suo segno.

Nell'esperimento vengono realizzati circuiti oscillanti collegando in serie o in parallelo capacitori e induttori. Un generatore di funzione funge da sorgente di tensione con frequenza e ampiezza regolabile. Con un oscilloscopio si misurano corrente e tensione in funzione della frequenza impostata. La tensione U e la corrente I vengono rappresentate su un oscilloscopio; I corrisponde alla caduta di tensione su una resistenza dinamica piccola.

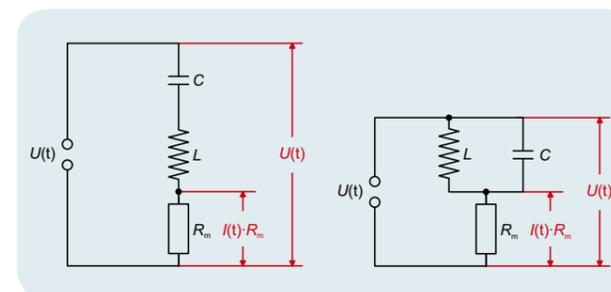


Fig. 1: Disposizione di misurazione per il collegamento in serie

Fig. 2: Disposizione di misurazione per il collegamento in parallelo

ANALISI

Sull'oscilloscopio vengono rilevati per ogni frequenza f lo spostamento di fase φ e le ampiezze I_0 e U_0 . Da ciò si calcola il valore dell'impedenza totale $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$.

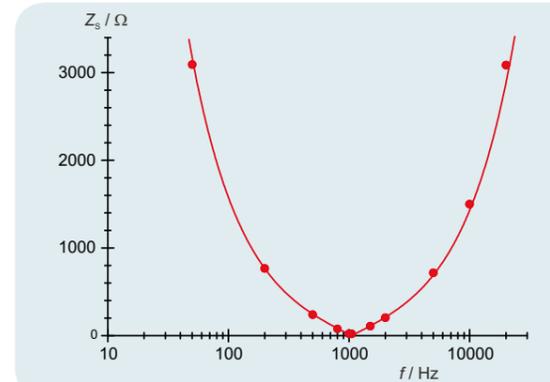


Fig. 3: Impedenza in alternata del collegamento in serie in funzione della frequenza

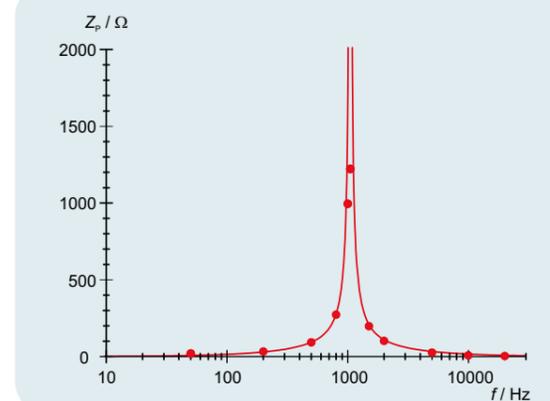


Fig. 4: Impedenza in alternata del collegamento in parallelo in funzione della frequenza

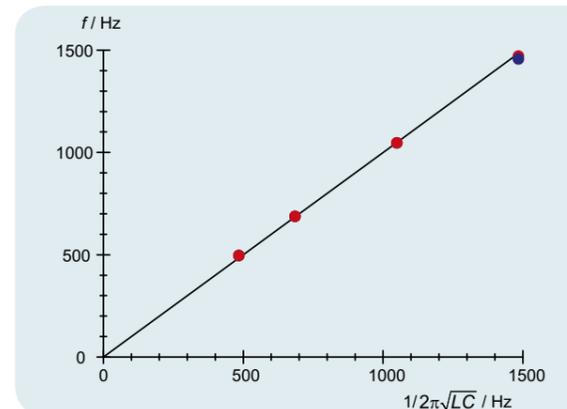


Fig. 5: Confronto tra frequenza di risonanza misurata e calcolata per un collegamento in serie (rosso) e un collegamento in parallelo (blu)



FUNZIONI

- Registrazione delle curve di risonanza delle ampiezze di un circuito oscillante LC in serie per diversi smorzamenti.
- Determinazione della frequenza di risonanza di un circuito oscillante LC in serie.

SCOPO

Analisi del comportamento di risonanza di un circuito oscillante LC in serie

RIASSUNTO

Un circuito oscillante elettrico è un collegamento soggetto a risonanza costituito da un induttore e da un condensatore. In questo esperimento, con il generatore di funzione viene prodotta una tensione alternata con cui si genera un circuito oscillante in serie. Viene misurata la curva di risonanza (ampiezza) e la corrente in funzione della frequenza con ampiezza della tensione costante. Dalla frequenza di risonanza, conoscendo la capacità, si calcola l'induttanza sconosciuta.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per esperimenti di base (230 V, 50/60 Hz)	1000573 o
	Scheda per esperimenti di base (115 V, 50/60 Hz)	1000572
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957 o
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm	1002840

2

BASI GENERALI

Un circuito oscillante elettrico è un collegamento soggetto a risonanza formato da una bobina con induttività L e un condensatore con capacità C . Il circuito oscillante produce, attraverso il periodico scambio di energia fra il campo magnetico della bobina e il campo elettrico del condensatore, oscillazioni elettriche. Lo scambio porta alternativamente alla massima intensità di corrente sulla bobina o alla massima tensione sul condensatore.

Se il circuito oscillante non oscilla liberamente, ma viene eccitato dall'esterno da un segnale sinusoidale, esso oscilla con la stessa frequenza dell'eccitazione e le ampiezze della corrente e delle tensioni sui singoli componenti dipendono dalla frequenza. La corrente I si ricava dalla legge di Ohm:

$$(1) \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U_0 \cdot e^{i\omega t}}{Z}$$

U : Tensione in ingresso sinusoidale

U_0 : Ampiezza, ω : Frequenza del circuito

Z : Impedenza complessiva

In un collegamento in serie l'impedenza complessiva è costituita dalla somma delle impedenze dei singoli componenti. Vi è una resistenza ohmica R , che considera le perdite che si presentano in un circuito oscillante reale e che viene eventualmente integrata da una resistenza esterna. Pertanto si ha

$$(2) \quad Z = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C}$$

Da (1) e (2) per la corrente si ha

$$(3) \quad I(\omega) = \frac{U_0 \cdot e^{i\omega t}}{R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

Il valore della corrente corrisponde alla sua ampiezza, che dipende dalla frequenza:

$$(4) \quad I_0(\omega) = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Diventa massima con la frequenza di risonanza

$$(5) \quad f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

e raggiunge qui il valore

$$(6) \quad I_0(\omega_r) = \frac{U_0}{R}$$

Il circuito oscillante in serie in caso di risonanza si comporta come se fosse composto solo da una resistenza ohmica. In particolare una capacità e un'induttività collegate in serie in caso di risonanza rappresentano un cortocircuito.

In questo esperimento, con il generatore di funzione viene prodotta una tensione alternata con cui si alimenta il circuito oscillante. La corrente I viene misurata in funzione della frequenza f ad una ampiezza di tensione costante. La corrente viene misurata con un'interfaccia di misurazione e registrata e rappresentata graficamente con un software di misurazione e di valutazione. La curva di risonanza (ampiezza), vale a dire la dipendenza dell'ampiezza della corrente dalla frequenza, viene registrata automaticamente.

ANALISI

Dalla curva di risonanza (ampiezza) viene letta la frequenza della risonanza f_r . Poiché la capacità C è nota, è possibile calcolare l'induttività sconosciuta L tramite l'equazione (5):

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_r^2 \cdot C}$$

Dall'ampiezza della curva di risonanza viene calcolata la resistenza ohmica R tramite l'equazione (6). Nel caso in cui non sia applicata alcuna resistenza esterna, R corrisponde alla perdita ohmica nel circuito oscillante reale.

$$R = \frac{U_0}{I_0(\omega_r)}$$

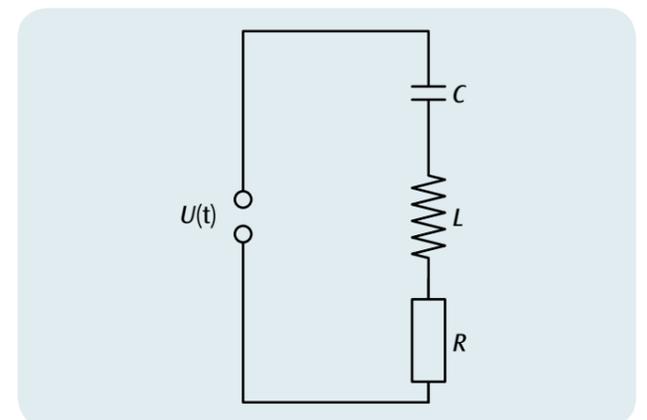


Fig. 1: Schizzo di commutazione per il circuito oscillante LC in serie

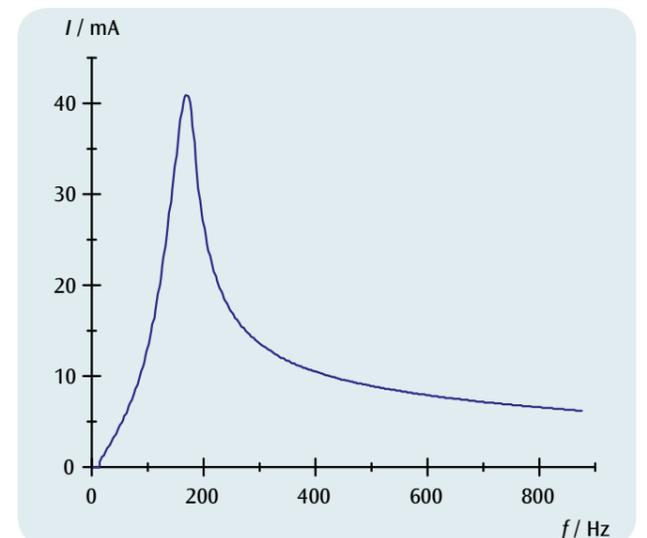
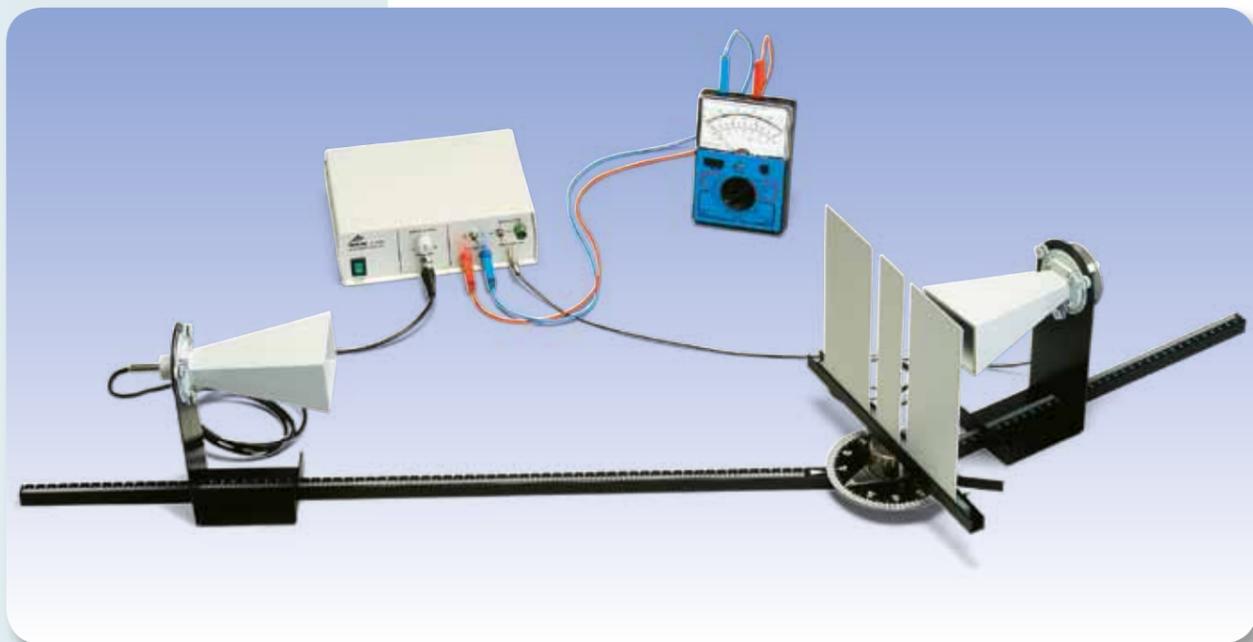


Fig. 2: Curva di risonanza (ampiezza) della corrente ($R_{\text{ext}} = 0$)



FUNZIONI

- Misurazione punto per punto dell'intensità nella diffrazione di microonde da doppia fenditura.
- Determinazione dei massimi per diversi ordini di diffrazione.
- Determinazione della lunghezza d'onda conoscendo la distanza tra fenditure.
- Analisi e variazione della polarizzazione delle microonde irradiate.

SCOPO

Dimostrazione e analisi di interferenza, diffrazione e polarizzazione delle microonde

RIASSUNTO

Con le microonde è possibile eseguire numerosi esperimenti su interferenza, diffrazione e polarizzazione con luce visibile. A questo scopo vengono impiegati oggetti di diffrazione e griglie di polarizzazione, la cui struttura interna è riconoscibile a occhio nudo. Così risulta chiaro che, in caso di diffrazione da doppia fenditura, l'intensità massima viene misurata proprio quando il ricevitore non viene irradiato direttamente dal trasmettitore.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set microonde 9,4 GHz (230 V, 50/60 Hz)	1009951 o
	Set microonde 10,5 GHz (115 V, 50/60 Hz)	1009950
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718

2

BASI GENERALI

L'ottica ondulatoria considera la luce come onda trasversale ed elettromagnetica e ne spiega così l'interferenza, la diffrazione e la polarizzazione. Anche le microonde sono onde elettromagnetiche e presentano gli stessi fenomeni. La loro lunghezza d'onda è tuttavia notevolmente maggiore di quella della luce visibile. Pertanto per esperimenti di ottica ondulatoria con microonde è possibile utilizzare oggetti di diffrazione e griglie di polarizzazione, la cui struttura interna è riconoscibile a occhio nudo.

Nell'esperimento, viene analizzata la diffrazione di microonde della lunghezza d'onda λ su una doppia fenditura, con una distanza tra le fenditure d di diversi centimetri. Si ottiene la distribuzione dell'intensità tipica della diffrazione da doppia fenditura (vedi fig. 1) con massimi al di sotto degli angoli α_m , che soddisfano la condizione.

$$(1) \quad \sin \alpha_m = m \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

L'intensità massima viene misurata esattamente quando il ricevitore si trova dietro il ponte centrale e non può venire irradiato direttamente dal trasmettitore. Questo fenomeno può essere spiegato mediante l'interferenza delle onde separate dalle due fenditure e costituisce una prova significativa della natura ondulatoria delle microonde.

Ruotando il ricevitore nella direzione del fascio, si dimostra la polarizzazione lineare delle microonde irradiate. Allineando in maniera incrociata trasmettitore e ricevitore, l'intensità misurata diminuisce fino a zero. Se nel percorso dei raggi si inserisce a meno di 45° una griglia di polarizzazione, il ricevitore riceve nuovamente un'onda, anche se di ampiezza inferiore. La griglia fa passare la componente del vettore E della microonda in arrivo, che oscilla parallelamente alla griglia di polarizzazione. Da qui a sua volta viene misurata la componente che oscilla parallelamente al ricevitore.

NOTA

Con la stessa dotazione è possibile eseguire anche esperimenti sull'assorbimento, la riflessione, la rifrazione e la polarizzazione di microonde.

ANALISI

Si riportano gli angoli α_m dei massimi di diffrazione in un diagramma $\sin \alpha_m - m$ inversamente rispetto all'ordine di diffrazione m . I lavori misurati si trovano su una retta di origine, il cui incremento corrisponde al quoziente λ/d .

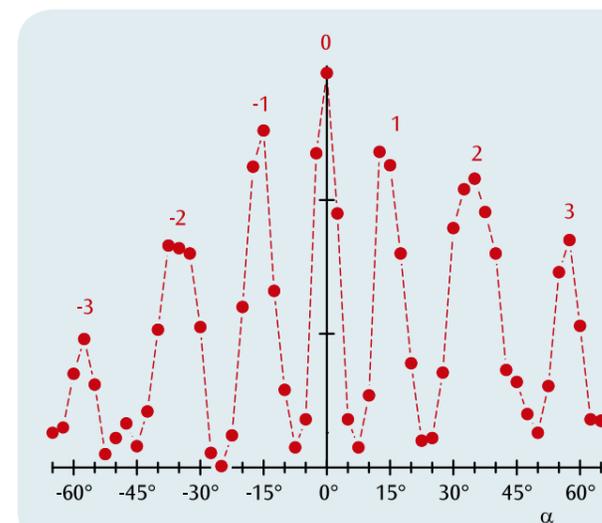


Fig. 1: Distribuzione dell'intensità nella diffrazione delle microonde da doppia fenditura

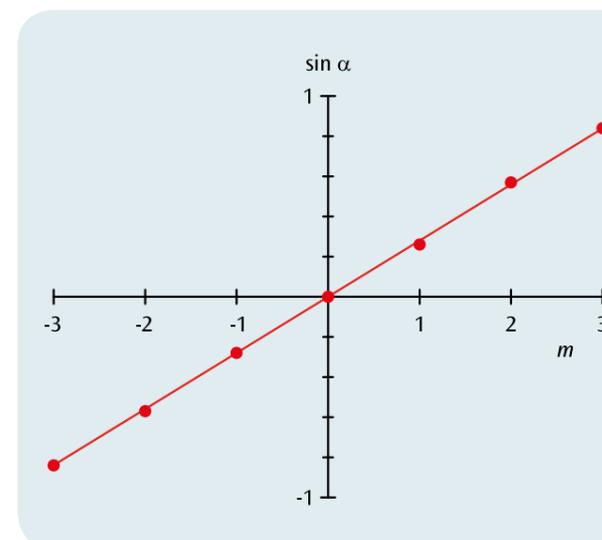


Fig. 2: Posizione dei massimi di intensità in funzione dell'ordine di diffrazione m



FUNZIONI

- Registrazione delle caratteristiche di un diodo a tubo per tre diverse tensioni di riscaldamento del catodo.
- Identificazione dell'area di carica spaziale e di saturazione.
- Conferma della legge di Schottky-Langmuir.

SCOPO

Registrazione della caratteristica di un diodo a tubo

RIASSUNTO

In un diodo a tubo scorre una corrente di emissione supportata da elettroni liberi tra catodo incandescente e anodo, se tra catodo e anodo sussiste una tensione positiva. La corrente aumenta con l'incremento della tensione fino alla saturazione, tuttavia diventa nulla in caso di tensione negativa.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Diodo S	1000613
1	Portatubo S	1014525
1	Alimentatore CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)	1003308 o
	Alimentatore CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)	1003307
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

1

BASI GENERALI

Un diodo a tubo è un recipiente di vetro evacuato in cui si trovano due elettrodi: un catodo riscaldato, dal quale vengono liberati elettroni attraverso l'effetto termoionico, e un anodo (vedi fig. 1). Attraverso una tensione positiva tra catodo e anodo si genera una corrente di emissione supportata da elettroni liberi verso l'anodo (corrente anodica). Se questa tensione è ridotta, la corrente anodica viene ostacolata dalla carica spaziale degli elettroni liberati, in quanto questi schermano il campo elettrico nei confronti del catodo. Con l'incremento della tensione anodica, le linee di campo si insinuano più in profondità nello spazio davanti al catodo e la corrente anodica aumenta. L'aumento avviene fino a quando la carica spaziale davanti al catodo viene eliminata e quindi fino al raggiungimento del valore di saturazione della corrente anodica. Al contrario, gli elettroni non possono arrivare all'anodo se su di esso non è presente una tensione negativa sufficientemente elevata e quindi la corrente anodica è nulla.

La dipendenza della corrente anodica I_A dalla tensione anodica U_A viene definita come caratteristica del diodo a tubo (vedi fig. 2).

Si opera una distinzione tra area di forza controelettromotrice (a), area di carica spaziale (b) e area di saturazione (c).

Nell'area di forza controelettromotrice (a), l'anodo si trova ad un potenziale negativo rispetto al catodo. Gli elettroni non possono avvicinarsi al campo elettrico.

Nell'area di carica spaziale, la dipendenza della corrente anodica dalla tensione anodica viene descritta dalla legge Schottky-Langmuir:

$$(1) \quad I_A \sim U_A^{\frac{3}{2}}$$

Nell'area di saturazione, la corrente anodica dipende dalla temperatura del catodo. Questa può essere aumentata con un incremento della tensione di riscaldamento U_F .

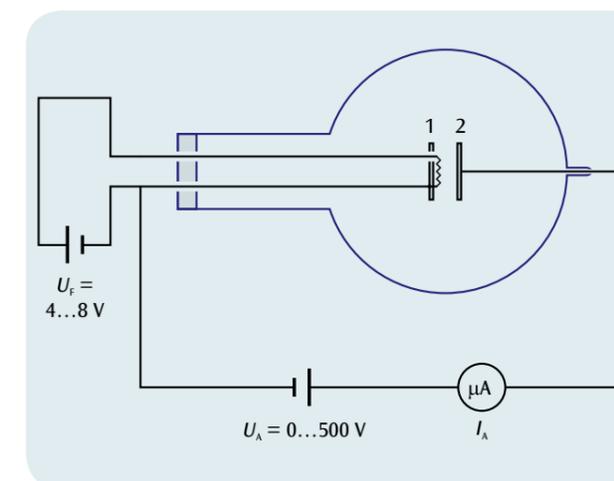


Fig. 1 Collegamento per la registrazione della caratteristica di un diodo a tubo
1: Catodo, 2: Anodo

ANALISI

Area di forza controelettromotrice:

Poiché gli elettroni escono dal catodo con un'energia cinetica $E_{kin} > 0$, scorre una corrente anodica fino a quando la tensione anodica negativa è di entità tale da impedire anche agli elettrodi più veloci di raggiungere l'anodo.

Area di carica spaziale:

In caso di intensità di campo ridotte, non tutti gli elettroni che escono dal catodo incandescente possono proseguire. Circondano il catodo dopo essere usciti come una nuvola e formano una carica spaziale negativa. In caso di tensioni ridotte, le linee di campo che provengono dall'anodo finiscono pertanto sugli elettroni della carica spaziale e non sul catodo stesso. Il campo derivante dall'anodo viene così schermato. Solo con l'incremento della tensione le linee di campo si insinuano sempre più in profondità nello spazio intorno al catodo e la corrente anodica aumenta. L'aumento della corrente avviene fino a quando la carica spaziale intorno al catodo è esaurita. Si raggiunge così il valore di saturazione della corrente anodica.

Area di saturazione:

Nell'area di saturazione, la corrente di emissione è indipendente dalla tensione anodica. Può tuttavia aumentare, incrementando il numero di elettroni che escono dal catodo per ogni unità di tempo. Questo può essere effettuato attraverso un aumento di temperatura del catodo. Il valore della corrente di saturazione dipende quindi dalla tensione di riscaldamento.

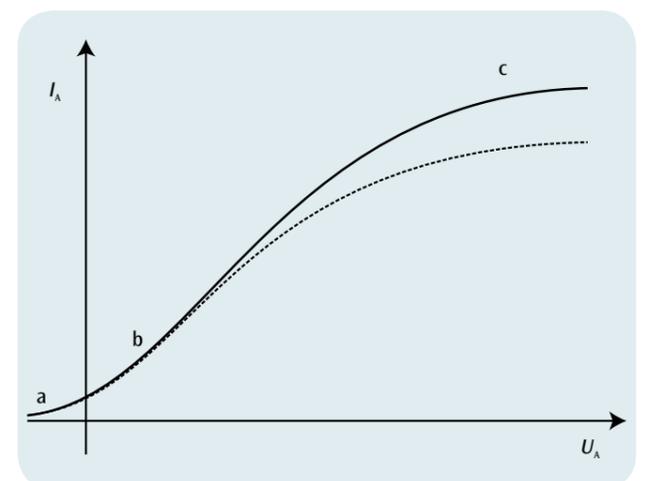


Fig. 2 Caratteristica di un diodo a tubo
a: Area di forza controelettromotrice, b: Area di carica spaziale, c: Area di saturazione



FUNZIONI

- Registrazione delle caratteristiche della corrente e della tensione anodiche di un triodo a tubo a più tensioni costanti del reticolo.
- Registrazione delle caratteristiche della corrente anodica e della tensione del reticolo di un triodo a tubo a più tensioni anodiche costanti.

SCOPO

Registrazione del campo di caratteristiche di un triodo a tubo

RIASSUNTO

In un triodo a tubo scorre una corrente di emissione supportata da elettroni liberi tra catodo incandescente e anodo, se tra catodo e anodo sussiste una tensione positiva. Questa corrente può essere controllata da una tensione positiva o negativa ridotta tra catodo e reticolo.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Triode S	1000614
1	Portatubo S	1014525
1	Alimentatore CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)	1003308 o
	Alimentatore CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)	1003307
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

1

BASI GENERALI

Un triodo a tubo è un recipiente di vetro evacuato in cui si trovano due elettrodi: un catodo riscaldato, dal quale vengono liberati elettroni attraverso l'effetto termoionico, un anodo e un reticolo tra i due. Se la tensione positiva tra catodo e anodo (tensione anodica) è sufficientemente elevata, gli elettroni liberi passano dal catodo all'anodo attraverso il reticolo. La corrente anodica così generata può essere controllata attraverso la variazione di una tensione supplementare tra catodo e reticolo (tensione del reticolo). A seconda del fatto che il reticolo si trovi su un potenziale positivo o negativo rispetto al catodo, la corrente anodica viene aumentata o diminuita. Un triodo a tubo può pertanto essere utilizzato per l'aumento delle tensioni alternate.

Nell'esperimento, viene registrato il campo delle caratteristiche di un triodo a tubo. Con ciò si intende la dipendenza della corrente anodica I_A dalla tensione anodica U_A e dalla tensione del reticolo U_C . Per la rappresentazione del campo delle caratteristiche sono utili due varianti (vedi fig. 2 e 3): la variante 1 rappresenta la corrente anodica come funzione della tensione anodica a diverse tensioni costanti del reticolo, mentre la variante 2 rappresenta la corrente anodica come funzione della tensione del reticolo a diverse tensioni anodiche costanti.

ANALISI

La corrente anodica aumenta con l'aumentare della tensione anodica e della tensione del reticolo. Anche variazioni della tensione del reticolo nell'ordine di grandezza di solo pochi volt comportano notevoli modificazioni della corrente anodica. La tensione del reticolo può essere pertanto utilizzata per il controllo della corrente anodica.

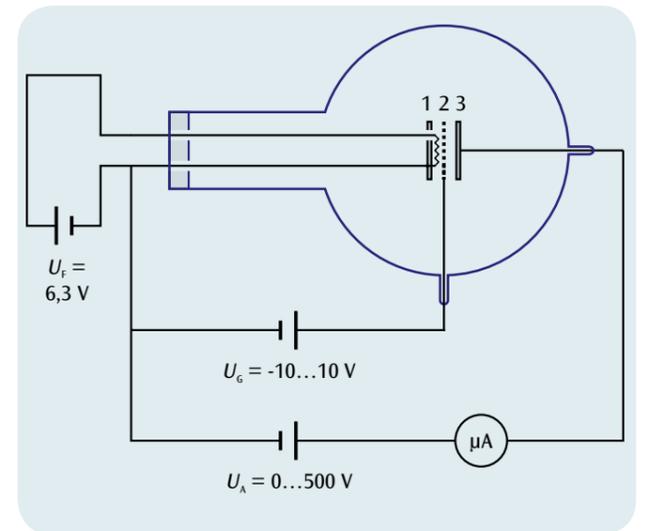


Fig. 1 Collegamento per la registrazione del campo delle caratteristiche di un triodo a tubo. 1: Catodo, 2: Reticolo, 3: Anodo

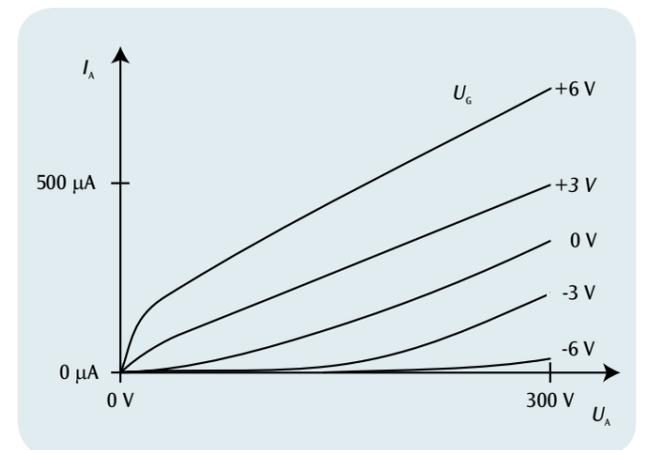


Fig. 2 Caratteristiche della corrente e della tensione anodiche

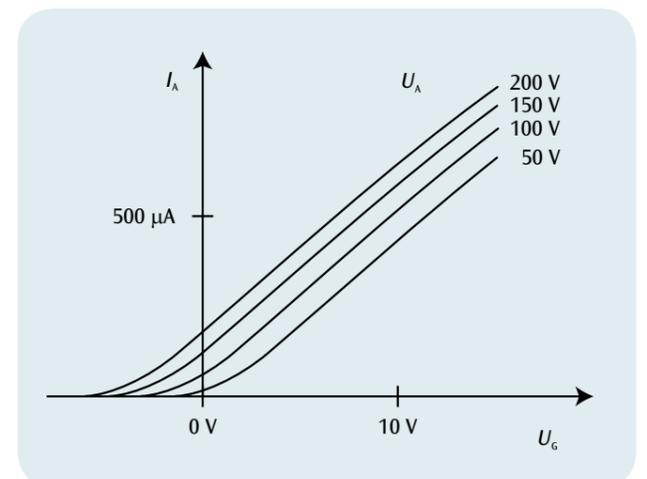
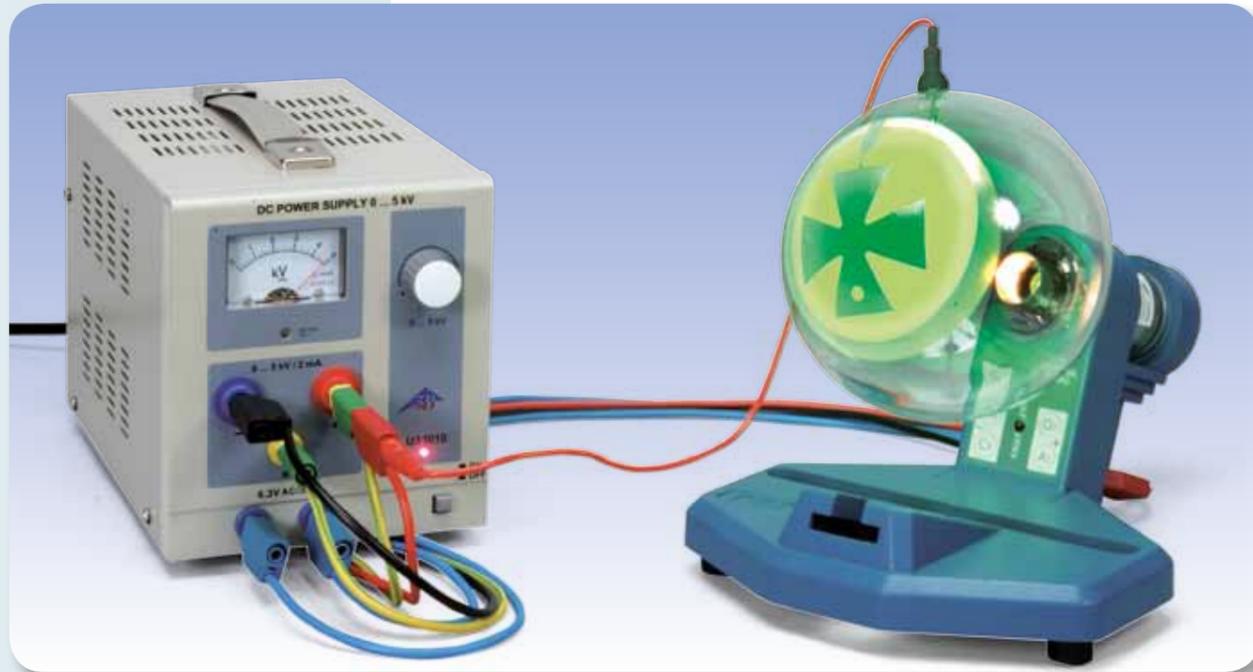


Fig. 3 Caratteristiche della corrente anodica e della tensione del reticolo



FUNZIONI

- Dimostrazione della diffusione rettilinea di elettroni nello spazio privo di campo.
- Dimostrazione della deviazione degli elettroni in un campo magnetico.
- Introduzione all'ottica elettronica.

SCOPO

Dimostrazione della diffusione rettilinea di elettroni nello spazio privo di campo

RIASSUNTO

La diffusione rettilinea di elettroni nello spazio privo di campo viene dimostrata nei tubi a croce di Malta attraverso la congruenza dell'ombra degli elettroni con l'ombra della luce. Un disturbo della diffusione rettilinea, ad es. per l'interposizione di un campo magnetico, si nota sotto forma di spostamento dell'ombra degli elettroni.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo a croce di Malta S	1000011
1	Portatubo S	1014525
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (230 V, 50/60 Hz)	1003310 o
	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (115 V, 50/60 Hz)	1003309
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843
Ulteriormente consigliato per la creazione di un campo magnetico assiale:		
1	Coppia di bobine di Helmholtz S	1000611
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311

1

BASI GENERALI

In un tubo a croce di Malta, il fascio elettronico divergente di un cannone elettronico su uno schermo fluorescente viene osservato come luminescenza, in cui un ostacolo impenetrabile per gli elettroni (croce di Malta) crea un'ombra. La posizione dell'ombra varia quando la diffusione rettilinea degli elettroni viene disturbata nel proprio percorso verso lo schermo fluorescente.

Quando anodo e croce di Malta hanno lo stesso potenziale, lo spazio è privo di campo e gli elettroni si diffondono in maniera rettilinea. L'ombra degli elettroni della croce di Malta è quindi congrua a quella della luce che è da ricondursi alla luce emessa dal catodo incandescente.

Il disturbo della diffusione rettilinea nello spazio privo di campo può essere dimostrato molto semplicemente attraverso l'interruzione del collegamento di conduzione tra anodo e ostacolo: la carica statica così realizzata dell'ostacolo provoca un'ombra degli elettroni sfuocata sullo schermo fluorescente. Se gli elettroni vengono deviati nel campo magnetico nel loro percorso verso lo schermo fluorescente, si osserva uno spostamento o una rotazione dell'ombra degli elettroni. La forza di deviazione F dipende dalla velocità v e dal campo magnetico B ed è data dalla forza di Lorentz:

$$(1) \quad F = -e \cdot v \times B$$

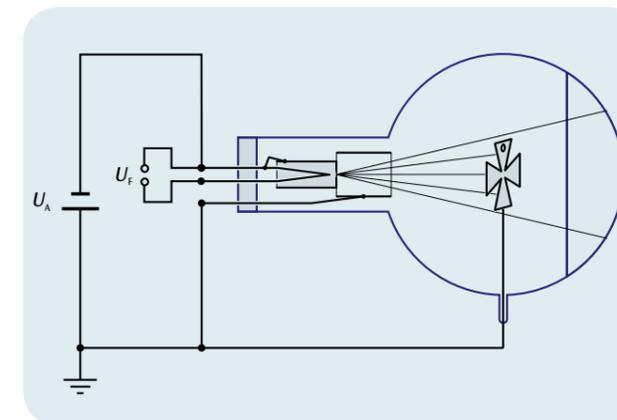


Fig. 1: Rappresentazione schematica del tubo a croce di Malta

ANALISI

Nello spazio privo di campo gli elettroni si diffondono in maniera rettilinea. L'ombra degli elettroni della croce di Malta è quindi congrua a quella della luce.

In un campo magnetico, gli elettroni vengono deviati e la loro ombra viene spostata rispetto a quella della luce. La forza di deviazione è ortogonale rispetto alla direzione di movimento degli elettroni e al campo magnetico.

Se il campo magnetico si sposta in direzione assiale, gli elettroni vengono deviati su orbite a spirale e l'ombra degli elettroni viene girata e rimpicciolita.



Fig. 2: Rotazione dell'ombra degli elettroni tramite deflessione degli elettroni nel campo magnetico



FUNZIONI

- Dimostrazione dell'emissione termo-elettrica di portatori di carica da un catodo riscaldato.
- Determinazione della polarità dei portatori di carica emessi.
- Valutazione della carica specifica dei portatori di carica.

SCOPO

Determinazione della polarità dei portatori di carica

RIASSUNTO

Nel tubo di Perrin il fascio elettronico viene deviato applicando un campo magnetico omogeneo a una tazza di Faraday. La carica degli elettroni può essere dimostrata mediante un elettroscopio collegato alla tazza di Faraday e analizzata in termini di polarità confrontandola con una carica di segno conosciuto.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di Perrin S	1000616
1	Portatubo S	1014525
1	Coppia di bobine di Helmholtz S	1000611
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (230 V, 50/60 Hz)	1003310 o
	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (115 V, 50/60 Hz)	1003309
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Elettroscopio di Kolbe	1001027
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

1

BASI GENERALI

Nel tubo di Perrin un fascio elettronico focalizzato colpisce uno schermo fluorescente e può qui essere osservato come punto luminoso. A meno di 45° rispetto al fascio elettronico viene applicata una tazza di Faraday nella quale gli elettroni possono essere deviati con l'applicazione di un campo magnetico. La corrente di carica può essere misurata attraverso un collegamento separato.

Nell'esperimento il fascio elettronico viene deviato nella tazza di Faraday dal campo magnetico omogeneo di una coppia di bobine di Helmholtz collegata a un elettroscopio. Dal caricamento o dallo scaricamento dell'elettroscopio da parte del fascio elettronico condotto nella tazza di Faraday è possibile desumere la polarità dei portatori di carica.

Inoltre è possibile valutare la carica specifica dei portatori di carica in quanto il raggio di curvatura r della traiettoria circolare nella tazza di Faraday è noto. Su questa guida circolare la forza centripeta che agisce sui portatori di carica è data dalla forza di Lorentz.

Vale quindi:

$$(1) \quad m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B$$

e : Carica, m : Massa dei portatori di carica, B : Campo magnetico

dove la velocità v dei portatori di carica dipende dalla tensione anodica U_A :

$$(2) \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A}$$

Ne consegue, per la carica specifica dei portatori di carica:

$$(3) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2}$$

ANALISI

Il raggio di curvatura r della traiettoria circolare verso la tazza di Faraday è di 160 mm. L'alta tensione U_A è nota.

Il campo magnetico B viene generato in una coppia di bobine di Helmholtz ed è proporzionale alla corrente I_H che attraversa una singola bobina. Il fattore di proporzionalità k può essere calcolato sulla base del raggio della bobina $R = 68$ mm e del numero di spire $N = 320$ per bobina:

$$B = k \cdot I_H \quad \text{con} \quad k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

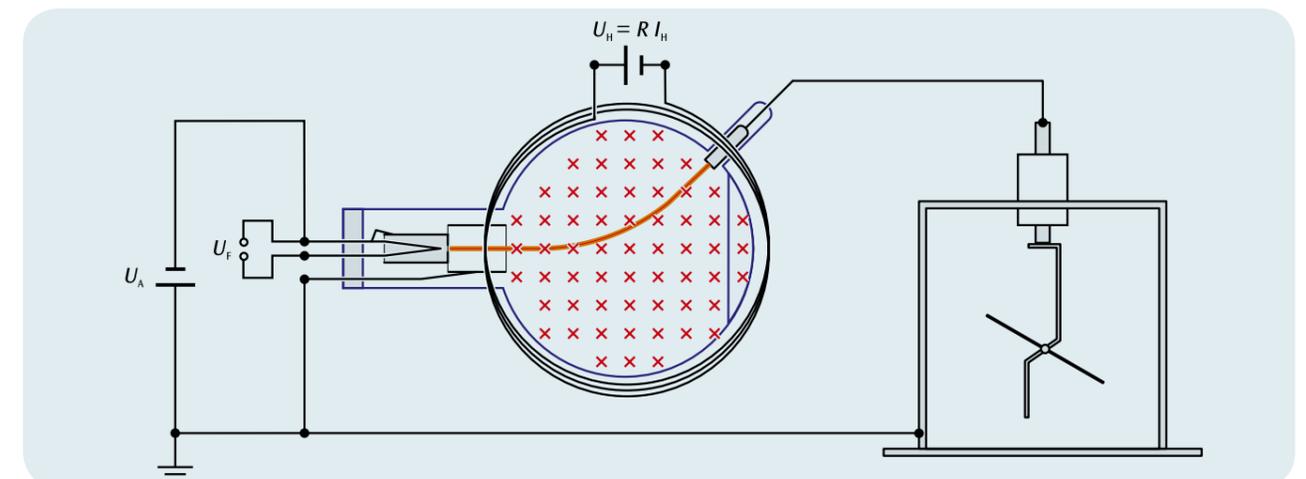


Fig. 1 Rappresentazione schematica del tubo di Perrin


FUNZIONI

- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo magnetico.
- Valutazione della carica specifica dell'elettrone.
- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo elettrico.
- Struttura di un selettore di velocità da un campo elettrico e magnetico incrociato.

SCOPO

Analisi della deviazione degli elettroni nel campo elettrico e magnetico

RIASSUNTO

Nei tubi di Thomson, la deviazione verticale di un fascio elettronico orizzontale risulta visibile su uno schermo fluorescente. La deviazione può essere generata da un campo elettrico verticale o da un campo magnetico orizzontale ortogonale rispetto alla direzione del fascio.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di Thomson S	1000617
1	Portatubo S	1014525
1	Coppia di bobine di Helmholtz S	1000611
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (230 V, 50/60 Hz)	1003310 o
	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (115 V, 50/60 Hz)	1003309
1	Alimentatore CC 0 - 500 V (230 V, 50/60 Hz)	1003308 o
	Alimentatore CC 0 - 500 V (115 V, 50/60 Hz)	1003307
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2
BASI GENERALI

Nei tubi di Thomson, gli elettroni passano in direzione orizzontale attraverso un diaframma a fessura dietro l'anodo e colpiscono uno schermo fluorescente inclinato nel percorso dei raggi luminosi, sul quale risulta visibile l'andamento del fascio. Dietro al diaframma a fessura è montato un condensatore a piastre, nel cui campo elettrico verticale gli elettroni vengono deviati in direzione verticale. Inoltre, con le bobine di Helmholtz viene generato un campo magnetico ad andamento orizzontale ortogonale rispetto alla direzione del fascio, in cui gli elettroni vengono deviati anche in questo caso in direzione verticale:

Su un elettrone che si sposta nel campo magnetico B alla velocità v agisce la forza di Lorentz

$$(1) \quad F = -e \cdot v \times B$$

e : Carica fondamentale

ortogonalmente rispetto alla direzione del movimento e al piano creato dal campo magnetico. La deviazione avviene in direzione verticale, se sia la direzione del movimento che il campo magnetico si trovano nel piano orizzontale (vedi fig. 1). Se la direzione di movimento è ortogonale al campo magnetico omogeneo, gli elettroni vengono forzati su una traiettoria circolare, la cui forza centripeta è data dalla forza di Lorentz.

$$(2) \quad m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B$$

m : Massa elettronica, r : Raggio della guida circolare

La velocità degli elettroni dipende dalla tensione degli anodi U_A . Ossia:

$$(3) \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A}$$

In questo modo, dal raggio della traiettoria circolare è possibile determinare la carica specifica dell'elettrone se il campo magnetico omogeneo B e la tensione anodica U_A sono noti. Sulla base di (2) e (3), per la carica specifica dell'elettrodo ne consegue:

$$(4) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2}$$

Se sul condensatore a piastre è presente una tensione U_p , nel campo elettrico verticale E con la forza

$$(5) \quad F = -e \cdot E$$

e : Carica fondamentale

gli elettroni vengono deviati anche in questo caso verticalmente (vedi fig. 2). Il campo elettrico può quindi essere scelto in modo che la deviazione nel campo magnetico sia compensata:

$$(6) \quad e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0$$

In questo caso, la velocità degli elettroni può essere facilmente determinata. Ossia:

$$(7) \quad v = \frac{E}{B}$$

Una disposizione del campo elettrico e magnetico incrociato in cui la deviazione degli elettroni viene compensata rispetto allo zero viene chiamata selettore di velocità.

ANALISI

Il campo magnetico B viene generato in una coppia di bobine di Helmholtz ed è proporzionale alla corrente I_H attraverso una singola bobina. Il fattore di proporzionalità k può essere calcolato sulla base del raggio della bobina $R = 68$ mm e del numero di spire $N = 320$ per bobina:

$$B = k \cdot I_H \quad \text{con} \quad k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

Il campo elettrico può essere calcolato sulla base della tensione U_p e della distanza delle piastre d :

$$E = \frac{U_p}{d}$$

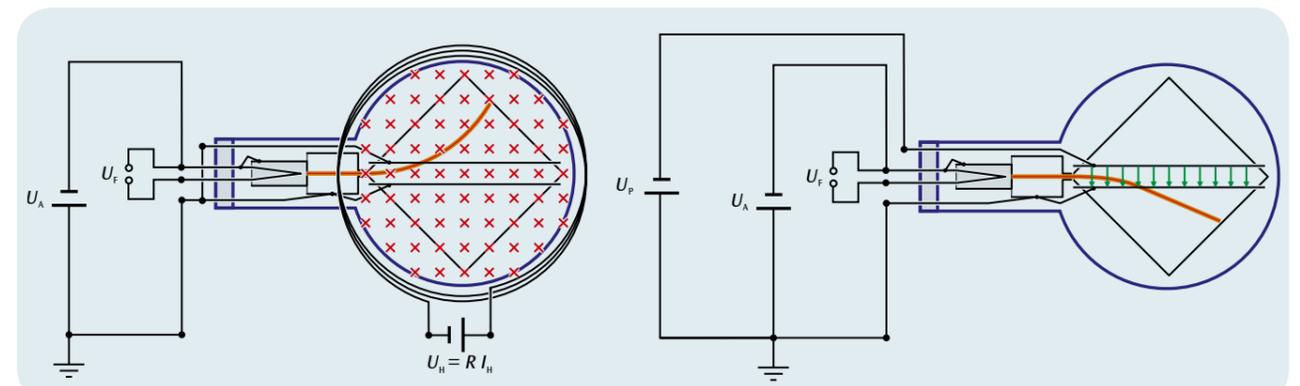


Fig. 1 Rappresentazione schematica per i tubi di Thomson nel campo magnetico

Fig. 2 Rappresentazione schematica per i tubi di Thomson nel campo elettrico



FUNZIONI

- Dimostrazione della deviazione degli elettroni in un campo magnetico omogeneo su una traiettoria circolare chiusa.
- Determinazione della corrente delle bobine di Helmholtz I_H a seconda della tensione di accelerazione U del cannone elettronico a raggio della traiettoria circolare r costante.

SCOPO

Determinazione della carica specifica dell'elettrone

RIASSUNTO

Nel tubo a fascio filiforme, la traiettoria circolare degli elettroni in un campo magnetico omogeneo è visibile come traccia su oscilloscopio limitata in modo preciso. Pertanto, il raggio della traiettoria circolare può essere misurato direttamente con una scala. Dal raggio della traiettoria r , dal campo magnetico B e dalla tensione di accelerazione U del cannone elettronico è possibile calcolare la carica specifica e/m dell'elettrone.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo a fascio elettronico su base di collegamento	1000904
1	Bobine di Helmholtz da 300 mm	1000906
1	Alimentatore CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)	1003308 o
	Alimentatore CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)	1003307
1	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Nel tubo a fascio filiforme, gli elettroni si spostano in un campo magnetico omogeneo su una traiettoria circolare. I tubi contengono gas neon a pressione precisamente regolata e gli atomi di gas vengono ionizzati lungo la traiettoria circolare tramite gli urti degli elettroni ed eccitati con emissione di luminescenza. In questo modo, la traiettoria circolare degli elettrodi risulta indirettamente visibile e il suo raggio può essere misurato direttamente con una scala. Poiché la tensione di accelerazione U del cannone elettronico e il campo magnetico B sono noti, dal raggio della traiettoria circolare è possibile calcolare la carica specifica e/m dell'elettrone:

Su un elettrone che si sposta perpendicolarmente rispetto ad un campo magnetico omogeneo B alla velocità v , ortogonalmente rispetto alla velocità e al campo magnetico agisce la forza di Lorentz

$$(1) \quad F = e \cdot v \cdot B$$

e : Carica fondamentale

che agisce sull'elettrone come forza centripeta

$$(2) \quad F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

m : Massa elettronica

su una traiettoria circolare con il raggio r . Pertanto, è vale

$$(3) \quad e \cdot B = \frac{m \cdot v}{r}$$

La velocità v dipende dalla tensione di accelerazione U del cannone elettronico:

$$(4) \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U}$$

Per la carica specifica dell'elettrone vale quindi:

$$(5) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{(r \cdot B)^2}$$

ANALISI

Il campo magnetico B viene generato in una coppia di bobine di Helmholtz ed è proporzionale alla corrente I_H attraverso una singola bobina. Il fattore di proporzionalità k può essere calcolato sulla base del raggio della bobina $R = 147,5$ mm e del numero di spire $N = 124$ per bobina:

$$B = k \cdot I_H \quad \text{con} \quad k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

Pertanto, tutte le grandezze di determinazione per la carica elettronica specifica sono note.

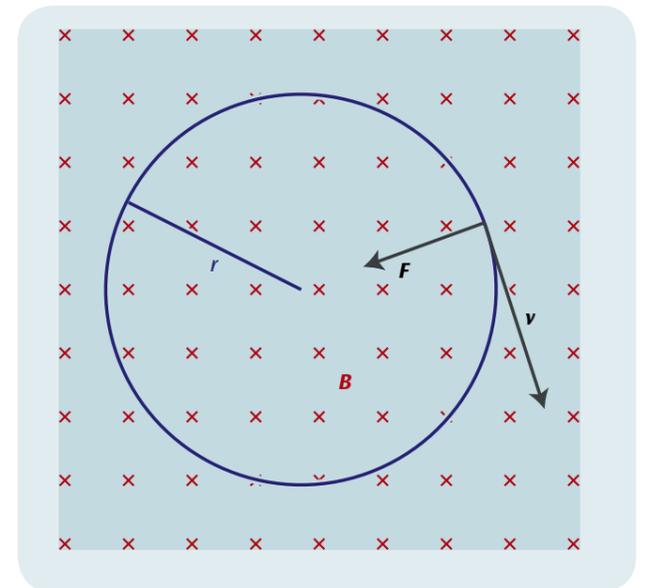


Fig. 1 Deviazione degli elettroni alla velocità v in un campo magnetico B attraverso la forza di Lorentz F su una guida circolare chiusa con il raggio r



Fig. 2 Tubo a fascio filiforme con traccia luminosa circolare degli elettroni nel campo magnetico



FUNZIONI

- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo elettrico.
- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo magnetico.
- Dimostrazione della rappresentazione oscilloscopica prendendo come esempio i segnali periodici di un generatore di funzione.
- Calibrazione del regolatore di frequenza del generatore a dente di sega.

SCOPO

Analisi dei principi fisici della rappresentazione oscilloscopica con risoluzione temporale dei segnali elettrici

RIASSUNTO

Con l'oscilloscopio didattico è possibile analizzare i principi fisici della rappresentazione di segnali elettrici con risoluzione temporale su uno schermo fluorescente. In un tubo a raggi catodici viene prodotto un fascio elettronico il cui punto di impatto sullo schermo può essere osservato come un punto luminoso verde. Deviato su una coppia di piastre da una tensione a dente di sega, il fascio elettronico si sposta a velocità costante da sinistra a destra per poi "saltare" al punto di partenza. Questo processo si ripete periodicamente con una frequenza regolabile. La tensione in funzione del tempo che deve essere rappresentata viene applicata a una bobina esterna al tubo e determina una deviazione verticale del fascio nel campo magnetico della bobina. La sua dipendenza dal tempo viene risolta dal contemporaneo movimento orizzontale del fascio elettronico e resa visibile sullo schermo fluorescente.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Oscilloscopio didattico	1000902
1	Alimentatore CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)	1003308 o
	Alimentatore CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)	1003307
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957 o
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Un'importante applicazione dell'emissione di elettroni termici in alto vuoto è l'oscilloscopio a raggi catodici, con il tubo a raggi catodici come sua parte costituente fondamentale. Nella versione didattica dell'oscilloscopio, un catodo incandescente circondato dal cosiddetto cilindro di Wehnelt e un disco forato a potenziale anodico costituiscono il sistema ottico elettronico del tubo a raggi catodici esternamente visibile. Una parte degli elettroni accelerati verso l'anodo attraversa il disco forato e forma un raggio visibile sullo schermo fluorescente del tubo sotto forma di un punto luminoso verde. Poiché il tubo è riempito di neon a bassa pressione, il fascio elettronico urta gli atomi di gas e conseguentemente è reso visibile sotto forma di un filo luminoso rossastro. Alla formazione di questo nuovo fascio contribuisce anche l'applicazione di una tensione negativa sul cilindro di Wehnelt. A favore della semplicità e della chiarezza si è rinunciato a dispositivi supplementari per l'accelerazione successiva e la messa a fuoco del raggio, comuni negli oscilloscopi tecnici.

Dietro all'anodo è situata una coppia di piastre orientate parallelamente al fascio elettronico che possono essere collegate a un generatore di tensione a dente di sega (vedi fig. 1). Il campo elettrico della tensione a dente di sega $U_x(t)$ devia orizzontalmente il fascio, che si sposta sullo schermo fluorescente da sinistra a destra a velocità costante, per poi "saltare" al punto di partenza. Questo processo si ripete periodicamente con una frequenza regolabile.

Durante il moto da sinistra a destra, il fascio elettronico può inoltre essere deviato verticalmente in un campo magnetico applicando una tensione $U_y(t)$ alla bobina esterna al tubo. Se questa tensione varia in funzione del tempo, la variazione viene resa visibile con risoluzione temporale sullo schermo fluorescente (vedi fig. 2).

Queste tensioni dipendenti dal tempo possono per esempio essere i segnali di uscita periodici di un generatore di funzione oppure i segnali amplificati di un microfono.

Nell'esperimento vengono analizzati i segnali periodici di un generatore di funzione. Per la rappresentazione ottimale, la frequenza a dente di sega viene scelta con un rapporto a numeri interi rispetto alla frequenza del generatore di funzione.

ANALISI

Se sullo schermo fluorescente viene rappresentato un periodo del segnale proveniente dal generatore di funzione, la sua frequenza corrisponde alla frequenza del dente di sega.

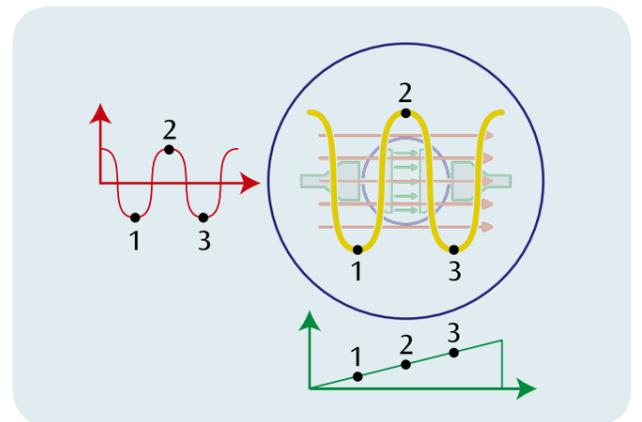


Fig. 2: Rappresentazione con risoluzione temporale di un segnale periodico

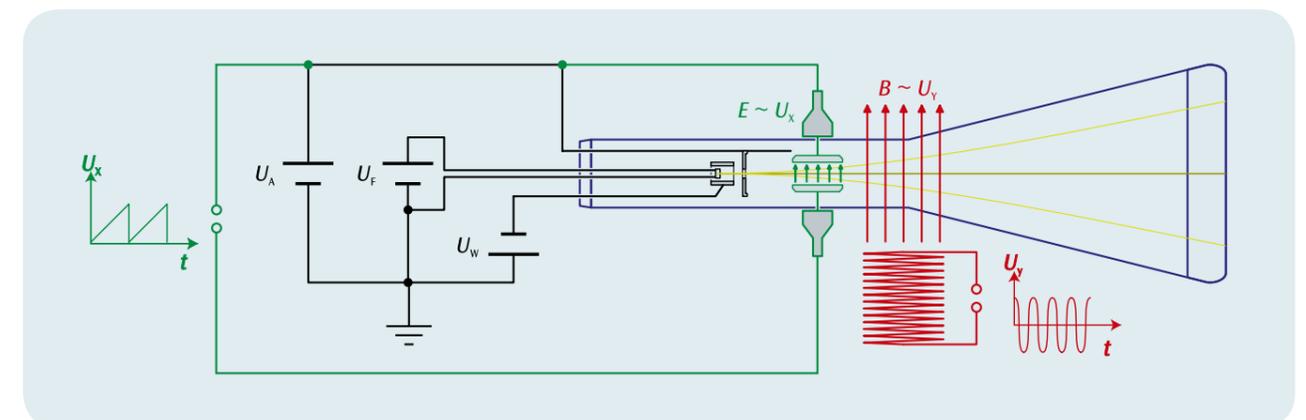


Fig. 1: Rappresentazione schematica dell'oscilloscopio didattico visto dall'alto



FUNZIONI

- Sovrapposizione di campi alternati magnetici a frequenza uguale e diversa e osservazione dello spostamento del punto di immagine del tubo.
- Produzione di figure di Lissajous chiuse.
- Verifica della frequenza di rete.

SCOPO

Dimostrazione della sovrapposizione indisturbata di campi magnetici nel vuoto

RIASSUNTO

La sovrapposizione indisturbata di campi magnetici nel vuoto è dimostrata mediante l'uso di un tubo a raggi catodici. A tale scopo si osservano gli spostamenti del punto di immagine sullo schermo fluorescente del tubo. Le verifiche possono essere estese ai campi magnetici con frequenze uguali e diverse. Le figure di Lissajous osservabili sullo schermo fluorescente dipendono fortemente dal rapporto di frequenza dei due campi magnetici e dalla loro posizione di fase.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Oscilloscopio didattico	1000902
1	Alimentatore CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)	1003308 o
	Alimentatore CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)	1003307
1	Generatore di funzione FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	1009957 o
	Generatore di funzione FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	1009956
1	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A, stab. (230 V, 50/60 Hz)	1001007 o
	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A, stab. (115 V, 50/60 Hz)	1001006
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Con il tubo a raggi catodici è possibile dimostrare il principio di sovrapposizione per i campi magnetici nel vuoto analizzando la deviazione del fascio elettronico del tubo nel campo magnetico. La verifica può essere eseguita in particolar modo anche per i campi magnetici alternati, in quanto il fascio elettronico segue quasi privo di inerzia le variazioni dei campi magnetici.

Nell'esperimento, due bobine con caratteristiche costruttive identiche percorse da corrente vengono applicate esternamente al tubo a raggi catodici e viene osservata la deviazione del fascio elettronico nei campi magnetici delle bobine sotto forma di spostamenti del punto di immagine sullo schermo fluorescente del tubo. Mentre il campo magnetico della bobina orizzontale determina uno spostamento verticale, la bobina verticale provoca uno spostamento orizzontale.

Attraverso un campo magnetico alternato alla frequenza di rete in una delle bobine, il punto di immagine viene allungato in una linea verticale o orizzontale. Se si collegano entrambe le bobine parallelamente alla sorgente di corrente alternata, compare una linea retta a meno di 45°, se le si collega non parallelamente essa compare a meno di -45° rispetto alla verticale, in quanto gli spostamenti del punto di immagine vengono sovrapposti da entrambi i campi magnetici.

Le verifiche possono essere estese anche ai campi magnetici con frequenze diverse. Le figure di Lissajous ora osservabili sullo schermo fluorescente dipendono dal rapporto di frequenza dei due campi magnetici e dalla loro posizione di fase. Se le frequenze hanno tra loro un rapporto semplice e razionale vengono prodotte figure chiuse, la cui forma precisa dipende ancora dalla differenza di fase tra i campi magnetici, come è raffigurato nella Figura 1 per le figure di Lissajous con rapporto di frequenza 5:1.

Se il rapporto di frequenza si discosta solo leggermente da un rapporto razionale semplice, ne deriva una figura chiusa che cambia tanto più lentamente quanto più piccola è la deviazione dal rapporto razionale. Questo fenomeno viene sfruttato nell'esperimento per verificare la frequenza di rete. A tale scopo, la prima bobina viene collegata a un trasformatore funzionante a frequenza di rete e la seconda bobina a un generatore di funzione la cui frequenza di segnale possa essere letta con altissima precisione.

ANALISI

Compatibilmente alla frequenza di rete ν viene cercata la frequenza del generatore ν_5 in corrispondenza della quale la figura di Lissajous da correlare al rapporto di frequenza 5:1 cambia più lentamente.

Le frequenze di rete ν è calcolabile nel momento di osservazione nel modo seguente.

$$\nu = \frac{\nu_5}{5}$$

Questa determinazione è effettuata con una precisione di 0,01 Hz, in quanto ν_5 può essere impostata con una precisione di 0,05 Hz.

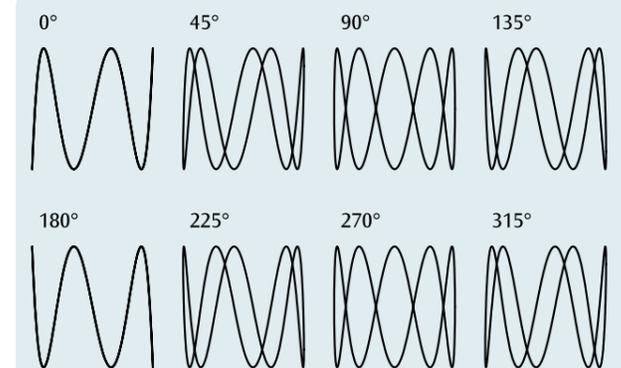
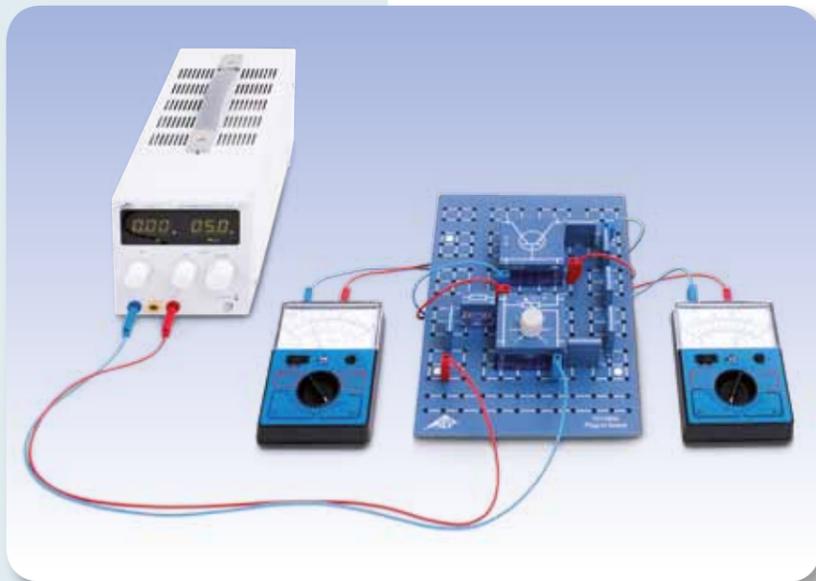


Fig. 1: Figure di Lissajous con rapporto di frequenza 5:1 e differenze di fase 0°, 45°, 90°, ...



SCOPO

Misurazione delle caratteristiche rilevanti di un transistor npn

RIASSUNTO

Un transistor bipolare è un componente elettronico costituito da tre strati semiconduttori drogati p e n alternati: la base, il collettore e l'emettitore. In base alla disposizione degli strati si parla di un transistor npn oppure pnp. Il comportamento di un transistor bipolare è caratterizzato, tra le altre cose, dalla caratteristica di ingresso, di controllo e di uscita che nell'esperimento come esempio vengono misurate, rappresentate graficamente e valutate per il transistor npn.

FUNZIONI

- Misurazione della caratteristica di ingresso, vale a dire la corrente di base I_B in funzione della tensione base-emettitore base U_{BE} .
- Misurazione della caratteristica di controllo, vale a dire la corrente di collettore I_C in funzione della corrente di base I_B con tensione collettore-emettitore fissa U_{CE} .
- Misurazione della caratteristica di uscita, quindi della corrente di collettore I_C in funzione della tensione collettore-emettitore U_{CE} con corrente di base fissa I_B .

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Set di 10 connettori a nastro, P2W19	1012985
1	Resistenza 1 kΩ, 2 W, P2W19	1012916
1	Resistenza 47 kΩ, 0,5 W, P2W19	1012926
1	Potenziometro 220 Ω, 3 W, P4W50	1012934
1	Potenziometro 1 kΩ, 1 W, P4W50	1012936
1	Transistor NPN BD 137, P4W50	1012974
1	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1002776 o
1	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1002775
3	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

BASI GENERALI

Un transistor bipolare è un componente elettronico costituito da tre strati semiconduttori drogati p e n alternati: la base, il collettore e l'emettitore. La base si trova tra il collettore e l'emettitore e serve per il controllo. In linea di massima il transistor bipolare corrisponde a due diodi collegati contrapposti con un anodo o un catodo comune. La bipolarità è dovuta al fatto che a causa dei diversi tipi di drogaggio, sia gli elettroni, sia le lacune sono coinvolte nel trasporto della carica.

In base alla disposizione degli strati si parla di un transistor npn oppure pnp (Fig. 1). In base al collegamento cui viene applicata la tensione di ingresso e di uscita, il transistor bipolare viene usato come quadripolo in tre configurazioni principali, ovvero le configurazioni a emettitore comune, a collettore comune o a base comune.

A seconda della polarizzazione delle giunzioni base-emettitore e base-collettore in conduzione ($U_{BE}, U_{BC} > 0$) o in interdizione ($U_{BE}, U_{BC} < 0$), si ottengono quattro regioni operative del transistor npn (vedere la tab. 1). Nella modalità attiva diretta del transistor la giunzione BE polarizzata in conduzione ($U_{BE} > 0$) inietta elettroni dall'emettitore nella base e nelle lacune e dalla base nell'emettitore. Poiché l'emettitore ha un drogaggio molto superiore rispetto alla base, nella base sono iniettati più elettroni rispetto alle lacune iniettate nell'emettitore con ricombinazioni conseguentemente ridotte. Poiché l'ampiezza della base è molto inferiore rispetto alla lunghezza di diffusione degli elettroni, che nella

base sono portatori di carica minoritari, gli elettroni si diffondono attraverso la base fino alla barriera di potenziale tra la base e il collettore e diffondono fino al collettore, poiché la barriera di potenziale rappresenta un ostacolo solo per il portatore di carica di maggioranza. Si presenta quindi una corrente di trasporto I_T dall'emettitore nel collettore, che con nella regione attiva rappresenta la parte fondamentale della corrente del collettore I_C . Il transistor può quindi essere considerato come sorgente di corrente controllata dalla tensione; la corrente I_C sull'uscita può essere controllata dalla tensione U_{BE} sull'ingresso. Gli elettroni ricombinati nella base producono una corrente I_B di base, necessaria per garantire una corrente di trasporto I_T costante e quindi la stabilità del transistor. Attraverso una piccola corrente d'ingresso I_B viene quindi controllata una corrente in uscita maggiore I_C ($I_C \approx I_T$) e avviene un'amplificazione di corrente. Il comportamento del transistor bipolare è contraddistinto da quattro caratteristiche: ingresso, controllo, uscita e feedback (vedere Tab. 2). Nell'esperimento sono misurate e rappresentate graficamente come esempio le caratteristiche di ingresso, controllo e uscita per il transistor npn.

Tab. 1: Le quattro regioni operative di un transistor npn

U_{BE}	U_{BC}	Modalità operativa
> 0	< 0	Modalità attiva diretta
> 0	> 0	Saturazione
< 0	> 0	Modalità attiva inversa
< 0	< 0	Interdizione o cutoff

Tab. 2: Le quattro caratteristiche di un transistor npn in modalità di avanzamento

Descrizione	Dipendenza	Parametro
Caratteristica di ingresso	$I_B(U_{BE})$	
Caratteristica di controllo	$I_C(I_B)$	$U_{CE} = \text{cost.}$
Caratteristica di uscita	$I_C(U_{CE})$	$I_B = \text{cost.}$
Caratteristica di feedback	$U_{BE}(U_{CE})$	$I_B = \text{cost.}$

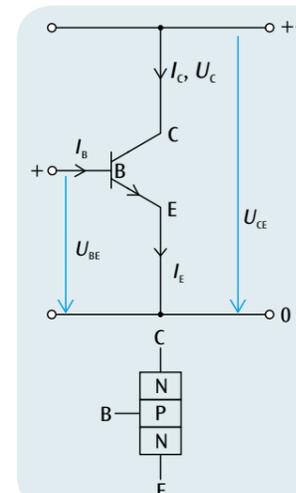


Fig. 1: Principio della struttura di un transistor npn con relativi simboli grafici e le tensioni e correnti presenti

ANALISI

Dalla caratteristica di ingresso è determinata la tensione di soglia U_S , dalla caratteristica di controllo il fattore di amplificazione

$$B = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

e dalla caratteristica di uscita la perdita di potenza $P = U_{CE} \cdot I_C$.

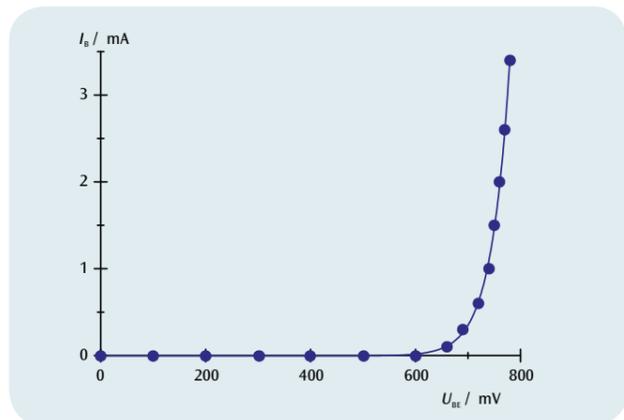


Fig. 2: Caratteristica di ingresso

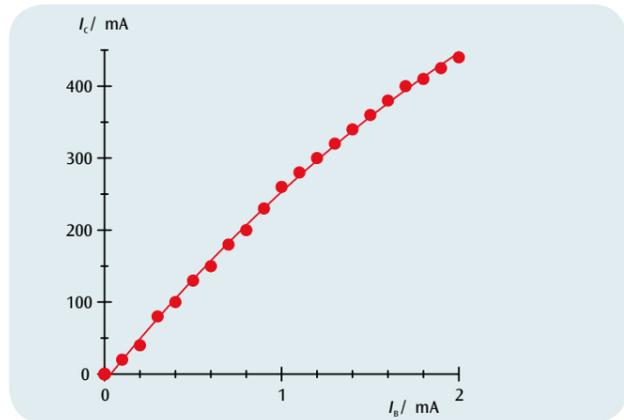


Fig. 3: Caratteristica di controllo per $U_{CE} = 5,2$ V

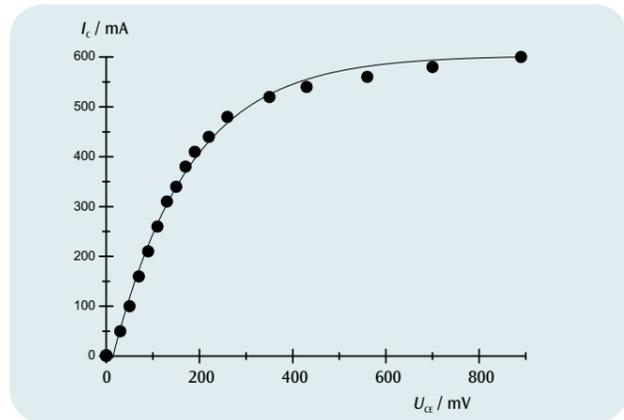
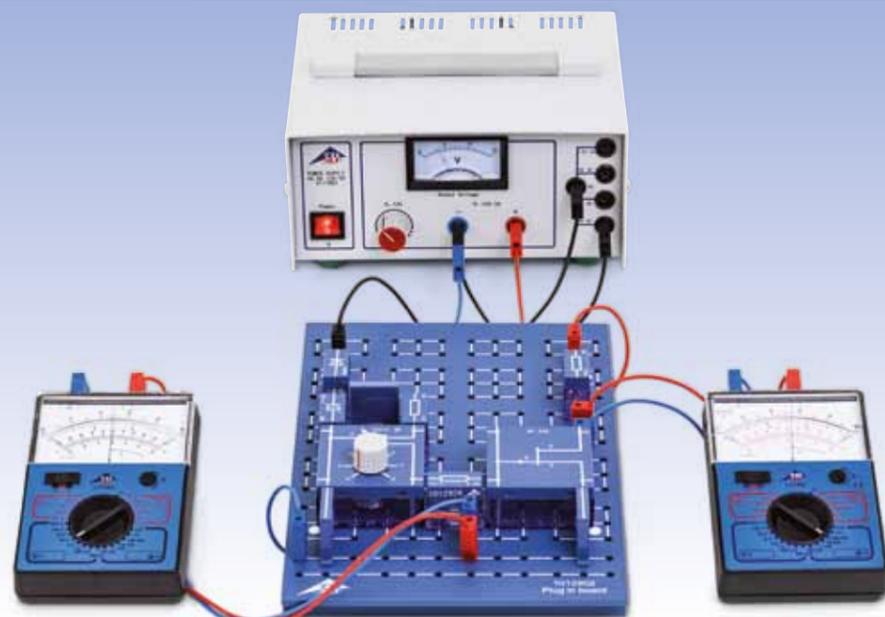


Fig. 4: Caratteristica di uscita per $I_B = 4,2$ mA



FUNZIONI

- Misurazione della tensione Drain in funzione della corrente Drain per diverse tensioni Gate.

SCOPO

Misurazione delle caratteristiche rilevanti di un transistor ad effetto di campo

RIASSUNTO

Un transistor ad effetto di campo (FET) è un elemento semiconduttore con il quale la corrente elettrica che passa attraverso un canale può essere controllata da un campo elettrico perpendicolare rispetto al flusso di corrente. Il FET ha tre collegamenti chiamati Source, Drain e Gate o, rispettivamente, sorgente, pozzo e porta. Se viene applicata una tensione elettrica tra Source e Drain, questa genera nel canale la corrente di Drain. Per piccole tensioni Drain-Source il FET si comporta come una resistenza ohmica e la curva si estende in modo lineare. Con la tensione Drain-Source in aumento si arriva prima ad uno strozzamento e poi ad una interruzione del canale e la curva passa in un'area di saturazione. Per le tensioni di Gate diverse da zero, il valore di saturazione della corrente di Drain si abbassa.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Scheda per componenti	1012902
1	Set di 10 connettori a nastro, P2W19	1012985
1	Resistenza 1 kΩ, 2 W, P2W19	1012916
1	Resistenza 470 Ω, 2 W, P2W19	1012914
1	Resistenza 47 kΩ, 0,5 W, P2W19	1012926
1	Condensatore 470 μF, 16 V, P2W19	1012960
1	Transistor FET BF 244, P4W50	1012978
1	Diodo Si 1N 4007, P2W19	1012964
1	Potenzimetro 220 Ω, 3 W, P4W50	1012934
1	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1002776
1	Alimentatore CA/CC 0 – 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1002775
2	Multimetro analogico AM50	1003073
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840

2

BASI GENERALI

Un transistor ad effetto di campo (FET) è un elemento semiconduttore con il quale la corrente elettrica che passa attraverso un canale può essere controllata da un campo elettrico perpendicolare rispetto al flusso di corrente.

Il FET ha tre collegamenti chiamati Source (S), Drain (D) e Gate (G) o, rispettivamente, sorgente, pozzo e porta. Il canale è il collegamento di conduzione tra Source e Drain. Se viene applicata una tensione elettrica U_{DS} tra Source e Drain questa genera nel canale la corrente di Drain I_D . La corrente è costituita da portatori di carica di una sola polarità (transistor unipolare), vale a dire elettroni per un canale composto da un semiconduttore n, lacune per un canale composto da un semiconduttore p. La sezione o la conducibilità del canale vengono controllate dal campo elettrico perpendicolare al flusso di corrente. Per la creazione di questo campo trasversale viene applicata una tensione Gate U_{GS} tra Source e Gate. L'isolamento degli elettrodi rispetto al canale può avvenire attraverso una giunzione pn in interdizione (FET a giunzione o J-FET) o tramite uno strato di isolamento (IG-FET, MIS-FET, MOS-FET). Nei FET a giunzione la sezione del canale viene controllata dalla dilatazione della zona di svuotamento e questa a sua volta dal campo trasversale. Per garantire che la giunzione pn sia sempre polarizzata inversamente, quindi che non fluisca corrente di Gate, la tensione Gate U_{GS} e la tensione di Source U_{DS} con un canale FET n devono soddisfare le condizioni

$$(1a) \quad U_{GS} \leq 0, U_{DS} \geq 0$$

e con un canale FET p le condizioni

$$(1b) \quad U_{GS} \geq 0, U_{DS} \geq 0.$$

Per piccole tensioni Drain-Source $|U_{DS}|$ il FET si comporta come una resistenza ohmica e la curva si estende in modo lineare. Aumentando i valori $|U_{DS}|$ avviene uno strozzamento del canale, perché la tensione di interdizione tra Gate e canale aumenta nella direzione del Drain. La zona di svuotamento in prossimità del Drain è più ampia che in prossimità del Source, quindi il canale in prossimità di Drain è più stretto che in prossimità del Source. Con una determinata tensione $U_{DS} = U_p$ la larghezza del canale va verso zero, giunge all'interdizione (pinch-off) del canale e la corrente non aumenta più con un ulteriore aumento della tensione Drain-Source. La curva passa dall'area ohmica in un'area di saturazione.

La dilatazione della zona di svuotamento e quindi la larghezza del canale sono controllabili tramite la tensione di Gate. Se la tensione di Gate è diversa da zero, il canale si restringe ulteriormente, con una conseguente riduzione della corrente di Drain e in particolare della corrente di saturazione. Il canale è sempre bloccato indipendente dalla tensione Drain-Source U_{DS} per $|U_{GS}| \geq |U_p|$.

Nell'esperimento la corrente Drain I_D è misurata in funzione della tensione Drain-Source U_{DS} per diverse tensioni di Gate U_{GS} .

ANALISI

I valori di misurazione per le diverse tensioni Gate sono rappresentati graficamente in un diagramma I_D-U_{DS} (Fig. 1) ed è confermato l'andamento delle curve caratteristiche descritte che si ottiene dal controllo della corrente Drain attraverso la tensione Drain e la tensione Gate.

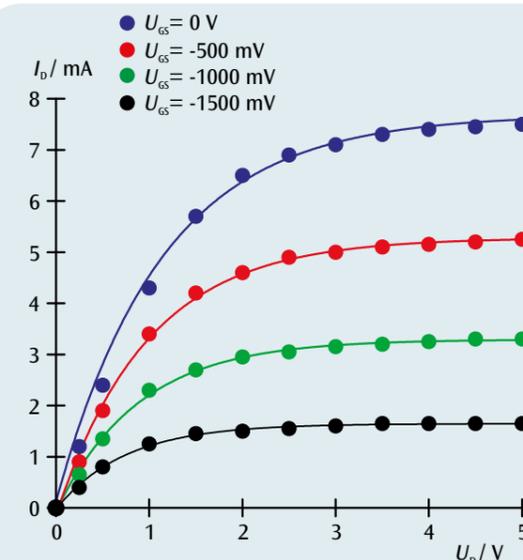
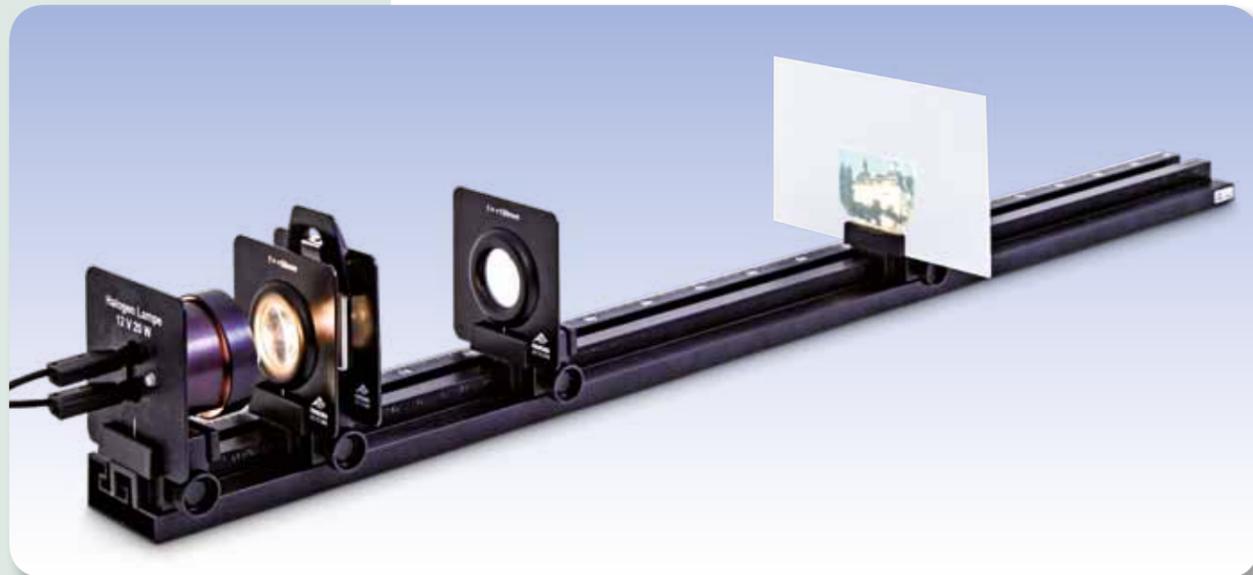


Fig. 1: Curve caratteristiche del transistor ad effetto di campo per le tensioni Gate 0 V (blu), -0,5 V (rosso), -1 V (verde) e -1,5 V (verde-azzurro)



FUNZIONI

- Determinazione delle due posizioni di una lente sottile che forniscono un'immagine nitida.
- Determinazione della distanza focale di una lente sottile.

SCOPO

Determinazione della distanza focale di una lente secondo il metodo di Bessel

RIASSUNTO

Su un banco ottico è possibile disporre una lente, una sorgente luminosa, uno schermo e un oggetto di proiezione in modo che sullo schermo venga prodotta un'immagine nitida. Tramite i rapporti geometrici dei cammini ottici di una lente sottile è possibile determinare la sua distanza focale.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico K, 1000 mm	1009696
4	Cavaliere ottico K	1000862
1	Lampada ottica K	1000863
1	Trasformatore 12 V, 25 VA (230 V, 50/60 Hz)	1000866 o
	Trasformatore 12 V, 25 VA (115 V, 50/60 Hz)	1000865
1	Lente collettrice K, f = 50 mm	1000869
1	Lente collettrice K, f = 100 mm	1010300
1	Supporto di fissaggio K	1008518
1	Set di 4 oggetti per immagine	1000886
1	Schermo di proiezione K, bianco	1000879

1

BASI GENERALI

La distanza focale f di una lente indica la distanza tra il piano principale della lente e il punto focale, vedere fig.1. È possibile definirla conformemente al metodo Bessel (da Friedrich Wilhelm Bessel). Per questo vengono misurate le diverse distanze tra gli elementi del banco ottico.

In base alle fig. 1 e fig. 2 si riconosce che per una lente sottile deve valere il rapporto geometrico

$$(1) \quad a = b + g$$

a : Distanza tra l'oggetto G e l'immagine B
 b : Distanza tra la lente e l'immagine B
 g : Distanza tra l'oggetto G e la lente

Inserendolo nell'equazione delle lenti

$$(2) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

f : Distanza focale della lente

si ottiene:

$$(3) \quad \frac{1}{f} = \frac{a}{a \cdot g - g^2}$$

Ciò corrisponde a un'equazione quadratica con le soluzioni

$$(4) \quad g_{1,2} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - a \cdot f}$$

Risulta un'immagine nitida per entrambe le distanze dell'oggetto g_1 e g_2 . Dalla loro differenza è possibile definire la distanza focale della lente:

$$(5) \quad e = g_1 - g_2 = \sqrt{a^2 - 4af}$$

La differenza e è la distanza tra entrambe le posizioni delle lenti P_1 e P_2 che rendono un'immagine nitida.

ANALISI

Dall'equazione (4) emerge la formula per la distanza focale della lente sottile

$$f = \frac{a^2 - e^2}{4a}$$

secondo il metodo di Bessel.

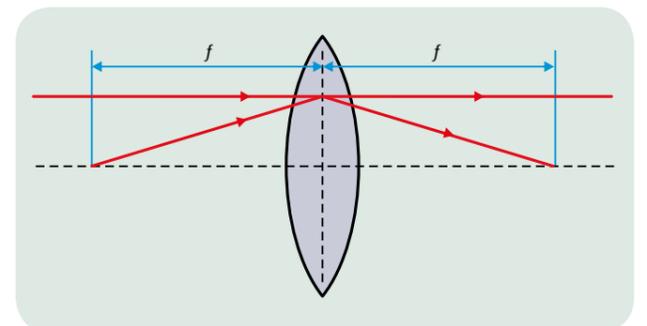


Fig. 1: Rappresentazione schematica per la definizione della distanza focale di una lente sottile

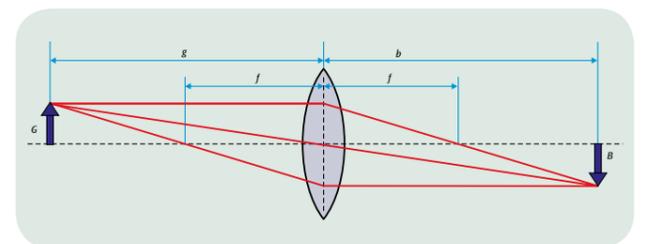


Fig. 2: Cammino ottico schematico attraverso una lente

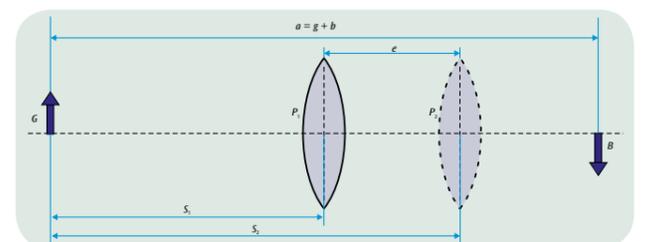
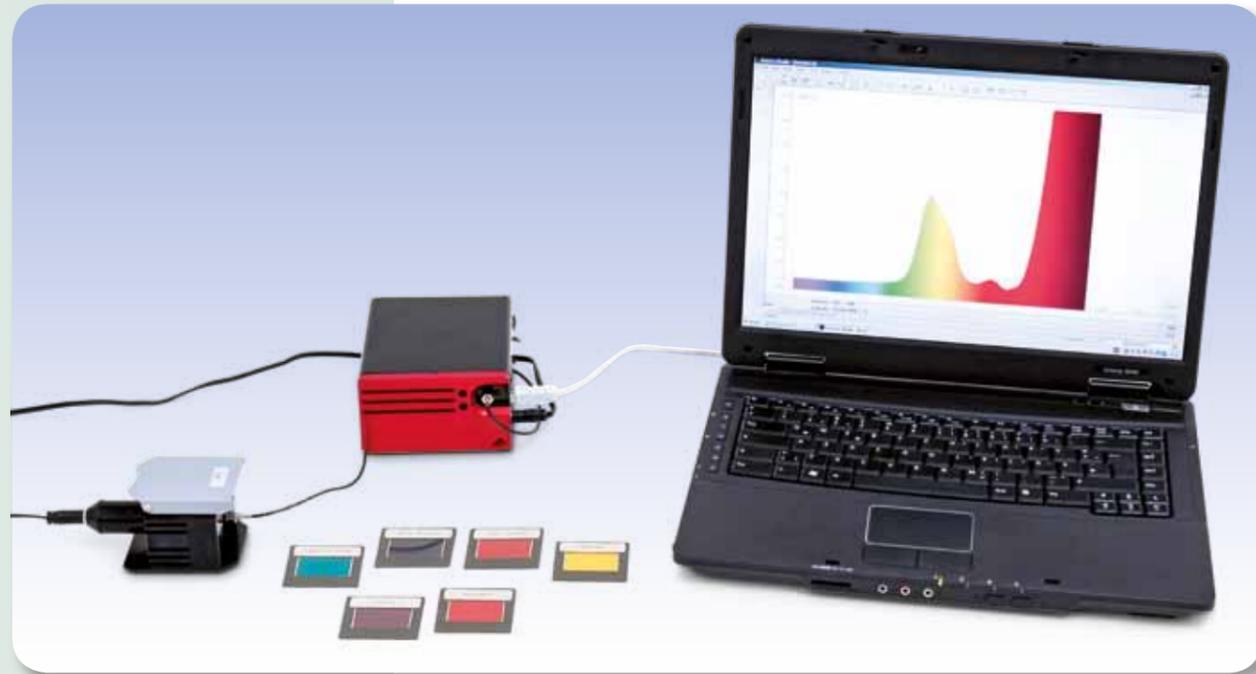


Fig. 3: Disposizione schematica di due posizioni di lenti che producono un'immagine nitida sullo schermo



FUNZIONI

- Misurazione e confronto degli spettri di trasmissione dei corpi solidi.
- Misurazione e confronto degli spettri di trasmissione dei liquidi.

SCOPO

Registrazione e valutazione degli spettri di trasmissione di corpi trasparenti

RIASSUNTO

Per la misurazione di spettri di trasmissione viene utilizzato uno spettrofotometro digitale. Al suo interno, la luce trasmessa rilevata con una fibra ottica viene scomposta nel proprio spettro attraverso un reticolo di riflessione secondo il principio di Czerny-Turner e rappresentata mediante due specchi di riflessione su un rivelatore CCD. Lo spettro di trasmissione si ottiene, mediante normalizzazione automatica, sullo spettro della luce incidente rilevato in precedenza.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Spettrometro LD, digitale	1018103
1	Modulo di assorbimento	1018105
1	Set di 7 filtri colore	1003084
1	Cuvette macro, 4 ml	1018106

Ulteriormente consigliato:

Clorofilla
Permanganato di potassio

1

BASI GENERALI

Il colore con cui viene percepito un corpo irradato con luce bianca dipende dal suo potere riflettente. Se si osserva il corpo attraversato dalla luce, l'impressione di colore è determinata dalla capacità di trasmissione del corpo. Così, nel passaggio attraverso il corpo, si forma ad es. l'impressione di colore rosso se il corpo lascia penetrare la luce rossa, mentre vengono indebolite le altre componenti della luce. In questo caso, la trasmissione spettrale è massima per la luce rossa.

L'occhio umano non è in grado di distinguere chiaramente se un'impressione di colore è generata da luce spettrale pura o dalla somma dei colori adiacenti. Pertanto dal colore osservato non è possibile risalire direttamente allo spettro di trasmissione. Questo può essere determinato chiaramente solo con l'aiuto di uno spettrometro.

Nell'esperimento, per rilevare gli spettri di trasmissione viene impiegato lo spettrofotometro digitale. Al suo interno la luce trasmessa rilevata con una fibra ottica viene scomposta nel proprio spettro attraverso un reticolo di riflessione secondo il principio di Czerny-Turner e rappresentata mediante due specchi di riflessione su un rivelatore CCD. Gli spettri di trasmissione si ottengono, mediante normalizzazione automatica, sullo spettro della luce incidente rilevato in precedenza.

ANALISI

Dalla capacità di trasmissione spettrale $T(\lambda)$ di un corpo è possibile calcolare direttamente, senza tenere conto della riflessione, il grado di assorbimento spettrale $A(\lambda)$.

Vale:

$$A(\lambda) = 1 - T(\lambda)$$

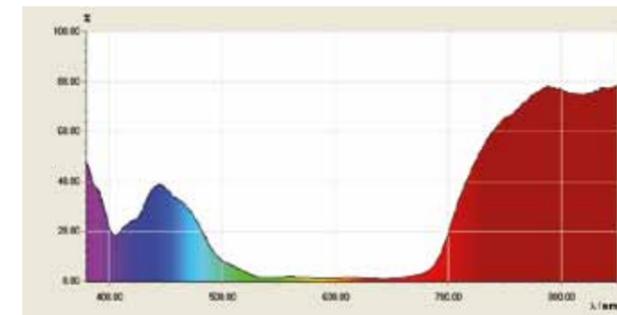


Fig. 1: Spettro di trasmissione di filtro colore azzurro

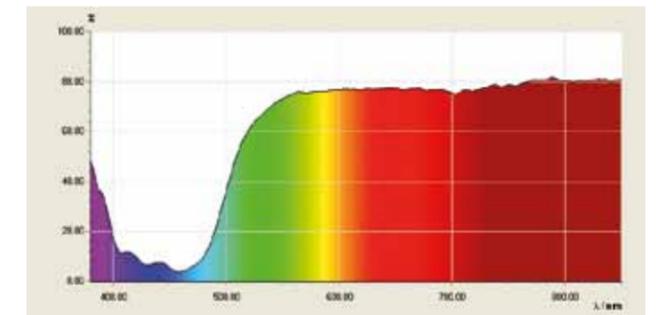


Fig. 2: Spettro di trasmissione di filtro colore giallo

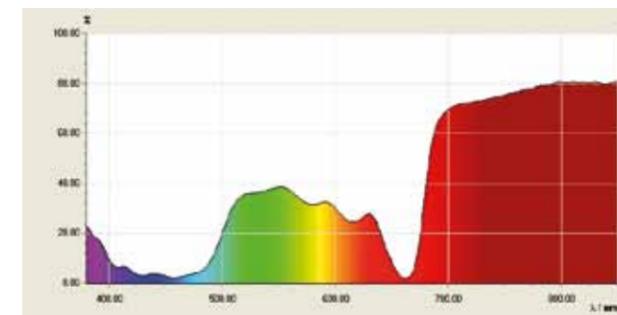


Fig. 3: Spettro di trasmissione di una soluzione di clorofilla

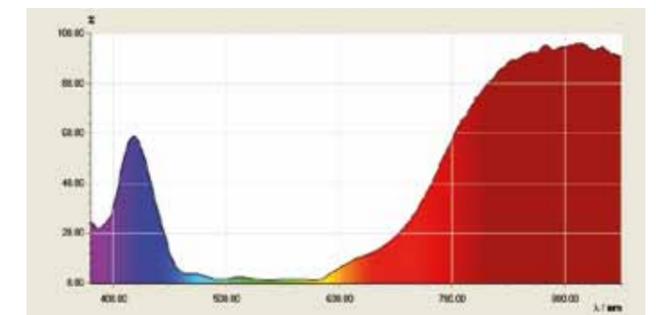
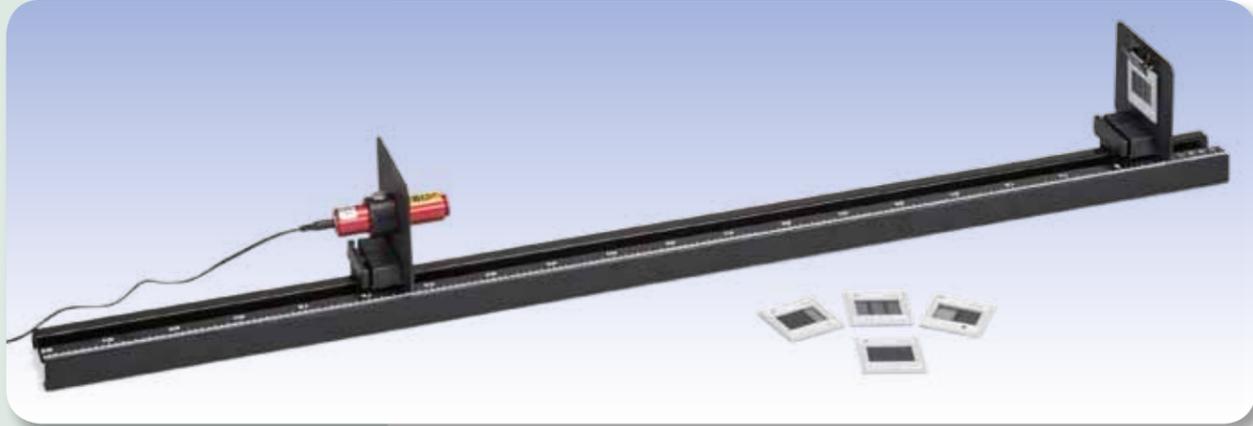


Fig. 4: Spettro di trasmissione di una soluzione di permanganato di potassio



FUNZIONI

- Analisi della diffrazione da doppie fenditure con fenditure a distanze diverse.
- Analisi della diffrazione da doppie fenditure con fenditure di larghezza diversa.
- Analisi della diffrazione da fenditure multiple con numero diverso di fenditure.
- Analisi della diffrazione da reticolo inciso e da reticolo a croce.

SCOPO

Dimostrazione della natura ondulatoria della luce e determinazione della lunghezza d'onda

RIASSUNTO

È possibile descrivere la diffrazione della luce da fenditure multiple e reticoli mediante la sovrapposizione di onde elementari coerenti che, secondo il principio di Huygens, si propagano da ogni punto illuminato di una fenditura multipla. L'interferenza di onde elementari spiega il sistema di frange chiare e scure osservato dietro la fenditura multipla. A partire dalla distanza tra due frange chiare e conoscendo la distanza tra le fenditure nonché la distanza dallo schermo di osservazione, è possibile calcolare la lunghezza d'onda della luce.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Diode laser, rosso	1003201
1	Banco ottico K, 1000 mm	1009696
2	Cavaliere ottico K	1000862
1	Supporto di fissaggio K	1008518
1	Supporto K per diode laser	1000868
1	Diaframma con 3 doppie fenditure di larghezza diversa	1000596
1	Diaframma con 4 doppie fenditure a distanze diverse	1000597
1	Diaframma con 4 fenditure multiple e reticolo	1000598
1	Diaframma con 3 reticoli incisi	1000599
1	Diaframma con 2 reticoli a croce	1000601

BASI GENERALI

È possibile descrivere la diffrazione della luce da fenditure multiple e reticoli mediante la sovrapposizione di onde elementari coerenti che, secondo il principio di Huygens, si propagano da ogni punto illuminato di una fenditura multipla. La sovrapposizione in determinate direzioni porta a un'interferenza costruttiva o distruttiva e spiega pertanto il sistema di frange chiare e scure osservato dietro la fenditura multipla.

Dietro la fenditura doppia, da un angolo di osservazione α_n l'intensità è massima se per ogni onda elementare dalla prima fenditura vi è esattamente un'onda elementare dalla seconda fenditura che si sovrappone in modo costruttivo. Tale condizione è soddisfatta se il ritardo ottico Δs_n tra le onde ele-

mentari provenienti dal centro delle fenditure corrisponde ad un multiplo intero della lunghezza d'onda λ della luce (vedere la Fig. 1).

$$(1) \quad \Delta s_n(\alpha_n) = n \cdot \lambda$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots : \text{Ordine di diffrazione}$$

Ad una grande distanza L dalla doppia fenditura, per piccoli angoli di osservazione α_n tra il ritardo ottico Δs_n e la coordinata di spazio x_n dei massimi di intensità vale la relazione

$$(2) \quad \frac{\Delta s_n}{d} = \sin \alpha_n \approx \tan \alpha_n = \frac{x_n}{L}$$

d : Distanza tra fenditure

Pertanto i massimi si trovano ad un intervallo regolare. l'uno accanto all'altro.

$$(3) \quad a = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{d} \cdot L$$

Questo vale anche per la diffrazione da una fenditura multipla con più di 2 fenditure equidistanti. L'equazione (1) indica la condizione di interferenza costruttiva delle onde elementari da tutte le fenditure N . È quindi possibile ricorrere alle equazioni (2) e (3) anche per le fenditure multiple.

La determinazione dei minimi di intensità è invece matematicamente più complessa: Mentre per una doppia fenditura tra due massimi di intensità si trova esattamente un minimo di intensità, nel caso di una fenditura multipla tra l' n -esimo e l' $(n+1)$ -esimo massimo si trova un minimo, se le onde elementari dalle fenditure N interferiscono in modo tale che l'intensità totale si azzeri. Questo avviene quando il ritardo ottico tra le onde elementari provenienti dal centro delle fenditure soddisfa la condizione.

$$(4) \quad \Delta s = n \cdot \lambda + m \frac{\lambda}{N}$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, m = 1, \dots, N - 1$$

Si trovano quindi i minimi $N-1$ e tra questi i cosiddetti massimi secondari $N-2$, la cui intensità è inferiore a quella dei cosiddetti massimi principali. All'aumentare del numero N delle fenditure scompare il contributo dei massimi secondari. Non si parla più di fenditura multipla bensì di reticolo inciso. Un reticolo a croce infine può essere inteso come una disposizione di due reticoli incisi contrapposti di 90° l'uno all'altro. I massimi di diffrazione diventano punti di una rete rettangolare in cui l'ampiezza delle maglie è data da (3). La luminosità nei massimi principali è modulata dalla distribuzione della luminosità a partire dalla diffrazione sulla fenditura singola ed è concentrata in modo tanto più intenso su piccoli angoli α quanto maggiore è la larghezza della fenditura b . Per un calcolo preciso si sommano le ampiezze di tutte le onde elementari, tenendo conto dei ritardi ottici, a formare l'ampiezza totale A . In un qualsiasi punto x dello schermo si ha quindi

$$(5) \quad I = A^2 \propto \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot L}\right)}{\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot L}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(N \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot L}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot L}\right)} \right)^2$$

ANALISI

È possibile determinare la lunghezza d'onda della luce diffratta a partire dalla distanza a dei massimi principali. Vale:

$$\lambda = d \cdot \frac{a}{L}$$

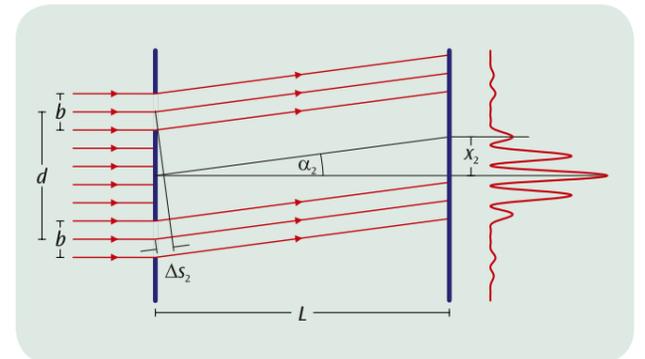


Fig. 1: Rappresentazione schematica della diffrazione della luce su una fenditura doppia

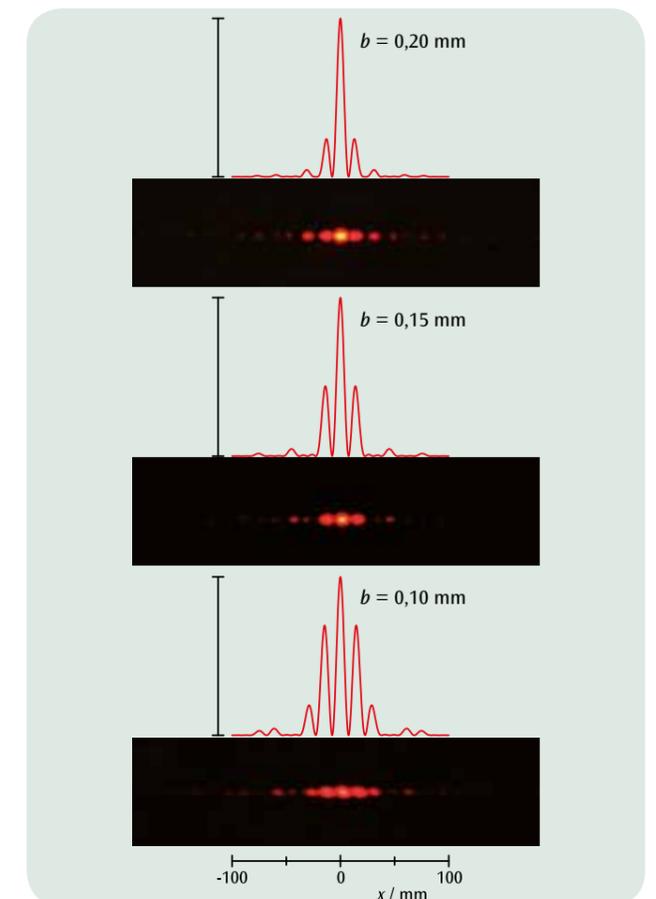
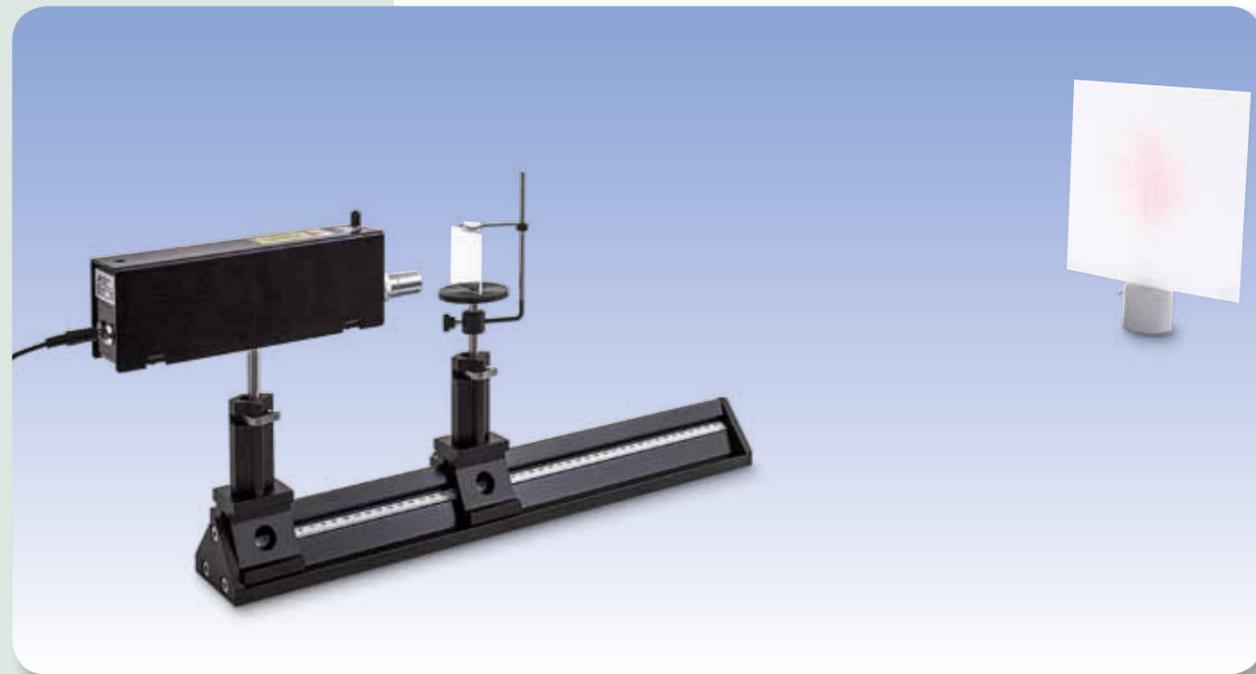


Fig. 2: Intensità calcolata e osservata nella diffrazione da doppie fenditure con distanze diverse tra fenditure



FUNZIONI

- Utilizzo di un biprisma di Fresnel per la creazione di due sorgenti luminose coerenti virtuali da una sorgente luminosa puntiforme.
- Osservazione dell'interferenza tra due raggi di entrambe le sorgenti luminose virtuali.
- Determinazione della lunghezza d'onda di una luce laser elio-neon dalla distanza delle frange di interferenza.

SCOPO

Creazione di un'interferenza fra due raggi con un biprisma Fresnel

RIASSUNTO

Grazie alla rifrazione di un fascio di luce divergente su un biprisma vengono creati due fasci parziali che per via della loro coerenza interferiscono l'uno con l'altro. La lunghezza d'onda della luce utilizzata può essere determinata dalla distanza delle sorgenti luminose virtuali e o dalla distanza di due frange di interferenza.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Biprisma di Fresnel	1008652
1	Piano per prisma su asta	1003019
1	Laser elio-neon	1003165
1	Obiettivo acromatico 10x/ 0,25	1005408
1	Lente convergente su asta f = 200 mm	1003025
3	Cavaliere ottico D, 90/50	1002635
1	Banco ottico di precisione D,500 mm	1002630
1	Schermo di proiezione	1000608
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603

2

BASI GENERALI

In un dei suoi esperimenti sull'interferenza August Jean Fresnel ha utilizzato un biprisma per la creazione di un'interferenza fra due raggi. Ha scomposto un fascio di luce divergente tramite una rifrazione sul biprisma in due fasci parziali che sembrano provenire da due sorgenti luminose coerenti e pertanto interferiscono l'uno con l'altro. Su uno schermo di osservazione ha potuto osservare una serie di massimi di intensità a distanza costante.

La generazione di un massimo di intensità dipende dal ritardo ottico Δ fra i percorsi ottici dei fasci parziali. In presenza di una grande distanza L fra la sorgente luminosa e lo schermo di osservazione si ha in buona approssimazione

$$(1) \quad \Delta = A \cdot \frac{x}{L}$$

dove x è la coordinata del punto osservato sullo schermo perpendicolare all'asse di simmetria e A la distanza ancora da calcolare delle due sorgenti luminose virtuali. I massimi di intensità si manifestano esattamente quando il ritardo ottico coincide con un multiplo della lunghezza d'onda λ :

$$(2) \quad \Delta_n = n \cdot \lambda, \text{ con } n = 0, 1, 2, \dots$$

Un confronto tra (1) e (2) mostra che i massimi di intensità si trovano sulle coordinate

$$(3) \quad x_n = n \cdot D$$

e presentano la distanza costante D . Si applica inoltre la correlazione

$$(4) \quad \lambda = A \cdot \frac{D}{L}$$

L'equazione (4) può essere considerata come equazione condizionale per la lunghezza d'onda λ della luce utilizzata. Si applica in linea di massima per l'interferenza fra due raggi.

Tuttavia è ancora da dimostrare come misurare la distanza A di entrambe le sorgenti luminose virtuali. In questo caso è utile un semplice schema ottico in cui vengono rappresentate entrambe le sorgenti luminose con l'ausilio di una lente collettiva sullo schermo di osservazione e viene misurata la distanza B delle immagini di queste sorgenti luminose (vedere Fig. 2). Vale:

$$(5) \quad A = B \cdot \frac{a}{b}$$

a : distanza dell'oggetto, b : distanza focale.

NOTA

Al posto di un biprisma è possibile utilizzare anche uno specchio di Fresnel (1002649) per creare entrambe le sorgenti luminose virtuali. L'elenco accessori corrispondente è disponibile al numero UE4030320.

ANALISI

Nell'esperimento viene utilizzato un laser come sorgente luminosa il cui raggio viene ampliato con una lente. La posizione della sorgente luminosa e quindi anche la distanza dell'oggetto a non sono pertanto note con esattezza. Esse devono essere pertanto calcolate con l'ausilio della legge di rappresentazione

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$

dalla distanza focale f della lente collettiva e dalla distanza focale facilmente accessibile a livello sperimentale b . Si tratta quindi

$$A = a \cdot \frac{B}{b} = \frac{f \cdot B}{b - f}$$

Le distanze D e L vengono misurate direttamente. In questo modo, tutte le grandezze risultano note dall'equazione condizionale (3) per la lunghezza d'onda.

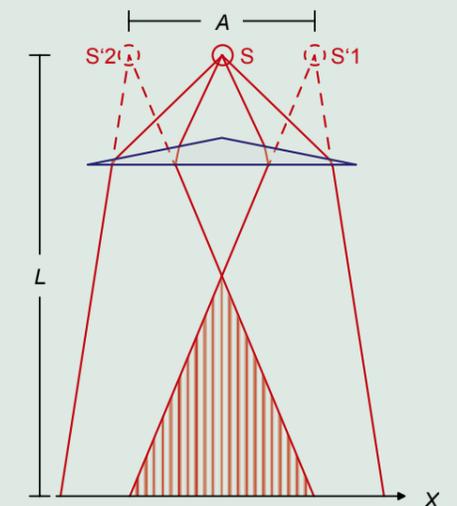


Fig. 1: Rappresentazione schematica del percorso del raggio sul biprisma

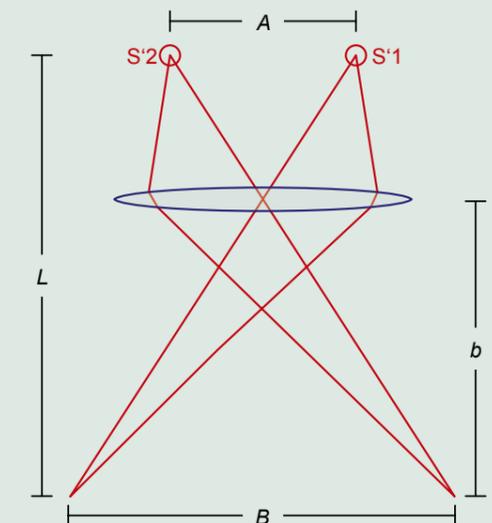
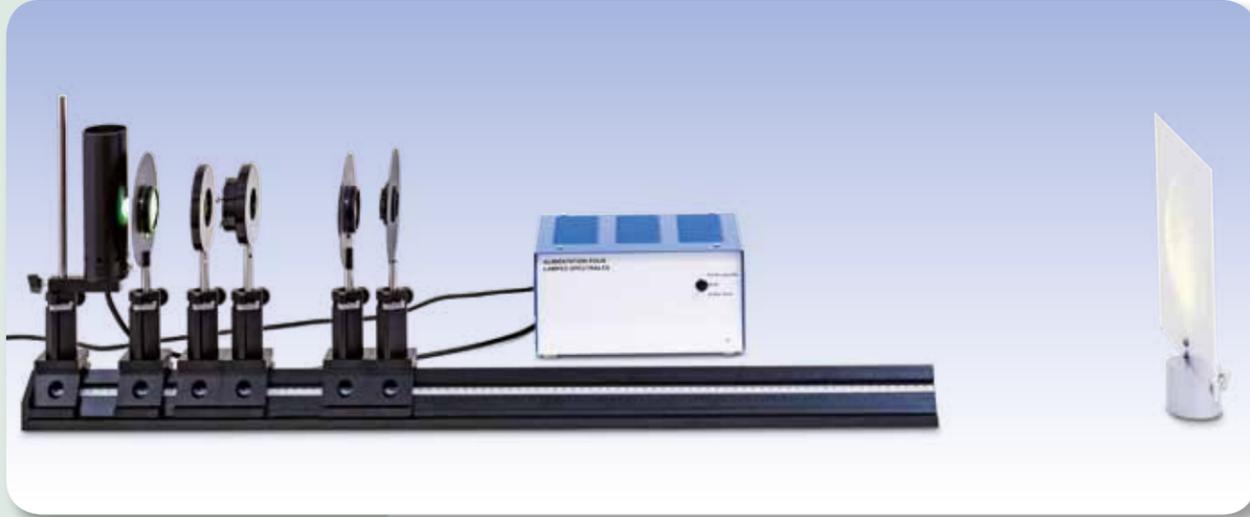


Fig. 2: Percorso del raggio per la rappresentazione di entrambe le sorgenti luminose virtuali sullo schermo



FUNZIONI

- Osservazione di anelli di Newton in trasmissione con illuminazione in luce monocromatica.
- Misurazione del raggio degli anelli e determinazione del raggio di curvatura della struttura.
- Valutazione dell'appiattimento per schiacciamento.

SCOPO

Osservazione di anelli di Newton in luce monocromatica

RIASSUNTO

Per generare gli anelli di Newton si utilizza una struttura formata da una lastra di vetro piana e un corpo sferico con raggio di curvatura molto ampio. Se la luce monocromatica parallela incide perpendicolarmente su tale struttura, si forma una serie di anelli di interferenza concentrici, alternatamente chiari e scuri, in prossimità del punto di contatto tra le superfici. Nell'esperimento si analizzano gli anelli di Newton utilizzando luce monocromatica in trasmissione. Dai raggi r degli anelli di interferenza si determina, nota la lunghezza d'onda λ della luce utilizzata, il raggio di curvatura R del corpo sferico.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico di precisione D, 1000 mm	1002628
6	Cavaliere ottico D, 90/50	1002635
1	Bobina di reattanza per lampade spettrali (230 V, 50/60 Hz)	1003196 o
	Bobina di reattanza per lampade spettrali (115 V, 50/60 Hz)	1003195
1	Lampada spettrale Hg 100	1003545
1	Lente convergente su asta $f = 50$ mm	1003022
1	Lente convergente su asta $f = 100$ mm	1003023
1	Diaframma ad iride su asta	1003017
1	Vetri per anelli di Newton	1008669
1	Supporto componenti	1003203
1	Filtro interferenziale 578 nm	1008672
1	Filtro interferenziale 546 nm	1008670
1	Schermo di proiezione	1000608
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603

2

BASI GENERALI

Gli anelli di Newton sono un fenomeno, osservabile anche nella vita quotidiana, generato dall'interferenza della luce riflessa sulla superficie limite superiore e inferiore di un cuneo di aria fra due superfici pressoché parallele. Nel caso di luce bianca i fenomeni di interferenza sono colorati, poiché la condizione di interferenza dipende dalla lunghezza d'onda.

Per generare gli anelli di Newton in maniera mirata si utilizza una struttura formata da una lastra di vetro piana e un corpo sferico con raggio di curvatura molto ampio. Il corpo sferico tocca la lastra di vetro piana formando un cuneo di aria. Se la luce monocromatica parallela incide perpendicolarmente su tale struttura, si forma una serie di anelli di interferenza concentrici, alternatamente chiari e scuri, in prossimità del punto di contatto. Gli anelli scuri sono prodotti da interferenza distruttiva, quelli chiari da interferenza costruttiva. Le onde della luce riflesse sulla superficie limite nel passaggio dal corpo sferico verso l'aria, interferiscono con le onde riflesse sulla superficie limite verso la lastra di vetro. Questi anelli di interferenza sono osservabili in riflessione e in trasmissione. In trasmissione si ha interferenza costruttiva al centro, indipendentemente dalla lunghezza d'onda della luce incidente.

La distanza degli anelli di interferenza non è costante. Lo spessore d del cuneo di aria varia con la distanza r dal punto di contatto tra la lastra di vetro e il corpo sferico. Dalla Fig. 1 si ricava

$$(1) \quad R^2 = r^2 + (R-d)^2$$

R : raggio di curvatura

Per piccoli spessori d e anelli di interferenza chiari vale pertanto

$$(2) \quad d = \frac{r^2}{2 \cdot R} = (n-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

e i raggi degli anelli chiari corrispondono quindi a

$$(3) \quad r^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda$$

Si consideri che il corpo sferico viene leggermente compresso presso il punto di contatto. Ciò è descrivibile modificando l'equazione (2) in maniera approssimativa con la relazione

$$(4) \quad d = \frac{r^2}{2 \cdot R} - d_0 \quad \text{per} \quad r^2 \geq 2 \cdot R \cdot d_0$$

Per i raggi r degli anelli di interferenza chiari si ricava:

$$(5) \quad r_i^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda + 2 \cdot R \cdot d_0$$

Nell'esperimento si analizzano gli anelli di Newton in trasmissione, monocromatizzando la luce di una lampada a vapori di mercurio tramite l'inserimento di filtri di interferenza. L'immagine di interferenza viene rappresentata nitidamente su uno schermo attraverso una lente.

ANALISI

Per determinare il raggio r si calcola la media dei raggi misurati per il punto di taglio sinistro e destro considerando il fattore di ingrandimento attraverso la lente.

In un diagramma si rappresenta r^2 in funzione di $n-1$ di modo che i punti di misurazione si trovino su rette con pendenza $a = R \cdot \lambda$ e intercetta $b = 2 \cdot R \cdot d_0$. Dato che la lunghezza d'onda è nota, è possibile calcolare il raggio di curvatura R , che equivale a circa 45 m. L'appiattimento d_0 per pressione è nettamente inferiore a un micrometro.

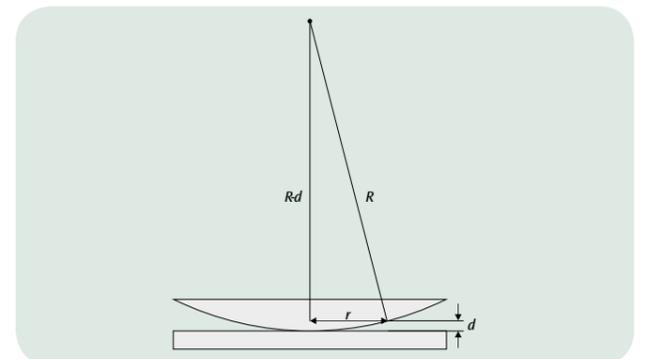


Fig. 1: Rappresentazione schematica del cuneo di aria fra la lente convessa e la lastra di vetro piana

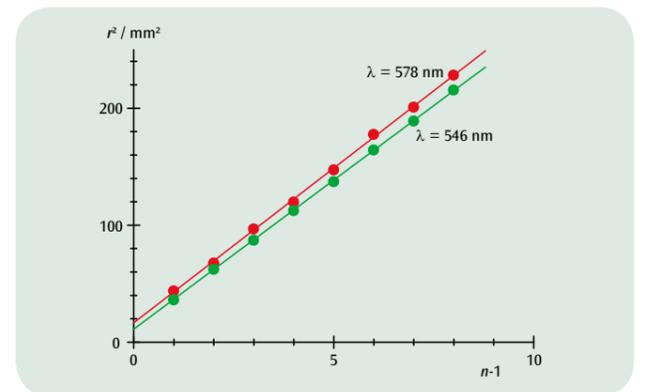


Fig. 2: Relazione tra i raggi r^2 degli anelli di interferenza chiari e il rispettivo numero d'ordine n

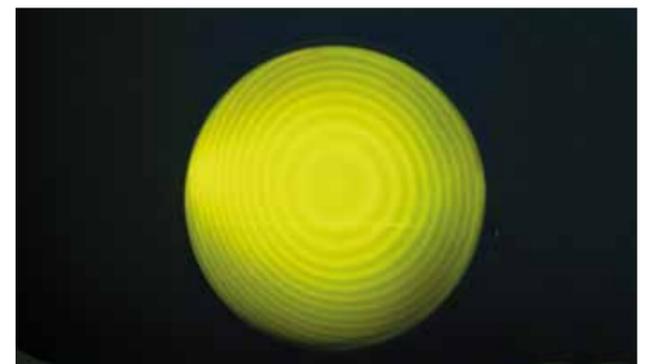
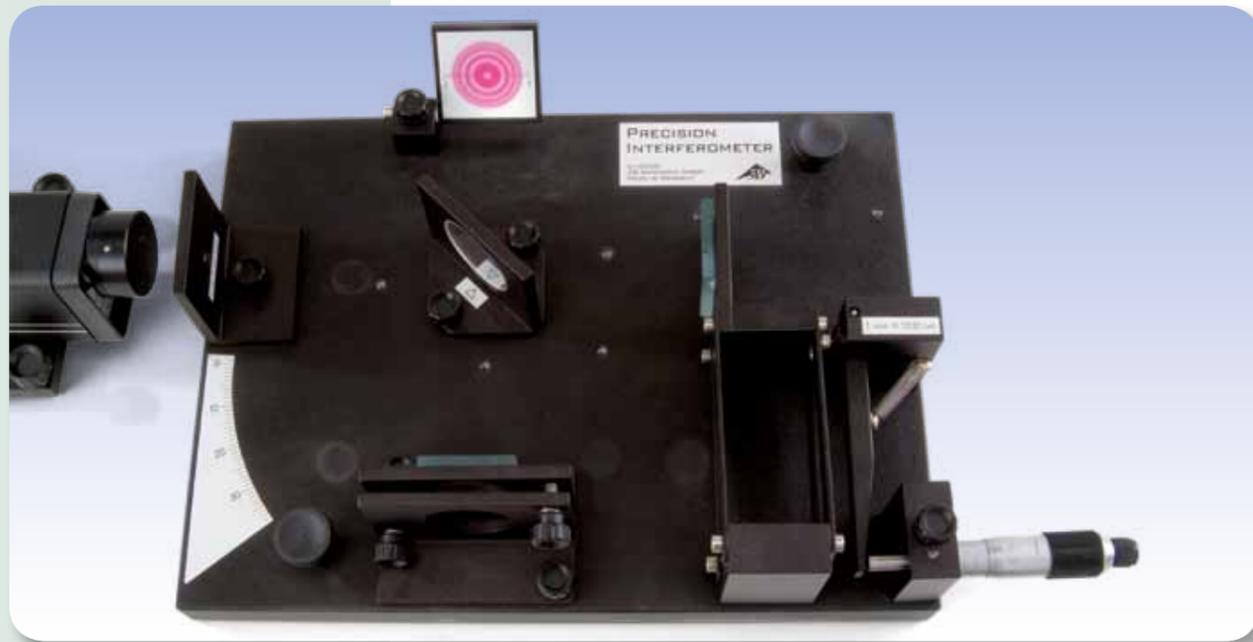


Fig. 3: Anelli di Newton con luce gialla



FUNZIONI

- Determinazione della lunghezza d'onda della luce laser.
- Determinazione dell'indice di rifrazione dell'aria a seconda della pressione atmosferica.
- Determinazione dell'indice di rifrazione del vetro.
- Valutazione della qualità superficiale di una striscia adesiva.

SCOPO

Dimostrazione e analisi del funzionamento di un interferometro di Michelson

RIASSUNTO

In un interferometro di Michelson, un fascio di luce coerente viene diviso da uno specchio semitrasparente in due parti, che prendono percorsi diversi, sono riflessi e infine si riuniscono. Sullo schermo di osservazione viene generata una figura di interferenza che cambia in maniera già nettamente riconoscibile quando il percorso ottico di un fascio parziale si modifica della frazione di una lunghezza dell'onda luminosa.

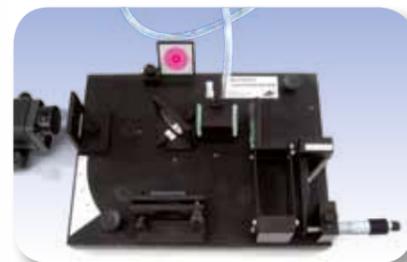
APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Interferometro	1002651
1	Set aggiuntivo per l'interferometro	1002652
1	Laser elio-neon	1003165
1	Pompa manuale per vuoto	1012856
1	Tubo di silicone 6 mm	1002622

2



Lastra di vetro sul percorso dei raggi dell'interferometro di Michelson



Camera evacuabile sul percorso dei raggi dell'interferometro di Michelson

BASI GENERALI

L'interferometro di Michelson fu originariamente progettato da A. A. Michelson per dimostrare gli effetti dell'esistenza dell'etere luminoso. Il suo principio di costruzione (vedi fig. 1) è tuttavia d'importanza fondamentale, in quanto può essere utilizzato per la misurazione interferometrica ad es. delle variazioni di lunghezza, degli spessori degli strati o degli indici di rifrazione. Un fascio di luce divergente viene diviso da uno specchio semitrasparente in due fasci parziali che prendono vie diverse. I due fasci parziali si riflettono e infine si riuniscono per sovrapporsi su uno schermo di osservazione. Qui viene creata un'immagine d'interferenza che reagisce in maniera sensibile alle variazioni di lunghezza ottica del percorso, quindi del prodotto dell'indice di rifrazione e della lunghezza geometrica del percorso, di un fascio parziale. Se l'indice di rifrazione viene mantenuto costante, possono essere quindi determinate variazioni del percorso geometrico, ad es. variazioni di lunghezza dei materiali attraverso la loro dilatazione termica. Se invece il percorso geometrico viene mantenuto costante, possono essere rilevate le variazioni degli indici di rifrazione dovute a variazioni di pressione, di temperatura o di densità.

A seconda del fatto che la lunghezza ottica del percorso aumenti o diminuisca, al centro dell'immagine di interferenza compaiono o scompaiono frange di interferenza. Tra la variazione Δs della lunghezza ottica del percorso e la lunghezza dell'onda luminosa λ vale la relazione

$$(1) \quad 2 \cdot \Delta s = z \cdot \lambda$$

in cui il numero intero positivo o negativo z indica il numero di frange di interferenza che compaiono o scompaiono sullo schermo di osservazione.

Se per la misurazione della lunghezza dell'onda luminosa uno dei due specchi viene spostato nell'aria di un percorso Δx ben definito con un meccanismo di regolazione di precisione, come indice di rifrazione può essere impiegato in una buona approssimazione $n = 1$. Pertanto, la variazione del percorso ottico è:

$$(2) \quad \Delta s = \Delta x$$

La situazione è diversa se una camera evacuata di lunghezza d viene portata in un fascio parziale. Introducendo aria e quindi aumentandone la pressione nella camera al valore p , la lunghezza ottica del percorso varia di

$$(3) \quad \Delta s = (n(p) - 1) \cdot d = A \cdot p \cdot d$$

in quanto la dipendenza della pressione dell'indice di rifrazione dell'aria a temperatura costante viene rappresentata nella forma

$$(4) \quad n(p) = 1 + A \cdot p$$

NOTA

La dotazione integrativa comprende anche una lastra di vetro. Se questa viene portata in un fascio parziale e ruotata lentamente di un angolo definito, il percorso della luce aumenta nel vetro e diminuisce all'esterno del vetro. Dalla variazione derivante del percorso ottico è possibile determinare l'indice di rifrazione del vetro. Inoltre, la valutazione della qualità di una superficie può essere dimostrata sulla base dell'esempio di una striscia adesiva che è stata applicata sulla lastra di vetro. Nella pratica questo si esegue mediante un interferometro di *Twyman-Green*, una variante dell'interferometro di Michelson.

ANALISI

Determinazione della lunghezza dell'onda luminosa: da (1) e (2) come equazione condizionale per il calcolo della lunghezza dell'onda luminosa dal percorso di traslazione dello specchio si ottiene:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta x}{z}$$

Determinazione dell'indice di rifrazione dell'aria: per la costante A indicata in (4) si ottiene l'equazione condizionale

$$A = \frac{z \cdot \lambda}{2 \cdot d \cdot p}$$

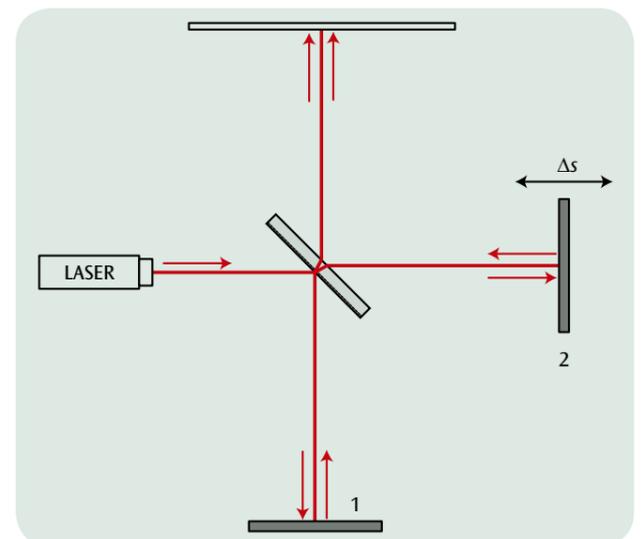


Fig. 1: Percorso dei raggi luminosi in un interferometro di Michelson con specchio mobile

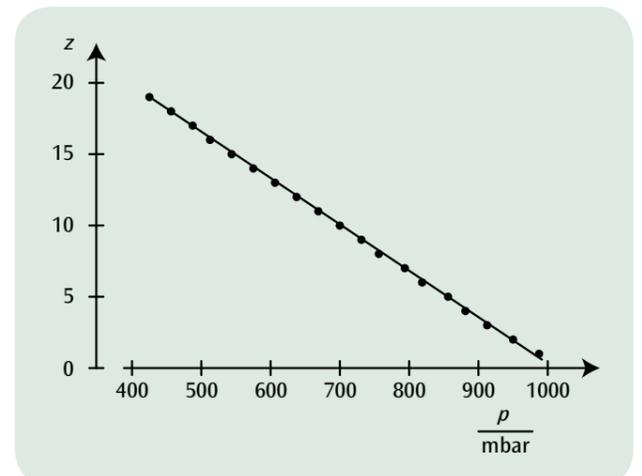
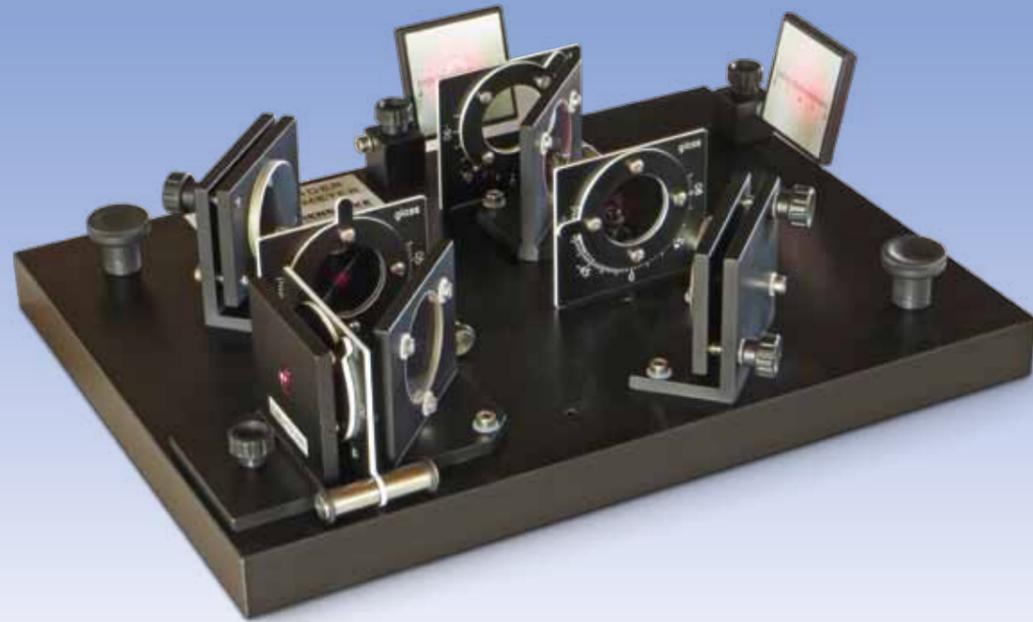


Fig. 2: Numero delle frange di interferenza come funzione della pressione atmosferica



FUNZIONI

- Messa a punto e regolazione di un interferometro di Mach-Zehnder.
- Osservazione del cancellatore di interferenza con informazione sul percorso non presente, presente e cancellata.

SCOPO

Illustrazione del cancellatore quantistico in un esperimento analogico

RIASSUNTO

Nella meccanica quantistica, anche la luce viene descritta con l'ausilio delle funzioni d'onda, dalle quali è possibile calcolare la distribuzione spaziale della densità di probabilità come quadrato del valore della funzione d'onda. La luce è pertanto adatta ad illustrare per analogia fenomeni di meccanica quantistica. Per illustrare il cosiddetto cancellatore quantistico si realizza un interferometro di Mach-Zehnder osservando l'interferenza di entrambi i fasci parziali su uno schermo. Se nei percorsi dei raggi luminosi dei fasci parziali si trovano due polarizzatori perpendicolari tra loro, l'interferenza scompare, in quanto, da un punto di vista di meccanica quantistica, si è riusciti a sapere quale percorso ha preso un fotone. Con un terzo polarizzatore regolato a 45° direttamente davanti allo schermo, è possibile eliminare questa informazione sul percorso e osservare di nuovo l'interferenza.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Interferometro di Mach-Zehnder	1014617
1	Laser elio-neon	1003165

BASI GENERALI

Nella meccanica quantistica, anche la luce viene descritta con l'ausilio delle funzioni d'onda, dalle quali è possibile calcolare la distribuzione spaziale della densità di probabilità come quadrato del valore della funzione d'onda. La convergenza di due percorsi dei raggi luminosi corrisponde ad una sovrapposizione di due funzioni d'onda. La densità di probabilità contiene quindi un termine misto che descrive la figura di interferenza. La luce è pertanto adatta ad illustrare per analogia fenomeni di meccanica quantistica.

2

Per illustrare il cancellatore quantistico viene messo a punto un interferometro di Mach-Zehnder. Come fascio luminoso coerente viene utilizzato il fascio ingrandito di un laser. Con l'ausilio di un divisore di fascio BS1, esso viene diviso in due fasci parziali, mentre un polarizzatore P assicura la stessa intensità in entrambi i fasci parziali (vedere fig. 1). I fasci parziali percorrono percorsi diversi per essere di nuovo sovrapposti con un secondo divisore BS2.

Qui si sommano – come si osserva nell'immagine classica dell'onda – i campi elettrici E_1 e E_2 di entrambi i fasci parziali

$$(1) \quad E = E_1 + E_2$$

e – dal punto di vista della meccanica quantistica – le rispettive funzioni d'onda Ψ_1 e Ψ_2

$$(2) \quad \Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

Vale pertanto

$$(3) \quad |E|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2$$

e

$$(4) \quad |\Psi|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2 \cdot \langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle,$$

laddove il termine misto presente in (3) e (4) descrive la figura di interferenza osservabile su uno schermo. L'equazione 4 descrive il comportamento di un singolo fotone. Esso interferisce con se stesso, finché non viene osservato tramite un processo di misurazione "quale percorso compie". Si dice in questo contesto che il fotone, in assenza di informazioni sul percorso, si comporta come un'onda presentando interferenze. In caso di presenza di informazioni sul percorso, tuttavia, il fotone si comporta come una classica particella e non presenta alcuna interferenza.

Tramite due polarizzatori aggiuntivi P1 e P2 nei fasci parziali 1 e 2 viene influenzato il modello di interferenza. Con polarizzatori perpendicolari tra loro, scompare nella descrizione classica (3) il prodotto scalare $E_1 E_2$ e nella descrizione di meccanica quantistica (4) il termine di interferenza $\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle$ e quindi anche la figura di interferenza. Nell'analogia con la meccanica quantistica sulla base della polarizzazione, è possibile definire in modo univoco se il fotone ha percorso il cammino 1 o 2.

Se ora viene posizionato un terzo polarizzatore regolato a 45° A dietro il secondo divisore di fascio, ricompare la figura di interferenza. Nell'analogia con la meccanica quantistica il polarizzatore A "cancella" l'informazione sul percorso, ovvero dietro il polarizzatore A non è più individuabile il percorso che segue il fotone. Nel modello d'onda classica della luce, il terzo polarizzatore assicura che i fasci parziali polarizzati siano indeboliti ma abbiano tuttavia di nuovo la stessa polarizzazione.

ANALISI

Senza i due polarizzatori P1 e P2 non è presente alcuna informazione sul percorso; si verifica un'interferenza.

Utilizzando i due polarizzatori è possibile ottenere un'informazione sul percorso; l'interferenza non ha luogo.

Il terzo polarizzatore A cancella l'informazione sul percorso; l'interferenza si presenta di nuovo.

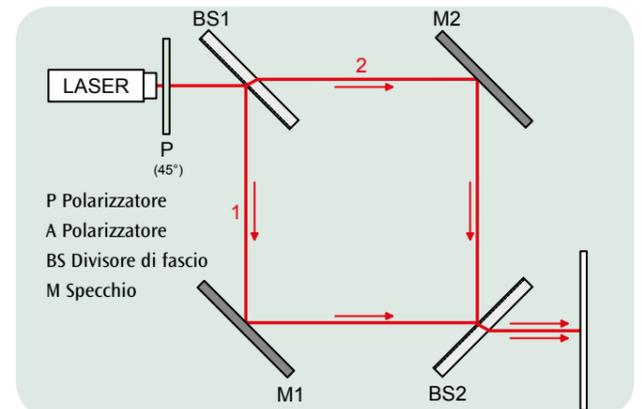


Fig. 1: Percorso dei raggi luminosi nell'interferometro di Mach-Zehnder (senza informazione sul percorso)

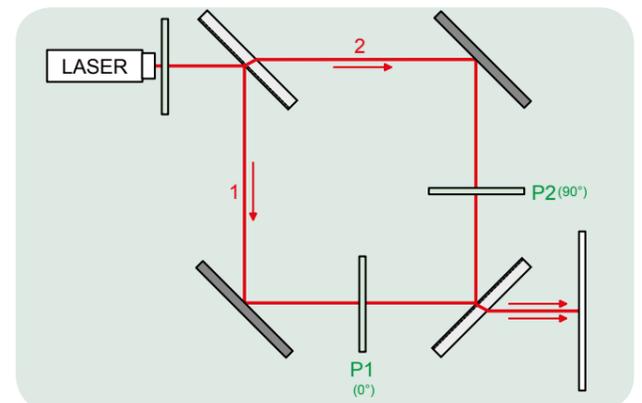


Fig. 2: Percorso dei fasci luminosi nell'interferometro di Mach-Zehnder (con polarizzatori P1 e P2 nei fasci parziali per il conseguimento dell'informazione sul percorso)

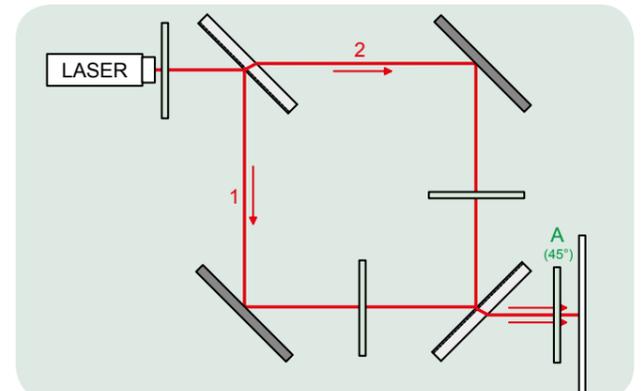


Fig. 3: Percorso dei fasci luminosi nell'interferometro di Mach-Zehnder (con polarizzatore A per la cancellazione dell'informazione sul percorso)


FUNZIONI

- Misurazione dell'intensità I della luce trasmessa attraverso il filtro di polarizzazione in funzione dell'angolo di rotazione dei filtri.
- Conferma della legge di Malus.

SCOPO

Conferma della legge di Malus per luce polarizzata linearmente

RIASSUNTO

La legge di Malus descrive l'intensità I della luce polarizzata, di intensità iniziale I_0 , dopo il passaggio attraverso un analizzatore, in funzione dell'angolo di rotazione. L'intensità della luce viene misurata con un sensore di luce.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico di precisione D,500 mm	1002630
4	Cavaliere ottico D, 90/50	1002635
1	Lampada ottica con lampadina alogena	1003188
	Trasformatore 12 V, 60 VA (230 V, 50/60 Hz)	1000593 o
1	Trasformatore 12 V, 60 VA (115 V, 50/60 Hz)	1006780
2	Filtro di polarizzazione su asta	1008668
1	Sensore di luce	1000562
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539

1
BASI GENERALI

La luce è polarizzabile come onda trasversale, facendola passare ad esempio attraverso un filtro di polarizzazione. In un'onda luminosa polarizzata linearmente, il campo elettrico E e il campo magnetico B oscillano ciascuno su un piano fisso. La direzione di oscillazione del campo elettrico viene definita come direzione di polarizzazione.

Nell'esperimento la luce colpisce in modo consecutivo un polarizzatore e un analizzatore, ruotati l'uno rispetto all'altro dell'angolo φ . Il polarizzatore si lascia attraversare solo da una porzione linearmente polarizzata della luce. L'ampiezza del campo elettrico dell'onda trasmessa dal polarizzatore sia E_0 . Nella direzione di polarizzazione dell'analizzatore tale componente oscilla con l'ampiezza

$$(1) \quad E = E_0 \cdot \cos \varphi$$

Solo questa frazione può attraversare l'analizzatore.

L'intensità della luce corrisponde al quadrato dell'intensità del campo elettrico. Pertanto l'intensità dietro l'analizzatore è pari a

$$(2) \quad I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi,$$

se I_0 è l'intensità dietro il polarizzatore.

L'equazione (2) è conosciuta come Legge di Malus, e viene confermata nell'esperimento misurando l'intensità con un sensore di luce. In questa misurazione il valore di intensità misurato con $\varphi = 90^\circ$ corrisponde alla luce ambientale. Viene quindi sottratto dall'intensità misurata.

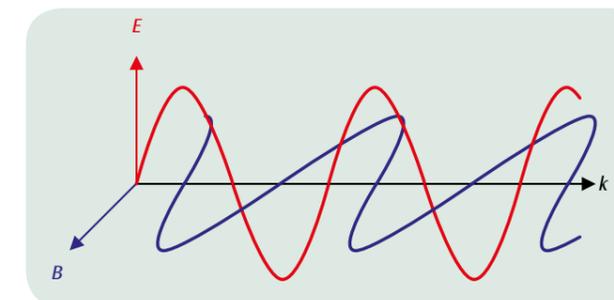


Fig. 1: Rappresentazione per la definizione della direzione di polarizzazione

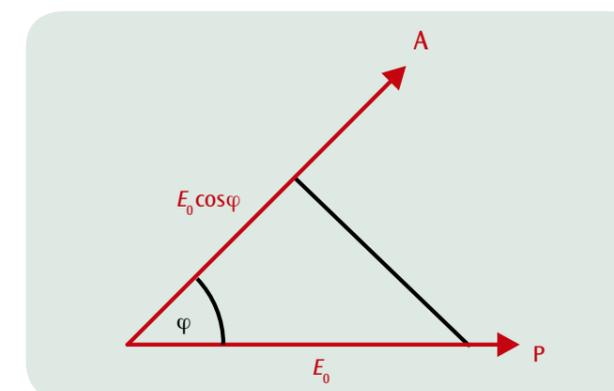
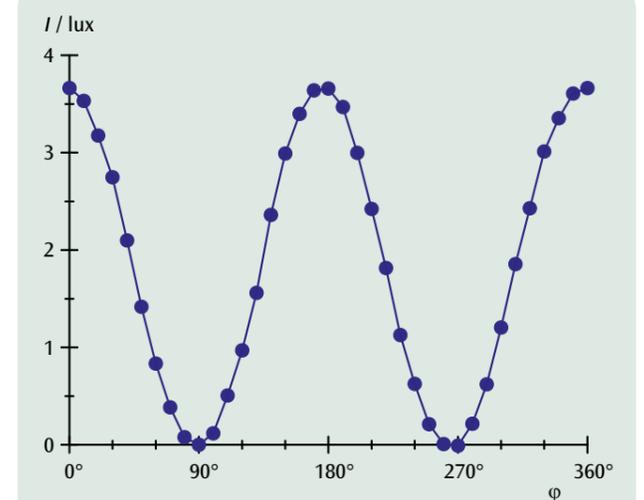
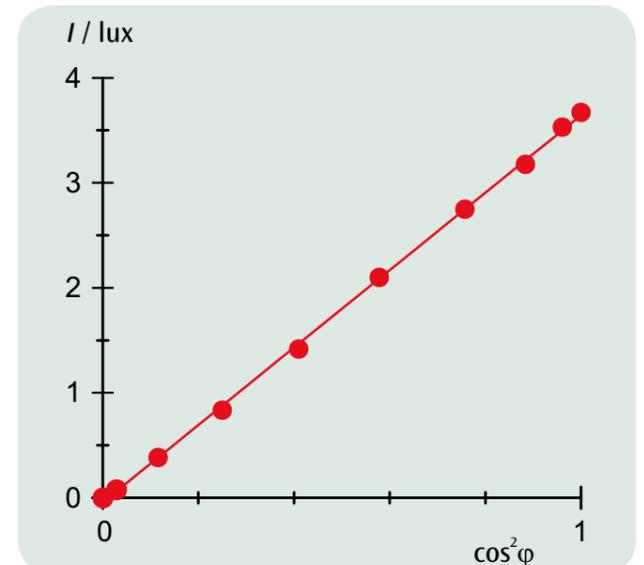


Fig. 2: Rappresentazione per il calcolo dell'intensità del campo magnetico dietro l'analizzatore

ANALISI

Dopo la sottrazione dell'intensità della luce ambientale i valori misurati vengono rappresentati come funzione di φ . L'andamento corrisponde all'equazione (2).

In un altro diagramma viene rappresentata l'intensità I come funzione di $\cos^2 \varphi$. In questo caso i valori misurati si trovano su una retta passante per l'origine con pendenza I_0 .


 Fig. 3: Intensità di luce I in funzione dell'angolo φ tra polarizzatore e analizzatore

 Fig. 4: Intensità di luce I in funzione di $\cos^2 \varphi$



FUNZIONI

- Misurazione dell'angolo di rotazione in funzione della lunghezza del tubo.
- Misurazione dell'angolo di rotazione in funzione della concentrazione della massa.
- Determinazione dell'angolo di rotazione specifico in funzione della lunghezza d'onda.
- Confronto dei sensi di rotazione e dell'angolo di rotazione di fruttosio, glucosio e saccarosio.
- Misurazione dell'angolo di rotazione durante l'inversione del saccarosio in una miscela equimolare di glucosio e fruttosio.

SCOPO

Rotazione del piano di polarizzazione attraverso soluzioni zuccherine

RIASSUNTO

Le soluzioni zuccherine sono attive otticamente, ossia ruotano il piano di polarizzazione della luce a polarizzazione lineare che le attraversa. Il senso di rotazione dipende dal tipo dello zucchero: le soluzioni di glucosio e saccarosio ruotano il piano di polarizzazione verso destra e le soluzioni di fruttosio verso sinistra, come indica la misurazione dell'angolo di rotazione con un polarimetro. Con la misurazione dell'angolo di rotazione si segue inoltre il comportamento di una soluzione di saccarosio dopo l'aggiunta di acido cloridrico. Si osserva una lenta inversione del senso di rotazione da destra verso sinistra, in quanto la struttura a doppio anello delle molecole di saccarosio viene scissa e si viene a formare una miscela equimolare di glucosio e fruttosio. Il senso di rotazione della miscela è pari alla somma degli angoli di rotazione del glucosio, destrorsa, e del fruttosio, sinistrorsa e maggiore.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Polarimetro con 4 LED (230 V, 50/60 Hz)	1001057 o
	Polarimetro con 4 LED (115 V, 50/60 Hz)	1001056
1	Cilindro graduato, 100 ml	1002870
1	Becher, di	1002872
1	Bilancia elettronica Scout Pro 200 g (230 V, 50/60 Hz)	1009772 o
	Bilancia elettronica Scout Pro 200 g (115 V, 50/60 Hz)	1003426

Ulteriormente consigliato:

Fruttosio, 500 g
Glucosio, 500 g
Saccarosio, 500 g

2

BASI GENERALI

Si definisce attività ottica la rotazione del piano di polarizzazione della luce a polarizzazione lineare al passaggio attraverso determinate sostanze. Questa rotazione si verifica nelle soluzioni di molecole chirali, come per es. le soluzioni zuccherine, e in determinati corpi solidi, come i quarzi. Si parla di sostanza con rotazione destrorsa quando il piano di polarizzazione, considerato nel senso opposto alla direzione di propagazione della luce, ruota verso destra, e di sostanze a rotazione sinistrorsa nel caso opposto. Le soluzioni di glucosio e saccarosio sono a rotazione destrorsa e le soluzioni di fruttosio a rotazione sinistrorsa.

L'angolo α , attorno al quale viene ruotato il piano di polarizzazione, dipende dalla sostanza in soluzione ed è proporzionale alla concentrazione della massa c e alla lunghezza d del tubo. Si scrive

$$(1) \quad \alpha = [\alpha] \cdot c \cdot d$$

e si definisce $[\alpha]$ l'angolo di rotazione specifico della sostanza.

L'angolo di rotazione specifico dipende nella formula

$$(2) \quad [\alpha] = \frac{k(T)}{\lambda^2}$$

dalla lunghezza d'onda λ della luce e dalla temperatura T del campione. Nelle tabelle esso viene nella maggior parte dei casi indicato per la luce gialla al sodio e una temperatura di 25°C. Quando è noto, con la misurazione dell'angolo di rotazione in un polarimetro è possibile determinare la concentrazione della soluzione.

Nell'esperimento vengono esaminate in un polarimetro diverse soluzioni zuccherine e ne vengono confrontati i rispettivi angoli di rotazione. A tale scopo, può essere scelta la luce di quattro LED di diverso colore. Inoltre, una soluzione di comune zucchero di canna (saccarosio) viene scissa nella sua struttura a doppio anello con una lenta reazione mediante l'aggiunta di acido cloridrico e trasformata in una miscela equimolare di glucosio e fruttosio. In tal modo il senso di rotazione viene "invertito" da destra verso sinistra, in quanto al termine della reazione l'angolo di rotazione risultante è pari alla somma dell'angolo di rotazione destrorsa del glucosio e dell'angolo di rotazione sinistrorsa del fruttosio, che è maggiore.

ANALISI

In base all'equazione (1) l'angolo di rotazione di una determinata sostanza è proporzionale alla lunghezza del campione quando la concentrazione è fissa ed è proporzionale alla concentrazione quando la lunghezza della prova è fissa. Partendo dalla pendenza delle rette passanti per l'origine rappresentate nella Fig. 1 è possibile determinare la rotazione specifica per le quattro lunghezze d'onda del polarimetro.

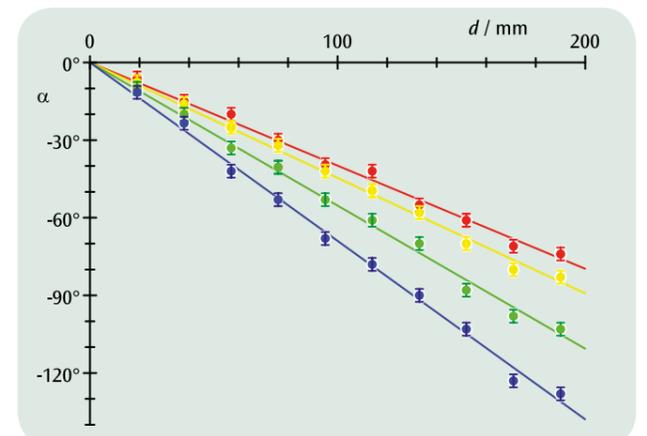


Fig. 1: Angolo di rotazione di una soluzione di fruttosio ($c = 0,5 \text{ g/cm}^3$) in funzione della lunghezza del tubo, per quattro diverse lunghezze d'onda luminosa

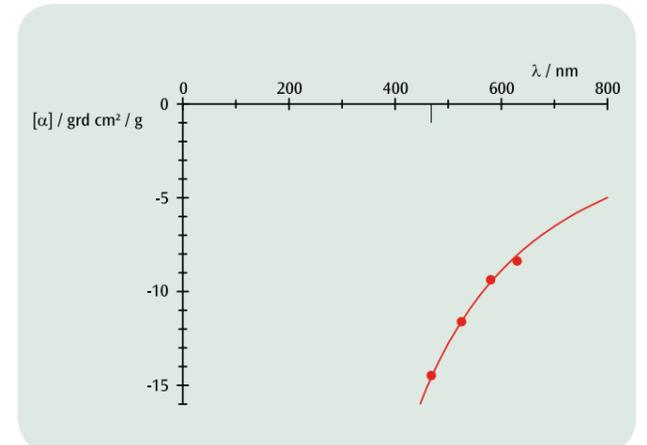


Fig. 2: Dipendenza dell'angolo di rotazione specifico dalla lunghezza d'onda

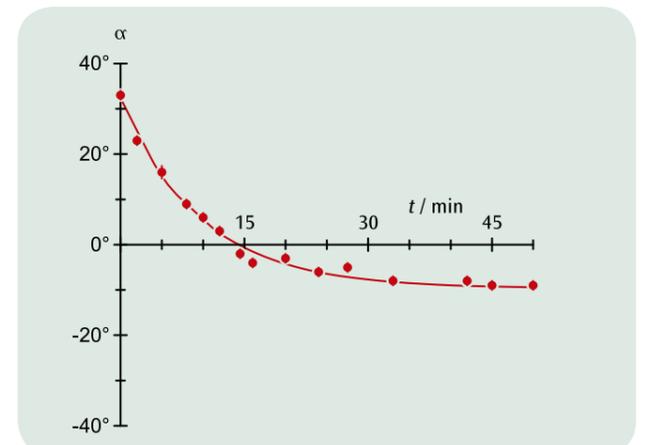


Fig. 3: Angolo di rotazione di una soluzione di saccarosio ($c = 0,3 \text{ g/cm}^3$, $d = 190 \text{ mm}$) durante l'inversione in funzione del tempo



FUNZIONI

- Dimostrazione dell'effetto Faraday nel vetro flint.
- Misurazione dell'angolo di rotazione del piano di polarizzazione nel campo magnetico.
- Determinazione della costante di Verdet per luce rossa e verde.
- Determinazione del coefficiente Cauchy b dell'indice di rifrazione.

SCOPO

Dimostrazione dell'effetto Faraday e determinazione della costante di Verdet per il vetro flint

RIASSUNTO

Sostanze otticamente isotrope, trasparenti, non magnetiche diventano otticamente attive in un campo magnetico. Ruotano il piano di polarizzazione di una luce polarizzata linearmente che proceda in direzione del campo magnetico attraverso la sostanza, poiché i tempi di transito della parte polarizzata circolare destra e sinistra sono diversi. Questo effetto è noto come effetto Faraday. Nell'esperimento viene misurato l'effetto Faraday nel vetro flint. Questo vetro si distingue per un'elevata e regolare dispersione ottica. È possibile riprodurre la dipendenza di frequenza dell'indice di rifrazione n con una buona approssimazione tramite una formula di Cauchy.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico di precisione D, 1000 mm	1002628
4	Cavaliere ottico D, 90/50	1002635
1	Piede ottico D	1009733
1	Diodo laser, rosso	1003201
1	Modulo laser, verde	1003202
2	Filtro di polarizzazione su asta	1008668
1	Schermo di proiezione	1000608
1	Nucleo del trasformatore D	1000976
2	Coppia di espansioni polari	1000978
2	Bobina D, 900 spire	1012859
1	Parallelepipedo in vetro flint per effetto Faraday	1012860
1	Accessori per effetto Faraday	1012861
1	Teslametro E	1008537
1	Sonda magnetica, assiale/tangenziale	1001040
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Morsetto universale	1002833
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840
1	Alimentatore CC 1-32 V, 0-20 A (230 V, 50/60 Hz)	1012857
1	Alimentatore CC 1-32 V, 0-20 A (115 V, 50/60 Hz)	1012858

2

BASI GENERALI

Sostanze otticamente isotrope, trasparenti, non magnetiche diventano otticamente attive in un campo magnetico. Ruotano il piano di polarizzazione di una luce polarizzata linearmente che procede in direzione del campo magnetico attraverso la sostanza, poiché i tempi di transito della parte polarizzata circolare destra e sinistra sono diversi. Questo effetto è noto come effetto Faraday.

È possibile spiegare le differenze dei tempi di transito con un semplice modello tramite la modifica della frequenza che subisce la luce polarizzata circolare nel campo magnetico. In caso di luce polarizzata destra, la frequenza f aumenta leggermente della frequenza di Larmor

$$(1) \quad f_L = \frac{e}{4\pi \cdot m_e} \cdot B,$$

$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ As}$: Carica fondamentale

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$: Massa a riposo dell'elettrone

la frequenza della luce polarizzata sinistra si riduce dello stesso valore.

Pertanto si ha

$$(2) \quad f_{\pm} = f \pm f_L$$

Alle diverse frequenze devono essere assegnati diversi indici di rifrazione nel materiale. Pertanto sono diverse anche le velocità dell'onda nel materiale.

Con questi dati è possibile calcolare la rotazione del piano polarizzato nel materiale attivo otticamente:

$$(3) \quad \varphi = 2\pi \cdot f \cdot (t_+ - t_-) = 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot (n(f_+) - n(f_-))$$

d : Lunghezza del campione,

$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$: Velocità della luce

Poiché la frequenza di Larmor f_L è notevolmente inferiore a f , ne consegue

$$(4) \quad \begin{aligned} \varphi &= 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot \frac{dn}{df} \cdot 2 \cdot f_L \\ &= f \cdot \frac{dn}{df} \cdot \frac{e}{m_e \cdot c} \cdot B \cdot d \end{aligned}$$

L'angolo di rotazione φ è proporzionale al campo magnetico B e alla lunghezza percorsa d :

$$(5) \quad \varphi = V \cdot B \cdot d$$

La costante di proporzionalità:

$$(6) \quad V = \frac{e}{m_e \cdot c} \cdot f \cdot \frac{dn}{df}$$

viene detta costante di Verdet; dipende dalla dispersione della luce nel materiale irradiato e dalla frequenza f della luce.

Nell'esperimento viene misurato l'effetto Faraday nel vetro flint F2. Questo vetro si distingue per un'elevata e regolare dispersione ottica. È possibile riprodurre la dipendenza di frequenza dell'indice di rifrazione n con una buona approssimazione tramite una formula di Cauchy.

$$(7) \quad n(f) = a + \frac{b}{c^2} \cdot f^2$$

con $a = 1,62$, $b = 8920 \text{ nm}^2$,

Per aumentare l'accuratezza di misurazione per piccoli angoli di rotazione, nell'esperimento con campo magnetico positivo B , la polarizzazione della luce viene definita in modo che l'analizzatore del campo visivo schermi esattamente a 0° . Dopo la commutazione al campo magnetico negativo $-B$, l'analizzatore viene ruotato intorno all'angolo 2φ per raggiungere di nuovo intensità zero.

ANALISI

Da (6) e (7) deriva
$$V = \frac{2 \cdot e \cdot b \cdot f^2}{m_e \cdot c^3} = \frac{2 \cdot e \cdot b}{m_e \cdot c \cdot \lambda^2}$$

Dalla costante di Verdet è quindi possibile determinare il coefficiente di Cauchy b per l'indice di rifrazione del vetro flint utilizzato, se si conosce la lunghezza d'onda λ della luce impiegata.

$$b = \frac{m_e \cdot c}{2 \cdot e} \cdot V \cdot \lambda^2$$

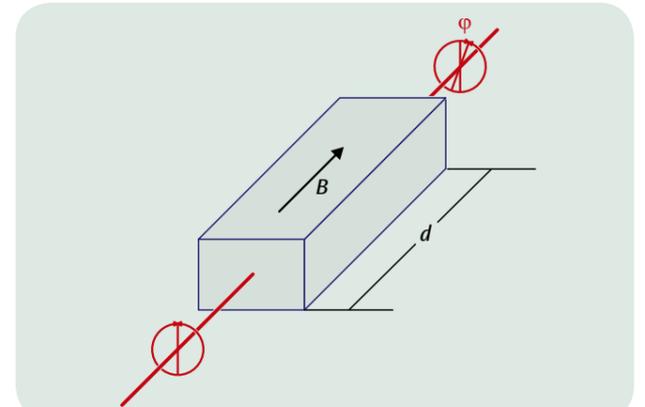


Fig. 1: Rappresentazione schematica della spiegazione dell'effetto Faraday

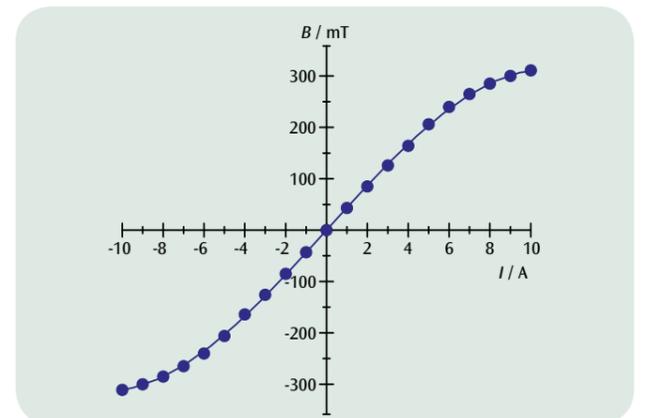
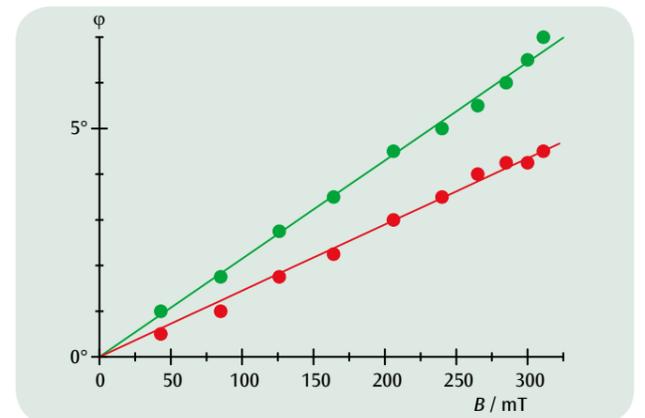


Fig. 2: Curva di calibrazione del magnete elettrico


 Fig. 3: Angolo di rotazione φ come funzione del campo magnetico B per luce laser rossa e verde



FUNZIONI

- Compensazione della luce ambientale.
- Misurazione dell'intensità di radiazione relativa in funzione della distanza.
- Rappresentazione in un diagramma $S - 1/r^2$.

SCOPO

Conferma della legge del quadrato della distanza per l'intensità di radiazione di una sorgente luminosa

RIASSUNTO

Secondo la legge del quadrato della distanza, l'intensità di radiazione di una sorgente luminosa, ovvero la potenza ceduta per unità di superficie, si riduce in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Questa correlazione viene verificata in un esperimento su una lampada a incandescenza, che per distanze maggiori rispetto alle dimensioni del filamento, può essere considerata come sorgente puntiforme. Per la misurazione relativa dell'intensità di radiazione viene utilizzata una termopila di Moll.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Lampada di Stefan-Boltzmann	1008523
1	Termopila di Moll	1000824
1	Amplificatore di misura (230 V, 50/60 Hz)	1001022 o
	Amplificatore di misura (115 V, 50/60 Hz)	1001021
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro digitale P1035	1002781
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Scala, 1 m	1000742
2	Piede a barilotto, 500 g	1001046
1	Cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm, set di 15	1002843

1

BASI GENERALI

La legge del quadrato della distanza descrive una correlazione fondamentale che vale anche per l'intensità di radiazione di una sorgente luminosa. L'intensità di radiazione, ovvero la potenza ceduta per unità di superficie, si riduce in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza della sorgente luminosa.

Il presupposto per la validità di questa correlazione è una sorgente luminosa che irradia in modo uniforme in tutte le direzioni spaziali, le cui dimensioni sono trascurabili rispetto alla distanza osservata. Inoltre non devono presentarsi assorbimenti o riflessioni tra la sorgente e il punto di misurazione.

Poiché la sorgente irradia in modo uniforme in tutte le direzioni spaziali, la potenza irradiata P alla distanza r rispetto alla sorgente è ripartita in modo uniforme sulla superficie sferica

$$(1) \quad A = 4\pi \cdot r^2.$$

L'intensità è quindi data da

$$(2) \quad S = \frac{dP}{dA} = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}.$$

L'equazione (2) viene verificata nell'esperimento su una lampada a incandescenza. Per distanze maggiori rispetto alle dimensioni del filamento, la lampada può essere considerata come una sorgente di radiazione puntiforme. Per la misurazione relativa dell'intensità di radiazione viene utilizzata una termopila di Moll. In questo modo, anziché misurare l'intensità assoluta S , la tensione termica U_{th} viene letta come dimensione per grandezza proporzionale all'intensità relativa.

ANALISI

Nelle misurazioni è inevitabile che venga rilevata anche l'intensità di radiazione della luce ambiente. Per questo prima della registrazione della serie di misurazione viene eseguita una compensazione. Per questa verifica viene adattata una linea retta ai punti di misurazione.

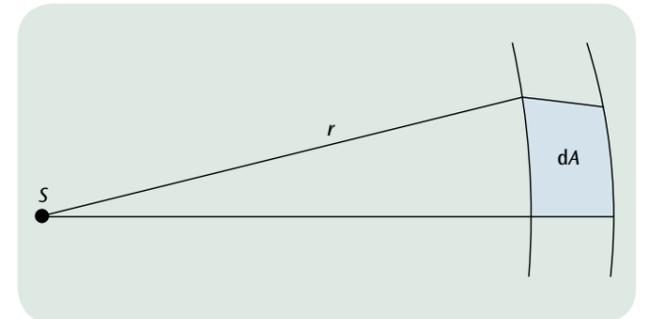
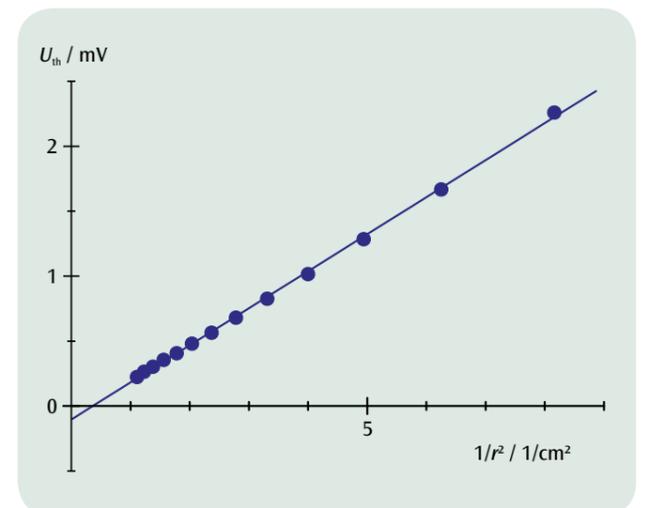


Fig. 1: Quadrato della distanza


 Fig. 2: Rappresentazione dei valori misurati in un diagramma $U_{th} - 1/r^2$



FUNZIONI

- Misurazione relativa dell'intensità di radiazione di una lampada a incandescenza con filo in tungsteno con una termopila di Moll in funzione della temperatura.
- Misurazione della resistenza in funzione della temperatura del filamento per la determinazione della temperatura.
- Rappresentazione dei valori di misurazione in un diagramma $\ln(U_{th}) - \ln(T)$ e determinazione dell'esponente dall'incremento lineare.

SCOPO

Conferma della dipendenza T^4 dell'intensità di radiazione

RIASSUNTO

La dipendenza dalla temperatura dell'intensità di radiazione di un corpo nero è descritta dalla legge di Stefan-Boltzmann. L'intensità di radiazione di una lampada a incandescenza con filo in tungsteno mostra la stessa dipendenza dalla temperatura. Nell'esperimento questa viene determinata con una termopila di Moll in una misurazione relativa. La temperatura del filamento si determina dalla resistenza in funzione della temperatura che viene rilevata con estrema precisione in una misurazione con quattro conduttori.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Lampada di Stefan-Boltzmann	1008523
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Termopila di Moll	1000824
3	Multimetro digitale P1035	1002781
2	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Sia l'intensità complessiva, sia la distribuzione spettrale della radiazione termica di un corpo dipendono dalla sua temperatura e dalle sue caratteristiche superficiali. A lunghezza d'onda e temperature fissate, l'emissività di un corpo è tanto buona quanto lo è la sua capacità di assorbimento. Un corpo nero, ovvero un corpo con caratteristiche superficiali ideali, assorbe la radiazione di tutte le lunghezze d'onda, quindi a una determinata temperatura emette una radiazione termica con la massima intensità possibile.

La dipendenza dalla temperatura dell'intensità di radiazione S di un corpo nero è descritta dalla legge di Stefan-Boltzmann.

$$(1) \quad S_0 = \sigma \cdot T^4$$

T : temperatura assoluta

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} : \text{costante di Stefan-Boltzmann}$$

Questa intensità non può essere misurata direttamente, poiché il corpo assorbe contemporaneamente radiazioni dall'ambiente. L'intensità misurata è piuttosto

$$(2) \quad S_1 = \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

T_0 : temperatura assoluta dell'ambiente

Anche la luce emessa da una lampada a incandescenza è radiazione termica. Qui la temperatura del filamento è selezionata in modo che una parte considerevole sia emessa come luce visibile. La dipendenza della temperatura dell'intensità di radiazione complessiva corrisponde a quella del corpo nero. Vale

$$(3) \quad S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

poiché il filamento assorbe una parte ε della radiazione dell'intera lunghezza d'onda.

Nell'esperimento è stata utilizzata una lampada a incandescenza di questo tipo per analizzare la dipendenza dalla temperatura dell'intensità di radiazione. Con una termopila di Moll viene determinata l'intensità di radiazione in una misurazione relativa. La temperatura del filamento si può determinare dalla resistenza in funzione della temperatura

$$(4) \quad R = R_0 (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

R_0 : resistenza con temperatura ambiente T_0

$$\alpha = 4,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \text{ per il tungsteno}$$

poiché R viene rilevata con estrema precisione con una misurazione a quattro conduttori.

ANALISI

Dall'equazione (4) si ricava la temperatura T

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0} + T_0$$

Tuttavia l'equazione (4) è valida solo con una buona approssimazione. Per analisi più precise si possono consultare valori tabulati.

Nell'esperimento le temperature T vengono scelte così alte da poter trascurare la temperatura ambiente T_0 nell'equazione (3). Inoltre, anziché l'intensità assoluta S viene misurata la tensione termica U_{th} che rappresenta l'intensità relativa. Dall'equazione (3) si ha quindi

$$U_{th} = a \cdot T^4 \text{ e } \ln(U_{th}) = \ln(a) + 4 \cdot \ln(T)$$

In un diagramma $\ln(U_{th}) - \ln(T)$ i punti di misurazione si trovano quindi su una retta con pendenza 4.

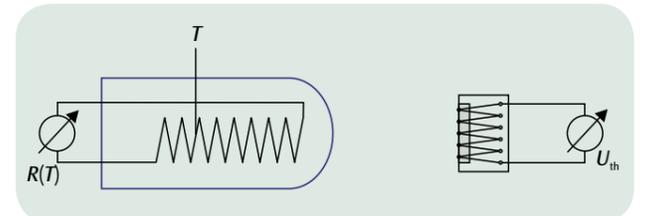


Fig. 1: Rappresentazione schematica della struttura

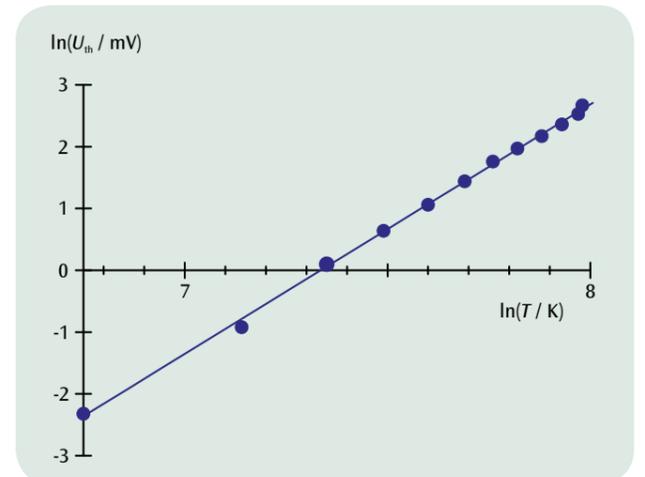


Fig. 2: Diagramma $\ln(U_{th}) - \ln(T)$



FUNZIONI

- Misurazione oscilloscopica della durata di un breve impulso luminoso che compie un percorso prestabilito mediante confronto con un segnale di riferimento.
- Determinazione della velocità della luce nell'aria come rapporto tra percorso e tempo impiegato.

SCOPO

Determinazione della velocità della luce sulla base della durata di brevi impulsi luminosi

RIASSUNTO

La velocità di propagazione della luce può essere dimostrata mediante una semplice misurazione della durata. A tale scopo vengono analizzati impulsi luminosi molto brevi, della durata di pochi nanosecondi, e la loro durata viene determinata oscilloscopicamente dopo aver percorso in andata e ritorno un tratto di misura di diversi metri di lunghezza. Dalla durata rilevata e dalla distanza del trasmettitore dal riflettore a prisma triplo è possibile calcolare la velocità della luce.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Misuratore della velocità della luce (230 V, 50/60 Hz)	1000882 o
	Misuratore della velocità della luce (115 V, 50/60 Hz)	1000881
1	Oscilloscopio analogico, 2x150 MHz	1002729
1	Banco ottico U, 600 mm	1003040
2	Cavaliere ottico U, 75 mm	1003041
1	Piede a barilotto	1001045
1	Asta di supporto, 1500 mm	1002937
1	Manicotto universale	1002830
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603

1

BASI GENERALI

La velocità di propagazione della luce può essere dimostrata con le tecniche di misura attuali mediante una semplice misurazione della durata. A tale scopo vengono analizzati impulsi luminosi molto brevi, della durata di soli pochi nanosecondi, e la loro durata viene determinata oscilloscopicamente dopo aver percorso in andata e ritorno un tratto di misura di diversi metri di lunghezza.

Nell'esperimento, i brevi impulsi di luce emessi da un LED pulsato raggiungono tramite un divisore di fascio due fototrasduttori, i cui amplificatori collegati a valle inviano impulsi di tensione per una valutazione oscilloscopica. Al fototrasduttore A giungono impulsi luminosi che vengono respinti verso l'apparecchio di misura da un riflettore a prisma triplo posto a grande distanza. Il fototrasduttore B misura l'impulso di riferimento non ritardato prodotto internamente. Il trigger dell'oscilloscopio è provocato da un impulso di tensione proveniente dall'uscita C, che anticipa l'impulso di riferimento di 60 ns.

Con un oscilloscopio a due canali, si misura la differenza di durata dei due impulsi. Dalla differenza di durata rilevata t e dalla distanza s del trasmettitore dal riflettore a prisma triplo è possibile calcolare la velocità della luce:

$$(1) \quad c = \frac{2 \cdot s}{t}$$

La misurazione risulta ancora più efficace modificando la distanza del riflettore e osservando sull'oscilloscopio la variazione risultante della distanza tra gli impulsi. Ciò è possibile senza alcun problema, in quanto il posizionamento del riflettore a prisma triplo non richiede una particolare necessità di regolazione, bensì può avvenire tranquillamente "a occhio".

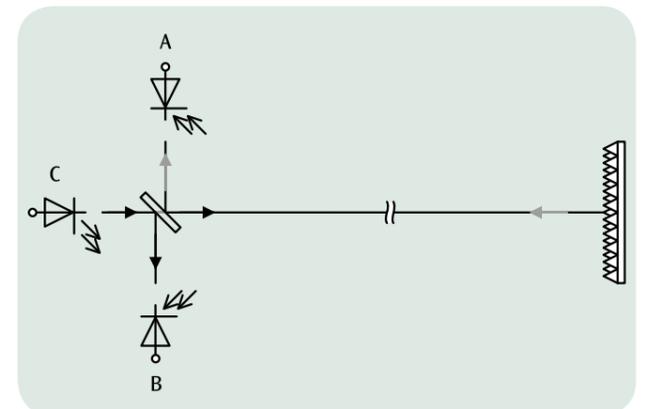


Fig. 1: Principio di misura

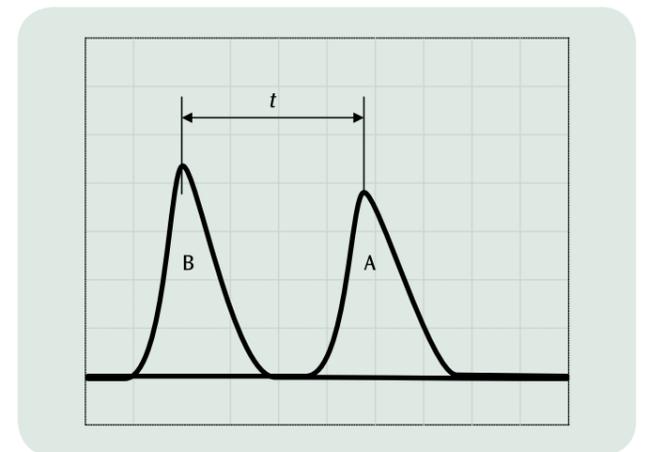
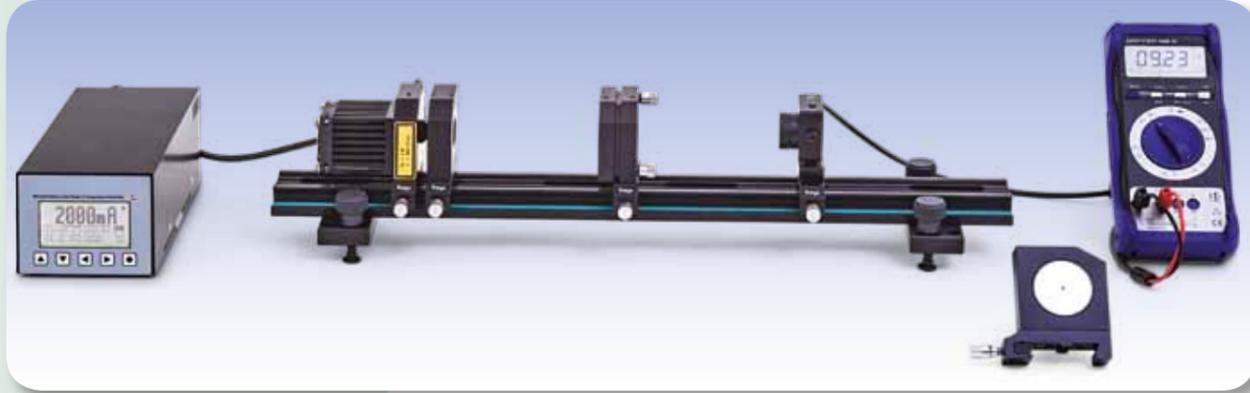


Fig. 2: Misurazione della durata con l'oscilloscopio



FUNZIONI

- Adattamento del laser a diodi per il pompaggio ottico stabile del laser Nd:YAG.
- Determinazione del tempo di decadimento del livello laser superiore ${}^4F_{3/2}$ nel cristallo Nd:YAG.
- Regolazione del risonatore e controllo delle sue modalità.
- Misurazione della potenza in uscita del laser Nd:YAG in funzione della potenza della pompa e determinazione della soglia laser.
- Controllo dello spiking con funzionamento ad impulsi del diodo laser.

ATTENZIONE

Nell'esperimento si utilizza un dispositivo laser di classe 4 che emette nel campo spettrale a infrarossi (non visibile). Pertanto indossare sempre occhiali di protezione laser. Anche con gli occhiali non osservare direttamente il fascio laser.

SCOPO

Configurazione e ottimizzazione di un laser Nd:YAG

RIASSUNTO

Nell'esperimento è stato configurato un laser Nd:YAG pompato con laser a diodi. Dopo l'adattamento del laser a diodi per un pompaggio ottico e l'ottimizzazione del risonatore, il sistema può essere messo in funzione come laser Nd:YAG. È stato analizzato il funzionamento non stazionario e quello stazionario. È stata inoltre determinata la vita media del livello laser superiore ${}^4F_{3/2}$ nel cristallo Nd:YAG.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Driver per diodi laser e doppio controllore di temperatura Dsc01-2,5	1008632
1	Banco ottico KL	1008642
1	Laser a diodo 1000 mW	1009497
1	Cristallo Nd:YAG	1008635
1	Lente collimatrice $f = +75$ mm	1008646
1	Specchio laser I	1008638
1	Fotodiodo PIN	1008640
1	Filtro RG850	1008648
1	Diodo laser di regolazione	1008634
1	Valigetta di trasporto KL	1008651
1	Occhiali protettivi laser per Nd:YAG	1002866
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Oscilloscopio digitale 4x60 MHz	1008676
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Cavo ad alta frequenza	1002746
1	Carta rivelatore a infrarossi	1017879

BASI GENERALI

Il laser Nd:YAG è un laser allo stato solido che emette luce infrarossa. Come mezzo attivo utilizza un cristallo di ittrio e alluminio (YAG) drogato al neodimio. Viene pompato con un laser a diodi semiconduttore. Viene solitamente emessa una lunghezza d'onda di 1064 nm.

La Fig. 1 mostra i livelli energetici del cristallo Nd:YAG, con le transizioni più importanti per il pompaggio ottico e il funzionamento del laser. Tramite il pompaggio ottico con luce dalla lunghezza d'onda di ca. 808 nm vengono eccitate le transizioni dallo stato di base (1) al livello di pompaggio superiore (4).

Il loro tempo di decadimento è molto breve e avvengono transizioni rapide non radiative verso il livello laser superiore metastabile (3). Vengono così evitate transizioni allo stato di base. La transizione radiativa avviene con $\lambda = 1064$ nm verso il livello laser inferiore (2). Questo ha un tempo di decadimento molto breve e decade senza emissione di radiazione nello stato di base. Così vengono occupati tutti gli stati fino ad un determinato grado. Gli stati 4 e 2 decadono però così rapidamente che le densità numeriche degli atomi in questi stati può essere assunta come pari a zero. Quindi il comportamento dinamico del laser può essere descritto tramite le seguenti equazioni cinetiche per le inversioni di densità n (la differenza della densità numerica degli atomi Nd negli stati 2 e 3) e per la densità dei fotoni p del campo luminoso laser:

$$(1a) \quad \frac{dn}{dt} = W \cdot (N_{Nd} - n) - \sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \frac{n}{\tau_3}$$

$$(1b) \quad \frac{dp}{dt} = \frac{L_{Nd}}{L} \cdot \sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \frac{p}{\tau_{res}}$$

W : Velocità di pompaggio

N_{Nd} : Densità numerica degli atomi Nd

σ : sezione efficace per l'emissione o l'assorbimento di un fotone

c : velocità della luce

τ_3 : Durata utile del livello laser superiore 3

L : Lunghezza risonatore

L_{Nd} : Lunghezza del cristallo Nd:YAG

τ_{res} : Costante di tempo delle perdite del risonatore

In (1a) il primo termine descrive il pompaggio ottico, il secondo l'emissione indotta e il terzo il decadimento del livello laser superiore a causa dell'emissione spontanea. Il primo termine in (1b) considera la generazione di fotoni a causa dell'emissione indotta, il secondo la diminuzione della densità dei fotoni a causa delle perdite nel risonatore. Occorre considerare con più precisione che a causa dell'emissione spontanea, già all'avvio sono presenti fotoni.

Per il funzionamento stazionario, senza considerare l'emissione spontanea, si ottiene la seguente soluzione:

$$(2) \quad p = \frac{1}{\sigma \cdot c \cdot \tau_3} \cdot \frac{W - W_s}{W_s}$$

$$\text{con} \quad W_s = \frac{1}{\tau_3} \cdot \frac{n_i}{n_i - N_{Nd}} \quad n_i = \frac{L}{L_{Nd} \cdot \sigma \cdot c \cdot \tau_{res}}$$

La velocità di pompaggio deve anche superare un valore di soglia; e successivamente la densità dei fotoni aumenterà in modo lineare con la velocità di pompaggio. Non è possibile una misurazione diretta della densità dei fotoni e della velocità di pompaggio. Nell'esperimento è quindi dimostrato che la potenza in uscita del laser PL al di sopra di un valore di soglia dipende in modo lineare dalla potenza della pompa.

La Fig. 2 mostra le soluzioni delle equazioni cinetiche per il funzionamento non stazionario. Si crea quindi innanzitutto l'inversione di popolazione. Non appena viene raggiunta l'inversione di soglia la densità di inversione aumenta in modo lineare. Seguono un aumento più rapido della densità dei fotoni e una riduzione della densità di inversione ad un valore leggermente inferiore all'inversione di soglia. Ripetendo questa procedura, l'overshoot della densità di inversione si riduce sempre più, fino all'impostazione dello stato stazionario. Anche questo cosiddetto "spiking" viene dimostrato nell'esperimento.

Tuttavia, prima viene adattata la lunghezza d'onda del laser a diodi utilizzata per il pompaggio sulla transizione con $\lambda = 808$ nm e successivamente

viene misurato l'andamento temporale dell'emissione spontanea del laser a diodi con il funzionamento a impulsi (Fig. 3). Tramite questi valori misurati è possibile determinare il tempo di decadimento del livello di laser superiore. Dopo la preparazione e la regolazione del risonatore viene controllato lo spiking (Fig. 4) e successivamente misurata la potenza in uscita in funzione della potenza della pompa.

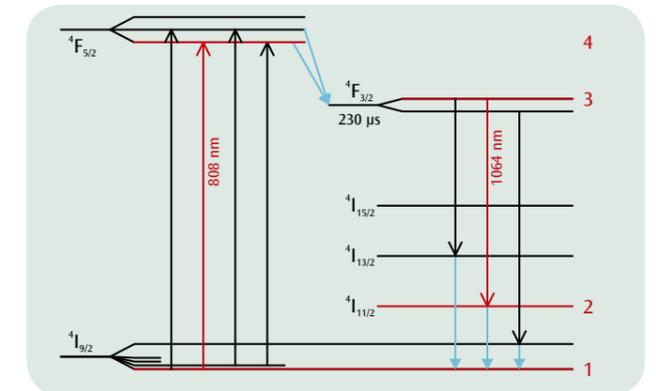


Fig. 1: Schema dei livelli energetici del cristallo Nd:YAG. Le transizioni rilevanti per l'esperimento sono rappresentate in rosso

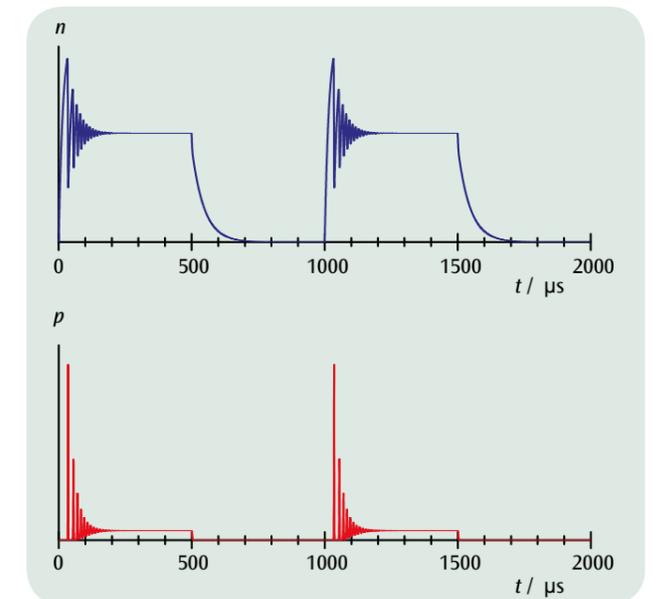


Fig. 2: Soluzioni non stazionarie delle equazioni cinetiche (spiking)

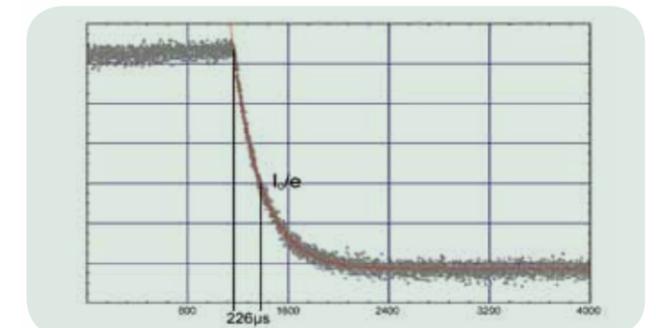
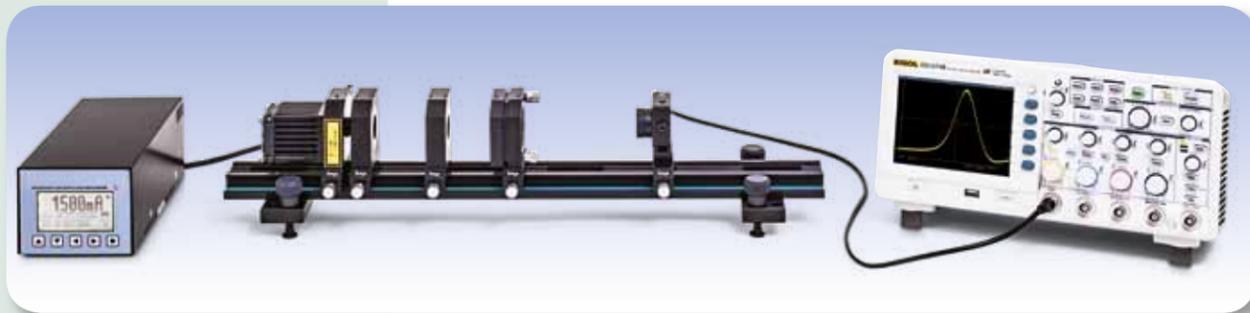


Fig. 3: Misurazione dell'emissione spontanea per la determinazione del tempo di decadimento del livello di laser superiore



FUNZIONI

- Configurazione e ottimizzazione del Q-switching del laser Nd:YAG con un modulo Cr:YAG.
- Registrazione degli impulsi e determinazione della durata degli impulsi.

SCOPO

Q-switching di un laser Nd:YAG con un modulo Cr:YAG

RIASSUNTO

Il Q-switching di un laser permette la generazione di brevi impulsi ricchi di energia. Si basa sul controllo della soglia laser attraverso l'aumento o l'abbassamento delle perdite del risonatore. Con il supporto di un modulo Cr:YAG si realizza un sistema di Q-switching passivo e viene rilevato l'andamento temporale degli impulsi del laser. Dalla potenza media e dalla frequenza di ripetizione viene calcolata l'energia degli impulsi.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Driver per diodi laser e doppio controllore di temperatura Dsc01-2,5	1008632
1	Banco ottico KL	1008642
1	Laser a diodo 1000 mW	1009497
1	Cristallo Nd:YAG	1008635
1	Interruttore di potenza passivo	1008637
1	Specchio laser I	1008638
1	Fotodiodo PIN, rapido	1008641
1	Filtro RG850	1008648
1	Diodo laser di regolazione	1008634
1	Valigetta di trasporto KL	1008651
1	Occhiali protettivi laser per Nd:YAG	1002866
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Oscilloscopio digitale 4x60 MHz	1008676
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Cavo ad alta frequenza	1002746
1	Carta rivelatore a infrarossi	1017879

3

ATTENZIONE

Nell'esperimento si utilizza un dispositivo laser di classe 4 che emette nel campo spettrale a infrarossi (non visibile). Pertanto indossare sempre occhiali di protezione laser. Anche con essi non osservare direttamente il fascio laser.

BASI GENERALI

Il Q-switching permette la creazione di brevi impulsi laser ricchi di energia, quali si rendono necessari nella lavorazione di materiali. Si basa sul controllo della soglia laser attraverso l'aumento o l'abbassamento delle perdite del risonatore. Nella fase con perdite elevate si evita l'oscillazione del risonatore e l'energia di pompaggio viene immagazzinata nel cristallo laser. Dopo l'attivazione del risonatore tramite la riduzione delle perdite si genera un impulso laser, la cui intensità è di molte volte maggiore rispetto a quella durante il funzionamento continuo. Questa è la differenza rispetto allo spiking: con il Q-switching si supera di molto la densità di inversione del valore della prima oscillazione. Si differenzia tra Q-switch passivi e attivi. I Q-switch passivi sono assorbenti e la loro capacità di assorbimento è attivata dalla luce nel risonatore. I Q-switch sono tipicamente circuiti acustici/ottici, elettrici/ottici o meccanici, che controllano la trasmissione esternamente.

L'impiego di un cristallo assorbente come Q-switch passivo presuppone la possibilità di saturazione del suo assorbimento. Per questo la sua sezione efficace deve essere maggiore a basse intensità, e la vita media del livello eccitato deve essere maggiore rispetto alla durata dell'impulso laser e inferiore al tempo di ripetizione dell'impulso. Un cristallo Cr:YAG soddisfa queste condizioni.

Le equazioni cinetiche per le densità di inversione raggiungibili con le pompe ottiche n nel cristallo Nd:YAG e per le densità dei fotoni p nel campo luminoso laser (cfr. l'esperimento UE4070310) per la descrizione del comportamento dinamico del laser passivo devono anche considerare la densità di occupazione nello stato di base del cristallo Cr:YAG. A causa dell'aumento estremamente rapido della densità dei fotoni, la velocità di pompaggio e quella dell'emissione spontanea possono essere trascurate. Con la definizione del valore di soglia della densità di inversione

$$(1) \quad n_s = \frac{1}{\sigma \cdot c \cdot \tau_{res}}$$

τ_{res} : Costante di tempo per la diminuzione della densità dei fotoni a causa delle perdite nel risonatore

σ : sezione efficace per l'emissione o l'assorbimento di un fotone
 c : velocità della luce

si ottiene la variazione temporale della densità di inversione n e della densità dei fotoni p :

$$(2a) \quad \frac{dn}{dt} = -\frac{n}{n_s} \cdot \frac{p}{\tau_{res}}$$

e

$$(2b) \quad \frac{dp}{dt} = -\left(\frac{n}{n_s} - 1\right) \cdot \frac{p}{\tau_{res}}$$

In un impulso gigante la densità di inversione è approssimativamente costante e corrisponde circa alla densità di inversione iniziale:

$$(3) \quad n(t) = n_i$$

Per la densità dei fotoni si ottiene quindi, dall'eq. (2b):

$$(4) \quad p(t) = \exp\left[\left(\frac{n_i}{n_s} - 1\right) \cdot \frac{t}{\tau_{res}}\right]$$

La densità di inversione n_i in un impulso gigante è molto maggiore rispetto alla densità di inversione di soglia n_s . Quindi il tempo di crescita della densità dei fotoni è molto più breve rispetto alla costante di tempo τ_{res} per le perdite del risonatore.

Un altro punto importante si raggiunge se la densità di inversione si riduce al valore di soglia. La densità dei fotoni non cambia più come dall'eq. (2b), vale a dire che non vengono generati altri fotoni laser. Si ottiene così dall'eq. (2a):

$$(5) \quad \frac{dn}{dt} = -\frac{p_{max}}{\tau_{res}} \quad \text{con } p(t) = p_{max}$$

La densità dei fotoni diminuisce quindi dopo il raggiungimento del valore massimo con la costante di tempo per le perdite del risonatore.

Il valore massimo della densità dei fotoni è dato da:

$$(6) \quad p_{max} = n_s \cdot \ln\left(\frac{n_s}{n_i}\right) - (n_s - n_i)$$

In base a ciò i laser con una vita media molto breve mostrano il loro livello di laser superiore, quindi una densità di inversione solo leggermente superiore, e nessun aumento significativo della potenza in uscita con il funzionamento a impulsi.

Nell'esperimento il modulo Cr:YAG viene inserito nel risonatore e viene eseguita una nuova regolazione di precisione del laser. Il segnale laser viene misurato con un diodo PIN e registrato con un oscilloscopio.

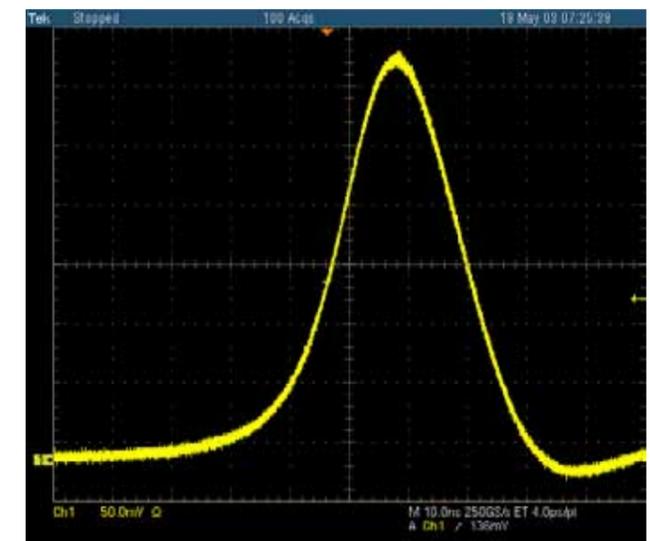
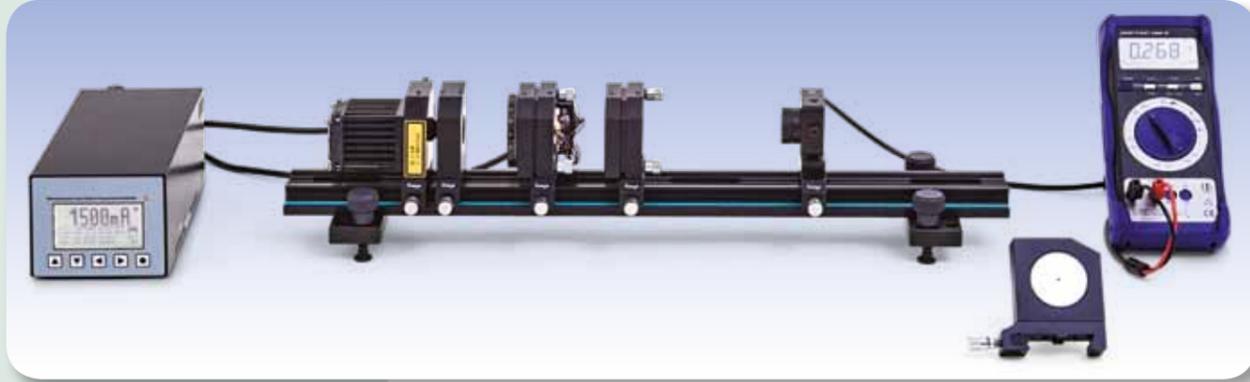


Fig. 1: andamento degli impulsi di un laser Nd:YAG a Q-switch passivo



FUNZIONI

- Generazione di radiazione a frequenza raddoppiata inserendo un cristallo KTP nel risonatore.
- Misurazione della potenza di uscita della radiazione a frequenza raddoppiata in funzione della potenza dell'onda fondamentale.
- Analisi della dipendenza dall'orientamento del cristallo e dalla temperatura del cristallo.

SCOPO

Duplicazione della frequenza internamente al risonatore in un laser Nd:YAG

RIASSUNTO

In un forte campo elettromagnetico molti materiali variano le proprie caratteristiche ottiche. In un materiale di questo tipo è possibile ad es. raddoppiare la frequenza della luce laser ad alta intensità. Nell'esperimento viene impiegato un cristallo KTP, per generare, partendo dalla radiazione infrarossa da 1064 nm di un laser Nd:YAG una radiazione verde con lunghezza d'onda 532 nm tramite raddoppio della frequenza. Questo tipo di cristallo è indicato per vari motivi in quanto si comporta da un punto di vista ottico in modo altamente non lineare e assorbe la radiazione con la frequenza di uscita e la frequenza raddoppiata solo in misura minima.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Driver per diodi laser e doppio controllore di temperatura Dsc01-2,5	1008632
1	Banco ottico KL	1008642
1	Laser a diodo 1000 mW	1009497
1	Cristallo Nd:YAG	1008635
1	Modulo di duplicazione della frequenza	1008636
1	Specchio laser II	1008639
1	Fotodiodo PIN	1008640
1	Filtro BG40	1017874
1	Diodo laser di regolazione	1008634
1	Valigetta di trasporto KL	1008651
1	Occhiali protettivi laser per Nd:YAG	1002866
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Carta rivelatore a infrarossi	1017879

ATTENZIONE

Nell'esperimento si utilizza un dispositivo laser di classe 4 che emette nel campo spettrale a infrarossi (non visibile). Pertanto indossare sempre occhiali di protezione laser. Anche con gli occhiali non osservare mai direttamente il fascio laser.

BASI GENERALI

In un forte campo elettromagnetico molti materiali variano le proprie caratteristiche ottiche. In un materiale di questo tipo è possibile ad es. raddoppiare la frequenza della luce laser ad alta intensità. Per la descrizione di tale fenomeno si parte dalla polarizzazione del materiale che varia non linearmente con l'intensità elettrica del campo.

Se il materiale non è magnetico, l'equazione d'onda per l'intensità del campo elettrico E ha la forma

$$(1) \quad \Delta E(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{P}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

\vec{P} : polarizzazione del materiale
 ϵ_0 : costante di dielettrica del vuoto
 c : velocità della luce

Tra la polarizzazione e l'intensità del campo sussiste la relazione non lineare

$$(2) \quad \vec{P}(t) = \epsilon_0 \cdot (\chi_1 \cdot E(t) + \chi_2 \cdot E(t)^2)$$

χ_1, χ_2 : suscettibilità di primo e secondo grado
 Pertanto, un campo elettrico oscillante con una frequenza f

$$(3) \quad E(t) = E_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

genera una polarizzazione composta da due termini. Il termine

$$(4) \quad \vec{P}_1(t) = \epsilon_0 \cdot \chi_1 \cdot E_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

oscilla con la frequenza semplice f e descrive la variazione della velocità della luce nel materiale. Il termine

$$(5) \quad \vec{P}_2(t) = \epsilon_0 \cdot \chi_2 \cdot E_0^2 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot 2f \cdot t)$$

oscilla con la frequenza doppia $2f$ e agisce secondo (1) come sorgente di una nuova un nuovo componente del campo elettromagnetico. Nel modello a fotoni si osservano due fotoni di frequenza f convertiti in un fotone di frequenza $2f$ (vedere Fig. 1). Per motivi di conservazione della quantità di moto, il rendimento è particolarmente grande, se lo spostamento di fase

$$(6) \quad \Delta k \cdot \frac{L}{2} = \left| 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_1} - \frac{2\pi}{\lambda_{2f}} \right| \cdot \frac{L}{2} = \frac{2\pi}{c} \cdot f \cdot L \cdot |n_1 - n_{2f}|$$

L : lunghezza risonatore
 λ_1, λ_{2f} : lunghezze d'onda nel materiale con frequenza semplice e doppia

è il più possibile vicino allo zero. Gli indici di rifrazione n_1 e n_{2f} del materiale devono pertanto essere più vicini possibile, cosa ottenibile nei materiali bifrangenti con forte anisotropia spaziale ed orientamento idoneo (vedere Fig. 2). La conseguenza è che il rendimento dipende dall'orientamento spaziale del materiale che raddoppia la frequenza.

La densità di potenza P_{2f} della nuova radiazione dipende in modo quadratico dalla densità di potenza P_f della radiazione fondamentale. Vale

$$(7) \quad P_{2f} = P_f^2 \cdot \frac{L^2}{A} \cdot C \cdot F\left(\Delta k \cdot \frac{L}{2}\right) \text{ con } F(x) = \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$$

A : sezione risonatore
 C : costante materiale ad una data lunghezza d'onda

Nell'esperimento viene impiegato un cristallo KTiOPO_4 (KTP), per generare, partendo dalla radiazione infrarossa da 1064 nm di un laser Nd:YAG una radiazione verde con lunghezza d'onda 532 nm tramite raddoppio della frequenza. Questo tipo di cristallo è indicato per vari motivi in quanto si comporta da un punto di vista ottico in modo altamente non lineare e assorbe la radiazione con la frequenza di uscita e la frequenza raddoppiata solo in misura minima.

ANALISI

Per la conferma della dipendenza dal quadrato della potenza primaria P_f si utilizza la dipendenza nota dagli esperimenti precedenti della potenza primaria dalla corrente d'iniezione I del diodo laser.

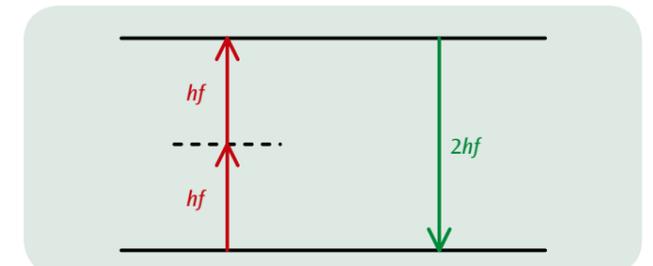


Fig. 1: Rappresentazione schematica del raddoppiamento della frequenza

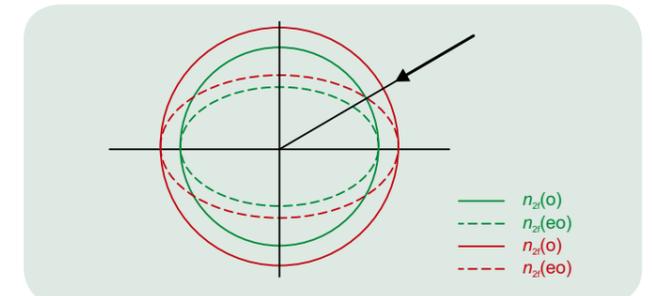


Fig. 2: Rappresentazione schematica per l'adattamento di fase utilizzando la doppia rifrazione nel materiale
 $n(o)$: indice di rifrazione del raggio ordinario
 $n(eo)$: indice di rifrazione del raggio straordinario

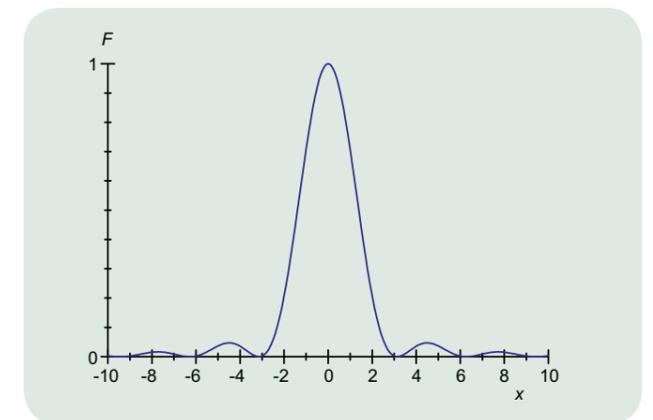


Fig. 3: Rappresentazione della funzione $F(x)$



FUNZIONI

- Misurazione dei valori limite della forza controelettromotrice in funzione della lunghezza d'onda della luce.
- Rappresentazione dei risultati in un diagramma energia-frequenza.
- Determinazione della costante di Planck e del lavoro di estrazione.
- Dimostrazione dell'indipendenza dell'energia degli elettroni dall'intensità della luce.

SCOPO

Determinazione della costante di Planck secondo il metodo della forza controelettromotrice

RIASSUNTO

In una variante della disposizione classica, la luce di una determinata frequenza giunge sul catodo attraverso un anodo ad anello, liberando elettroni per effetto fotoelettrico. L'energia degli elettroni può essere determinata tramite l'applicazione di una forza controelettromotrice che si oppone al flusso di corrente degli elettroni verso l'anodo portandolo a zero. Si dimostra che il valore limite della forza controelettromotrice corrispondente alla corrente zero e di conseguenza anche l'energia degli elettroni sono indipendenti dall'intensità della luce. Dai valori limite misurati per le diverse frequenze luminose si calcola la costante di Planck.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio della costante di Planck (230 V, 50/60 Hz)	1000537 o
	Apparecchio della costante di Planck (115 V, 50/60 Hz)	1000536



BASI GENERALI

L'effetto fotoelettrico presenta due caratteristiche importanti scoperte nel 1902 da *Lenard*: il numero degli elettroni rilasciati dal materiale del catodo per via dell'effetto fotoelettrico è proporzionale all'intensità della luce incidente, mentre la loro energia dipende dalla frequenza e non dall'intensità della luce. Nel 1905 *Einstein* ha spiegato queste caratteristiche traendo ipotesi fondamentali dalla descrizione di *Planck* della radiazione di un corpo nero, gettando così importanti basi per la teoria quantistica.

Einstein ipotizzò che la luce si diffondesse sotto forma di fotoni di energia proporzionale alla frequenza della luce. Se un tale fotone con energia

$$(1) \quad E = h \cdot f,$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$: costante di Planck

giunge su un elettrone nel materiale del catodo, può trasmettere la sua energia all'elettrone, che si libera dal catodo con energia cinetica

$$(2) \quad E_{\text{kin}} = h \cdot f - W$$

Il lavoro di estrazione W è una grandezza dipendente dal materiale, pari ad es. nel cesio a circa 2 eV.

Nell'esperimento si utilizza questa relazione per determinare la costante di Planck h . A tale scopo, la luce di una determinata frequenza f giunge attraverso un anodo ad anello sul catodo, provocando il rilascio di elettroni. La corrente risultante verso l'anodo viene misurata con un nanoamperometro e compensata a zero applicando una forza controelettromotrice U_0 tra anodo e catodo. La luce viene fornita da diodi luminosi di colore diverso, il cui spettro è sufficientemente ristretto da consentire l'assegnazione di una lunghezza d'onda λ e quindi di una frequenza

$$(3) \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

L'intensità della luce dei diodi può essere variata tra 0 e 100%, in modo che anche l'indipendenza dell'energia degli elettroni dall'intensità della luce sia verificabile.

ANALISI

Il valore limite U_0 della forza controelettromotrice è il minore che provoca l'azzeramento della corrente. Questa definizione si può ricavare dalle equazioni (2) e (3)

$$e \cdot U_0 = h \cdot f - W = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W$$

con $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ carica fondamentale

La costante di Planck è rilevabile valutabile pertanto come pendenza di un grafico in cui sull'asse y siano rappresentati i valori $E = e \cdot U_0$ e sull'asse x i valori

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

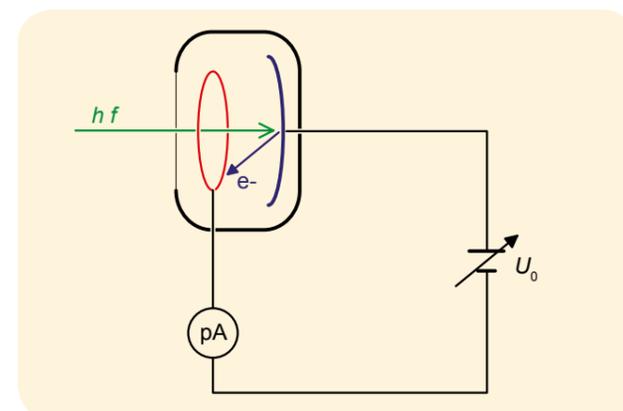


Fig. 1: Schema della disposizione di misurazione

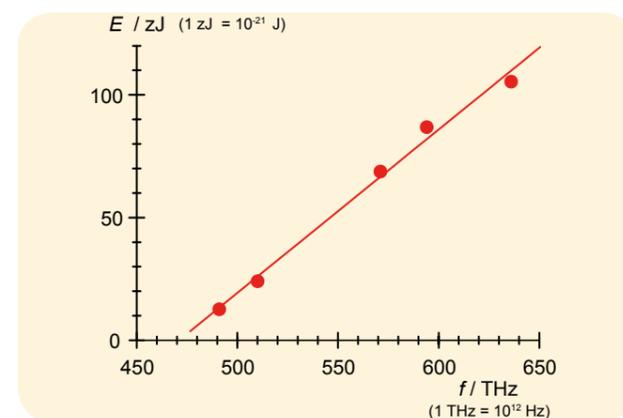


Fig. 2: Diagramma Energia-Frequenza

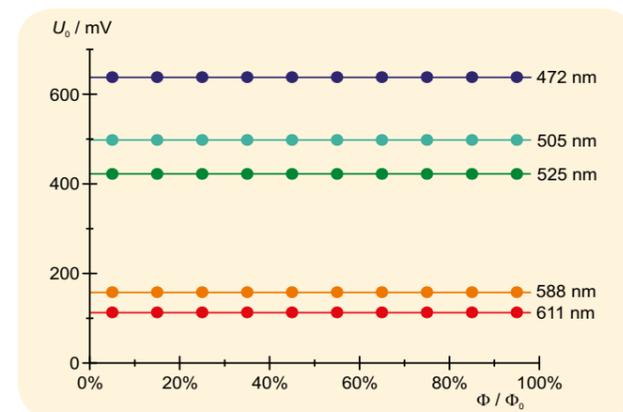


Fig. 3: Tensione limite U_0 in funzione dell'intensità

UE5010300

MICROSCOPIO A SCANSIONE PER EFFETTO TUNNEL

UE5010300



FUNZIONI

- Rappresentazione dei singoli atomi su una superficie in grafite e analisi della struttura reticolare e dei legami atomici.
- Rappresentazione di una superficie in oro e misurazione delle altezze dei "gradini" atomici.

SCOPO

Rappresentazione della struttura atomica della superficie di campioni di oro e grafite

RIASSUNTO

Un microscopio a scansione a effetto tunnel viene utilizzato per l'analisi microscopica di materiali elettricamente conduttori con risoluzione atomica. Come sonda viene utilizzato un ago appuntito che scansiona la superficie del campione a una distanza di pochi diametri atomici. In questo modo si instaura una corrente di tunneling tra sonda e campione poi mantenuta costante tramite la variazione della distanza tra campione e sonda. I rilevamenti vengono elaborati in un'immagine della superficie del campione che rappresenta la sovrapposizione della topografia del campione e della sua conduttività elettrica.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Microscopio a effetto tunnel	1012782
Ulteriormente consigliato:		
1	Campione TaSe ₂	1012875

BASI GENERALI

Un microscopio a scansione a effetto tunnel è dotato di una sonda molto appuntita che può essere avvicinata molto ad un campione di materiale elettricamente conduttore, così da generare una corrente di tunneling in presenza di una tensione tra campione e punta. Variazioni di distanza minime, anche di solo 0,01 nm tra punta e campione comportano variazioni misurabili della corrente di tunneling in quanto la probabilità dell'effetto tunnel dipende in modo esponenziale dalla distanza. In questo modo è possibile scansionare la struttura atomica della superficie, conducendo la punta riga per riga sull'intera superficie e regolando automaticamente la distanza in modo che la corrente di tunnel resti costante. Durante la reticolazione, i movimenti di autoregolazione vengono riprodotti come segnale di immagine nel computer. L'imma-

gine risultante sullo schermo è una sovrapposizione della topografia del campione e della conduttività elettrica della sua superficie.

Nell'esperimento viene dapprima realizzata la sonda con un filo di platino-iridio. Lo scopo è quello di far sì che la punta sia il più sottile possibile, formata idealmente solo da un atomo. Per la preparazione della superficie in grafite, questa viene pulita con una striscia adesiva. Per gli altri campioni è possibile solo fare attenzione all'assenza di grasso.

Per ottenere una buona immagine a risoluzione atomica, occorrono attenzione nell'esecuzione dell'esperimento, una buona punta e una superficie liscia del campione. Dopo qualsiasi variazione di un parametro di misura, scansionare la punta sempre più volte sopra il campione prima di acquisire l'immagine definitiva. Solo allora è utile modificare di nuovo un parametro di misura.

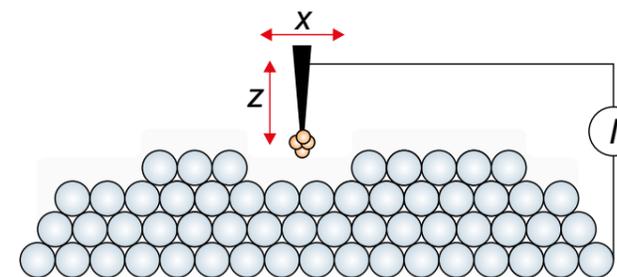


Fig. 1: Rappresentazione schematica della corrente di tunnel

ANALISI

Nell'immagine della struttura esagonale della grafite sono presenti in alternanza atomi di carbonio rappresentati in chiaro e scuro. Gli atomi chiari hanno vicini diretti nel livello sottostante mentre quelli scuri no. I primi appaiono più chiari in quanto hanno una maggiore densità di elettroni. Per misurare le distanze e gli angoli tra gli atomi così identificati si utilizzano gli strumenti di misura nel software.

Durante l'analisi della superficie dorata con una punta idonea si identificano livelli composti da un solo atomo, la cui altezza è misurabile.

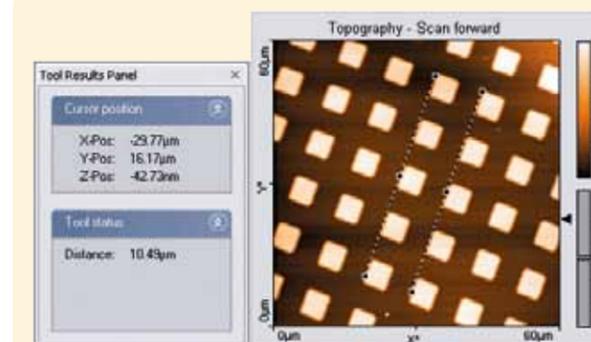
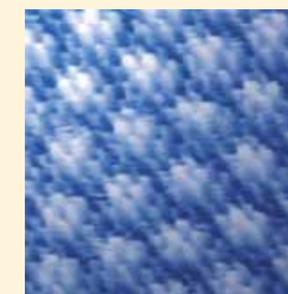


Fig. 2: Determinazione della distanza dell'atomo

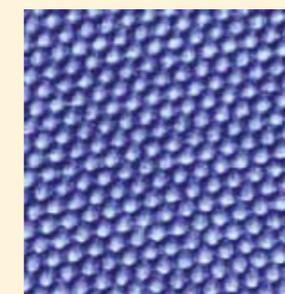
Rappresentazione di una superficie dorata

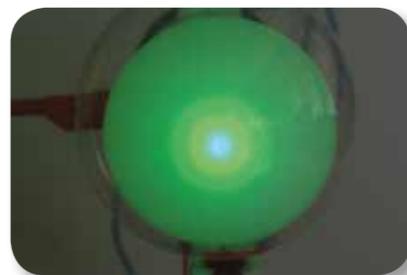


Rappresentazione di una superficie di TaS₂ con onde di densità di carica stazionarie



Rappresentazione della struttura esagonale di una superficie in grafite





SCOPO

Osservazione della diffrazione degli elettroni sulla grafite policristallina e conferma della natura ondulatoria degli elettroni

FUNZIONI

- Determinazione del diametro dei due anelli di diffrazione per diverse tensioni di accelerazione.
- Determinazione della lunghezza d'onda degli elettroni per diverse tensioni di accelerazione sulla base della condizione di Bragg.
- Conferma della relazione di De Broglie per la lunghezza d'onda.

RIASSUNTO

La diffrazione degli elettroni su una pellicola di grafite policristallina dimostra la natura ondulatoria degli elettroni. Sullo schermo fluorescente del tubo di diffrazione elettronica si osservano due anelli di diffrazione attorno a un punto centrale in direzione del fascio. Questi anelli sono da ricondurre alla diffrazione degli elettroni sui piani reticolari dei microcristalli della pellicola di grafite che soddisfano le condizioni di Bragg. L'osservazione è comparabile al risultato della diffrazione di Debye-Scherrer dei raggi X su una polvere di cristalli.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di diffrazione elettronica S	1013889
1	Portatubo S	1014525
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (230 V, 50/60 Hz)	1003310 o
	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (115 V, 50/60 Hz)	1003309
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

BASI GENERALI

Nel 1924 Louis de Broglie formulò l'ipotesi che sostanzialmente anche le particelle abbiano carattere ondulatorio, e che la loro lunghezza d'onda dipenda dall'impulso. Le sue considerazioni furono confermate da C. Davisson e L. Germer mediante la diffrazione di elettroni su nichel cristallino.

Per la dipendenza della lunghezza d'onda λ di una particella dal suo impulso p De Broglie indicò la relazione

$$(1) \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

h : Costante di Planck

Per quanto riguarda gli elettroni che hanno attraversato una tensione di accelerazione U_A questa relazione può essere trasformata nell'equazione

$$(2) \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U_A}}$$

m : Massa elettronica, e : Carica fondamentale

Se la tensione di accelerazione è per es. 4 kV, è possibile assegnare agli elettroni una lunghezza d'onda di circa 20 pm.

Nell'esperimento è stata dimostrata la natura ondulatoria degli elettroni in un tubo di vetro sotto vuoto mediante diffrazione su grafite policristallina. Sullo schermo fluorescente del tubo di vetro si osservano anelli di diffrazione attorno a un punto centrale in direzione del fascio, il cui diametro dipende dalla tensione di accelerazione. Essi sono provocati dalla diffrazione degli elettroni sui piani reticolari dei microcristalli che soddisfano la condizione di Bragg

$$(3) \quad 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda$$

ϑ : Angolo di Bragg, n : Ordine di diffrazione, d : Distanza dei piani reticolari

(vedi fig. 2). Il diametro dell'anello di diffrazione da correlare all'angolo di Bragg ϑ è

$$(4) \quad D = 2 \cdot L \cdot \tan 2\vartheta$$

L : Distanza tra la pellicola di grafite e lo schermo fluorescente.

Poiché la grafite presenta una struttura cristallina con due distanze dei piani reticolari $d_1 = 123 \text{ pm}$ e $d_2 = 213 \text{ pm}$ (vedi fig. 3), nel primo ordine di diffrazione ($n = 1$) si osservano due anelli di diffrazione con i diametri D_1 e D_2 .

ANALISI

Dai diametri dei due anelli di diffrazione e dalle distanze dei piani reticolari è possibile determinare la lunghezza d'onda λ applicando la condizione di Bragg. Per i piccoli angoli di apertura vale:

$$\lambda = 2 \cdot d_{1/2} \cdot \sin \left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{D_{1/2}}{2 \cdot L} \right) \right)$$

La lunghezza d'onda così calcolata viene confrontata con quella calcolata sulla base di (2).

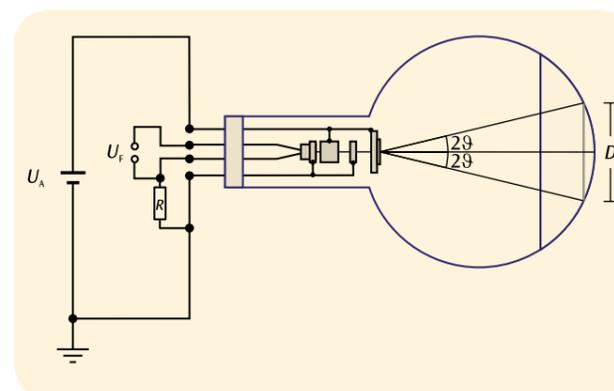


Fig. 1: Rappresentazione schematica del tubo di diffrazione elettronica

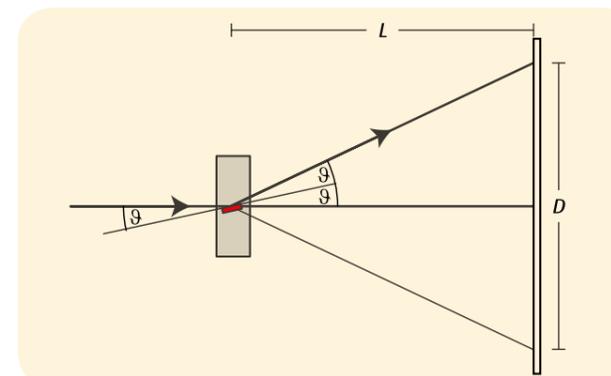


Fig. 2: Riflessione di Bragg su una serie di piani reticolari "adatta" di un cristallite selezionato nella pellicola di grafite

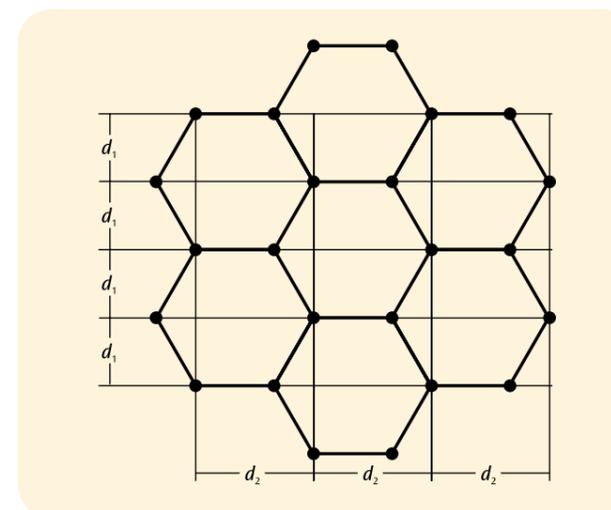


Fig. 3: Struttura cristallina della grafite

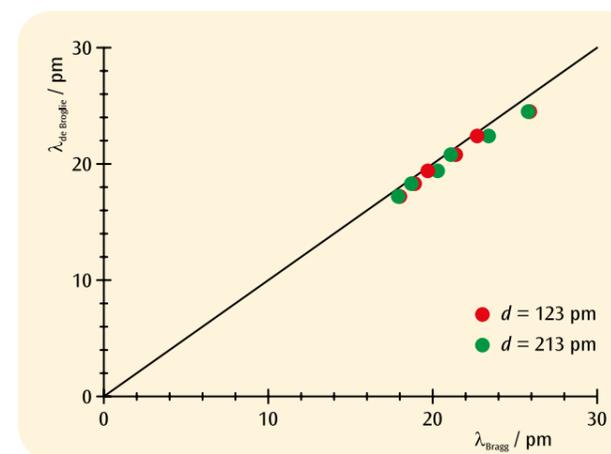


Fig. 4: Lunghezza d'onda determinata sulla base della condizione di Bragg in funzione della lunghezza d'onda di De Broglie





FUNZIONI

- Registrazione dello spettro a righe dell'idrogeno.
- Determinazione delle frequenze delle righe H_{α} , H_{β} , H_{γ} e H_{δ} dalla serie di Balmer dell'idrogeno.
- Calcolo della costante di Rydberg.
- Registrazione e valutazione degli spettri a righe dei gas nobili e dei vapori metallici.

SCOPO

Registrazione e valutazione della serie di Balmer dell'idrogeno e di altri spettri a righe nel campo visibile

RIASSUNTO

Gli spettri a righe di atomi che emettono luce sono caratteristici di ogni elemento chimico. La loro complessità aumenta però con l'aumentare del numero atomico degli elementi. Con l'aiuto del modello atomico di Bohr, invece, è possibile spiegare in modo semplice la parte dello spettro a righe dell'idrogeno atomico nel campo visibile.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Spettrometro LD, digitale	1018103
1	Alimentatore tubi spettrali (230 V, 50/60 Hz)	1000684
	Alimentatore tubi spettrali (115 V, 50/60 Hz)	1000683
1	Tubo spettrale idrogeno	1003409
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
Ulteriormente consigliato:		
1	Tubo spettrale elio	1003408
1	Tubo spettrale neon	1003413
1	Tubo spettrale argon	1003403
1	Tubo spettrale cripto	1003411
1	Tubo spettrale mercurio	1003412
1	Tubo spettrale bromo	1003404
1	Tubo spettrale iodio	1003410

BASI GENERALI

Gli atomi che emettono luce in un gas luminoso generano spettri di diverse righe singole, chiaramente separate l'una dall'altra, anche se possono accumularsi in singoli punti. Le righe sono caratteristiche per l'elemento chimico perché ogni riga corrisponde ad un passaggio tra due livelli precisi di energia all'interno del guscio elettronico dell'atomo.

Lo spettro di emissione dell'idrogeno atomico nel campo visibile presenta quattro righe H_{α} , H_{β} , H_{γ} e H_{δ} , che proseguono nel range degli ultravioletti per formare una serie completa. Per le frequenze di questa serie J.J. Balmer nel 1885 ha indicato una formula empirica:

$$(1) \quad \nu = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, 6 \dots$$

$R = 3290$ THz: Costante di Rydberg

Successivamente è stato possibile spiegare la serie di frequenze nell'ambito del modello atomico di Bohr, semplicemente con l'emissione di energia dell'elettrone durante il passaggio da gusci superiori al secondo guscio dell'atomo di idrogeno.

Già lo spettro a righe dell'atomo di elio contenente solo un elettrone in più è notevolmente più complesso di quello dell'atomo di idrogeno, poiché gli spin di entrambi gli elettroni si possono allineare in modo parallelo o antiparallelo e pertanto occupare, nell'atomo di elio, livelli di energia completamente diversi.

La complessità aumenta ancora per tutti gli altri elementi chimici. In ogni caso però lo spettro a righe è caratteristico dell'elemento.

ANALISI

Nella rappresentazione $\nu = f(1/n^2)$ le frequenze della serie di Balmer si trovano su una retta, associando alla riga H_{α} il numero $n = 3$, alla riga H_{β} il valore $n = 4$ e così via (vedi fig. 1).

L'incremento lineare corrisponde alla costante di Rydberg R . Il punto d'intersezione con l'asse x è $0,25$, dato che i passaggi della serie di Balmer sono orientati al livello di energia $n = 2$.

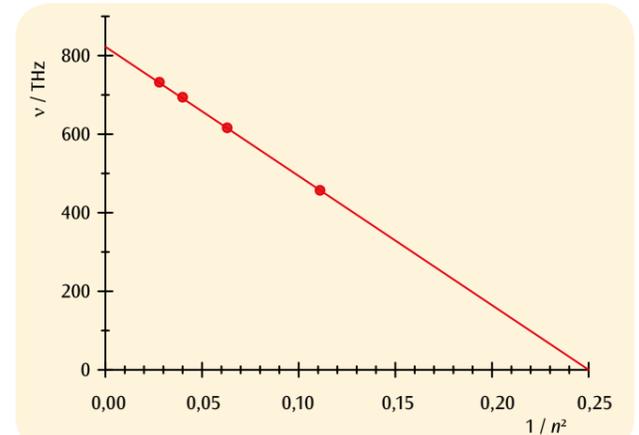


Fig. 1: Frequenze di transizione della serie di Balmer in funzione di $1/n^2$

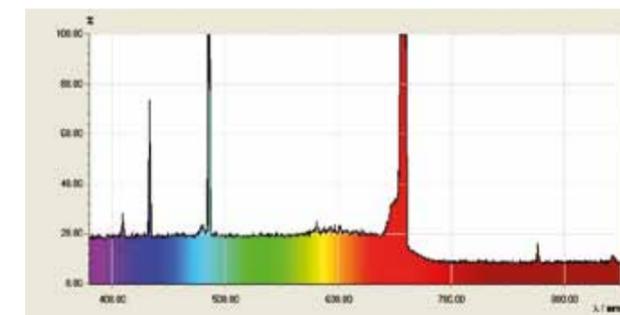


Fig. 2: Spettro a righe dell'idrogeno atomico

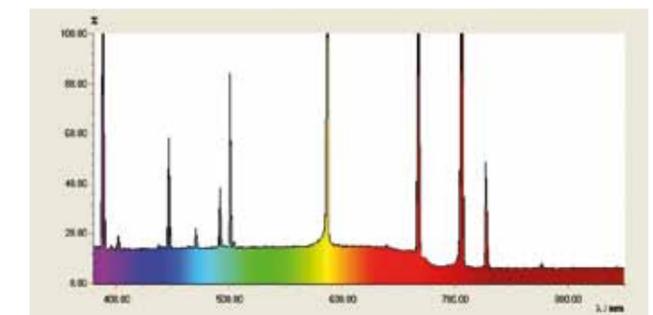


Fig. 3: Spettro a righe dell'elio

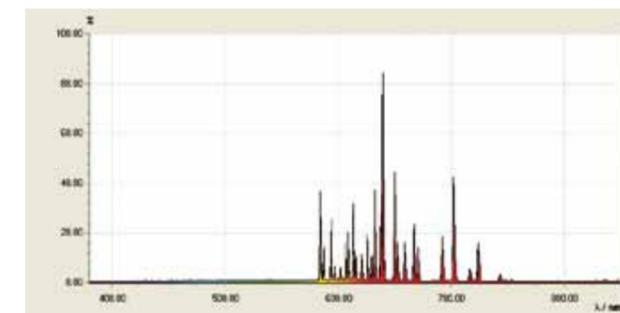


Fig. 4: Spettro a righe del neon

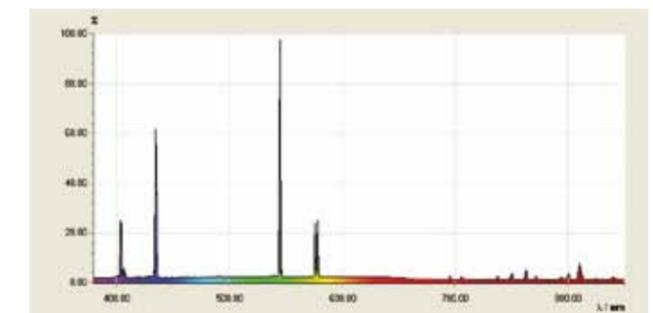


Fig. 5: Spettro a righe del mercurio



FUNZIONI

- Identificazione della struttura fine nella linea D del sodio.
- Misurazione delle linee di assorbimento nello spettro solare.
- Misurazione ad alta risoluzione di linee spettrali di altri atomi.

SCOPO

Misurazione ad alta risoluzione di linee di assorbimento ed emissione

RIASSUNTO

Il potere di risoluzione di uno spettrometro è spesso valutato in funzione della possibilità di separare le due linee D del sodio. Nell'esperimento si usa uno spettrometro digitale in grado di farlo.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Spettrometro HD, digitale	1018104
1	Bobina di reattanza per lampade spettrali (230 V, 50/60 Hz)	1003196 o
	Bobina di reattanza per lampade spettrali (115 V, 50/60 Hz)	1003195
1	Lampada spettrale Na	1003541
2	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
Ulteriormente consigliato:		
1	Lampada spettrale Hg 100	1003545
1	Lampada spettrale Hg/Cd	1003546

2

BASI GENERALI

Il potere di risoluzione di uno spettrometro definisce il limite delle prestazioni dell'apparecchio. Esso indica la distanza della lunghezza d'onda minima tra due linee spettrali vicine ancora separate. Una famosa coppia di linee è il doppietto della linea D del sodio, con una distanza della lunghezza d'onda pari a 0,6 nm. Il potere di risoluzione di uno spettrometro è spesso valutato in funzione della possibilità di separare le due linee.

La linea D del sodio si genera in emissione mediante la transizione dell'elettrone 3s del sodio dallo stato eccitato 3p allo stato di base. Poiché spin elettronico e momento angolare orbitale interagiscono (accoppiamento spin-orbita), lo stato 3p è suddiviso in due stati fini con momento angolare totale $j = 1/2$ e $j = 3/2$. La differenza di energia fra i due stati fini ammonta a 0,0021 eV, le lunghezze d'onda delle transizioni allo stato di base a 588,9950 nm (D2) e 589,5924 nm (D1).

Nell'esperimento si usa uno spettrometro digitale che permette di rendere visibile la struttura fine nella linea D del sodio. La scomposizione spettrale della luce incidente viene ottenuta per mezzo di un reticolo da 1200 linee/mm in un monocromatore Czerny-Turner. Il campo spettrale misurabile è compreso tra 400 nm e 700 nm, distribuito su un array CCD da 3600 pixel. Per ciascun intervallo di lunghezza d'onda da 0,08nm è dunque disponibile un pixel. Si ottiene in questo modo un potere di risoluzione pari a 0,5 nm. È pertanto possibile misurare la struttura fine nella linea D del sodio.

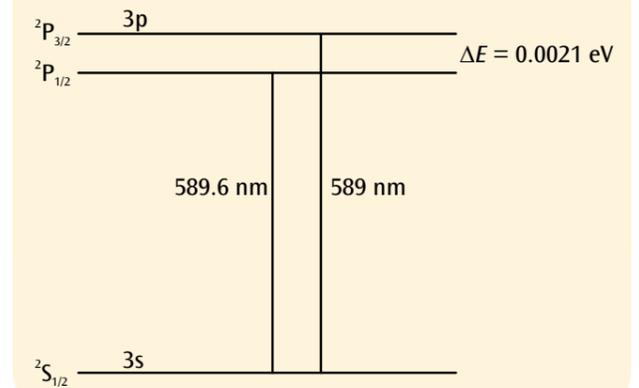


Fig. 1: Schema semplificato dei livelli energetici del sodio

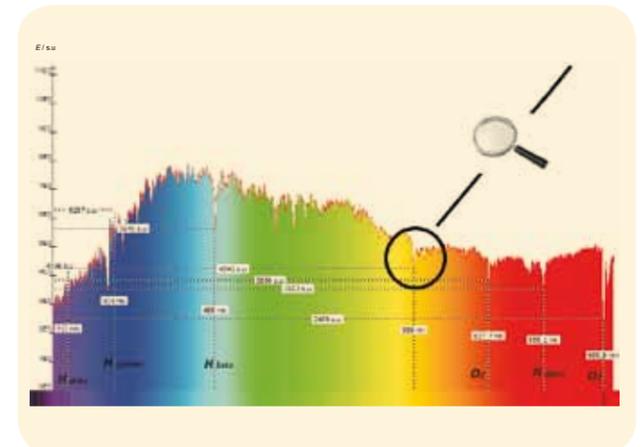


Fig. 2: Linee di assorbimento nello spettro solare

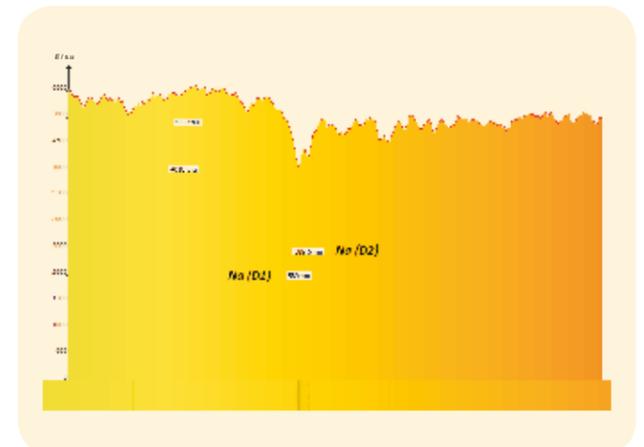
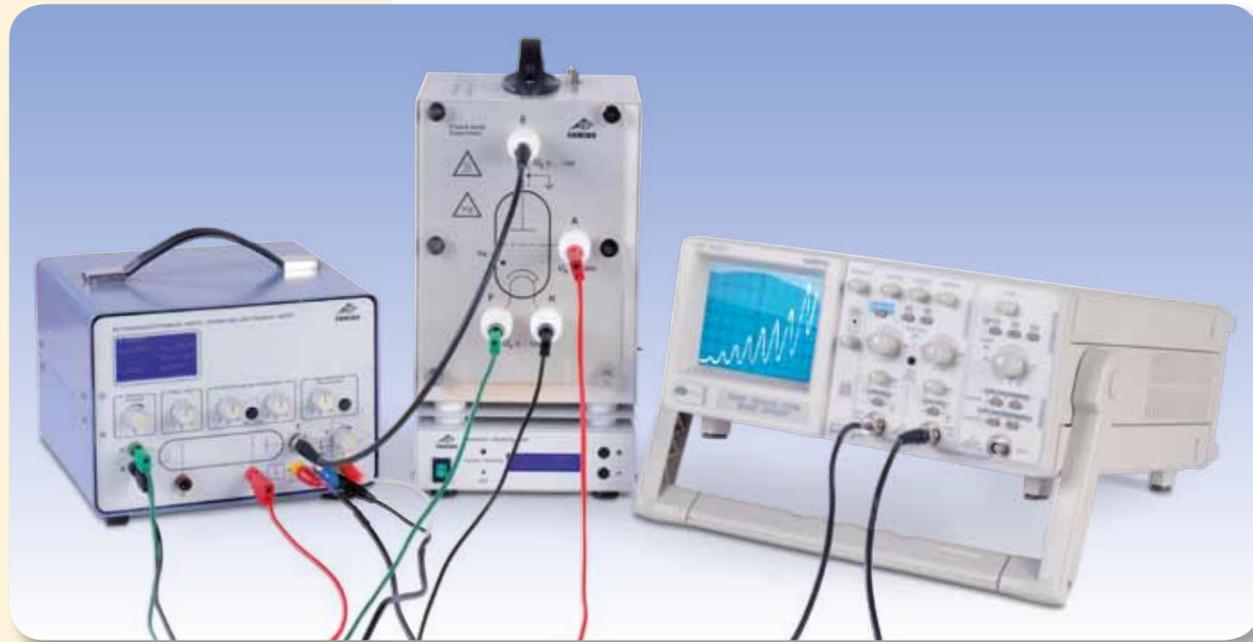


Fig. 3: Linee di assorbimento di sodio nello spettro solare



FUNZIONI

- Misurazione della corrente del raccogli-tore I come funzione della tensione U tra catodo e reticolo.
- Determinazione dell'intervallo ΔU dei livelli massimi o minimi di corrente.
- Confronto dell'intervallo di tensione con l'energia di eccitazione dell'atomo di mercurio.

SCOPO

Registrazione e analisi della curva di Franck-Hertz sul mercurio

RIASSUNTO

Nell'esperimento di Franck-Hertz sul mercurio si osserva l'emissione di energia degli elettroni attraverso urti anelastici durante l'attraversamento del vapore di mercurio. L'emissione di energia avviene gradualmente, in quanto l'urto provoca una transizione nell'atomo di mercurio. L'esperimento fornisce quindi una conferma del modello atomico di Bohr e della quantizzazione dei livelli energetici atomici.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di Franck-Hertz riempito con mercurio e dotato di forno (230 V, 50/60 Hz)	1006795 o
	Tubo di Franck-Hertz riempito con mercurio e dotato di forno (115 V, 50/60 Hz)	1006794
1	Apparecchio per l'esperimento di Franck-Hertz (230 V, 50/60 Hz)	1012819 o
	Apparecchio per l'esperimento di Franck-Hertz (115 V, 50/60 Hz)	1012818
1	Oscilloscopio analogico, 2x30 MHz	1002727
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Cavo ad alta frequenza	1002746
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Nel 1914 *James Franck e Gustav Hertz* riportarono che gli elettroni cedono gradualmente la loro energia durante l'attraversamento del vapore di mercurio e contemporaneamente si osserva l'emissione della linea ultravioletta ($\lambda = 254 \text{ nm}$) del mercurio. Alcuni mesi dopo, *Niels Bohr* trovò una prova del modello atomico da egli sviluppato. L'esperimento di Franck-Hertz sul mercurio è quindi un esperimento classico per la conferma della teoria quantica.

In un tubo di vetro evacuato sono disposti uno dietro l'altro un catodo riscaldato C, un reticolo G e un elettrodo del raccogli-tore A (vedi fig. 1). Dal catodo escono elettroni che vengono accelerati da una tensione U verso il reticolo. Attraverso il reticolo, gli elettroni raggiungono il raccogli-tore e contribuiscono alla corrente del raccogli-tore I , se la loro energia cinetica è sufficiente per il superamento della forza controelettromotrice U_{GA} tra reticolo e raccogli-tore. Inoltre, nel tubo di vetro si trova una goccia di mercurio che viene riscaldata a una tensione di vapore di circa 15 hPa.

Con la tensione U aumenta in primo luogo anche la corrente del raccogli-tore I , in quanto sempre più elettroni vengono catturati dal campo elettrico crescente derivante dalla nuvola di carica spaziale intorno al catodo.

Ad un determinato valore $U = U_1$ gli elettroni raggiungono tuttavia, poco prima del reticolo, un'energia cinetica sufficiente ad emettere l'energia per eccitare un atomo di mercurio attraverso un urto anelastico. La corrente del raccogli-tore diminuisce fino a quasi zero, in quanto dopo un urto gli elettroni non sono più in grado di superare la forza controelettromotrice verso il raccogli-tore.

Con l'ulteriore incremento della tensione, gli elettroni raggiungono l'energia necessaria per l'eccitazione per urto di un atomo di mercurio sempre prima del reticolo. Dopo l'urto, vengono di nuovo accelerati e ricevono energia cinetica sufficiente per arrivare al raccogli-tore. La corrente del raccogli-tore aumenta quindi di nuovo.

In caso di tensione ancora maggiore $U = U_2$, dopo il primo urto gli elettroni assorbono una seconda volta l'energia per poter eccitare un secondo atomo di mercurio. La corrente del raccogli-tore diminuisce anch'essa drasticamente a questa tensione per riaumentare con l'incremento della tensione, fino a quando torna infine a diminuire drasticamente per una terza volta e altre volte in caso di tensioni ancora maggiori.

NOTA

Il primo valore di tensione U_1 non si trova a 4,9 V, ma è sfalsato della cosiddetta tensione di contatto tra catodo e reticolo.

ANALISI

Le tensioni U_1, U_2, U_3, \dots , a cui la corrente diminuisce drasticamente nella caratteristica misurata $I(U)$ presentano l'intervallo costante $\Delta U = 4,9 \text{ V}$. Questo intervallo corrisponde all'energia di eccitazione $E_{Hg} = 4,9 \text{ eV}$ ($\lambda = 254 \text{ nm}$) degli atomi di mercurio rispetto allo stato di base 1S_0 nel primo stato 3P_1 . Ossia:

$$(1) \quad E_{Hg} = e \cdot \Delta U$$

e : Carica fondamentale

Il risultato di misurazione è quindi da ricondursi all'assorbimento di energia discreto degli atomi di mercurio in caso di urto anelastico e quindi all'emissione connessa di una quantità di energia fissa da parte degli elettroni.

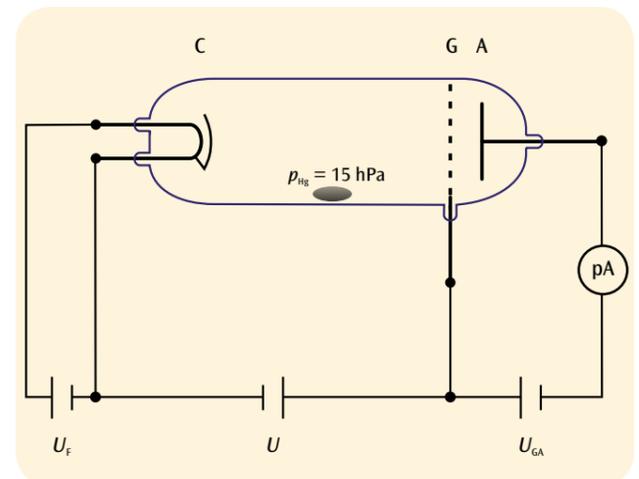


Fig. 1: Struttura schematica per la registrazione della curva di Franck-Hertz sul mercurio

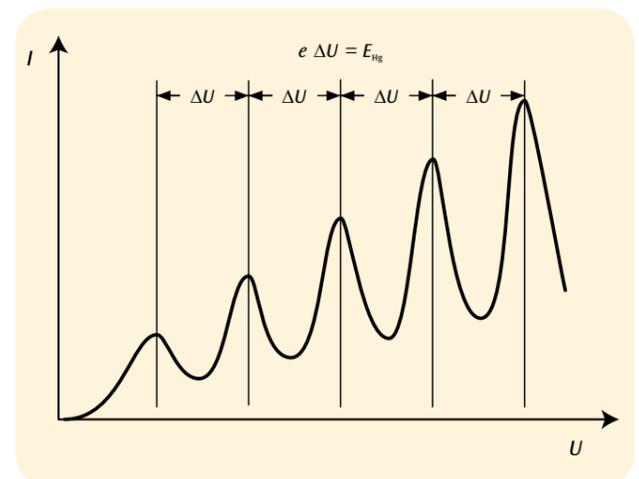
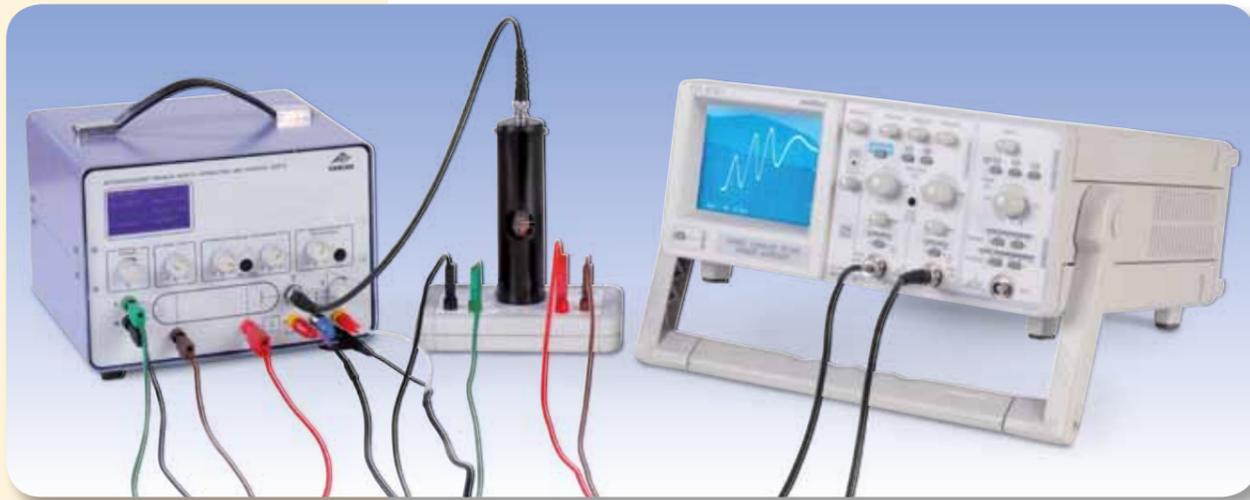


Fig. 2: Corrente del raccogli-tore I a seconda della tensione di accelerazione U



FUNZIONI

- Misurazione della corrente del raccogli-tore I come funzione della tensione U tra catodo e reticolo.
- Confronto della posizione dei livelli massimi di corrente con le energie di eccitazione degli atomi di neon.
- Osservazione della luce emessa dagli atomi di neon eccitati.
- Determinazione del numero di strati luminosi per diverse tensioni di accelerazione.

SCOPO

Registrazione e analisi della curva di Franck-Hertz sul neon e osservazione dell'emissione luminosa

RIASSUNTO

Nell'esperimento di Franck-Hertz sul neon si osserva l'emissione di energia degli elettroni attraverso un urto anelastico durante l'attraversamento del gas neon. L'emissione di energia avviene solo in certi casi, in quanto gli urti provocano transizioni caratteristiche negli atomi di neon. Gli atomi eccitati emettono luce nel campo visibile.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo di Franck-Hertz riempito con neon	1000912
1	Apparecchio per l'esperimento di Franck-Hertz (230 V, 50/60 Hz)	1012819 o
	Apparecchio per l'esperimento di Franck-Hertz (115 V, 50/60 Hz)	1012818
1	Oscilloscopio analogico, 2x30 MHz	1002727
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Cavo ad alta frequenza	1002746
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843

2

BASI GENERALI

Nell'esperimento di Franck-Hertz sul neon, gli atomi di neon vengono eccitati da un urto anelastico degli elettroni. Gli atomi eccitati emettono luce visibile che può essere osservata direttamente. È possibile riconoscere zone a elevata densità luminosa o di eccitazione, la cui posizione tra catodo e reticolo dipende dalla differenza di tensione tra i due.

In un tubo di vetro evacuato e riempito con gas neon ad una pressione del gas di 10 hPa sono disposti uno dietro l'altro un catodo riscaldato C, un reticolo di controllo S, un reticolo G e un elettrodo del raccogli-tore A (vedi fig. 1). Dal catodo escono elettroni che vengono accelerati da una tensione U verso il reticolo. Attraverso il reticolo, gli elettroni raggiungono il raccogli-tore e contribuiscono alla corrente del raccogli-tore I , se la loro energia cinetica è sufficiente per il superamento della forza controelettromotrice U_{CA} tra reticolo e raccogli-tore. La curva $I(U)$ (vedi fig. 2) presenta un modello simile all'esperimento di Franck-Hertz sul mercurio, tuttavia in intervalli di tensione di circa 19 V. Ciò significa che ad un determinato valore $U = U_1$ la corrente del raccogli-tore diminuisce quasi fino a zero, in quanto gli elettroni poco prima del reticolo raggiungono energia cinetica sufficiente per emettere l'energia necessaria per l'eccitazione di un atomo di neon attraverso l'urto anelastico. Contemporaneamente, in prossimità del reticolo si osserva una luce di un rosso aranciato, in quanto una delle transizioni degli atomi di neon in emissione emette luce di questo colore. La zona luminosa si sposta verso il catodo con l'incremento della tensione U e contemporaneamente la corrente del raccogli-tore I aumenta di nuovo. In caso di tensione ancora maggiore $U = U_2$ la corrente del raccogli-tore diminuisce anch'essa drasticamente e si osservano due zone luminose: una al centro tra catodo e reticolo e una direttamente sul reticolo. Qui, dopo il primo urto, gli elettroni possono riassorbire energia una seconda volta in modo da poter eccitare un secondo atomo di neon. Con l'ulteriore aumento delle tensioni si osservano infine ulteriori diminuzioni della corrente del raccogli-tore e ulteriori strati luminosi.

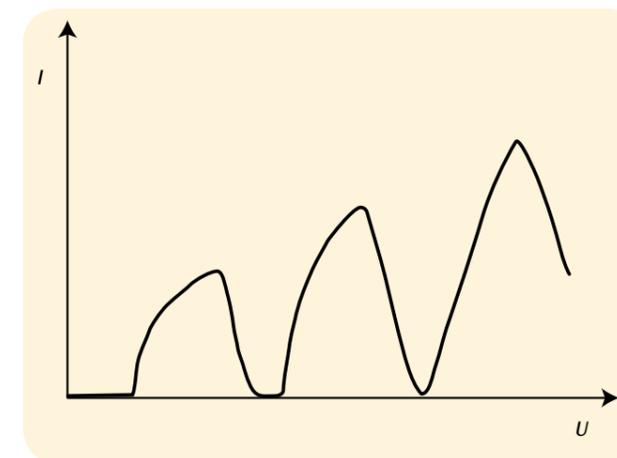


Fig. 2: Corrente del raccogli-tore I a seconda della tensione di accelerazione U

ANALISI

La caratteristica $I(U)$ presenta più livelli massimi e minimi: l'intervallo dei livelli minimi ammonta a circa $\Delta U = 19$ V. Questo corrisponde alle energie di eccitazione dei livelli 3p nell'atomo di neon (vedi fig. 3) che vengono eccitati con elevata probabilità. L'eccitazione dei livelli 3s non può essere completamente trascurata e comporta una sottostruttura nella caratteristica $I(U)$. Le zone luminose sono zone a elevata densità di eccitazione e corrispondono alle diminuzioni di corrente nella caratteristica $I(U)$. Viene generato di volta in volta uno strato luminoso supplementare se si aumenta U di ca. 19 V.

NOTA

Il primo livello minimo non si trova a 19 V, ma è sfalsato della cosiddetta tensione di contatto tra catodo e reticolo. Le linee spettrali emesse possono essere osservate e misurate senza problemi con lo spettroscopio (1003184) utilizzando la tensione massima U .

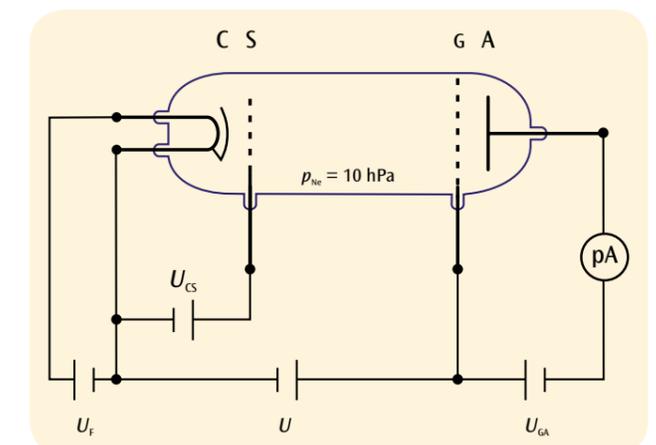


Fig. 1: Struttura schematica per la registrazione della curva di Franck-Hertz sul neon

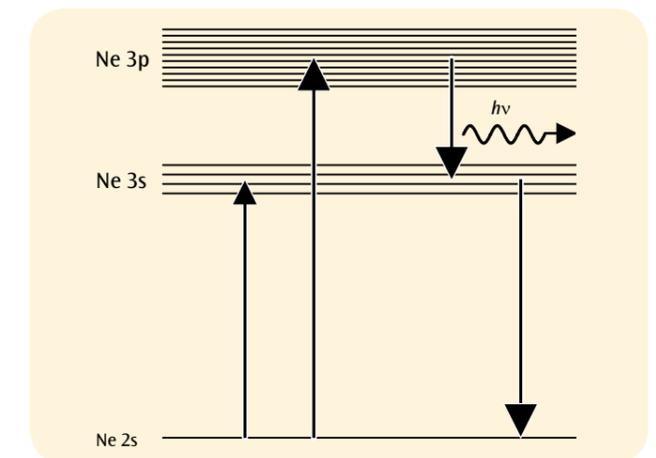


Fig. 3: Diagramma energetico degli atomi di neon



FUNZIONI

- Misurazione della corrente del collettore I_R in funzione della tensione di accelerazione U_A .
- Confronto della posizione dei livelli massimi di corrente con i potenziali critici dell'atomo di elio.
- Identificazione della struttura doppia nello schema dei livelli energetici dell'elio (ortoelio e paraelio).

SCOPO

Determinazione dei potenziali critici dell'atomo di elio

RIASSUNTO

I potenziali critici indicano tutte le energie di eccitazione e ionizzazione presenti nel guscio elettronico di un atomo. I relativi stati vengono eccitati ad esempio da un urto anelastico di elettroni. Se l'energia cinetica dell'elettrone corrisponde ad un potenziale critico, l'elettrone perde completamente la sua energia cinetica nell'urto anelastico. Questo fenomeno viene utilizzato in un esperimento per la determinazione dei potenziali critici attribuito a G. Hertz.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Tubo per potenziale critico S con pieno di He	1000620
1	Portatubo S	1014525
1	Unità di comando per tubo per potenziale critico (230 V, 50/60 Hz)	1008506 o
1	Unità di comando per tubo per potenziale critico (115 V, 50/60 Hz)	1000633
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843
Ulteriormente consigliato:		
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
1	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544

3

BASI GENERALI

La denominazione “potenziali critici” comprende tutte le energie di eccitazione e ionizzazione presenti nel guscio elettronico di un atomo. I relativi stati atomici possono essere eccitati ad esempio da un urto anelastico di elettroni. Se l'energia cinetica dell'elettrone corrisponde esattamente ad un potenziale critico, l'elettrone cede completamente all'atomo la sua energia cinetica nell'urto anelastico. Questo fenomeno può essere utilizzato in un esperimento per la determinazione dei potenziali critici attribuito a G. Hertz.

In un tubo sotto vuoto riempito con elio dopo il passaggio di una tensione di accelerazione U_A gli elettroni liberi si muovono in modo divergente attraverso uno spazio con potenziale costante. Per evitare cariche nella parete del tubo, la parte interna è rivestita con un materiale conduttivo e collegata elettricamente all'anodo A (vedi fig. 1). Nel tubo è disposto un elettrodo collettore a forma di anello R, che non viene colpito dal fascio di elettroni divergenti, sebbene presenti un potenziale leggermente superiore.

Viene misurata la corrente I_R all'anello collettore, compresa nel range dei picoampere, in funzione della tensione di accelerazione U_A . La corrente presenta livelli massimi caratteristici, in quanto gli elettroni nel loro percorso attraverso il tubo subiscono urti anelastici con gli atomi di elio: se la loro energia cinetica

$$(1) \quad E = e \cdot U_A$$

e : Carica fondamentale

corrisponde esattamente a un potenziale critico dell'atomo di elio, essi cedono l'energia cinetica completamente agli atomi di elio. In questo caso possono essere attratti verso l'anello collettore e contribuire ad una corrente del collettore I_R superiore.

All'aumentare della tensione di accelerazione è possibile eccitare livelli sempre superiori nell'elio, finché infine l'energia cinetica dell'elettrone è sufficiente per la ionizzazione dell'atomo di elio. Da questo valore la corrente del collettore aumenta costantemente all'aumentare della tensione di accelerazione.

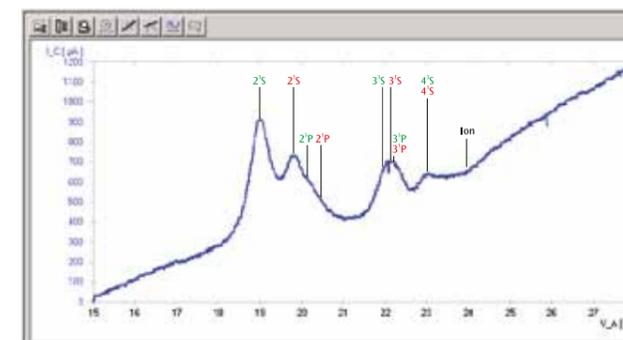


Fig. 3: Corrente del collettore I_R in funzione della tensione di accelerazione U_A

ANALISI

Per l'analisi vengono confrontate le posizioni dei livelli massimi di corrente con i valori della letteratura per le energie di eccitazione e ionizzazione dell'atomo di elio. È necessario considerare che rispetto ai valori della letteratura i livelli massimi sono sfalsati della cosiddetta tensione di contatto tra catodo e anodo.

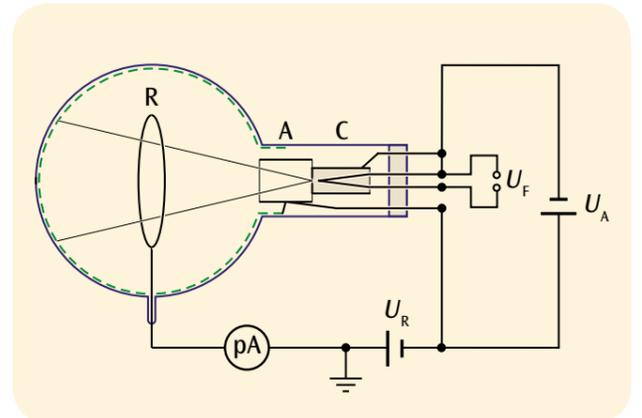


Fig. 1: Rappresentazione schematica del tubo di potenziali critici

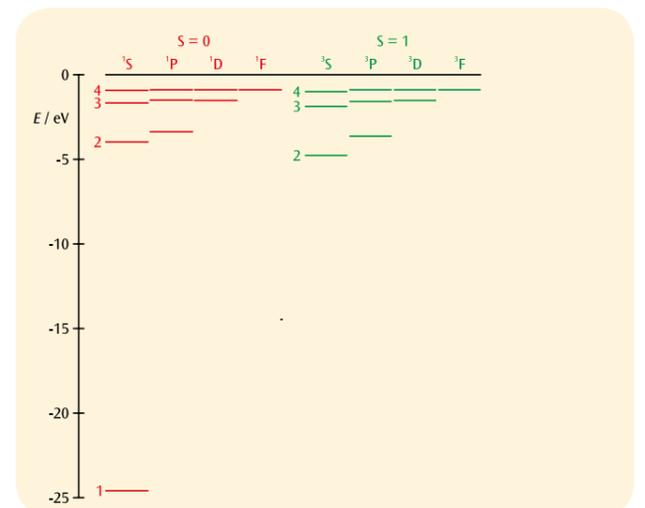


Fig. 2: Schema dei livelli energetici dell'elio
Rosso: spin totale $S = 0$ (paraelio),
verde: spin totale $S = 1$ (ortoelio)



FUNZIONI

- Osservazione della curva di risonanza del DPPH.
- Determinazione della frequenza di risonanza in funzione del campo magnetico.
- Determinazione del fattore di Landé dell'elettrone libero.

SCOPO

Dimostrazione della risonanza di spin elettronico su DPPH

RIASSUNTO

La risonanza di spin elettronico (ESR) si fonda sull'assorbimento di energia da parte di sostanze con elettroni spaiati, immerse in un campo magnetico continuo esterno. L'energia viene fornita da un campo alternato ad alta frequenza diretto perpendicolarmente al campo continuo. Se la frequenza del campo alternato coincide con la frequenza di risonanza, l'impedenza della bobina di trasmissione riempita con la sostanza varia in maniera risonante e sull'oscilloscopio è osservabile una deviazione. Una sostanza adatta a questo scopo è il difenil-picril-idrazile (DPPH).

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Kit di base per ESR/NMR (230 V, 50/60 Hz)	1000638 o
	Kit di base per ESR/NMR (115 V, 50/60 Hz)	1000637
1	Kit aggiuntivo ESR	1000640
1	Oscilloscopio analogico, 2x30 MHz	1002727
2	Cavo ad alta frequenza	1002746

3

BASI GENERALI

La risonanza a di spin elettronico (ESR) si fonda sull'assorbimento di energia da parte di sostanze con elettroni spaiati, immerse in un campo magnetico continuo esterno. L'energia viene fornita da un campo alternato ad alta frequenza diretto perpendicolarmente al campo continuo. Se la frequenza del campo alternato coincide con la frequenza di risonanza, l'impedenza della bobina di trasmissione riempita con la sostanza varia in maniera risonante e sull'oscilloscopio è osservabile una deviazione. La causa dell'assorbimento di risonanza è il „ribaltamento“ del momento magnetico dell'elettrone libero. La frequenza di risonanza dipende dall'intensità del campo continuo, la larghezza del segnale di risonanza dalla sua omogeneità.

Il momento magnetico di un elettrone, derivante puramente dallo spin, assume nel campo magnetico B gli stati discreti

$$(1) \quad E_m = -g_l \cdot \mu_B \cdot m \cdot B, \quad m = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

$$\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T} : \text{Magnetone di Bohr}$$

$$g_l = 2,0023: \text{Fattore di Landé.}$$

La distanza tra i due livelli ammonta pertanto a

$$(2) \quad \Delta E = g_l \cdot \mu_B \cdot B$$

La risonanza è raggiunta esattamente nel momento in cui la frequenza f del campo alternato applicato soddisfa la condizione

$$(3) \quad h \cdot f = \Delta E,$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} : \text{Costante di Planck.}$$

L'esperimento dimostra la risonanza a di spin elettronico su difenil-picril-idrazile (DPPH), un composto organico le cui molecole presentano un elettrone spaiato. Il campo magnetico continuo viene generato da una coppia di bobine di Helmholtz e varia a dente di sega fra lo zero e il valore massimo $B_{\max} = 3,5 \text{ mT}$. Si cerca ora la frequenza f a cui si ha assorbimento di in funzione del campo magnetico variabile.

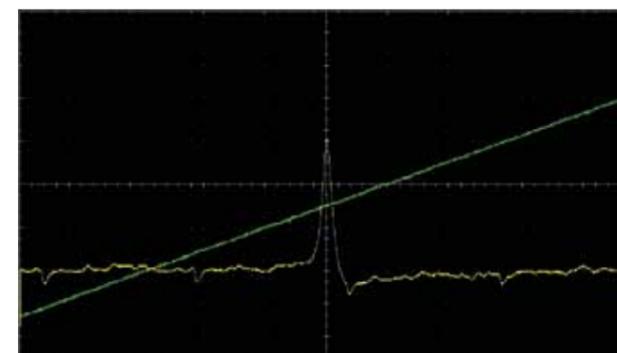


Fig. 1: Segnale di assorbimento e andamento cronologico del campo magnetico nella risonanza a di spin elettronico su DPPH

ANALISI

Da (2) e (3) si evince la seguente correlazione tra la frequenza di risonanza f e il campo magnetico B .

$$f = g_l \cdot \frac{\mu_B}{h} \cdot B$$

I valori misurati si trovano, nei limiti della precisione della misura, su una retta passante per l'origine la cui pendenza permette di determinare il fattore di Landé.

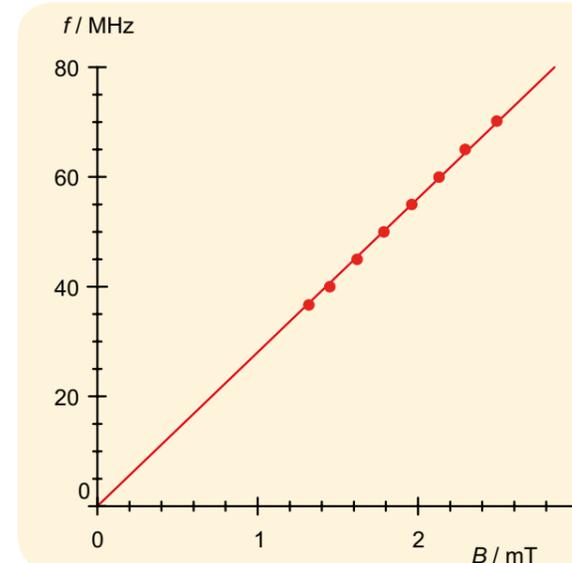


Fig. 2: Frequenza di risonanza f in funzione del campo magnetico B

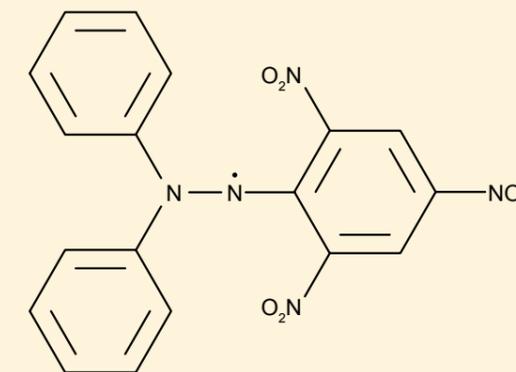


Fig. 3: Struttura molecolare DPPH



FUNZIONI

- Dimostrazione della risonanza magnetica nucleare su glicerina, polistirolo e teflon.
- Determinazione delle frequenze di risonanza con campo magnetico fisso.
- Confronto con i fattori g di nuclei ^1H e ^{19}F .

SCOPO

Dimostrazione e confronto della risonanza magnetica nucleare su glicerina, polistirolo e teflon

RIASSUNTO

La risonanza magnetica nucleare (NMR) si fonda sull'assorbimento di energia da parte di sostanze con nuclei dotati di momento magnetico, immerse in un campo magnetico continuo esterno. L'energia viene fornita da un campo alternato ad alta frequenza diretto perpendicolarmente al campo continuo. Se la frequenza del campo alternato coincide con la frequenza di risonanza, l'impedenza della bobina di trasmissione riempita con la sostanza varia in maniera risonante e sull'oscilloscopio è osservabile una deviazione. Sostanze adatte a questo scopo sono la glicerina, il polistirolo e il teflon, in cui si utilizza il momento magnetico del nucleo ^1H o ^{19}F .

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Kit di base per ESR/NMR (230 V, 50/60 Hz)	1000638 o
	Kit di base per ESR/NMR (115 V, 50/60 Hz)	1000637
1	Kit aggiuntivo NMR	1000642
1	Oscilloscopio analogico, 2x30 MHz	1002727
2	Cavo ad alta frequenza	1002746

3

BASI GENERALI

La risonanza magnetica nucleare (NMR) si fonda sull'assorbimento di energia da parte di sostanze con nuclei dotati di momento magnetico, immerse in un campo magnetico continuo esterno. L'energia viene fornita da un campo alternato ad alta frequenza diretto perpendicolarmente al campo continuo. Se la frequenza del campo alternato coincide con la frequenza di risonanza, l'impedenza della bobina di trasmissione riempita con la sostanza varia in maniera risonante e sull'oscilloscopio è osservabile una deviazione. La causa dell'assorbimento di risonanza è il passaggio fra uno stato energetico e l'altro del momento magnetico del nucleo nel campo magnetico. La frequenza di risonanza dipende dall'intensità del campo continuo, mentre la larghezza del segnale di risonanza dipende dalla sua omogeneità.

Il momento magnetico di un nucleo con spin nucleare I assume nel campo magnetico B gli stati discreti

$$(1) \quad E_m = -g_i \cdot \mu_k \cdot m \cdot B, \quad m = -I, -I + 1, \dots, I$$

$$\mu_k = 5,051 \cdot 10^{-27} \frac{\text{J}}{\text{T}} : \text{Magnetone nucleare}$$

g_i : Fattore g del nucleo atomico.

La distanza tra i due livelli ammonta pertanto a

$$(2) \quad \Delta E = g_i \cdot \mu_k \cdot B$$

Quando gli stati energetici soddisfano la condizione di risonanza, un campo magnetico con frequenza f disposto perpendicolarmente al campo magnetico eccita i passaggi fra stati energetici vicini. La risonanza è raggiunta esattamente nel momento in cui la frequenza f del campo alternato applicato soddisfa la condizione

$$(3) \quad h \cdot f = \Delta E,$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} : \text{Costante di Planck.}$$

Con l'esperimento si dimostra la risonanza magnetica nucleare di glicerina, polistirolo e teflon derivante per la glicerina e il polistirolo dalla presenza dell'isotopo ^1H e per il teflon dalla presenza dell'isotopo ^{19}F . Il campo magnetico continuo viene per la maggior parte generato con un magnete permanente; a ciò si aggiunge il campo magnetico di una coppia di bobine di Helmholtz con andamento a dente di sega fra lo zero e il valore massimo. Si cerca ora la frequenza f a cui si ha assorbimento di risonanza in un campo magnetico stabilito corrispondente, per semplificare, al centro del dente di sega.

ANALISI

Il fattore g dei nuclei coinvolti ammonta secondo la letteratura a: $g_i(^1\text{H}) = 5,5869$ e $g_i(^{19}\text{F}) = 5,255$.

Da (2) e (3) si evince la frequenza di risonanza f in un campo magnetico B .

$$f = g_i \cdot \frac{\mu_k}{h} \cdot B$$

Le frequenze di risonanza per diversi nuclei nello stesso campo magnetico stanno pertanto nel medesimo rapporto dei fattori g :

$$\frac{f(^{19}\text{F})}{f(^1\text{H})} = \frac{g_i(^{19}\text{F})}{g_i(^1\text{H})} = 94\%$$

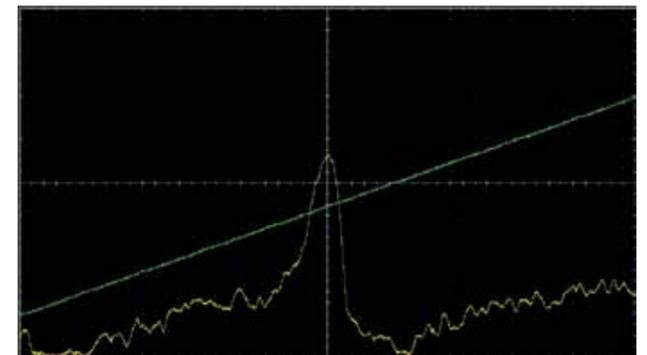


Fig. 1: Risonanza magnetica nucleare della glicerina ($f = 12,854 \text{ MHz}$)

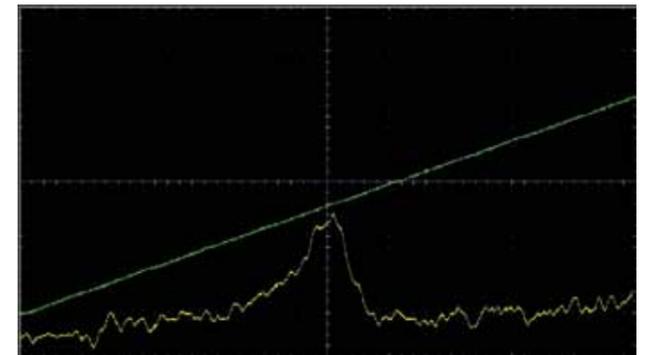


Fig. 2: Risonanza magnetica nucleare del polistirolo ($f = 12,854 \text{ MHz}$)

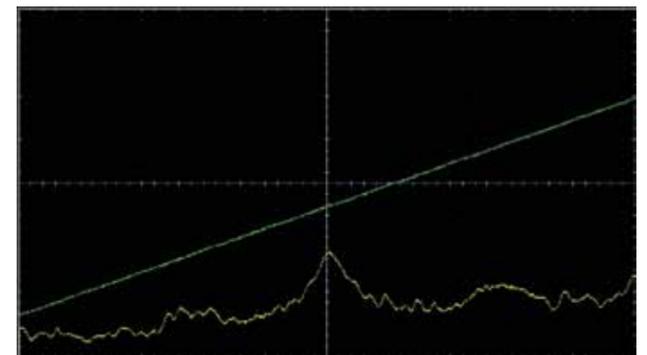


Fig. 3: Risonanza magnetica nucleare del teflon ($f = 12,1 \text{ MHz}$)



SCOPO

Determinazione della banda proibita del germanio

RIASSUNTO

I semiconduttori mostrano una conducibilità elettrica misurabile solo a temperature non troppo basse. La causa di tale dipendenza dalla temperatura è la struttura a bande formata dai livelli energetici degli elettroni, con una banda di valenza e una banda di conduzione e, nel caso di un semiconduttore non drogato, una zona intermedia che non può essere occupata da elettroni. Aumentando la temperatura, sempre più elettroni vengono attivati termicamente e passano dalla banda di valenza a quella di conduzione lasciando nella prima delle "buche" o lacune.

Queste lacune si muovono sotto l'influsso di un campo elettrico come se fossero particelle cariche positivamente e contribuiscono così come gli elettroni alla densità di corrente. Per la determinazione della conducibilità nel germanio puro non drogato, nell'esperimento viene inviata una corrente costante attraverso il cristallo e misurata la caduta di tensione corrispondente in funzione della temperatura. I dati misurati possono in buona approssimazione essere descritti con una funzione esponenziale in cui la banda proibita compare come parametro.

FUNZIONI

- Misurazione della conducibilità elettrica del germanio non drogato in funzione della temperatura.
- Determinazione della banda proibita fra banda di valenza e banda di conduzione.

NOTA

Nella realtà, la conducibilità intrinseca dei semiconduttori non drogati ha un ruolo secondario. Di norma, i cristalli presentano impurità. Spesso anche cristalli molto puri vengono resi conduttivi grazie al drogaggio con atomi donatori o accettori. L'influsso di questo drogaggio risulta evidente quando le analisi qui rappresentate vengono eseguite per il confronto anche su germanio drogato p e drogato n. La conducibilità dei cristalli drogati è notevolmente più alta a temperatura ambiente rispetto a quella del cristallo puro, ma a temperature elevate si avvicina alla conducibilità intrinseca, vedere Fig. 4.

La dipendenza dalla temperatura del coefficiente di Hall dei cristalli di germanio utilizzati viene analizzata più in dettaglio nell'esperimento UE6020200.



APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Ge non drogato su circuito stampato	1008522
1	Apparecchio di base per effetto Hall	1009934
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Trasformatore con raddrizzatore 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1003316
	Trasformatore con raddrizzatore 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1003315
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002849
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75cm, rosso/blu	1017718

Ulteriormente consigliato:

1	p-Ge su circuito stampato	1009810
	n-Ge su circuito stampato	1009760
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	3B NETlab™	1000544

BASI GENERALI

La **conducibilità elettrica** è una grandezza fortemente dipendente dal materiale. Si usa quindi classificare i materiali in base alla loro conducibilità elettrica. Per **semiconduttore** s'intende un corpo solido che mostra una conducibilità elettrica misurabile solamente oltre una certa temperatura. La causa di tale dipendenza dalla temperatura è la struttura a bande formata dai livelli energetici degli elettroni, con una banda di valenza e una banda di conduzione e, nel caso di un semiconduttore non drogato, una zona intermedia che non può essere occupata da elettroni.

In linea di principio, la banda di valenza è la banda maggiormente occupata dagli elettroni e la banda di conduzione quella più prossima non occupata. Il gap fra le due bande si chiama banda proi-

bita E_g ed è una grandezza che dipende dal materiale. Nel caso del germanio, essa ammonta a circa 0,7 eV. Aumentando la temperatura, sempre più elettroni vengono attivati termicamente e passano dalla banda di valenza a quella di conduzione lasciando nella prima delle "buche". Queste buche – dette anche lacune o vacanze elettroniche – si muovono sotto l'influsso di un campo elettrico E come particelle cariche positivamente e contribuiscono così come gli elettroni alla densità di corrente

(1)
$$j = \sigma \cdot E$$

$$\sigma: \text{Conducibilità elettrica del materiale semiconduttore}$$
 (vedi Fig.1). Gli elettroni e le lacune si muovono con velocità medie di deriva differenti

(2)
$$v_n = -\mu_n \cdot E \quad e \quad v_p = \mu_p \cdot E$$

$$\mu_n: \text{Mobilità degli elettroni}$$

$$\mu_p: \text{Mobilità delle lacune elettroniche}$$
 La conduzione elettrica, resa possibile tramite l'eccitazione di elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione, viene chiamata conduzione intrinseca.

Il numero degli elettroni nella banda di conduzione corrisponde all'equilibrio termico al numero delle lacune elettroniche nella banda di valenza. La densità di corrente in conduzione intrinseca è quindi definibile come

(3)
$$j_i = -e \cdot n_i \cdot v_n + e \cdot n_i \cdot v_p = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E;$$
 vale a dire che la conducibilità intrinseca è

(4)
$$\sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p),$$
 mentre la dipendenza dalla temperatura della densità dei portatori di carica n_i ovvero degli elettroni e delle lacune elettroniche è data da

(5)
$$n_i = 2 \cdot \left(\frac{2\pi}{h^2} \cdot \sqrt{m_n m_p} \cdot kT \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$k = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} : \text{Costante di Boltzmann,}$$

$$h: \text{Costante di Planck}$$

$$m_n: \text{Massa efficace degli elettroni}$$

$$m_p: \text{Massa efficace delle lacune elettroniche}$$

$$T: \text{Temperatura campione}$$
 Anche le mobilità μ_n e μ_p dipendono dalla temperatura. Nel range di temperature al di sopra della temperatura ambiente è vale

(6)
$$\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$
 Il termine dominante della dipendenza dalla temperatura della conducibilità è tuttavia dato dalla funzione esponenziale. Pertanto, la conducibilità intrinseca per temperature più elevate è rappresentabile nella forma

(7)
$$\sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right).$$

Per la determinazione della conducibilità nel germanio puro non drogato, nell'esperimento viene inviata una corrente costante I attraverso il cristallo e misurata la caduta di tensione corrispondente U . Dai dati misurati, in base alle correlazioni

(8)
$$U = a \cdot E \quad o \quad I = b \cdot c \cdot j$$

$$a, b, c \text{ Dimensioni del cristallo,}$$

è possibile calcolare la conducibilità σ :

(9)
$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{a}{b \cdot c}$$

ANALISI

L'equazione (7) può essere riscritta nella forma:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E_g \cdot \frac{1}{2kT}$$

Si rappresenta quindi graficamente $y = \ln \sigma$ rapportato a $x = \frac{1}{2kT}$ e si determina la banda proibita E_g in base alla pendenza delle rette risultanti.

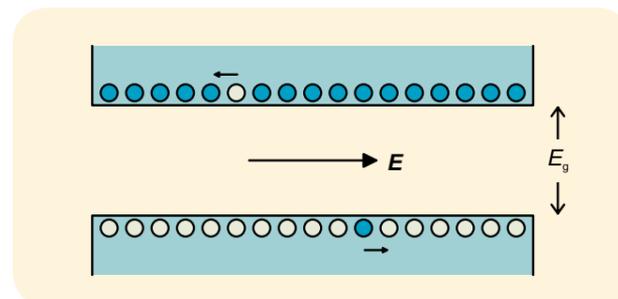


Fig. 1: Struttura di banda del semiconduttore con un elettrone nella banda di conduzione e una lacuna elettronica nella banda di valenza, che evidenziano una deriva sotto l'influsso di un campo elettrico E

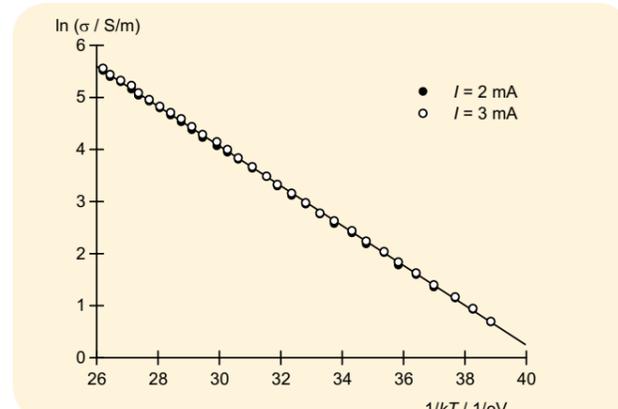


Fig. 2: Rappresentazione per la determinazione della banda proibita E_g nel germanio

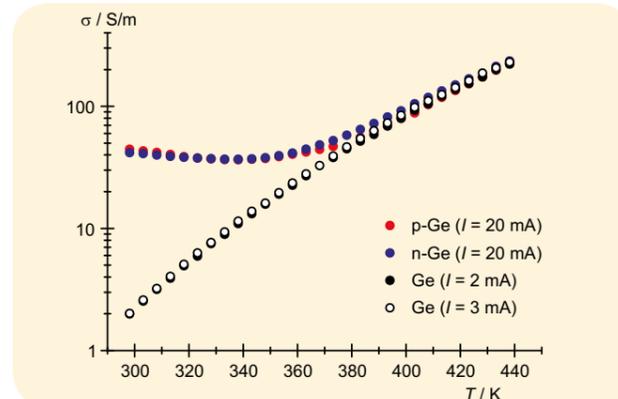


Fig. 3: Confronto delle conducibilità di germanio puro e drogato



FUNZIONI

- Dimostrazione dell'effetto Hall nel germanio drogato.
- Misurazione della tensione di Hall in funzione di corrente e campo magnetico a temperatura ambiente.
- Determinazione del segno, della densità e della mobilità dei portatori di carica a temperatura ambiente.
- Misurazione della tensione di Hall in funzione della temperatura del campione.
- Determinazione della temperatura di inversione e distinzione tra conduzione estrinseca e intrinseca nei germanio drogato p.

NOTA

La dipendenza dalla temperatura della conducibilità elettrica dei cristalli di germanio utilizzati viene analizzata più in dettaglio nell'esperimento UE6020100.



SCOPO

Analisi dei meccanismi della conduzione elettrica in germanio drogato mediante studio dell'effetto Hall

RIASSUNTO

L'effetto Hall si verifica in nei materiali conduttori in un campo magnetico B . Il segno della tensione di Hall cambia a seconda che la stessa corrente I venga trasmessa da portatori di carica positivi o negativi. Il suo valore dipende dalla densità dei portatori di carica. Pertanto, l'effetto Hall rappresenta uno strumento importante per la determinazione dei meccanismi del trasporto della carica in semiconduttori drogati. Nell'esperimento vengono analizzati cristalli di germanio drogati a temperature comprese tra 300 K e 450 K, per distinguere la conduzione elettrica causata dal drogaggio e la conduzione intrinseca consentita dall'attivazione termica degli elettroni della banda di valenza che raggiungono la banda di conduzione.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio di base per effetto Hall	1009934
1	n-Ge su circuito stampato	1009760
1	p-Ge su circuito stampato	1009810
1	Sensore campo magnetico ± 2000 mT	1009941
1	Bobina D con 600 spire	1000988
1	Nucleo a U	1000979
1	Coppia di espansioni polari e staffe di fissaggio per effetto Hall	1009935
1	Trasformatore con raddrizzatore 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	1003316 o
1	Trasformatore con raddrizzatore 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	1003315
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312 o
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	1003311
1	Multimetro digitale P3340	1002785
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	1000540 o
1	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	1000539
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843
Ulteriormente consigliato:		
1	3B NETlab™	1000544

BASI GENERALI

L'effetto Hall si verifica nei materiali conduttori in un campo magnetico B . La sua causa risiede nella forza di Lorentz, che devia i portatori di carica che costituiscono la corrente elettrica I che percorre un campione di materiale trasversalmente rispetto al campo magnetico e alla direzione della corrente. La separazione delle cariche genera un campo elettrico E_H perpendicolare alla direzione della corrente, che compensa la forza di Lorentz e crea una tensione di Hall U_H tra i lati del campione. Il segno della tensione di Hall cambia a seconda che la stessa corrente I trasmessa da portatori di carica positivi o negativi. Il suo valore dipende dalla densità dei portatori di carica. Pertanto, l'effetto Hall rappresenta uno strumento importante per la determinazione del meccanismo del trasporto della carica nei materiali conduttori, ed è utilizzato spesso per analizzare i semiconduttori drogati.

Nell'esperimento vengono analizzati cristalli di germanio drogati a temperature comprese tra 300 K e 450 K. I cristalli sono realizzati come campioni piani con lunghezza a , larghezza b e spessore d attraverso cui scorre la corrente I in direzione longitudinale. Il campo magnetico B attraversa il campione perpendicolarmente rispetto alla corrente. Ne risulta la tensione di Hall

$$(1) \quad U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

con il coefficiente di Hall

$$(2) \quad R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}$$

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ As: Carica fondamentale

Le densità n_n degli elettroni nella banda di conduzione, n_p delle lacune elettroniche nella banda di valenza, nonché le mobilità μ_n degli elettroni e μ_p delle lacune elettroniche sono grandezze materiali e dipendono dalla temperatura del campione T .

Oltre alla tensione di Hall, nell'esperimento si misura la caduta di tensione U in direzione longitudinale del campione per determinare la conducibilità elettrica

$$(3) \quad \sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p)$$

e la cosiddetta mobilità di Hall

$$(4) \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}$$

Le densità dei portatori di carica n_n e n_p sono influenzate dal drogaggio, ovvero dall'integrazione di atomi esterni nel cristallo. In caso di drogaggio p, gli atomi accettori legano gli elettroni dalla banda di valenza, causando così fori nella banda di valenza – le cosiddette lacune elettroniche. In caso di drogaggio n, gli atomi donatori cedono ciascuno un elettrone alla banda di conduzione.

I cristalli drogati sono elettricamente neutri, pertanto le cariche negative e positive si compensano. In questo modo è vale

$$(5) \quad n_n + n_A = n_p + n_D$$

n_A : Concentrazione degli accettori
 n_D : Concentrazione dei donatori

Inoltre, n_n e n_p sono accoppiati tramite la legge dell'azione di massa, poiché all'equilibrio dipendentemente dalla temperatura, per unità di tempo si formano e si ricombinano molte coppie di elettroni-lacune elettroniche.

Vale:

$$(6) \quad n_n \cdot n_p = n_i^2$$

n_i densità dei portatori di carica con una mera conduzione intrinseca (vedere esperimento UE6020100)

In totale pertanto

$$(7) \quad n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}$$

$$(8) \quad n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}$$

A temperatura ambiente, le concentrazioni n_A e/o n_D sono notevolmente più grandi rispetto alla densità dei portatori di carica in caso di mera conduzione intrinseca n_i . Pertanto,

$$(9) \quad R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e}, \quad \mu_H = -\mu_n$$

con drogaggio n e 300 K

$$(10) \quad R_H = \frac{1}{n_A \cdot e}, \quad \mu_H = \mu_p$$

con drogaggio p e 300 K

È possibile rilevare segno e densità dei portatori di carica direttamente dal coefficiente di Hall. La mobilità dei portatori di carica corrisponde alla mobilità di Hall.

ANALISI

Poiché con l'aumentare della temperatura sono disponibili sempre più portatori di carica, la tensione di Hall diminuisce fino a raggiungere lo zero.

Per il germanio drogato p, il segno della tensione di Hall cambia in quanto al crescere della conduzione intrinseca cresce anche l'influsso degli elettroni la cui mobilità μ_n è maggiore. Al di sotto della cosiddetta temperatura di inversione domina la conduzione elettrica consentita dal drogaggio, al di sopra di essa la conduzione intrinseca.

A temperature elevate, i cristalli drogati n e p non sono più distinguibili, poiché

$$n_n = n_p = n_i, \quad R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}, \quad \mu_H = -(\mu_n - \mu_p)$$

La dipendenza dalla temperatura delle mobilità μ_n e μ_p non è riconoscibile nel coefficiente di Hall, in quanto in entrambi i casi vale: $\mu \sim T^{-3/2}$ (vedere anche esperimento UE6020100)

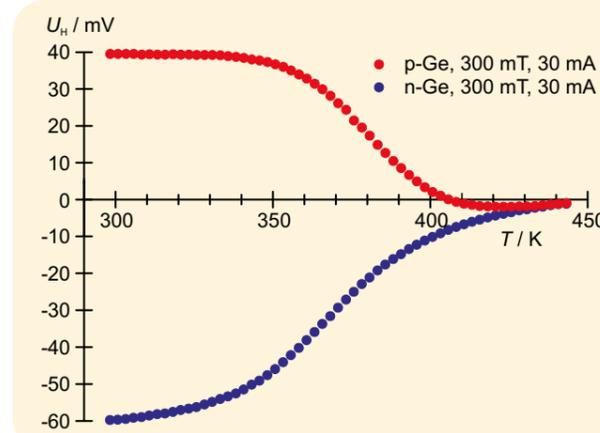


Fig. 1: Tensione di Hall nel germanio drogato p e n come funzione della temperatura T



SCOPO

Registrazione delle caratteristiche di diversi termoelementi e determinazione della sensibilità

FUNZIONI

- Misurazione della tensione termica U_{th} in funzione della temperatura T_1 e conferma del rapporto lineare per tre diversi termoelementi.
- Determinazione delle sensibilità S dai diagrammi $U_{th}(T_1)$.
- Valutazione delle temperature di riferimento T_2 in base alle curve di misurazione.

RIASSUNTO

In un filo metallico, i cui capi sono mantenuti a temperature differenti, si verifica, a causa delle diverse velocità di movimento degli elettroni, una termodiffusione tra le due estremità. Per effetto della corrente di diffusione l'estremità fredda si carica negativamente rispetto all'estremità calda. Tra le due estremità si genera una tensione termoelettrica, proporzionale alla differenza di temperatura tra i capi del filo, in cui il coefficiente di Seebeck rappresenta la costante di proporzionalità. Unendo due fili di metallo, le cui zone di giunzione sono poste a differenti temperature, e applicando un voltmetro sulla giunzione, si viene a creare un termoelemento. Il voltmetro mostra quindi la tensione termica che è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i punti di giunzione. Nell'esperimento ciò viene verificato per tre diverse coppie di materiali.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set di 3 termocoppie	1017904
1	Termometro -20°- 110°C	1003384
1	Clip per termometro	1003528
1	Set di 10 becher, forma alta	1002873
1	Agitatore magnetico riscaldamento (230 V, 50/60 Hz)	1002807 o
	Agitatore magnetico riscaldamento (115 V, 50/60 Hz)	1002806
1	Microvoltmetro (230 V, 50/60 Hz)	1001016 o
	Microvoltmetro (115 V, 50/60 Hz)	1001015



BASI GENERALI

In un filo metallico, i cui capi sono mantenuti a temperature differenti, si verifica una termodiffusione. Poiché il movimento termico degli elettroni è più veloce sull'estremità calda che su quella fredda, in media si spostano più elettroni dall'estremità calda a quella fredda che viceversa. Per effetto di questa corrente di diffusione, in questo caso a conduzione elettronica, l'estremità fredda si carica negativamente rispetto all'estremità calda e tra le due estremità si genera una tensione termoelettrica, che si oppone in modo crescente al movimento degli elettroni, fino a che la corrente di diffusione si annulla.

La tensione termoelettrica U_{td} è proporzionale alla differenza di temperatura $T_1 - T_2$ tra i capi del filo, e il coefficiente di Seebeck rappresenta la costante di proporzionalità.

$$(1) \quad U_{td} = k \cdot (T_1 - T_2)$$

U_{td} : Tensione termoelettrica
 k : Coefficiente di Seebeck
 T_1 : Temperatura sull'estremità calda
 T_2 : Temperatura sull'estremità fredda

Unendo due fili di metallo, le cui zone di giunzione sono poste a differenti temperature, e applicando un voltmetro sulla giunzione, si viene a creare una corrente termoelettrica. Il metallo con la tensione termoelettrica maggiore stabilisce la direzione della corrente e si ottiene un termoelemento. A causa dell'elevata impedenza di ingresso il flusso di corrente è praticamente azzerato e il voltmetro mostra quindi una tensione termica che è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i punti di giunzione:

$$(2) \quad U_{th} = U_{td,B} - U_{td,A} = (k_B - k_A) \cdot (T_1 - T_2)$$

U_{th} : Tensione termica
 $U_{td,A}, U_{td,B}$: Tensione termoelettrica dei metalli A e B
 k_A, k_B : Coefficienti di Seebeck dei metalli A e B

Solo la differenza

$$(3) \quad k_{BA} = k_B - k_A$$

tra i coefficienti di Seebeck evidenziata nell'equazione (2) può essere misurata senza problemi. Essa rappresenta la sensibilità

$$(4) \quad S = \frac{dU_{th}}{dT_1}$$

del termoelemento generato dalla giunzione dei metalli A e B. È quindi prassi frequente utilizzare il platino come materiale di riferimento indicando i coefficienti k_{Apt} .

Nell'esperimento vengono determinate le sensibilità S per tre diverse coppie di materiali. A tale scopo un'estremità del termoelemento viene immersa in un becher pieno d'acqua riscaldata a una temperatura T_1 . Per misurare la tensione, l'altra estremità del termoelemento viene collegata a un voltmetro i cui jack di ingresso sono mantenuti alla temperatura costante T_2 .

ANALISI

In un diagramma $U_{th}(T_1)$ viene riportata la tensione termica rispetto alla temperatura per i diversi termoelementi; i valori di ogni singolo termoelemento si adattano a una retta, quindi vengono determinate le relative sensibilità in base alle pendenze.

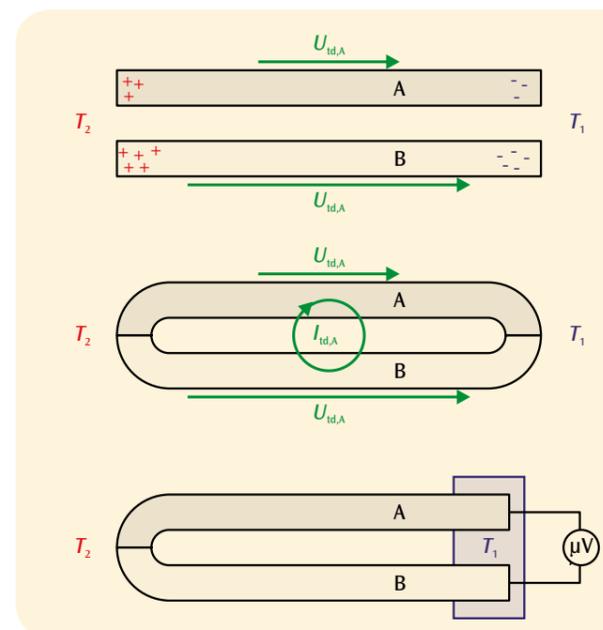


Fig. 1: Termodiffusione in fili di metallo (sopra), corrente termoelettrica (al centro) e tensione termica in una catena chiusa di due diversi fili di metallo (sotto)

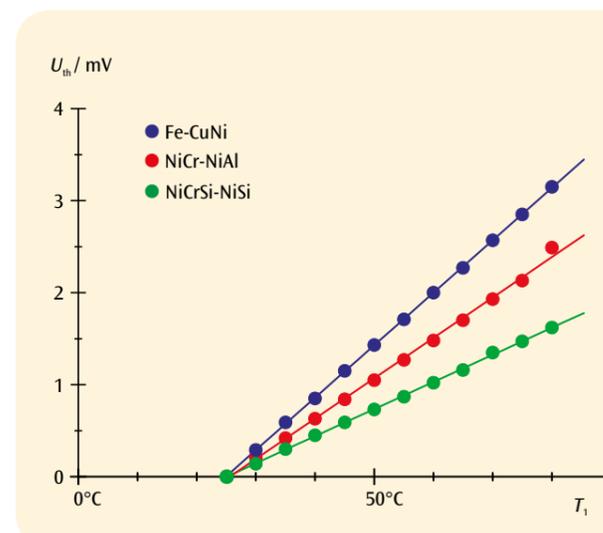


Fig. 2: Tensioni termiche in funzione della temperatura per termoelemento di tipo Fe-CuNi, NiCr-NiAl e NiCrSi-NiSi. Le curve di misurazione intersecano l'asse T_1 del diagramma in corrispondenza della temperatura di riferimento $T_2 = 23^\circ\text{C}$

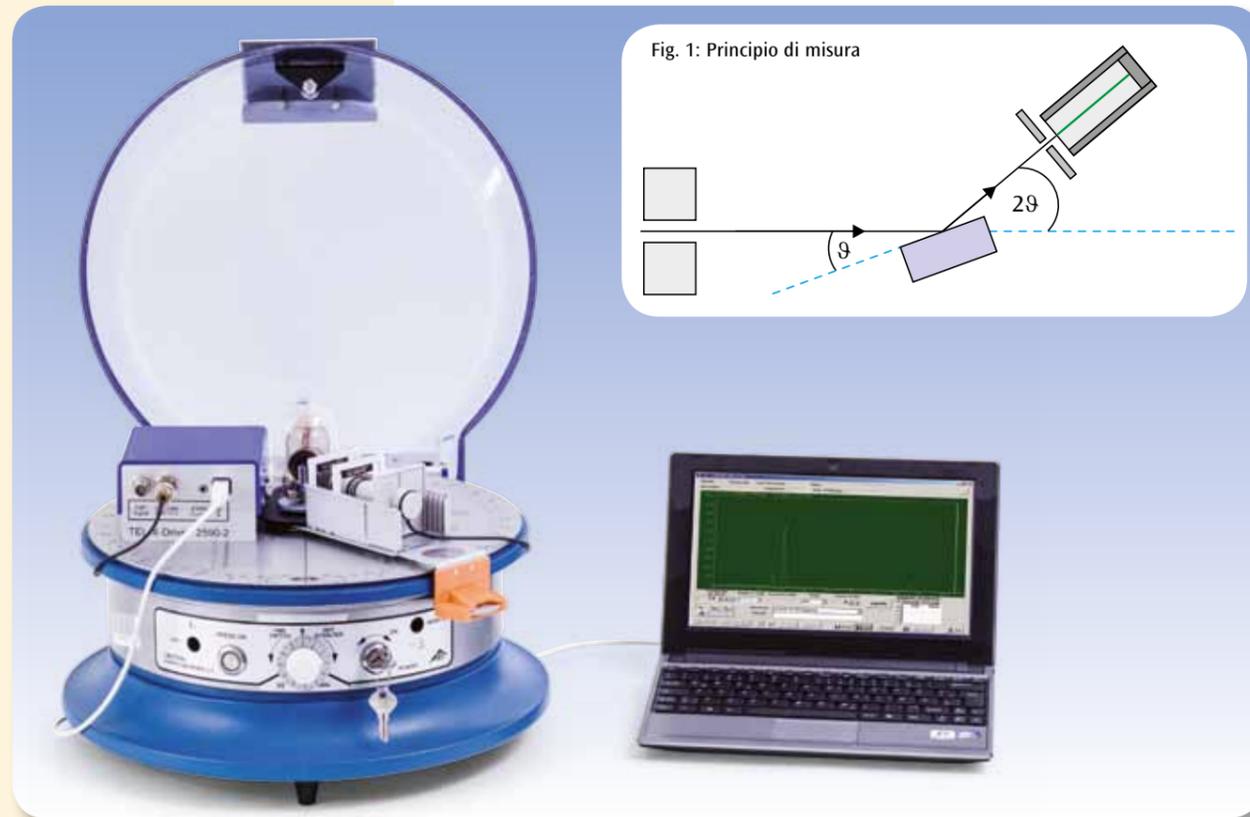


Fig. 1: Principio di misura

FUNZIONI

- Registrazione degli spettri di diffrazione dei raggi röntgen di un anodo in rame su cristalli con struttura in NaCl.
- Determinazione delle costanti reticolari e confronto con le dimensioni dei moduli in cristallo.

SCOPO

Determinazione di costanti reticolari di cristalli con struttura in NaCl

RIASSUNTO

La misurazione della riflessione di Bragg è un metodo di analisi importante su monocristalli con il supporto di raggi röntgen. A tale scopo la radiazione X viene riflessa sui piani reticolari del cristallo le onde separate riflesse sui singoli piani reticolari interferiscono in modo costruttivo tra loro, se la condizione di Bragg viene soddisfatta. Conoscendo la lunghezza delle onde dei raggi röntgen è possibile calcolare la distanza dei piani reticolari. Nell'esperimento sono analizzati e confrontati cristalli con struttura in NaCl.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per raggi X (230 V, 50/60 Hz)	1000657 o
	Apparecchio per raggi X (115 V, 50/60 Hz)	1000660
1	Set di base Bragg	1008508
1	Accessori di cristallografia	1000666
1	Driver di Bragg	1012871

2

BASI GENERALI

H. W. e W. L. Bragg hanno sviluppato un importante metodo di analisi sui monocristalli utilizzando i raggi röntgen. Essi hanno interpretato la disposizione regolare degli atomi o degli ioni nei cristalli come andamento parallelo con i piani reticolari occupati dai moduli reticolari. L'onda piana dei raggi röntgen viene riflessa su questo piano reticolare; in questo modo la lunghezza delle onde dei raggi röntgen rimane invariata.

Le direzioni del fascio dell'onda in arrivo e riflessa che corrono perpendicolarmente ai fronti d'onda soddisfano la condizione "angolo di incidenza = angolo di emergenza". Inoltre, le onde separate riflesse dai singoli piani reticolari interferiscono e l'interferenza è costruttiva, se il ritardo ottico Δ tra le onde separate è un multiplo intero della lunghezza d'onda λ . Il ritardo ottico può essere calcolato mediante la Fig. 1. Si ottiene

(1)

$$\Delta = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta$$

d : distanza dei piani reticolari

ϑ : angolo di incidenza o angolo di emergenza

Da qui si ottiene la condizione per l'interferenza costruttiva:

(2)

$$2 \cdot d \cdot \sin \vartheta_n = n \cdot \lambda$$

Se viene quindi utilizzata una lunghezza d'onda nota dei raggi röntgen monocromatici, è possibile determinare la distanza dei piani reticolari d tramite la misurazione degli angoli.

Nella pratica questo avviene tramite la rotazione del monocristallo di un angolo ϑ relativo alla direzione di incidenza con la stessa rotazione del contatore di Geiger-Müller intorno all'angolo 2ϑ , vedere Fig. 2. La condizione (2) è perfettamente soddisfatta, se il contatore registra la massima intensità. Nell'esperimento sono utilizzati raggi röntgen caratteristici di un tubo per raggi röntgen con anodo in rame. Di questi fanno parte la radiazione K_α con lunghezza d'onda $\lambda = 154 \text{ pm}$ e la radiazione K_β con $\lambda = 138 \text{ pm}$. Con un filtro Ni la radiazione K_β può essere ampiamente soppressa, poiché lo spigolo di assorbimento del nichel è compreso tra le due lunghezze d'onda citate. Oltre alla radiazione caratteristica, il tubo per raggi röntgen emette sempre anche una radiazione di frenamento con una distribuzione spettrale continua. Questo si nota nelle curve di misurazione come "sfondo" sotto i picchi della radiazione caratteristica.

Nell'esperimento sono analizzati monocristalli a struttura cubica, tagliati parallelamente rispetto alla superficie (100). I piani reticolari rilevanti per la riflessione di Bragg sono facilmente identificabili in questo modo. Per aumentare la precisione di misurazione sono stati misurati diversi ordini di diffrazione.

Sono disponibili un cristallo in LiF e uno in NaCl. Misurazioni integrative possono essere effettuate su un cristallo KCl e un cristallo RbCl. Tutti mostrano la stessa struttura dei cristalli, in cui due tipi di atomi occupano alternatamente i posti nel reticolo. La distanza dei piani reticolari d corrisponde quindi alla metà della costante reticolare a .

ANALISI

Utilizzando l'equazione (2) si ottiene la seguente equazione condizionale per la costante reticolare cercata:

$$a = 2 \cdot d = \lambda_{K\alpha} \cdot \frac{n}{\sin \vartheta_n}$$

Un raffronto tra i valori trovati per NaCl, KCl e RbCl mostra che la costante reticolare è correlata alla dimensione degli ioni alcalino-terrosi. Anche le costanti reticolari di LiF e NaCl sono diverse, perché gli elementi dei cristalli hanno dimensioni diverse.

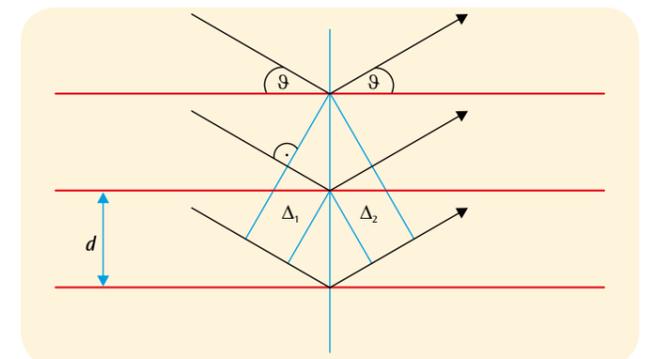


Fig. 2: Rappresentazione della deduzione della condizione di Bragg

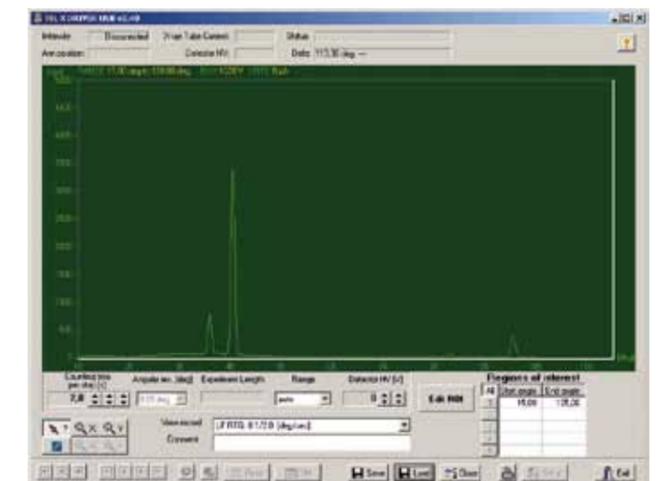


Fig. 3: Curva di Bragg su NaCl

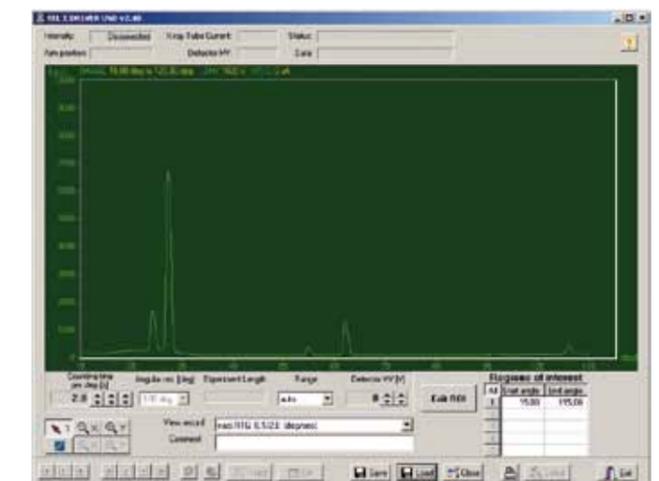
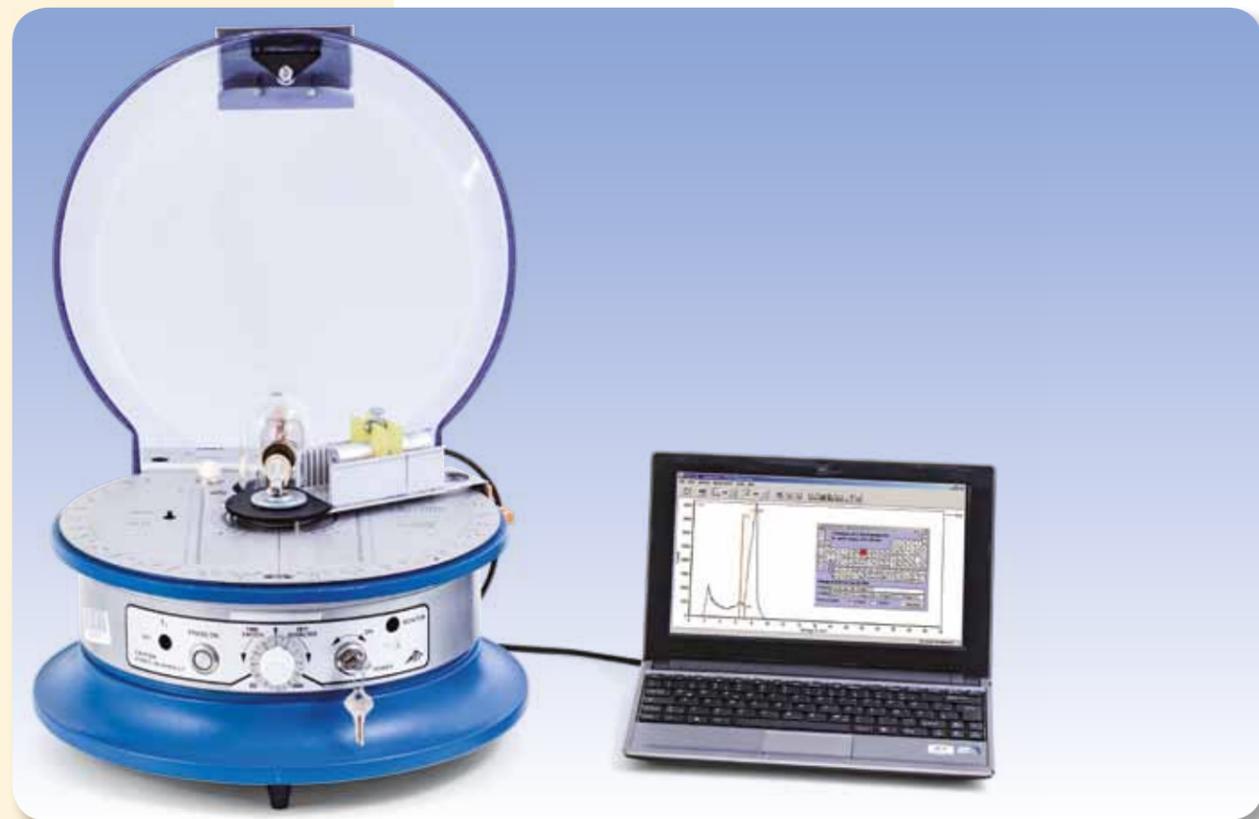


Fig. 4: Curva di Bragg su LiF



Fig. 5: Cristallo NaCl



FUNZIONI

- Registrazione degli spettri di fluorescenza a raggi X di diversi campioni di materiale.
- Identificazione dei componenti chimici in base alle linee di raggi X.

SCOPO

Analisi non distruttiva del composto chimico

RIASSUNTO

Gli elementi chimici possono essere identificati chiaramente in base alle loro emissioni di raggi X, poiché l'energia delle radiazioni dipende dal numero atomico dell'elemento. Si parla di analisi della fluorescenza a raggi X se la radiazione röntgen (X) viene eccitata dall'illuminazione del materiale analizzato con quanti di raggi X ad alta energia. Nell'esperimento sono stati analizzati diversi campioni di materiale relativamente alla loro composizione chimica. Sono stati raffrontati quindi ferro fucinato con acciaio inox, rame e ottone con bronzo e anche diverse monete.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio per raggi X (230 V, 50/60 Hz)	1000657 o
	Apparecchio per raggi X (115 V, 50/60 Hz)	1000660
1	Set di base Bragg	1008508
1	Rivelatore di energia a raggi X	1008629
1	Set di campioni fluorescenti	1012868

Ulteriormente consigliato:

Numismatico

2

BASI GENERALI

Gli elementi chimici possono essere identificati chiaramente in base alle loro emissioni di raggi X, poiché l'energia delle radiazioni dipende dal numero atomico dell'elemento. La composizione chimica di un materiale può quindi essere determinata dalla misurazione della radiazione a raggi X. I legami chimici degli elementi non hanno alcun ruolo in questo caso, poiché non influenzano gli anelli elettronici interni, attraverso i quali avviene il passaggio dei raggi X.

Si parla di analisi della fluorescenza a raggi X se la radiazione röntgen viene eccitata dall'illuminazione del materiale analizzato con quanti di raggi X ad alta energia. L'energia di eccitazione deve essere maggiore rispetto all'energia della radiazione caratteristica attesa, poiché le transizioni dalla serie K negli elementi con numero atomico molto grande potrebbero non essere eccitate. L'analisi deve quindi considerare anche le transizioni dalla serie L, vedere Fig. 1.

Per il rilevamento degli spettri energetici nell'esperimento è disponibile un rivelatore di energia a raggi X. La radiazione a raggi X incidente crea dall'effetto di reciprocità con gli atomi dei cristalli di una coppia buco elettrone di un fotodiode PIN Si, la cui carica complessiva è proporzionale all'energia dei raggi X. La carica viene convertita in un impulso di tensione, la cui altezza proporzionale per l'energia a raggi X trasmessa ad un computer sotto forma di valore digitale. Un software di valutazione rappresenta graficamente la distribuzione della frequenza dell'altezza degli impulsi. Dopo la calibrazione dell'energia, la distribuzione della frequenza rappresenta lo spettro energetico analizzato.

Nell'esperimento come sorgente luminosa viene usato un tubo per raggi X con anodo in rame. Sono stati analizzati diversi campioni di materiale relativamente alla loro composizione chimica. Sono stati raffrontati quindi ferro fucinato con acciaio, rame e ottone con bronzo e anche diverse monete.

ANALISI

Con il supporto del software di valutazione le energie trovate sono raffrontate con i valori della letteratura per la radiazione caratteristica degli elementi presi in considerazione.

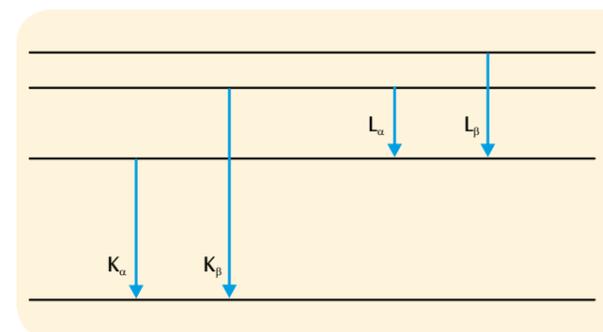


Fig. 1: Diagramma di Grotrian semplificato di un atomo con le linee di raggi X caratteristiche

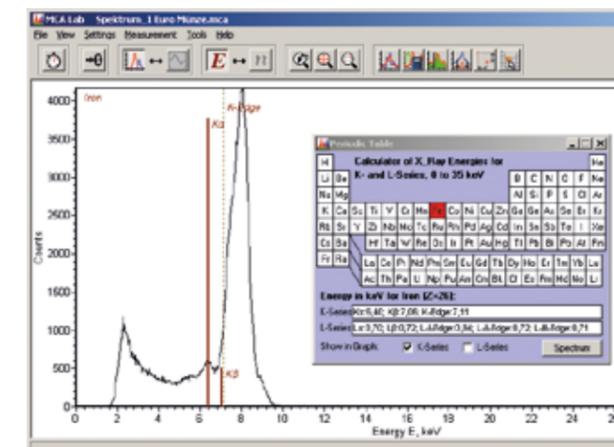


Fig. 2: Spettro di fluorescenza dei raggi X di una moneta da 1 Euro

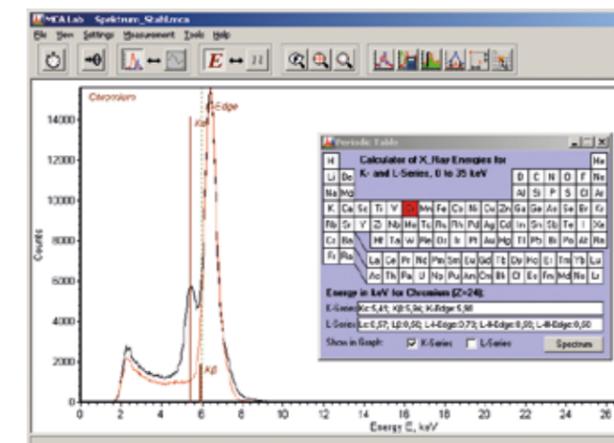


Fig. 3: Spettro di fluorescenza dei raggi X di ferro fucinato (rosso) e acciaio inox (nero)

SES ONDE ULTRASONORE

Kit completo per lo studio delle proprietà basilari delle onde sfruttando onde ultrasonore da 40 kHz in 30 esperimenti scolastici. In scatola in plastica stabile con inserto in espanso formato sull'apparecchio e coperchio trasparente. Incluso CD con descrizioni di esperimenti.

Con due trasmettitori di ultrasuoni, una sonda microfono ad asta per la registrazione e l'analisi delle oscillazioni con un oscilloscopio standard e una penna a ultrasuoni per la registrazione dei fronti d'onda sul piano del tavolo come linee di fase uguale (isofasi). Molti esperimenti possono essere eseguiti anche senza oscilloscopio. Per la misurazione delle ampiezze ultrasonore basta in molti casi un voltmetro analogico per tensioni alternate con una sufficiente risposta in frequenza.

1016651 (230 V, 50/60 Hz)

1014529 (115 V, 50/60 Hz)

Fornitura:

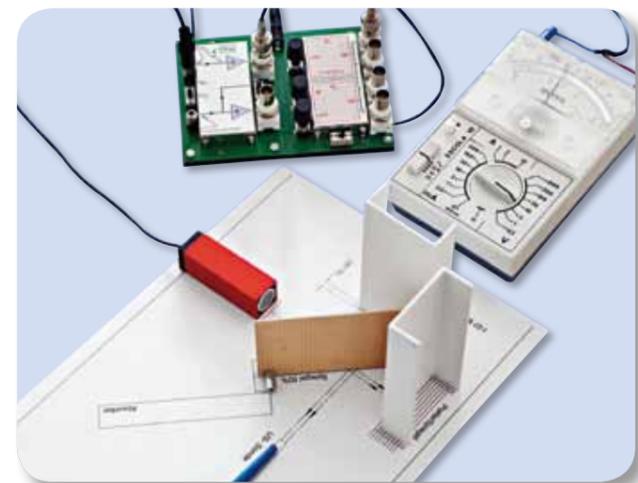
- 1 apparecchio a ultrasuoni
- 2 trasmettitori di ultrasuoni da 40 kHz
- 1 penna a ultrasuoni
- 1 supporto per penna a ultrasuoni
- 1 base del supporto per penna a ultrasuoni
- 1 sonda microfono
- 2 divisori di fascio
- 3 morsetti per divisore di fascio
- 1 piastra di zone Fresnel
- 1 specchio concavo
- 2 elementi laterali per doppia fenditura / riflettori
- 1 barra centrale per doppia fenditura
- 1 morsetto per doppia fenditura
- 1 assorbitore per ultrasuoni
- 2 cavi BNC, 1 m
- 1 cavo BNC/ 4 mm
- 1 alimentatori ad innesto

CD con descrizioni di esperimenti compreso!

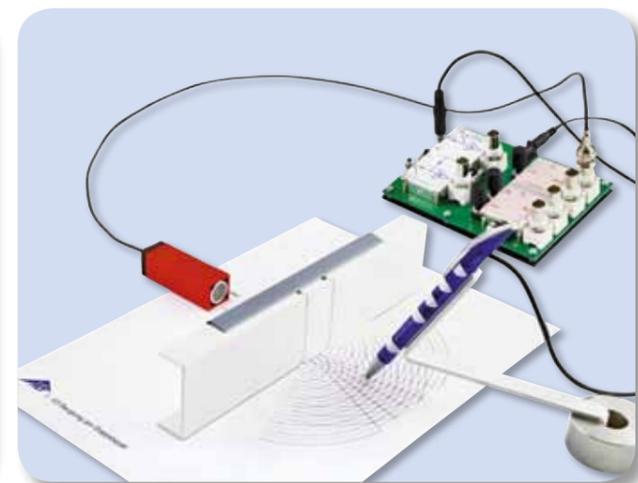


Incluse 30 descrizioni di esperimenti per onde ultrasonore

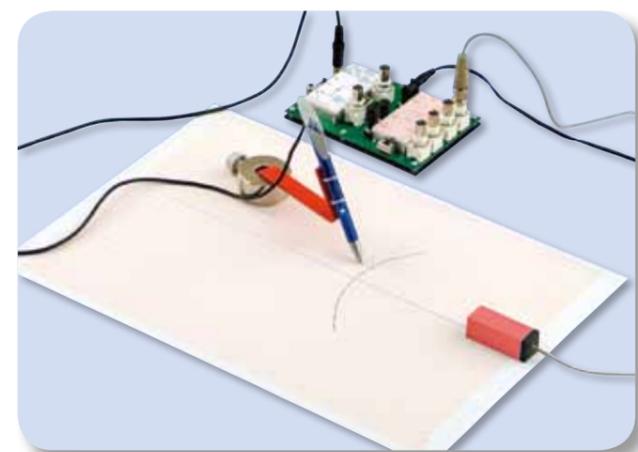
- Rappresentazione di vibrazioni sonore sull'oscilloscopio *)
- Correlazione tra oscillazioni e onde *)
- Confronto delle oscillazioni su due punti di un'onda *)
- Analisi delle relazioni di fase con la penna ad ultrasuoni *)
- Determinazione della lunghezza d'onda e della velocità del suono
- Dipendenza della temperatura della velocità del suono
- Caratteristica di trasmissione del trasmettitore di ultrasuoni **)
- Curva di risonanza del convertitore a ultrasuoni *)
- Trasmissione e riflessione delle onde ultrasonore **)
- Assorbimento di onde ultrasonore **)
- Sovrapposizione di oscillazioni sinusoidali *)
- Amplificazione ed estinzione in caso di sovrapposizione delle oscillazioni sinusoidali *)
- Registrazione dei fronti d'onda con la penna ad ultrasuoni
- Creazione e dimostrazione di fronti d'onda piani
- Diffrazione di onde ultrasonore su un bordo
- Diffrazione di onde ultrasonore sulla fenditura singola
- Interferenza fra due raggi **)
- Legge di reciprocità con l'interferenza fra due raggi **)
- Diffrazione su doppia fenditura **)
- Relazioni di fase con diffrazione su fenditura doppia I *)
- Relazioni di fase con diffrazione su fenditura doppia I **)
- Rappresentazione con uno specchio concavo sferico **)
- Costruzione di zone Fresnel **)
- Rappresentazione con una piastra di zone Fresnel **)
- Interferenza di onde ultrasonore su uno specchio di Lloyd **)
- Struttura di un interferometro semplice **)
- Struttura di un interferometro di Michelson **)
- Eliminazione dell'interferenza interrompendo il percorso *)
- Creazione di onde ultrasonore stazionarie **)
- Battimento con onde ultrasonore *)
- Effetto Doppler con onde ultrasonore



Interferometro di Michelson



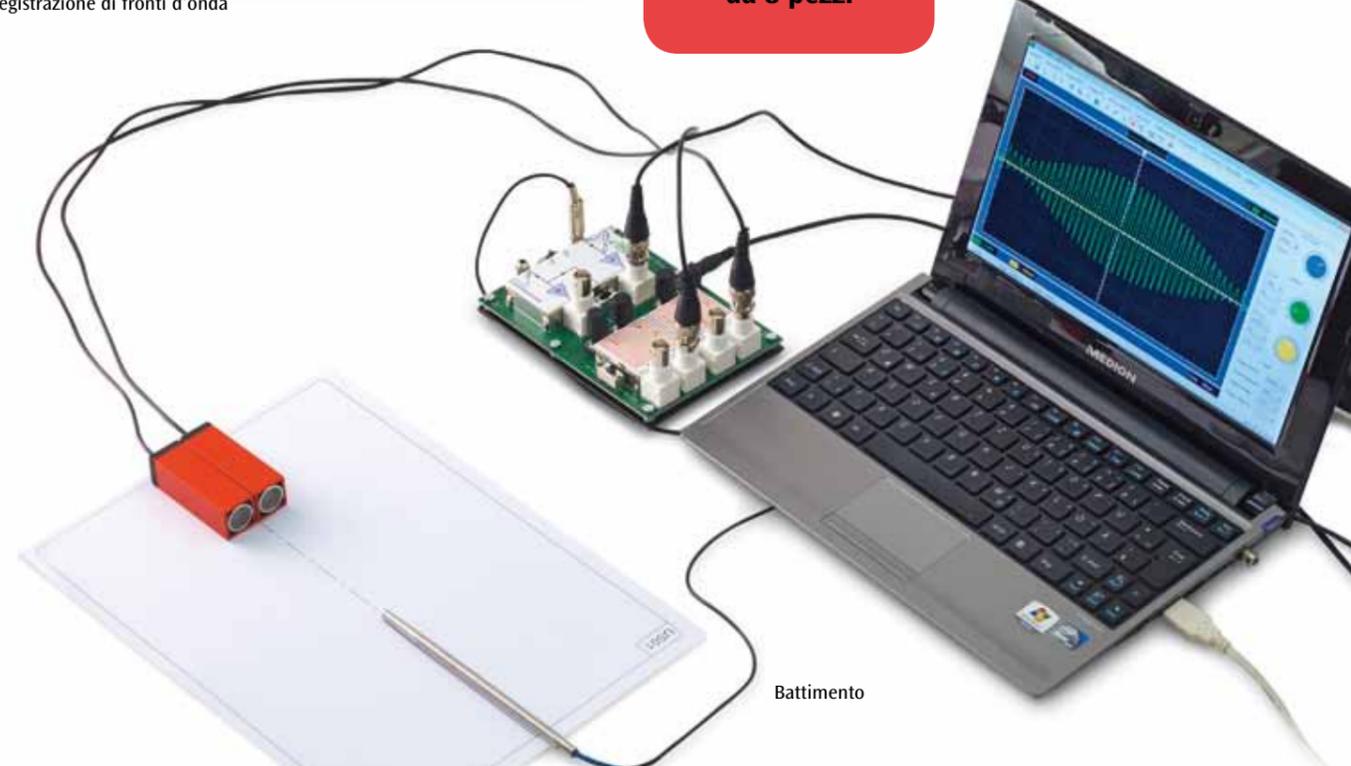
Diffrazione su doppia fenditura



Registrazione di fronti d'onda

Inoltre richiesti:
1017264 Oscilloscopio a due canali, p.e. USB-Oscilloscopio 2x50 MHz (per esperimenti con contrassegno *)
1006811 Misuratore multiplo ESCOLA 2 (per esperimento con contrassegno **)

Sconti speciali per quantità a partire da 8 pezzi



Battimento

...going one step further

OTTICA KRÖNCKE NEGLI ESERCIZI DIDATTICI E NELLA PRATICA

SET DI BASE PER OTTICA DI KRÖNCKE

Il sistema ottico di Kröncke garantisce un grado di affidabilità elevato, collaudato negli anni con la precisione necessaria per gli esercizi didattici e pratici in numerosi esperimenti di ottica geometrica e ondulatoria. Gli esperimenti vengono eseguiti in modo classico utilizzando la luce bianca di una lampadina, il cui filamento viene riprodotto per l'osservazione di interferenze su una fenditura impostabile.

Tutti i componenti ottici vengono installati su schermi senza asta e per ottenere la regolazione esatta nel cavaliere ottico possono essere spinti senza problemi anche perpendicolarmente al percorso della luce. I cavalieri ottici possono essere spostati liberamente sul profilo a U del banco ottico e con sforzo di serraggio minimo.

Dotazione:

- 1 luce ottica K
- 1 trasformatore 12 V, 25 VA
- 1 banco ottico, 1.000 mm
- 6 cavalieri ottici K
- 2 morsettiere K
- 2 lenti collettrici K, f = 50 mm
- 2 lenti collettrici K, f = 100 mm
- 2 lenti collettrici K, f = 150 mm
- 1 lente collettrice K, f = 300 mm
- 1 lente collettrice K, f = 500 mm
- 1 lente divergente K, f = -100 mm
- 1 lente divergente K, f = -500 mm
- 1 diaframma con 1 fenditura
- 3 diaframmi con 3 fenditure
- 1 foto in telaio per diapositive
- 1 schermo, trasparente
- 1 schermo, bianco
- 1 set di 4 filtri colorati
- 1 scala, 15 mm
- 1 sagoma traforata
- 1 diaframma di apertura d = 1 mm
- 1 diaframma di apertura d = 6 mm
- 1009932** (230 V, 50/60 Hz)
- 1009931** (115 V, 50/60 Hz)

Incluso CD con tutte le istruzioni per gli esperimenti



OTTICA GEOMETRICA:

- Camera oscura a foro
- Riproduzione dell'immagine mediante lente collettrice
- Errori d'immagine
- Riproduzione dell'immagine nell'occhio (modello dell'occhio)
- Correzione degli errori di visione
- Lente di ingrandimento
- Microscopio
- Cannocchiale astronomico
- Cannocchiale terrestre
- Proiettore per diapositive

Dotazione per ottica geometrica:

- 1009932** Set di base per ottica di Kröncke (230 V, 50/60 Hz) oppure
- 1009931** Set di base per ottica di Kröncke (115 V, 50/60 Hz)



Proiettore per diapositive

POLARIZZAZIONE:

- Polarizzazione di onde trasversali
- Polarizzatore e analizzatore
- Visibilità di luce polarizzata in acqua torbida
- Doppia rifrazione
- Rotazione dei piani di polarizzazione in una soluzione zuccherina

Dotazione polarizzazione:

- 1009932** Set di base per ottica di Kröncke (230 V, 50/60 Hz) oppure
- 1009931** Set di base per ottica di Kröncke (115 V, 50/60 Hz)
- 1009701** Kit aggiuntivo polarizzazione

Kit aggiuntivo polarizzazione

Kit aggiuntivo per kit base ottica Kröncke (1009701 o 1009931) per l'esecuzione di esperimenti scolastici sulla polarizzazione delle onde luminose.

Dotazione:

- 1 paio di filtri di polarizzazione K
- 1 diaframma di apertura 10 mm
- 1 cuvetta, rettangolare
- 1009701**



Visibilità di luce polarizzata in acqua torbida

INTERFERENZA:

- Specchio di Fresnel
- Diffrazione su piccole aperture e dischi
- Diffrazione su traferro
- Diffrazione lungo un filo
- Diffrazione su fenditure multiple
- Diffrazione su una reticolo
- Potere di risoluzione ottico
- Determinazione della lunghezza d'onda della luce

Dotazione interferenza:

- 1009932** Set di base per ottica di Kröncke (230 V, 50/60 Hz) oppure
- 1009931** Set di base per ottica di Kröncke (115 V, 50/60 Hz)
- 1009700** Kit aggiuntivo Interferenza



2m

Per esempio:
Diffrazione su fenditura multipla



Sconti speciali per quantità a partire da 8 pezzi

Kit aggiuntivo interferenza

Kit aggiuntivo per kit base ottica Kröncke (1009932 o 1009931) per l'esecuzione di esperimenti scolastici sull'interferenza delle onde luminose.

Dotazione:

- 1 banco ottico, 500 mm
- 1 fenditura regolabile K
- 1 diaframma con 9 dischi circolari
- 1 diaframma con 9 fori circolari
- 1 diaframma con 3 fenditure singole e 1 fenditura doppia
- 1 diaframma con 4 fenditure multiple e reticolo
- 1 diaframma con 3 reticoli incisi
- 1 vite micrometrica K
- 1 specchio di Fresnel
- 1009700**

MODELLI PER L'INSEGNAMENTO DELLA BIOLOGIA

Estrazione del DNA da una cipolla

Con questo semplice esperimento sul tema della biologia cellulare e della genetica è possibile isolare il DNA cromosomale di una cipolla senza tempi di preparazione troppo lunghi, durante un'ora di lezione a scuola. In questo modo, gli studenti potranno apprendere una procedura fondamentale per l'estrazione del DNA. Questo kit contiene tutto il necessario per consentire a 5 gruppi di lavorare parallelamente. Si tratta di un efficace esperimento scolastico di grande significato, che non mancherà di divertire gli studenti.

Dotazione per 15 esperimenti:

Tampone per estrazione da 80 ml, 500 mg di miscela di proteasi, 15 tubetti per fondo piatto, 15 filtri rotondi di carta, 5 imbuto, 15 bastoncini di legno, istruzioni (multilingue).

Dimensioni: 20,5x20,5x10,5 cm

Peso: 534 g

1010264


Microscopio didattico monocolare, modello 300 (230 V, 50/60 Hz)

Il microscopio didattico modello 300 soddisfa tutti i requisiti di un'efficace lezione di biologia. La semplicità d'uso e l'ottima qualità meccanica e ottica contraddistinguono questo microscopio. Questo microscopio è dotato di piatto mobile, revolver portaobiettivi a 4 posizioni con obiettivi acromatici DIN 4x, 10x, 40x, 100x e condensatore Abbe.

1003271


Kit strumenti di dissezione per microscopia

Questo esclusivo set preparatorio comprende pregiati strumenti in acciaio inossidabile in una custodia in vinile.

- 1 forbice, appuntita, 10 cm
- 1 pinza, appuntita, 13 cm
- 1 ago da dissezione, 13,5 cm
- 1 astuccio per lame da bisturi n° 4
- 5 lame da bisturi di ricambio n° 11

18x8x3 cm, 0,15 kg

1008710

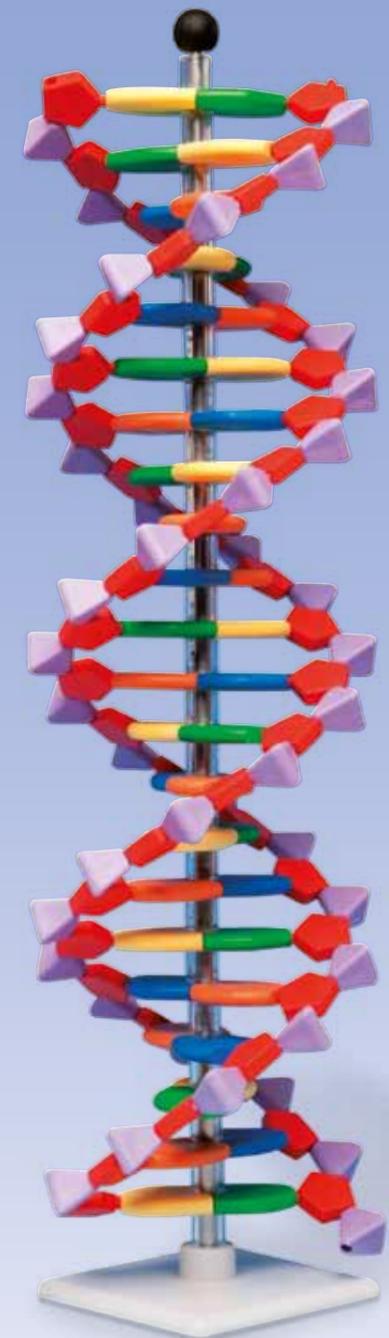

La cellula vegetale
ingrandimento da 500.000 a 1.000.000 volte

Il modello composto da due pezzi mostra la struttura di una tipica cellula vegetale con citoplasma e organelli mediante osservazione al microscopio ad elettroni. Tutti i principali organuli sono realizzati in rilievo per migliorarne la dimostrazione e rappresentati mediante differenziazione cromatica:

- parete cellulare
- membrana cellulare
- nucleo cellulare
- reticolo endoplasmatico liscio
- reticolo endoplasmatico ruvido
- ribosomi
- cloroplasti
- mitocondri
- dictiosomi/apparato di Golgi

20x14x32 cm; 0,8 kg

1000524


miniDNA™ Modello molecolare a 22 strati

Il sistema miniDNA™ comprende elementi con codice colore, di forme astratte, per rappresentare le basi azotate, elementi zuccherini pentagonali e fosfati piramidali per creare il modello a doppia elica del DNA.

Contenuto: 11 Timina (arancione), 11 Adenina (blu), 11 Guanina (rossa), 11 Citosina (gialla), 44 Deossiribosio (rosso), 44 Fosfato (viola). Con istruzioni per il montaggio e supporto. Confezionato in scatola di plastica.

A 44cm; diam 11 cm

1005297

MODELLI PER L'INSEGNAMENTO DELLA BIOLOGIA

Ciclo vitale dell'ape – Apis cerana
 Questi plastinati dimostrativi offrono ai vostri studenti un'eccezionale visione nel regno delle api da miele. Sono illustrati i seguenti preparati di alta qualità: 1. Uovo 2. Larva 3. Pupa 4. Operaia 5. Fuco 6. Regina 7. Parete intermedia 8. Favo dell'operaia 9. Favo della regina 10. Polline di api 11. Miele 12. Cera.
 21x12x3cm; 0,6 kg
1005971



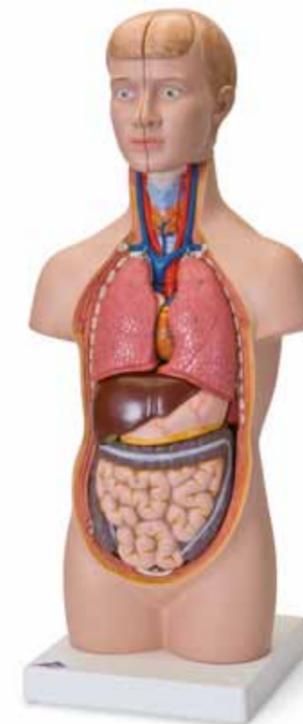
Fiore di ciliegio con frutto (Prunus avium)
 Questo eccezionale modello mostra il fiore del ciliegio dolce (in 3 parti) ingrandito 7 volte e un frutto di ciliegio ingrandito 3 volte. Il fiore di ciliegio si può scomporre in 2 parti rendendo visibile l'ovario con stilo e stigma.
 32,5 cm; 0,6 kg
1000530

Dipinta a mano e fedele alla realtà



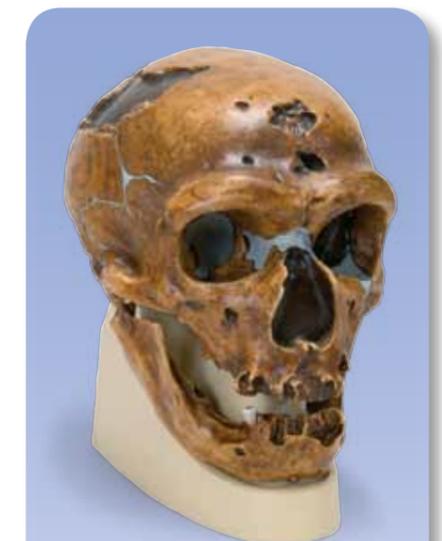
Salamandra maculata (Salamandra salamandra)
 Una salamandra che stupisce soprattutto gli studenti più giovani. Il dipinto della nostra salamandra pezzata sembra reale e le caratteristiche sono ben visibili. È modellata a grandezza naturale su una base naturale.
1001267

Occhio, ingrandito 5 volte, in 6 parti
 • due metà della sclera con cornea e attaccature dei muscoli dell'occhio
 • due metà della coroide con retina e iride
 • cristallino
 • corpo vitreo
 Su base. 9x9x15 cm; 0,1 kg
1000259



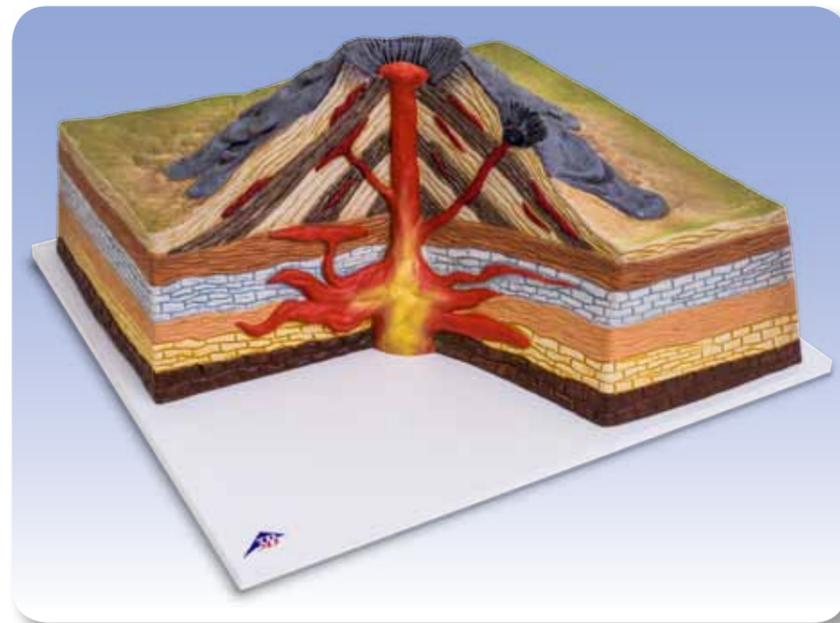
Mini torso in 12 parti
 Questo torso corrisponde all'incirca a metà della grandezza naturale. Anche piccole mani sono in grado di scomporlo rapidamente in:
 • testa in 2 metà
 • cervello in 2 metà
 • 2 lobi polmonari
 • cuore in 2 parti
 • stomaco
 • fegato con cistifellea
 • intestino in 2 parti
 54x24x18 cm; 1,89 kg
1000195

Pressurizzazione nell'orecchio medio
 Questo modello funzionale mostra il meccanismo di pressurizzazione dell'orecchio medio attraverso la tromba d'Eustachio. Il modello è in grado di riprodurre la curvatura verso l'interno o l'esterno del timpano e la pressurizzazione risultante. La fornitura comprende una membrana sostitutiva e il manuale (inglese/tedesco) per l'insegnante.
 16x13x12 cm, 0,2 kg
1012829



Cranio antropologico – La Chapelle-aux-Saints
 Riprodotto dalla ricostruzione del cranio ritrovato a La Chapelle-aux-Saints, questo modello accuratamente dettagliato mostra il cranio di un uomo di Neanderthal europeo, di età compresa tra 50 e 55 anni, della specie Homo (sapiens) neanderthalensis. Rappresentante dell'uomo antico. Luogo del ritrovamento: Francia meridionale. Periodo del ritrovamento: 1908; Età: da ca. 5.000 a 45.000 anni
 22x16x22,5 cm; 0,9 kg
1001294

TETTONICA DELLE PLACCHE E VULCANISMO



Sezione di vulcano
Questo modello dipinto a mano di un vulcano in sezione illustra il percorso del magma liquido dall'interno all'esterno della Terra.

Materiale: PVC
Dimensioni: 47x35x19 cm
Peso: 2,40 kg
1017595



Serie di tre rocce vulcaniche
Serie di tre vulcaniti, costituita da tre sacchetti, contenenti ciascuno dieci rocce singole (rispettivamente lava, ossidiana e pomice) della grandezza di una noce.
1018462

Dorsale medio atlantica

Il modello illustra il percorso a forma di S della catena montuosa vulcanica nell'Oceano Atlantico, formatasi a causa dello scorrimento delle placche terrestri.

Scala all'Equatore: 1:32x106
Materiale: PVC
Dimensioni: 64x48x8 cm
Peso: 6,5 kg
1017594



COLLEZIONI DI ROCCE



COLLEZIONE DI 24 ROCCE

Le collezioni contengono 24 esemplari comuni di diversi gruppi di rocce e minerali. Gli esemplari hanno dimensioni che variano da 3x3x3 cm³ a 5x5x5 cm³ circa e sono disposti all'interno di un robusto espositore che include numerazione, denominazione e foglio informativo.



Collezione di 24 rocce e minerali vulcanici
La collezione contiene rocce e minerali vulcanici.

Rocce magmatiche: basalto, fonolite, retinite, riolite
Lava: lava del Vesuvio, lava basaltica e riolitica
Piroclasti: lapilli, cenere vulcanica, pomice
Minerali: anortite, anortoclasio, augite, cristobalite, haüyne, leucite, natrolite, nefelina, picke-ringite, sanidino, zolfo, thaumasite, tridimite, ossidiana
1018442

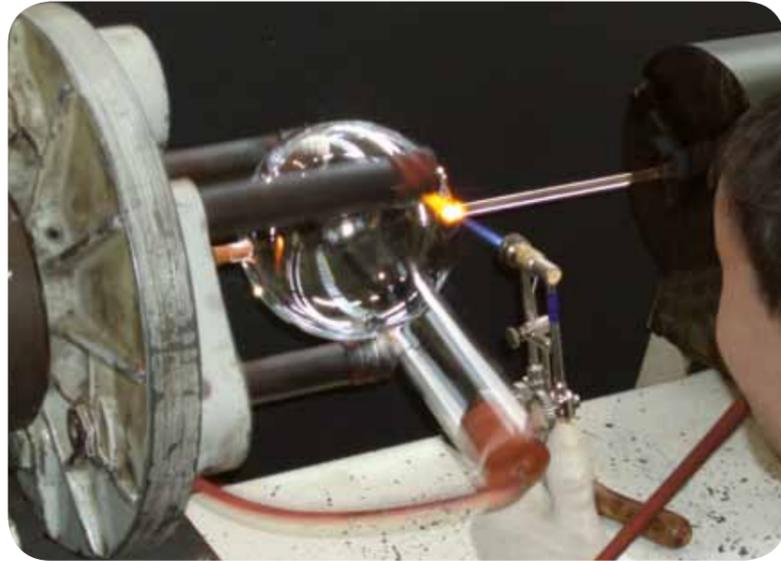
Collezione di 24 rocce
La collezione include esemplari comuni di rocce metamorfiche, sedimentarie e magmatiche, nonché importanti esemplari di rocce industriali.

Rocce magmatiche, plutonite: foyaite, gabbro, granito, granodiorite, larvikite e monzonite
Rocce magmatiche, vulcanite: basalto, pomice, fonolite, riolite
Rocce sedimentarie: breccia, dolomite, gesso, calcare, creta, quarzite e arenaria
Rocce metamorfiche: anfibolite, eclogite, mica-scisto, gneiss, marmo, fillade e serpentinite
1018443

Collezione di 24 minerali
La collezione contiene esemplari delle dieci classi di minerali: elementi, solfuri, alogeni, ossidi, carbonati, borati, solfati, silicati, fosfati e composti organici.

1. **Elementi:** grafite e zolfo
 2. **Solfuri:** bournonite, galenite e pirite
 3. **Alogeni:** fluorite e alite
 4. **Ossidi:** ematite, quarzo e rutilo
 5. **Carbonati:** calcite e dolomite
 6. **Borati:** ludwigite
 7. **Solfati:** barite, celestina e gesso
 8. **Fosfati, arsenati e vanadati:** apatite e vanadite
 9. **Silicati e germanati:** actinolite, amazonite, muscovite, sodalite e talco
 10. **Composti organici:** copale
- 1018444**

LA PRODUZIONE DI FISICA 3B SCIENTIFIC IN GERMANIA (KLINGENTHAL)



Produzione di un tubo elettronico TELTRON® presso lo stabilimento 3B Scientific

In tutto il mondo, i tubi elettronici vengono prodotti solo in un esiguo numero di stabilimenti. Solo tecnici in possesso di una formazione specialistica e con una lunga esperienza alle spalle sanno gestire il complesso processo tecnico necessario per potervi fornire tubi ad elevatissima qualità, quali sono i TELTRON®.



Produzione di gruppi nel centro di lavoro CNC

I noti apparecchi didattici di qualità sono il risultato dell'interazione tra la nuova tecnica di processo e l'antica tradizione artigianale. Il centro di lavoro CNC di Klingenthal garantisce la precisione meccanica necessaria per gli apparecchi fisici di alta qualità ed anche la conveniente produzione in serie in grado di offrire una qualità sempre costante.



Postazione di lavoro CAD/CAM presso

Con il programma CAD (Computer Aided Design) si esegue direttamente il comando CAM (Computer Aided Manufacturing) della fresatrice a base piatta. In questo modo è possibile dar forma ad idee e progetti speciali, rapidamente e con la necessaria precisione.

CRONOLOGIA 3B SCIENTIFIC



Il gruppo imprenditoriale 3B Scientific è leader mondiale nel know-how e nella produzione di strumenti didattici di anatomia. Il primo stabilimento iniziò la produzione già nel 1819 a Budapest, in Ungheria. Il successo crescente di 3B Scientific è il risultato di un'espansione globale, basata sulla produzione e distribuzione di sussidi didattici per la medicina e le scienze naturali di elevata qualità a prezzi moderati. Il marchio 3B Scientific® registrato a livello internazionale è presente nei settori della scienza, della formazione medica e dell'informazione del paziente in oltre 100 Paesi in tutto il mondo. La linea produttiva comprende riproduzioni di scheletri, colonne vertebrali, organi, torsi, poster didattici, simulatori medici e software nonché prodotti per l'insegnamento della biologia e della fisica. L'eccellente qualità dell'assistenza al cliente, dei prodotti e dell'organizzazione aziendale è stata certificata in conformità a DIN EN ISO 9001. Questo riconoscimento ufficiale del nostro quality management sottolinea il continuo processo di innovazione, miglioramento del prodotto e orientamento alle esigenze della clientela che viene associato al marchio 3B Scientific. Nel 2001 la linea produttiva è stata ampliata con la creazione di un nuovo settore di attività per sistemi e strumenti didattici di tecnica e fisica.



- 1819 Costituzione di Calderoni a Budapest, in Ungheria
- 1912 Fondazione dei laboratori didattici del Museo tedesco per l'Igiene a Dresda
- 1948 Costituzione di Paul Binhold Lehrmittelfabrik ad Amburgo
- 1950 Produzione del primo modello di scheletro
- 1952 Inaugurazione della prima fabbrica di scheletri
- 1963 Nuova sede ad Amburgo, a Rudolfsweg
- 1965 Lancio della linea produttiva di torsi
- 1970 Presentazione del logo aziendale Binhold
- 1979 Avvio dell'esportazione di modelli anatomici negli Stati Uniti
- 1983 Inizio della produzione con pressofusione di parti di scheletro
- 1986 La gamma produttiva viene integrata da simulatori di cura
- 1988 Avvio dell'esportazione di modelli anatomici in Giappone
- 1991 Costituzione di DHM Lehrmittelfabrik GmbH a Dresda
- 1993 Acquisizione di Calderoni e costituzione di Biocalderoni in Ungheria
- 1995 Costituzione di American 3B Scientific ad Atlanta, negli Stati Uniti
- 1996 Nuovo logo per il gruppo 3B Scientific
- 1997 Costituzione di Nihon 3B Scientific a Niigata, in Giappone
- 1998 Costituzione di France 3B Scientific a Bartenheim, in Francia
- 1998 Fusione di Paul Binhold Lehrmittelfabrik GmbH e di DHM Lehrmittelfabrik a formare 3B Scientific GmbH
- 1999 Costituzione di China 3B Scientific a Suzhou, in Cina
- 2000 Certificazione DIN EN ISO 9001
- 2001 Lancio di un'ampia gamma di prodotti di fisica 3B Scientific®
- 2002 Costituzione di Italia 3B Scientific a Bologna in Italia
- 2003 Costituzione di España 3B Scientific a Valencia, Spagna
- 2003 Costituzione di UK 3B Scientific a Weston-super-Mare, Inghilterra
- 2004 Distributore esclusivo per l'Europa di aghi per agopuntura SEIRIN®
- 2005 Costituzione di 3B Scientific Russia a San Pietroburgo, Russia.
- 2006 Costituzione di 3B Scientific Brasil a Joinville, Brasile
- 2007 Costituzione di 3B Scientific Thai a Bangkok, Thailandia
- 2009 Certificazione DIN EN ISO 9001
- 2011 Lancio del nuovo Software Gestionale SAP
- 2012 Costituzione di 3B Scientific Korea a Yongin, Corea del Sud
- 2012 Costituzione di 3B Scientific TR a Istanbul, Turchia



ESPERIMENTO DI FRANCK-HERTZ

La quantizzazione dell'energia così come la produzione, la registrazione e l'analisi degli spettri e la conseguente conferma sperimentale dei modelli sono una importante componente della maggior parte dei curriculum in tutto il mondo. Il noto esperimento di *James Franck* e *Gustav Hertz* del 1913 ha un'importanza fondamentale per dimostrare gli stati di energia discreta degli atomi.

➔ Pagina 212