

**20 nuovi
Esperimenti**



ESPERIMENTI DI FISICA

3bscientific.com

Meccanica · Termologia · Elettrologia · Ottica · Fisica atomica e nucleare · Fisica dello stato solido · Energia e ambiente

Gentile cliente,

ha già avuto modo di conoscere il catalogo 3B Scientific® con oltre 110 esperimenti? In continuo aggiornamento, propone un'interessante selezione di esperimenti. La raccolta costituisce uno strumento efficace e completo per affrontare aree tematiche dalla fisica classica a quella moderna. In questa occasione, siamo lieti di presentare 20 nuovi esperimenti. Desideriamo in particolare modo mettere in evidenza gli esperimenti nell'ambito dei seguenti argomenti:

- Deformazione elastica di corpi solidi (modulo di elasticità e taglio)
- Propagazione del suono in aste
- Analisi dell'effetto Pockels
- Determinazione della carica elementare secondo Millikan
- Installazione e ottimizzazione di impianti fotovoltaici

Qualora aveste necessità di ulteriori apparecchiature su nuovi argomenti, saremo lieti di collaborare insieme a voi, rispondendo in maniera ancor più specifica alle vostre esigenze. Potete comodamente contattarci telefonicamente, via e-mail o tramite il nostro sito 3bscientific.com. Riceveremo con piacere tutte le vostre domande, annotazioni e ordinazioni.

Tutti gli esperimenti sono disponibili anche sul nostro sito in formato pdf per download. Troverete inoltre continuamente nuove raccolte.



Spettrometro a prisma, Pagina 32

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



Esperimento di livello base



Esperimento di livello avanzato



Trovate ulteriori esperimenti
a 3bscientific.com

CONTENUTO

MECCANICA

FORZE

Legge di Hooke (UE1020100):	4
Conferma della legge di Hooke per molle elicoidali in tensione	

MOTO TRASLATORIO

Leggi degli urti (UE1030280):	6
Analisi di urti unidimensionali su rotaia a cuscinio d'aria	

MOTO ROTATORIO

Ruota di Maxwell (UE1040320):	8
Conferma della conservazione dell'energia con la ruota di Maxwell	

OSCILLAZIONI

Pendolo reversibile di Kater (UE1050221):	10
Determinazione dell'accelerazione di gravità locale con l'ausilio di un pendolo reversibile	

ACUSTICA

Propagazione del suono in aste (UE1070410):	12
Analisi di onde sonore longitudinali in barre a sezione circolare e determinazione della velocità del suono longitudinale	

DEFORMAZIONE DI CORPI SOLIDI

Flessione di barre piatte (UE1090200):	14
Misurazione della deformazione di barre piatte supportate su due lati e determinazione del modulo di elasticità	
Torsione di barre cilindriche (UE1090300):	16
Determinazione della costante di torsione e del modulo di taglio	

TERMOLOGIA

LEGGI DEI GAS

Legge di Amontons – Volta – Gay Lussac (UE2040120):	18
Conferma del rapporto lineare fra la pressione e la temperatura di un gas ideale	

ELETTROLOGIA

CAMPO MAGNETICO

Bilancia elettrodinamica (UE3030350):	20
Misurazione della forza agente su un conduttore attraversato da corrente e immerso in un campo magnetico	

INDUZIONE

Induzione in campo magnetico variabile (UE3040300):	22
Misurazione della tensione indotta in una bobina di induzione	

OTTICA

OTTICA GEOMETRICA

Riflessione su uno specchio (UE4010000):	24
Analisi della riflessione su specchi piani e curvi	
Rifrazione della luce (UE4010020):	26
Analisi della rifrazione della luce in diversi elementi ottici	

OTTICA ONDULATORIA

Diffrazione da singola fenditura (UE4030100):	28
Dimostrazione della natura ondulatoria della luce e determinazione della lunghezza d'onda	

POLARIZZAZIONE

Effetto Pockels (UE4040500):	30
Dimostrazione dell'effetto Pockels in un fascio conoscopico	

SPETTROMETRIA

Spettrometro a prisma (UE4080100):	32
Regolazione e calibrazione di uno spettrometro a prisma	

FISICA ATOMICA E NUCLEARE

PRINCIPI DI FISICA ATOMICA

Esperimento di Millikan (UE5010400):	34
Conferma del valore della carica elementare sulla base dell'esperimento di Millikan eseguito su goccioline d'olio cariche elettricamente	

FISICA DELLO STATO SOLIDO

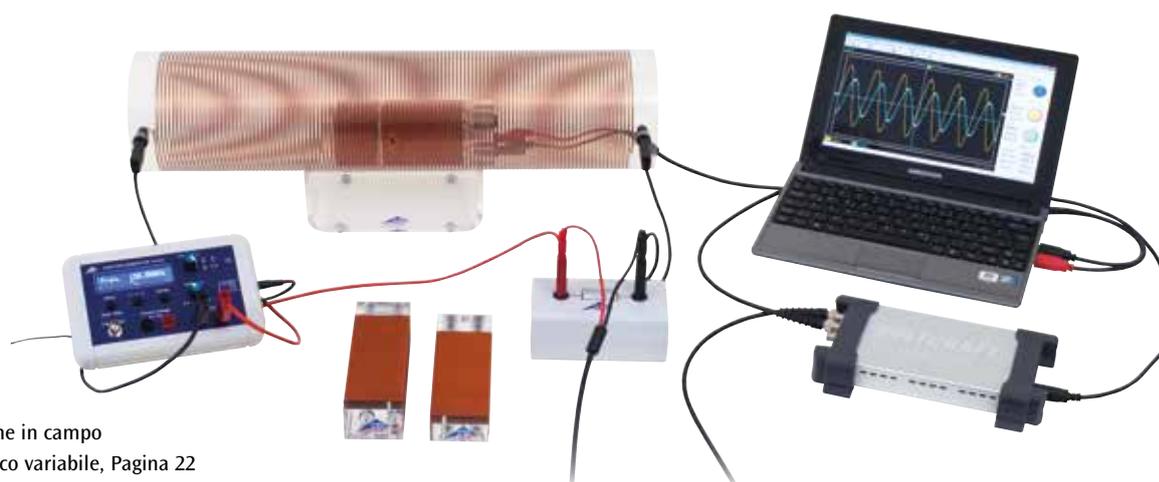
FENOMENI DI CONDUZIONE

Fotoconduzione (UE6020400):	36
Registrazione delle caratteristiche di una fotoresistenza	

ENERGIA E AMBIENTE

FOTOVOLTAICO

Impianti fotovoltaici (UE8020100):	38
Misurazione delle curve caratteristiche di un modulo fotovoltaico in funzione dell'intensità luminosa	
Impianti fotovoltaici (UE8020200):	40
Analisi dell'influenza dell'ombreggiamento parziale	
Impianti a isola (UE8020250):	42
Analisi di un impianto a isola per la produzione e l'immagazzinamento di energia elettrica	



Induzione in campo magnetico variabile, Pagina 22



SCOPO

Conferma della legge di Hooke per molle elicoidali in tensione

FUNZIONI

- Conferma della legge di Hooke e determinazione dell'indice di rigidità per cinque diverse molle elicoidali.
- Confronto degli indici di rigidità misurati con quelli calcolati.

RIASSUNTO

In un corpo elastico, deformazione e tensione sono proporzionali tra loro. Tale correlazione riscontrata da *Robert Hooke* viene spesso analizzata su una molla elicoidale caricata con un peso. La variazione di lunghezza della molla elicoidale è proporzionale al peso F agganciato. Nell'esperimento si misurano cinque diverse molle elicoidali in tensione i cui indici di rigidità, grazie ad un'ideale selezione di diametro del filo e diametro spire, si differenziano complessivamente di un ordine di grandezza. In tutti i casi, la validità della legge di Hooke per forze superiori al pretensionamento risulta confermata.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set molle ad elica per verificare la legge di Hooke	1003376
1	Set pesi a fessura 20 – 100 g	1003226
1	Scala per altezza, 1 m	1000743
1	Set indicatori per scale	1006494
1	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
1	Asta di supporto, 1000 mm	1002936
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Manicotto con gancio	1002828
Ulteriormente consigliato		
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601
1	Micrometro con staffa	1002600



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

BASI GENERALI

In un corpo elastico, espansione e tensione sono proporzionali tra loro. Tale correlazione riscontrata da *Robert Hooke* descrive bene il comportamento di molti materiali con una deformazione sufficientemente ridotta. Per illustrare tale correlazione, la legge di Hooke viene spesso analizzata con una molla elicoidale caricata con un peso. La variazione di lunghezza della molla elicoidale è in questo caso proporzionale al peso F agganciati.

Va considerato più attentamente il pretensionamento che la molla può presentare a seconda del processo produttivo. Esso deve essere compensato con un peso F_1 in grado di espandere la molla dalla lunghezza in assenza di carico s_0 alla lunghezza s_1 . Per pesi superiori a F_1 , la legge di Hooke vale nella seguente forma

$$(1) \quad F - F_1 = k \cdot (s - s_1),$$

purché la lunghezza s della molla allungata non diventi eccessiva.

L'indice di rigidezza k dipende dal materiale e dalle dimensioni geometriche. Per una molla elicoidale cilindrica con n spire di diametro costante D vale

$$(2) \quad k = G \cdot \frac{d^4}{D^3} \cdot \frac{1}{8 \cdot n}.$$

d : diametro del filo della molla

Il modulo di taglio G ammonta, nel caso di fili in acciaio, a 81,5 GPa.

Nell'esperimento si misurano cinque diverse molle elicoidali in tensione i cui indici di rigidezza, grazie ad un'ideale selezione di diametro del filo e diametro spire, si differenziano complessivamente di un ordine di grandezza. In tutti i casi, la validità della legge di Hooke per forze superiori al pretensionamento risulta confermata.

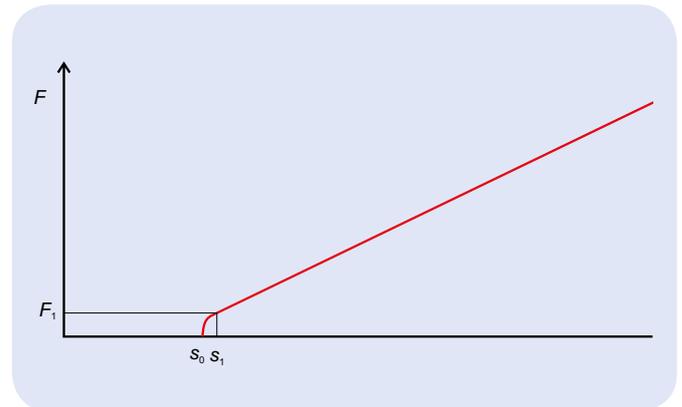


Fig. 1: Rappresentazione schematica di una molla elicoidale in tensione di lunghezza s con pretensionamento

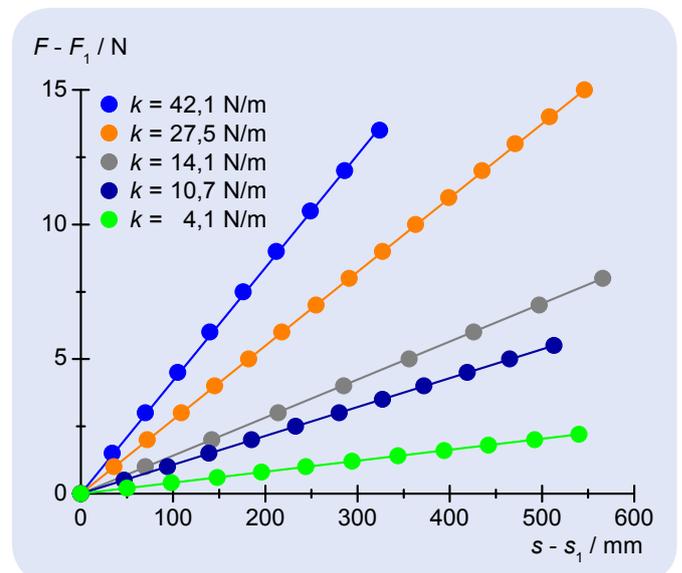
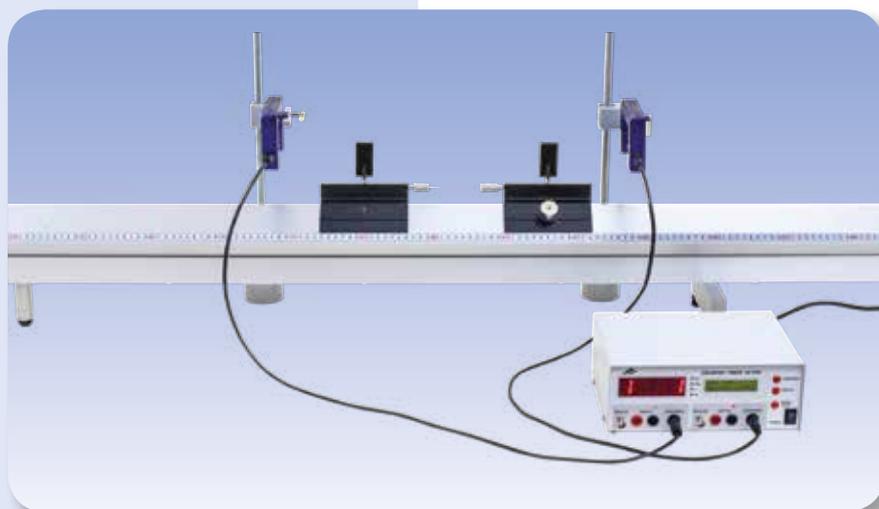


Fig. 2: Carico come funzione della variazione di lunghezza

ANALISI

La forza peso F viene calcolata con una precisione sufficiente a partire dalla massa appesa m in base alla formula

$$F = m \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$



SCOPO

Analisi di urti unidimensionali su rotaia a cuscino d'aria

RIASSUNTO

Una conseguenza importante del terzo assioma di Newton è la conservazione della quantità di moto nell'urto tra due corpi. Tale fenomeno è verificabile ad es. attraverso l'analisi di urti unidimensionali tra due carrelli su una rotaia a cuscino d'aria. Si parla di urti elastici quando l'energia cinetica totale rimane invariata e di urti anelastici quando invece rimane invariata solo l'energia cinetica del centro di massa.

Nell'esperimento, si determinano le singole velocità dei carrelli dai tempi di interruzione rilevati da una fotocellula e si calcolano le quantità di moto.

FUNZIONI

- Analisi dell'urto elastico e anelastico tra due carrelli su una rotaia a cuscino d'aria.
- Dimostrazione della conservazione della quantità di moto nel caso di urto elastico e anelastico e osservazione delle quantità di moto finali nell'urto elastico.
- Analisi del bilancio energetico nell'urto elastico e anelastico.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Rotaia a cuscino d'aria	1019299
1	Generatore di corrente d'aria (230 V, 50/60 Hz)	1000606 o
	Generatore di corrente d'aria (115 V, 50/60 Hz)	1000605
1	Contatore digitale con interfaccia (230 V, 50/60 Hz)	1003123 o
	Contatore digitale con interfaccia (115 V, 50/60 Hz)	1003122
2	Fotocellula	1000563
2	Piede a barilotto, 1000 g	1002834
2	Manicotto universale	1002830
2	Asta di supporto, 470 mm	1002934
In aggiunta si consiglia		
1	Bilancia da laboratorio 610	1003419

BASI GENERALI

Una conseguenza importante del terzo assioma di Newton è la conservazione della quantità di moto nell'urto tra due corpi. Tale fenomeno è verificabile ad es. attraverso l'analisi di urti unidimensionali tra due carrelli su una rotaia a cuscino d'aria.

Nel sistema di riferimento del centro di massa, la quantità di moto totale dei due carrelli con massa m_1 e m_2 è uguale a zero sia prima sia dopo l'urto.

$$(1) \quad \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = 0$$

\vec{p}_1, \vec{p}_2 : quantità di moto prima dell'urto, \vec{p}'_1, \vec{p}'_2 : quantità di moto dopo l'urto.

L'energia cinetica dei due carrelli nel sistema di riferimento

$$(2) \quad \vec{E} = \frac{\vec{p}_1^2}{2m_1} + \frac{\vec{p}_2^2}{2m_2}$$

può, a seconda del tipo di urto, essere trasformata parzialmente o completamente in altre forme di energia. Si parla di urto elastico quando l'energia cinetica calcolata nel sistema del centro di massa rimane invariata e di urto completamente anelastico quando invece essa viene completamente trasformata.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

Nel sistema di riferimento della rotaia, la conservazione della quantità di moto si scrive

$$(3) \quad p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2 = p = \text{cost.}$$

p_1, p_2 : impulsi singoli prima dell'urto,
 p'_1, p'_2 : impulsi singoli dopo l'urto.

Come conseguenza della conservazione della quantità di moto, anche la velocità

$$(4) \quad v_c = \frac{p}{m_1 + m_2}$$

e l'energia cinetica

$$(5) \quad E_c = \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot v_c^2$$

del baricentro rimangono invariate. Questo vale nel caso di urti sia elastici sia anelastici.

Nell'esperimento, prima dell'urto il secondo carrello è fermo. La conservazione della quantità di moto (equaz. 3) corrisponde pertanto a

$$(6) \quad p = m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2,$$

dove v'_1 e v'_2 assumono valori diversi dopo un urto elastico, mentre dopo un urto completamente anelastico coincidono. Nel caso dell'urto elastico, la piastra del primo carrello va ad urtare il nastro di gomma teso del secondo carrello; nel caso dell'urto anelastico l'ago del primo carrello va ad incunearsi in un pezzo di plastilina. Per variare la massa, è possibile aggiungere masse supplementari.

Dopo un urto elastico si ha

$$(7) \quad p'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot p, \quad p'_2 = \frac{2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot p$$

e

$$(8) \quad E = \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 = \frac{m_1}{2} \cdot v_1'^2 + \frac{m_2}{2} \cdot v_2'^2$$

Nel caso dell'urto anelastico rimane invariata solo l'energia cinetica del baricentro, per la quale da (4), (5) e (6) si calcola

$$(9) \quad E_c = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot E$$

ANALISI

Gli intervalli di tempo salvati nel contatore digitale Δt vanno associati ai processi sperimentali. Per le velocità dei carrelli vale

$$v = \frac{25 \text{ mm}}{\Delta t}$$

Se non si ha a disposizione una bilancia, per la massa di un carrello si presume un valore di 204 g, tutte le masse supplementari sono 200 g. Per una più precisa osservazione del bilancio energetico e della quantità di moto, occorre considerare anche le perdite per attrito. Esse ammonteranno per gli impulsi rilevati al 5% e al 10% dei valori energetici, v. Fig. da 1 a 5.

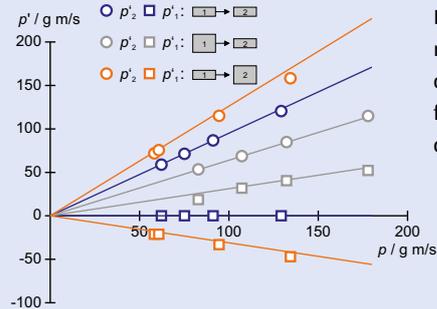


Fig. 1: Quantità di moto dei partner d'urto dopo l'urto elastico in funzione della quantità di moto di partenza.

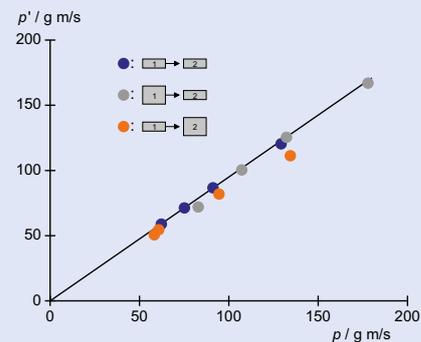


Fig. 2: Quantità di moto totale dei partner d'urto dopo l'urto elastico in funzione della quantità di moto di partenza.

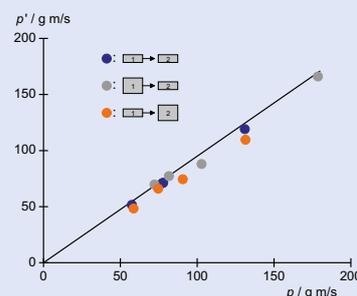


Fig. 3: Quantità di moto totale dei partner d'urto dopo l'urto anelastico in funzione della quantità di moto di partenza.

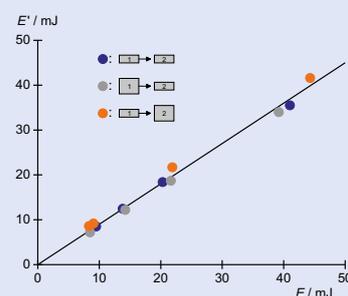


Fig. 4: Energia totale dei partner d'urto dopo l'urto elastico in funzione dell'energia iniziale.

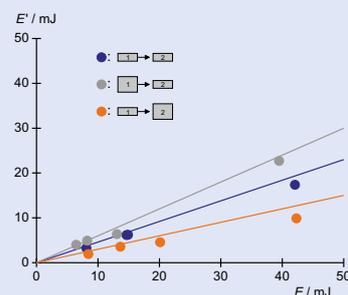
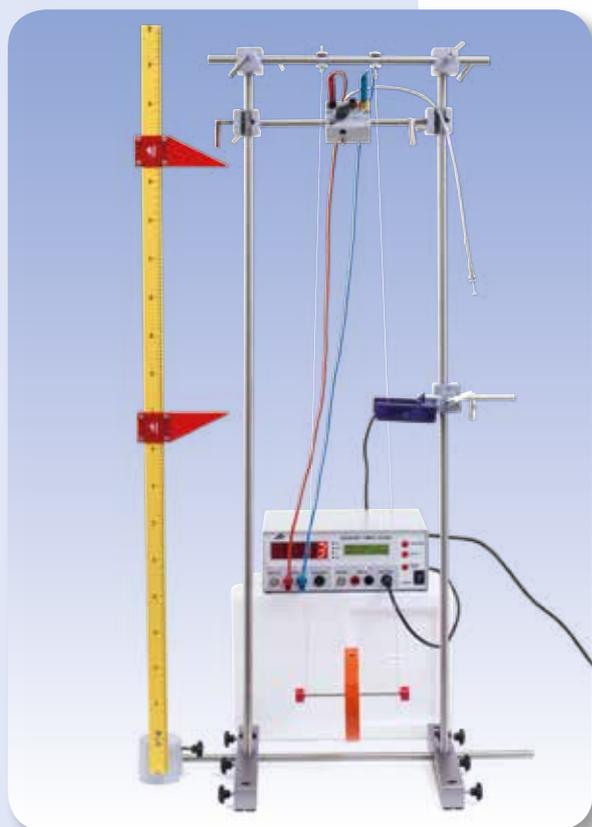


Fig. 5: Energia totale dei partner d'urto dopo l'urto anelastico in funzione dell'energia iniziale.

UE1040320

RUOTA DI MAXWELL



SCOPO

Conferma della conservazione dell'energia con la ruota di Maxwell

RIASSUNTO

La ruota di Maxwell è sospesa su entrambi i lati del proprio asse a un filo su cui scorre svolgendosi e riavvolgendosi. Durante il movimento, l'energia potenziale viene trasformata in energia cinetica e nuovamente in energia potenziale. Il movimento di svolgimento e riavvolgimento prosegue fino a quando l'energia determinata dall'altezza iniziale non viene completamente esaurita dall'attrito e dalla perdita in riflessione. Nell'esperimento, viene sistemata a diverse altezze una fotocellula, interrotta ripetutamente dall'asse della ruota di Maxwell durante il proprio movimento discendente e ascendente. Dai tempi di interruzione è possibile calcolare le velocità istantanee e, da esse, le energie cinetiche.

FUNZIONI

- Registrazione del diagramma spazio-tempo e del diagramma velocità-tempo del primo movimento discendente.
- Determinazione dell'accelerazione e del momento d'inerzia.
- Determinazione delle energie cinetiche e potenziali durante il movimento ascendente e discendente.
- Conferma della conservazione dell'energia in considerazione dell'attrito e della perdita di riflessione.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Ruota di Maxwell	1000790
1	Dispositivo di sgancio per ruota di Maxwell	1018075
1	Contatore digitale con interfaccia (230 V, 50/60 Hz)	1003123 o
	Contatore digitale con interfaccia (115 V, 50/60 Hz)	1003122
1	Fotocellula	1000563
1	Base di supporto a forma di H	1018874
2	Asta di supporto, 1000 mm	1002936
5	Manicotto universale	1002830
1	Asta di supporto, 400 mm, 10 mm Ø	1012847
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75 cm, rosso/blu	1017718
Ulteriormente consigliato		
1	Bilancia elettronica 5000 g	1003434
1	Calibro a corsoio, 150 mm	1002601

BASI GENERALI

La ruota di Maxwell è sospesa su entrambi i lati del proprio asse a un filo su cui scorre svolgendosi. L'energia potenziale viene progressivamente trasformata in energia cinetica di rotazione. Non appena il filo è completamente svolto, la ruota continua a girare con un'energia di rotazione elevata, avvolgendo il filo verso l'altro lato e muovendosi per riconversione dell'energia cinetica in energia potenziale verso l'alto fino a quando l'energia cinetica non risulta completamente riconvertita. Il movimento di svolgimento e riavvolgimento si ripete fino a quando l'energia determinata dall'altezza iniziale dalla perdita di carico continua e non viene completamente esaurita dall'attrito e dalla perdita in riflessione.

Mentre si svolge e si riavvolge, la ruota si muove lentamente verso il basso e verso l'alto con una velocità v . Essa è vincolata dalla relazione

$$(1) \quad v = \omega \cdot r \text{ con } r: \text{ raggio dell'asse}$$

rispetto alla velocità angolare ω con cui la ruota gira intorno al proprio asse. L'energia totale è pertanto pari a

$$(2) \quad \begin{aligned} E &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{I}{m \cdot r^2} + 1 \right) \cdot v^2 \end{aligned}$$

m : massa, I : momento d'inertzia,

h : altezza sul punto di inversione inferiore, g : accelerazione di gravità

Essa descrive un movimento di traslazione con un'accelerazione orientata verso il basso.

$$(3) \quad \dot{v} = a = \frac{g}{\frac{I}{m \cdot r^2} + 1}$$

Tale accelerazione viene determinata nell'esperimento a partire dal tratto percorso nel tempo t

$$(4) \quad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

o dalla velocità istantanea raggiunta dopo il tempo t

$$(5) \quad v = a \cdot t.$$

A tale scopo, viene sistemata a diverse altezze h una fotocellula, interrotta ripetutamente dall'asse della ruota durante il proprio movimento di discendente e ascendente (v. Fig. 1). Un contatore digitale misura i tempi di interruzione Δt e il "tempo di caduta" t del primo movimento discendente.

ANALISI

Noti la massa m e il raggio dell'asse r , il momento d'inertzia viene determinato a partire dall'accelerazione a . Da (3) si ha

$$I = m \cdot r^2 \cdot \left(\frac{g}{a} - 1 \right).$$

Dai tempi di interruzione Δt si calcolano le velocità istantanee v e le energie cinetiche E_{kin} :

$$v = \frac{2 \cdot r}{\Delta t} \quad \text{e} \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{I}{m \cdot r^2} + 1 \right) \cdot v^2.$$

Per l'energia potenziale vale

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h.$$

Le perdite chiaramente riconoscibili in Fig. 4 in termini di bilancio energetico sono descrivibili supponendo una forza di attrito costante contro la direzione del movimento e una perdita di energia non trascurabile nel cambio di direzione presso il punto di inversione inferiore.

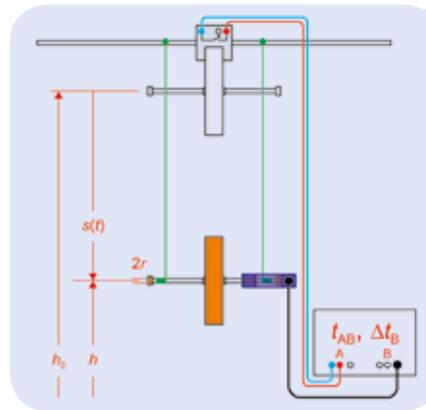


Fig. 1: Rappresentazione schematica della struttura sperimentale

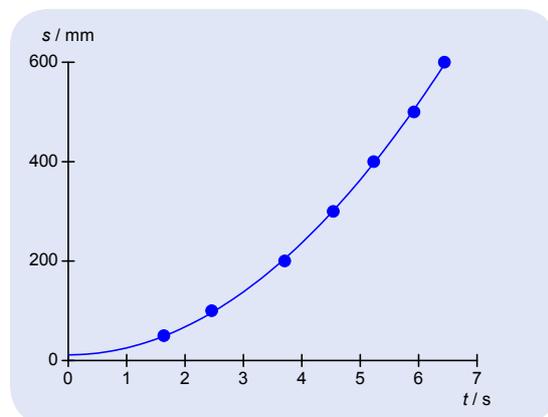


Fig. 2: Diagramma spazio-tempo del primo movimento discendente

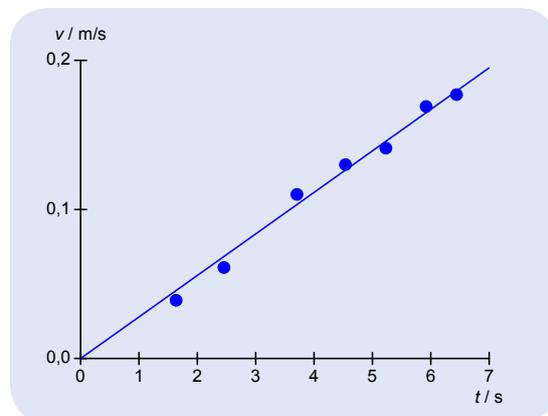


Fig. 3: Diagramma velocità-tempo del primo movimento discendente

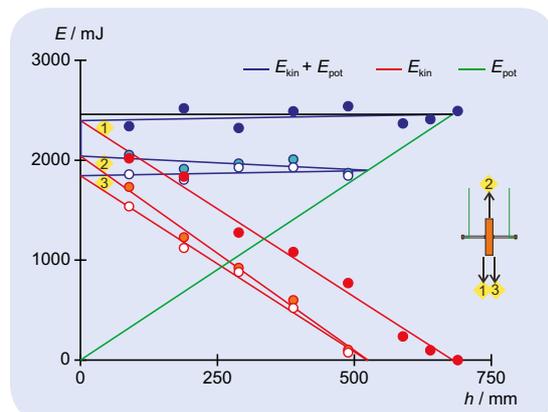


Fig. 4: Bilancio energetico in funzione dell'altezza h

UE1050221

PENDOLO REVERSIBILE DI KATER**SCOPO**

Determinazione dell'accelerazione di gravità locale con l'ausilio di un pendolo reversibile

FUNZIONI

- **Sincronizzazione di un pendolo reversibile al medesimo periodo di oscillazione intorno a due punti di sospensione.**
- **Determinazione del periodo di oscillazione e calcolo dell'accelerazione di gravità locale.**

RIASSUNTO

Il pendolo reversibile è una particolare struttura del pendolo fisico. Esso dispone di due punti di sospensione alternativi e può essere regolato di modo che il periodo di oscillazione sia identico in entrambi i casi. La lunghezza del pendolo ridotta coincide con la distanza dei due fulcri. Ciò facilita la determinazione dell'accelerazione di gravità locale da periodo di oscillazione e lunghezza del pendolo ridotto. La sincronizzazione del pendolo reversibile si ottiene nell'esperimento spostando in maniera adeguata un peso tra i due fulcri, mentre un contrappeso leggermente più grande rimane fisso al di fuori di essi.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Pendolo reversibile di Kater	1018466
1	Fotocellula	1000563
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

BASI GENERALI

Il pendolo reversibile è una particolare struttura del pendolo fisico. Esso dispone di due punti di sospensione alternativi e può essere regolato di modo che il periodo di oscillazione sia identico in entrambi i casi. La lunghezza del pendolo ridotta coincide con la distanza dei due fulcri. Ciò facilita la determinazione dell'accelerazione di gravità locale da periodo di oscillazione e lunghezza del pendolo ridotta.

Quando un pendolo fisico oscilla liberamente intorno alla propria posizione di riposo con piccole deviazioni ϕ , l'equazione del moto è

$$(1) \quad \frac{J}{m \cdot s} \cdot \ddot{\phi} + g \cdot \phi = 0.$$

J : momento d'inerzia intorno all'asse di oscillazione,
 g : accelerazione di gravità,
 m : peso del pendolo,
 s : distanza tra asse di oscillazione e baricentro

La grandezza

$$(2) \quad L = \frac{J}{m \cdot s}$$

è la lunghezza del pendolo ridotta del pendolo fisico. Un pendolo matematico di tale lunghezza oscilla con identico periodo di oscillazione.

Per il momento d'inerzia vale per il teorema di Steiner

$$(3) \quad J = J_s + m \cdot s^2$$

J_s : momento d'inerzia intorno all'asse del baricentro

A un pendolo reversibile con due fulcri ad una distanza d sono pertanto associate le due lunghezze ridotte del pendolo

$$(4) \quad L_1 = \frac{J_s}{m \cdot s} + s \quad \text{e} \quad L_2 = \frac{J_s}{m \cdot (d-s)} + d - s$$

Esse coincidono se il pendolo reversibile è sincronizzato in modo tale che il periodo di oscillazione intorno ai due fulcri risulta identico. Si ha quindi

$$(5) \quad s = \frac{d}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \frac{J_s}{m}}$$

e

$$(6) \quad L_1 = L_2 = d.$$

Il periodo di oscillazione T è in questo caso pari a

$$(7) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{d}{g}}$$

La sincronizzazione del pendolo reversibile si ottiene nell'esperimento spostando in maniera adeguata un peso $m_2 = 1$ kg tra i fulcri, mentre un contrappeso di massa leggermente più grande $m_1 = 1,4$ kg è fisso al di fuori di esse. La misurazione del periodo di oscillazione avviene in maniera elettronica, poiché l'estremità inferiore del pendolo interrompe periodicamente una fotocellula. In questo modo, i periodi di oscillazione T_1 e T_2 associati alle lunghezze ridotte L_1 e L_2 del pendolo vengono misurati in funzione della posizione x_2 del peso m_2 .

ANALISI

Le due curve di misurazione $T_1(x_2)$ e $T_2(x_2)$ si intersecano due volte al valore $T = T_1 = T_2$, dove per la determinazione precisa dei punti di intersezione fra punti di misurazione si effettua un'interpolazione. Dal valore rilevato si calcola

$$g = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot d, \quad d = 0,8 \text{ m}$$

con una precisione relativa di 0,3 per mille.

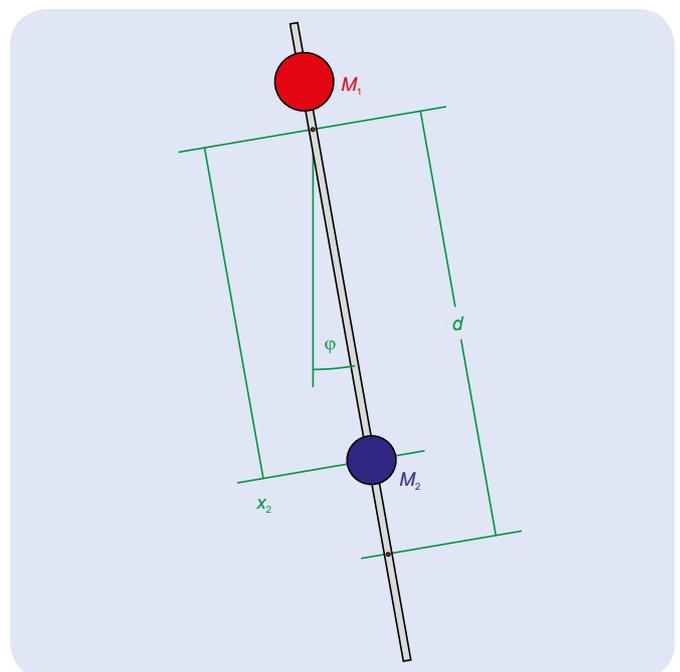


Fig. 1: Rappresentazione schematica del pendolo reversibile

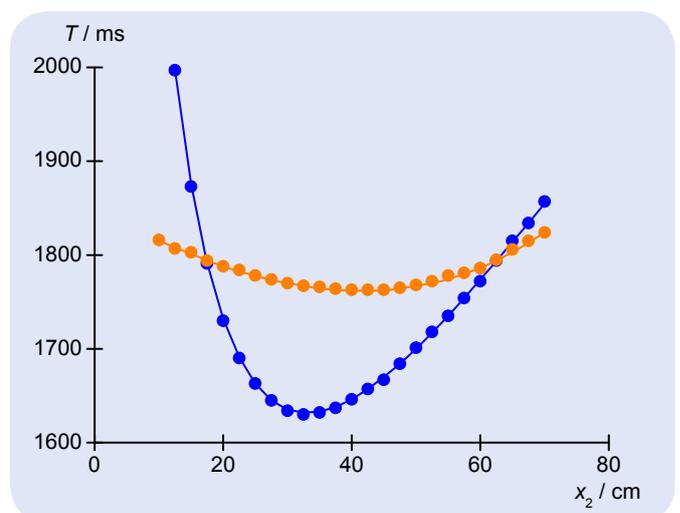
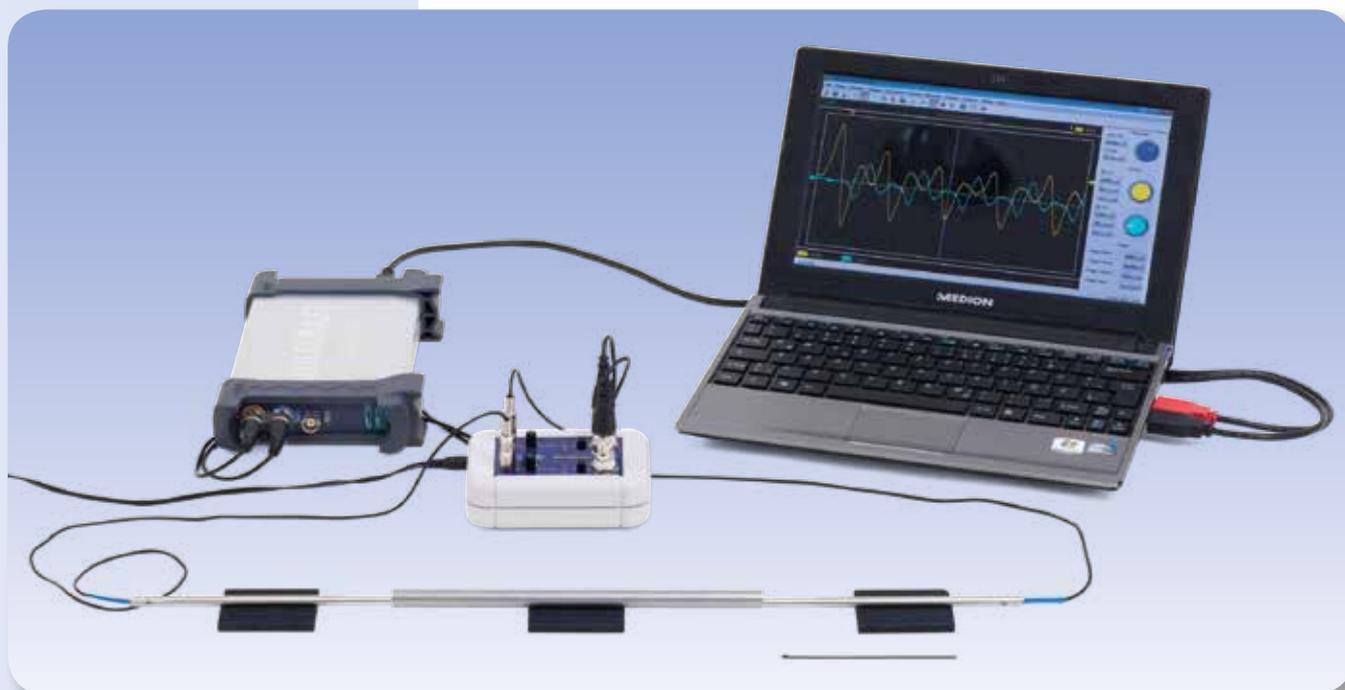


Fig. 2: Periodi di oscillazione misurati T_1 e T_2 in funzione della posizione del peso 2.



FUNZIONI

- Eccitazione a impulso di onde sonore longitudinali in aste a sezione circolare e rilevamento con due sonde microfono.
- Analisi di impulsi sonori in funzione del materiale e della lunghezza delle aste per mezzo di un oscilloscopio.
- Determinazione della velocità longitudinale del suono nei materiali a partire dal periodo degli impulsi sonori.
- Determinazione dei moduli di elasticità dei materiali a partire dalla velocità longitudinale del suono e dalla densità.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

SCOPO

Analisi di onde sonore longitudinali in barre a sezione circolare e determinazione della velocità del suono longitudinale

RIASSUNTO

Le onde sonore possono propagarsi in un corpo solido sotto forma di onde longitudinali, trasversali, di espansione o di flessione. Un'onda longitudinale elastica si propaga in un'asta secondo una sequenza periodica di espansione e compressione nella direzione della lunghezza. Se il diametro dell'asta è notevolmente inferiore alla sua lunghezza, la velocità di propagazione dipende solo dal modulo di elasticità e dalla densità del materiale. Essa viene calcolata nell'esperimento a partire dalla durata degli impulsi sonori dopo un'eccitazione a impulso.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Kit "Propagazione del suono in aste" (230 V, 50/60 Hz)	1018469 o
	Kit "Propagazione del suono in aste" (115 V, 50/60 Hz)	1018468
1	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo BNC, 0,5 m	5007670

BASI GENERALI

Le onde sonore possono propagarsi non solo nei gas o nei liquidi, ma anche nei corpi solidi, dove si presentano sotto forma di onde longitudinali, trasversali, di espansione o di flessione.

Un'onda longitudinale elastica si propaga in un'asta secondo una sequenza periodica di espansione e compressione nella direzione della lunghezza. L'espansione viene generata da un periodico spostamento degli atomi dalla rispettiva posizione di riposo. In un'asta il cui diametro sia notevolmente infe-

riore rispetto alla lunghezza, la contrazione trasversale è trascurabile, vale a dire che per il numero di Poisson vale in buona approssimazione $\mu = 0$. La relazione tra le variazioni spazio-temporali di tensione σ e spostamento ξ è in questo caso descritta dalle seguenti equazioni:

$$(1) \quad \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{e} \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad \text{con} \quad v = \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

ρ : densità del materiale dell'asta,
 E : modulo di elasticità dell'asta

Ne derivano le equazioni d'onda

$$(2) \quad \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

con la velocità del suono longitudinale

$$(3) \quad c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Nell'esperimento si generano onde sonore longitudinali in aste di materiali e lunghezze differenti mediante eccitazione a impulso su un'estremità dell'asta, si rilevano tali onde per mezzo di sonde microfono poste sull'estremità eccitata e su quella opposta rappresentandole poi su un oscilloscopio. Le estremità dell'asta costituiscono superfici limite ad elevata impedenza acustica, fra cui gli impulsi sonori si muovono avanti e indietro. Dagli oscillogrammi si determinano i periodi degli impulsi sonori. Nel caso di aste lunghe gli impulsi sonori a riflessione multipla sono nettamente divisi in senso temporale, nel caso di aste corte possono sovrapporsi in "onde stazionarie".

ANALISI

Dai periodi degli impulsi sonori si determinano le velocità longitudinali del suono come da

$$(4) \quad c_l = \frac{2 \cdot L}{T}, \quad L: \text{lunghezza asta:}$$

poiché l'impulso sonoro passa nel tempo T due volte attraverso l'asta.

Dalle velocità del suono rilevate e dalle densità dei materiali determinate mediante pesata si calcola il modulo di elasticità in base a (3).

Tab. 1: Velocità longitudinali dal suono c_l , spessori ρ e moduli di elasticità E misurati per diversi materiali.

Materiale	c_l (m / s)	ρ (g / cm ³)	E (m / s)
Vetro	5370	2,53	73
Alluminio	5110	2,79	73
Legno (faggio)	5040	0,74	19
Acciaio inossidabile	4930	7,82	190
Rame	3610	8,84	115
Ottone	3550	8,42	106
Vetro acrilico	2170	1,23	6
PVC	1680	1,50	4

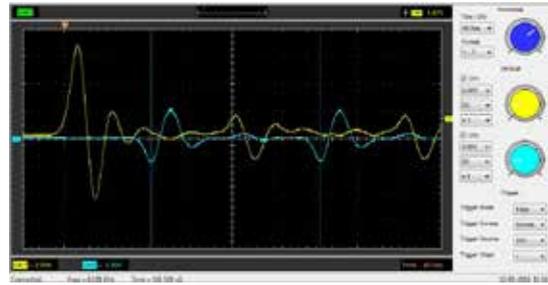


Fig. 1: Propagazione di un impulso sonoro, segnale presso l'estremità eccitata della barra (giallo) (asta di acciaio inossidabile, 400 mm)

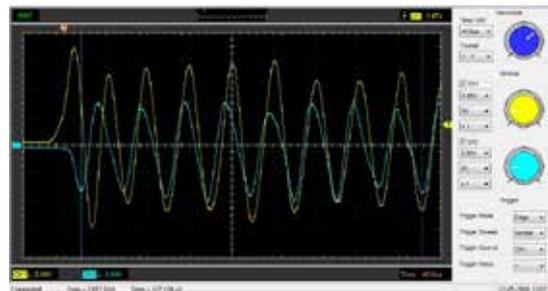


Fig. 2: Onda stazionaria, segnale presso l'estremità eccitata della barra (giallo) (asta di acciaio inossidabile, 100 mm)

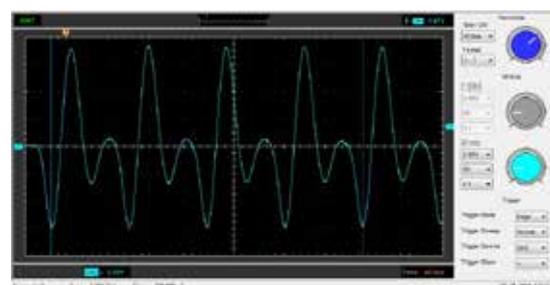
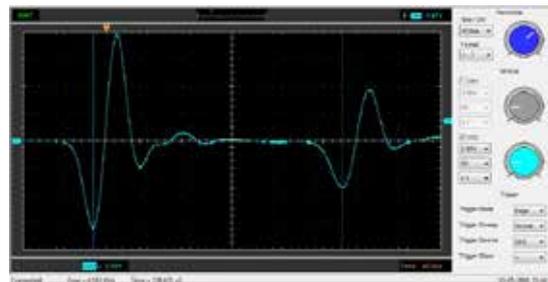


Fig. 3: Propagazione dell'impulso sonoro in un'asta in PVC lunga 200 mm (sopra) e un'asta in vetro lunga 200 mm (sotto). Segnale della sonda microfono presso l'estremità dell'asta opposta a quella eccitata

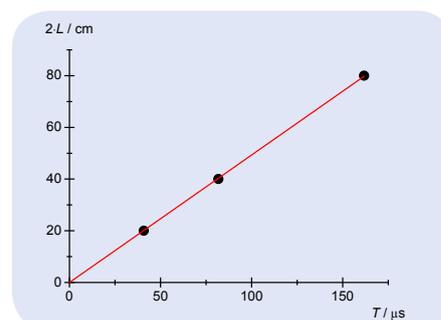
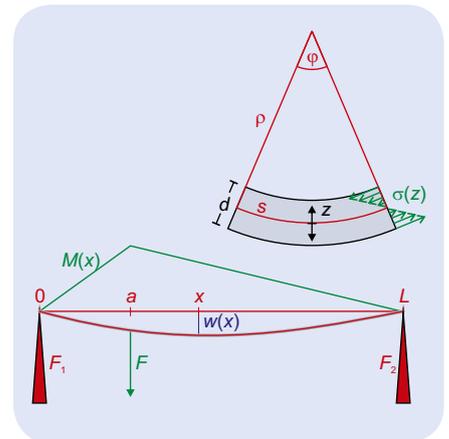
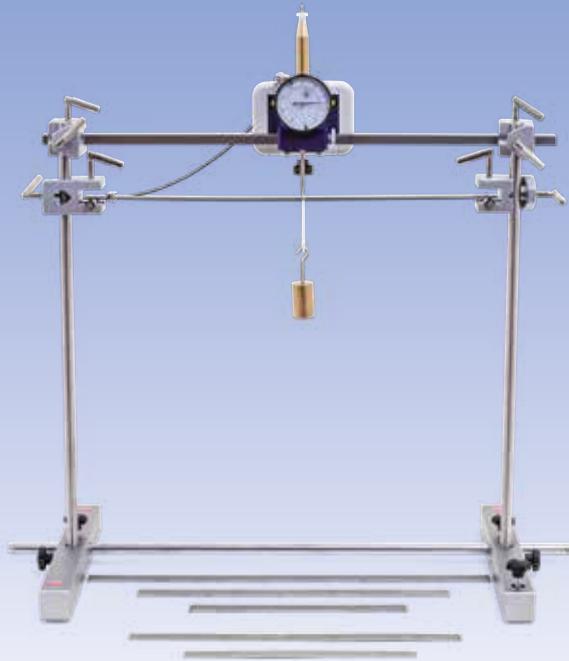


Fig. 4: Percorso del segnale $2 \cdot L$ in funzione dei periodi T per le aste in acciaio inossidabile



SCOPO

Misurazione della deformazione di barre piatte supportate su due lati e determinazione del modulo di elasticità

FUNZIONI

- Misurazione del profilo di deformazione con carico centrico ed eccentrico
- Misurazione della deformazione in funzione della forza.
- Misurazione della deformazione in funzione di lunghezza, larghezza, spessore e materiale e determinazione del modulo di elasticità.

RIASSUNTO

La resistenza alla deformazione per flessione di una barra piatta operata da una forza esterna si può calcolare in maniera analitica purché la deformazione sia notevolmente inferiore rispetto alla lunghezza della barra stessa. Essa è proporzionale al modulo di elasticità E del materiale da cui è composta la barra. Nell'esperienza si determina, attraverso la deformazione a forza nota, il modulo di elasticità di acciaio e alluminio.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Sistema di misurazione modulo di elasticità	1018527
1	Kit di ampliamento modulo di elasticità	1018528
1	Metro a nastro tascabile, 2 m	1002603
1	Micrometro con staffa	1002600

BASI GENERALI

La resistenza alla deformazione per flessione di una barra piatta operata da una forza esterna si può calcolare in maniera analitica purché la deformazione sia notevolmente inferiore rispetto alla lunghezza della barra stessa. Essa è proporzionale al modulo di elasticità E del materiale da cui è composta la barra. Il modulo di elasticità si determina pertanto dalla deformazione della barra a forza nota.

Per il calcolo, la barra viene suddivisa in segmenti paralleli che, durante la flessione, sul lato interno si comprimono e su quello esterno si estendono. I segmenti neutrali non subiscono né estensione né compressione, mentre l'estensione e la compressione relativa ϵ dei restanti segmenti e la tensione correlata σ dipendono dalla distanza z dai segmenti neutrali:

$$(1) \quad \epsilon(z) = \frac{s + \Delta s(z)}{s} = \frac{z}{\rho(x)} \quad \text{e} \quad \sigma(z) = E \cdot \epsilon(z)$$

$\rho(x)$: raggio di curvatura locale della flessione



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

La curvatura è pertanto generata dal momento flettente locale

$$(2) \quad M(x) = \int_A \sigma(z) \cdot z \cdot dA = \frac{1}{\rho(x)} \cdot E \cdot I$$

con $I = \int_A z^2 \cdot dA$: momento d'inerzia

In alternativa al raggio di curvatura $\rho(x)$, nell'esperimento si misura il profilo di deformazione $w(x)$ rispetto alla posizione di riposo, calcolabile come segue. Finché le variazioni $dw(x) / dx$ della deformazione sono sufficientemente ridotte, vale la correlazione

$$(3) \quad \frac{d^2 w}{dx^2}(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \frac{M(x)}{E \cdot I},$$

da cui per doppia integrazione si ricava il profilo di deformazione.

Un esempio tipico è l'osservazione di una barra avente lunghezza L supportata presso entrambe le estremità su cui è applicata una forza F verso il basso, agente sul punto a . In condizioni di equilibrio, la somma di tutte le forze agenti su di essa è pari a zero:

$$(4) \quad F_1 + F_2 - F = 0$$

Lo stesso vale per la somma di tutti i momenti agenti su un punto x qualsiasi della barra:

$$(5) \quad M(x) - F_1 \cdot x - F_2 \cdot (L - x) + F \cdot (a - x) = 0$$

Alle estremità della barra non si registra alcuna curvatura né deformazione, si ha quindi $M(0) = M(L) = 0$ e $w(0) = w(L) = 0$. $M(x)$ è pertanto completamente determinato.

$$(6) \quad M(\zeta) = \begin{cases} F \cdot L \cdot (1 - \alpha) \cdot \zeta; & 0 \leq \zeta \leq \alpha \\ F \cdot L \cdot \alpha \cdot (1 - \zeta); & \alpha < \zeta \leq 1 \end{cases}$$

con $\zeta = \frac{x}{L}$ e $\alpha = \frac{a}{L}$

E per doppia integrazione si ottiene il profilo di deformazione

$$(7) \quad w(\zeta) = \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \cdot \left[(1 - \alpha) \cdot \frac{\zeta^3}{6} - \left(\frac{\alpha^3}{6} - \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\alpha}{3} \right) \cdot \zeta \right]$$

$$\frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \cdot \left[\frac{\alpha^3}{6} - \left(\frac{\alpha^3}{6} + \frac{\alpha}{3} \right) \zeta + \frac{\alpha}{2} \cdot \zeta^2 - \frac{\alpha}{6} \zeta^3 \right]$$

L'andamento viene verificato nell'esperimento con carico centrico ($\alpha = 0,5$) ed eccentrico ($\alpha < 0,5$).

ANALISI

Con carico centrico si ha $w(x = \frac{L}{2}, a = \frac{L}{2}) = -\frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$

Per un rettangolo avente larghezza b e altezza d si calcola

$$I = \int_A z^2 \cdot dA = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} z^2 \cdot b \cdot dz = \frac{d^3}{12} \cdot b$$

Si ha quindi $w(x = \frac{L}{2}, a = \frac{L}{2}) = -\frac{1}{4} \cdot \frac{F}{E} \cdot \frac{L^3}{d^3} \cdot \frac{1}{b}$

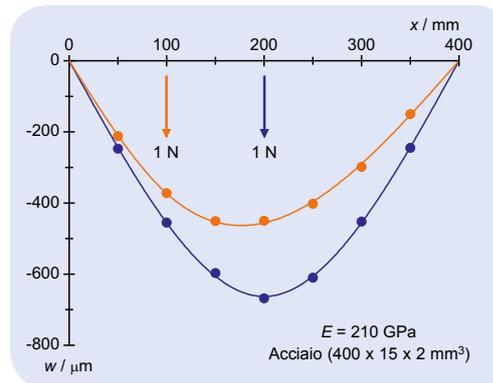


Fig. 1: Profilo di deformazione misurato e calcolato con carico centrico ed eccentrico

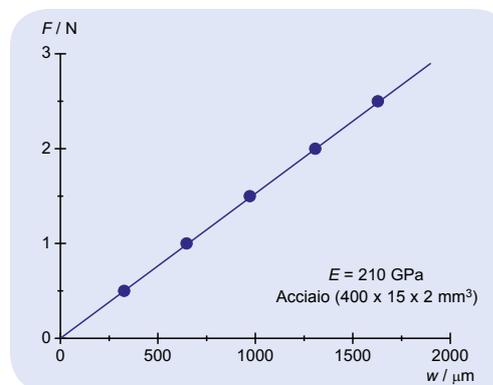


Fig. 2: Conferma della legge di Hooke

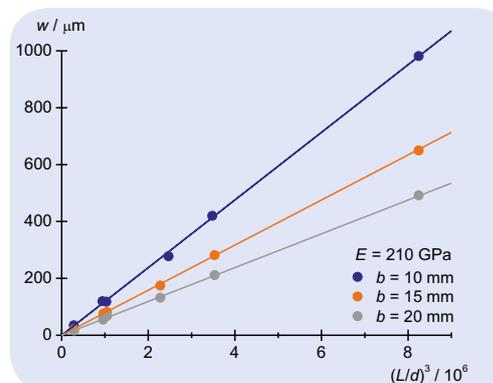


Fig. 3: Dipendenza della deformazione da $(L/d)^3$

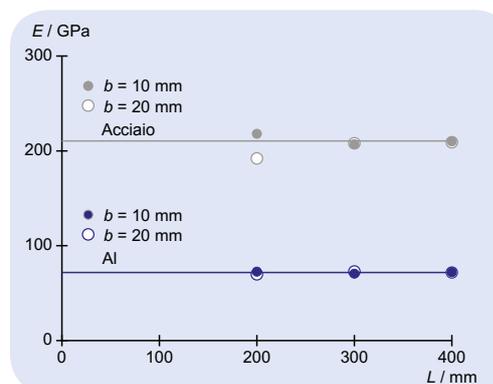
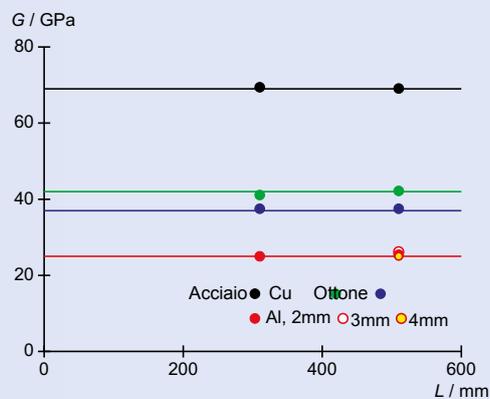
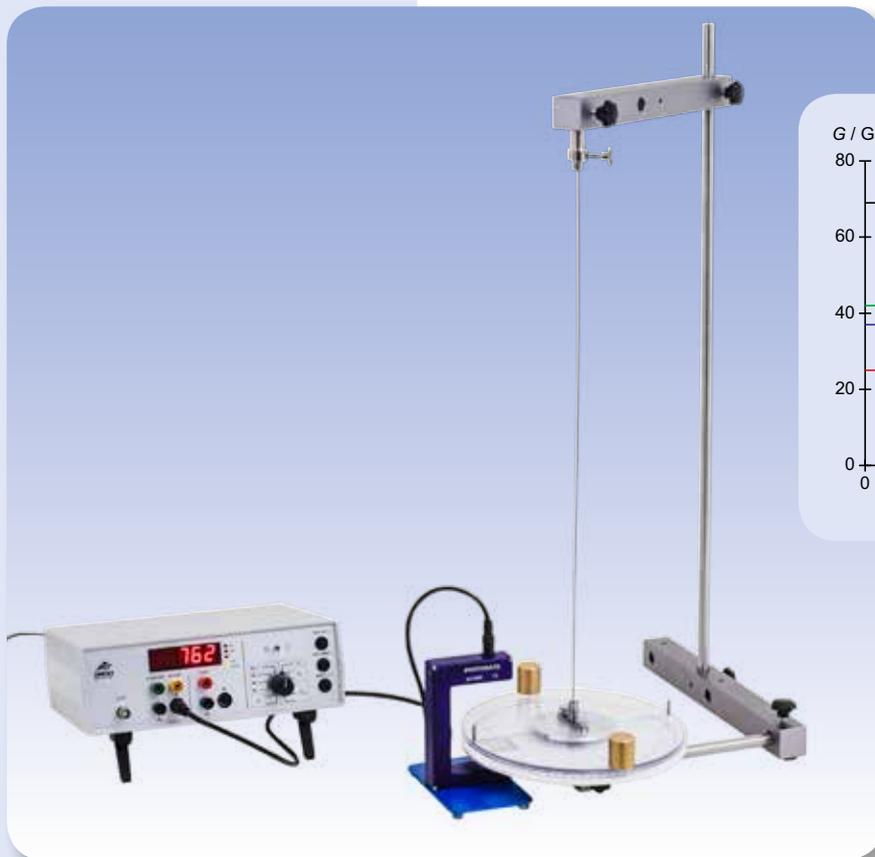


Fig. 4: Modulo di elasticità di acciaio e alluminio

UE1090300

TORSIONE DI BARRE CILINDRICHE



SCOPO

Determinazione della costante di torsione angolare e del modulo di taglio

FUNZIONI

- Determinazione della costante di torsione di barre cilindriche in funzione della lunghezza.
- Determinazione della costante di torsione di barre cilindriche in funzione del diametro.
- Determinazione della costante di torsione di barre cilindriche di materiale diverso e determinazione del modulo di taglio.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

RIASSUNTO

Per deformare un corpo solido occorre una forza esterna. Ad essa si oppone la cosiddetta resistenza alla deformazione, che varia a seconda del materiale e della geometria del solido stesso nonché della direzione della forza esterna applicata. La deformazione è reversibile e proporzionale alla forza applicata purché questa non sia eccessiva. Un esempio spesso esaminato è la torsione di una barra tonda omogenea fissata ad un solo estremo. La rispettiva resistenza alla deformazione viene calcolata in maniera analitica e determinata mediante la realizzazione di un sistema oscillante formato da barra e disco del pendolo misurando il periodo di oscillazione.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Torsiometro	1018550
1	Kit di ampliamento per torsiometro	1018787
1	Fotocellula	1000563
1	Contatore digitale (230 V, 50/60 Hz)	1001033 o
	Contatore digitale (115 V, 50/60 Hz)	1001032

BASI GENERALI

Per deformare un corpo solido occorre una forza esterna. Ad essa si oppone la cosiddetta resistenza alla deformazione, che varia a seconda del materiale e della geometria del solido stesso nonché dalla direzione della forza esterna applicata. La deformazione è elastica, quindi reversibile e proporzionale alla forza applicata, purché questa non sia eccessiva.

Un esempio spesso esaminato è la torsione di una barra tonda omogenea fissata ad un solo estremo, poiché è possibile calcolarne la resistenza alla deformazione in maniera analitica. A tale scopo, si considerano segmenti infinitesimi radiali e cilindrici di lunghezza L . Finché la barra non si piega, una torsione all'estremità libera di un piccolo angolo ψ causa uno spostamento angolare dei segmenti di raggio r pari a

$$(1) \quad \alpha_r = \frac{r}{L} \cdot \psi$$

(v. Fig. 1). Lo sforzo di taglio è allora pari a

$$(2) \quad \tau_r = \frac{dF_{r,\varphi}}{dA_{r,\varphi}} = G \cdot \alpha_r$$

G : modulo di taglio della barra

La componente della forza $dF_{r,\varphi}$ tangenziale alla superficie infinitesima

$$(3) \quad \Delta A_{r,\varphi} = r \cdot d\varphi \cdot dr$$

è pari a

$$(4) \quad dF_{r,\varphi} = G \cdot \frac{r^2}{L} \cdot \psi \cdot d\varphi \cdot dr$$

e si calcola di conseguenza facilmente la forza dF_r necessaria alla torsione del cilindro cavo infinitesimo di raggio r di un angolo ψ e il relativo momento torcente dM_r :

$$(5) \quad dM_r = r \cdot dF_r = G \cdot 2\pi \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \psi \cdot dr$$

Per la torsione dell'intero cilindro con raggio r_0 vale di conseguenza

$$(6) \quad M = \int_0^{r_0} dM_r = D \cdot \psi \quad \text{con} \quad D = G \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_0^4}{L}$$

La proporzionalità tra momento torcente M e angolo di torsione ψ è soddisfatta, ovvero la costante di torsione D è costante fino a quando il momento torcente M risulta eccessivo. In caso di valori troppo elevati, la deformazione diviene plastica e irreversibile.

Per determinare la costante di torsione, nell'esperimento si unisce all'estremità libera della barra un disco a pendolo che oscilla per deviazioni non troppo ampie con un periodo pari a

$$(7) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}}$$

J : momento d'inerzia del disco

intorno all'asse di torsione. Noto il momento d'inerzia, dal periodo di oscillazione si calcola la costante di torsione. Più esattamente, si suddivide il momento d'inerzia in momento d'inerzia J_0 del disco del pendolo e momento d'inerzia di due masse supplementari m disposte nel raggio R intorno all'asse di torsione:

$$(8) \quad J = J_0 + 2 \cdot m \cdot R^2$$

e si misura il periodo di oscillazione T per il disco con massa supplementare e periodo di oscillazione T_0 per il disco senza masse supplementari.

ANALISI

Per la costante di torsione si calcola partendo da (7) e da (8) l'equazione condizionale

$$D = 4\pi^2 \cdot \frac{2 \cdot m \cdot R^2}{T^2 - T_0^2}$$

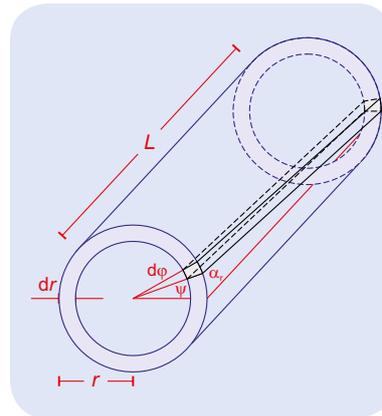


Fig. 1: Rappresentazione schematica del calcolo del momento torcente dM_r necessario alla torsione di un cilindro cavo avente lunghezza L , raggio r e spessore parete d_r .

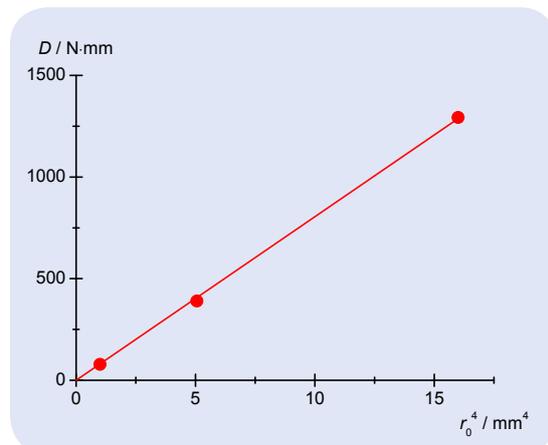


Fig. 2: Costante di torsione di aste di alluminio aventi lunghezza 500 mm in funzione di r_0^4 .

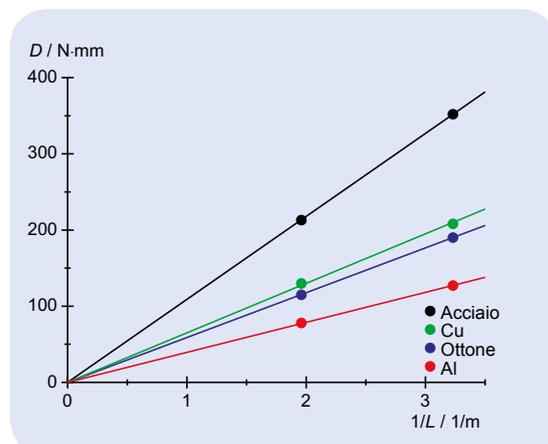


Fig. 3: Costante di collegamento angolare di barre circolari in funzione di $1/L$.



FUNZIONI

- Misurazione punto per punto della pressione p dell'aria racchiusa in funzione della temperatura T .
- Rappresentazione dei valori misurati in un diagramma $p-T$.
- Conferma della legge di Amontons.

SCOPO

Conferma del rapporto lineare fra la pressione e la temperatura di un gas ideale

RIASSUNTO

La validità della legge di Amontons (nota in Italia come seconda legge di Volta – Gay Lussac) per i gas ideali viene dimostrata sull'aria. Per tale dimostrazione si procede a riscaldare l'aria, che si trova in un volume chiuso all'interno di una sfera di metallo cava, mediante un bagno in acqua calda e al contempo vengono misurate la temperatura e la pressione.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Sfera di gas di Jolly	1012870
1	Agitatore magnetico con riscaldamento (230 V, 50/60 Hz)	1002807 o
	Agitatore magnetico con riscaldamento (115 V, 50/60 Hz)	1002806
1	Termometro tascabile digitale rapido	1002803
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
1	Set di 10 becher, forma bassa	1002872
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Asta di supporto, 250 mm	1002933
1	Doppio manicotto	1002827
1	Morsetto universale	1002833



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

BASI GENERALI

Il volume di una quantità di gas dipende dalla pressione a cui si trova il gas e dalla sua temperatura. A volume e quantità di gas costanti, anche il quoziente tra pressione e temperatura è costante. Questa legge scoperta da *Guillaume Amontons* vale per i gas allo stato ideale, ovvero quando la temperatura del gas si trova molto al di sopra della cosiddetta temperatura critica.

La legge di Amontons

$$(1) \quad \frac{p}{T} = \text{cost.}$$

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 la quantità di sostanza n di un gas:

$$(2) \quad p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

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

Dall'equazione (2) di validità generale è possibile derivare il caso speciale (1) supponendo che il volume V e la quantità di sostanza n del sistema non varino.

Nell'esperimento si dimostra la validità della legge di Amontons utilizzando l'aria come gas ideale. A tale scopo, l'aria racchiusa nel volume fisso di una sfera di metallo cava viene riscaldata tramite un bagno in acqua calda. Contemporaneamente vengono misurate la temperatura ϑ in °C mediante un termometro digitale e la pressione p mediante un manometro collegato alla sfera cava.

ANALISI

Il rapporto lineare fra la pressione e la temperatura viene confermato dall'andamento di una linea retta

$$(3) \quad p = a \cdot \vartheta + b$$

fra i punti di misurazione. Mediante estrapolazione del valore della pressione p fino al valore 0 è possibile determinare lo zero assoluto:

$$(4) \quad \vartheta_0 = -\frac{b}{a} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

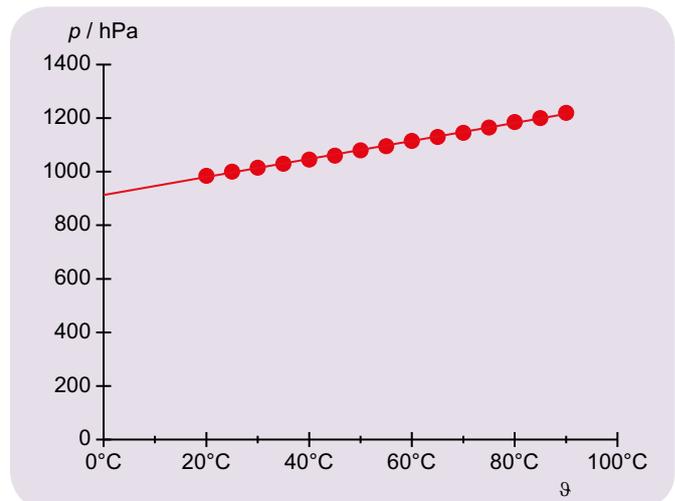


Fig. 1: Diagramma pressione-temperatura dell'aria a volume e quantità di sostanza costanti.

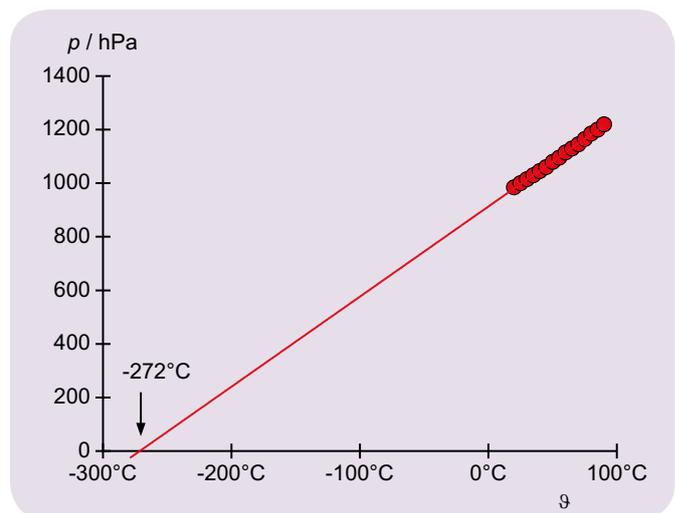


Fig. 2: Estrapolazione della pressione fino al valore $p = 0$.

UE3030350

BILANCIA ELETTRODINAMICA**FUNZIONI**

- Misurazione della forza agente su un conduttore attraversato da corrente in funzione dell'intensità di corrente.
- Misurazione della forza agente su un conduttore attraversato da corrente in funzione della lunghezza.
- Calibrazione del campo magnetico.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1**SCOPO**

Misurazione della forza agente su un conduttore attraversato da corrente e immerso in un campo magnetico

RIASSUNTO

La bilancia elettrodinamica si basa sugli esperimenti sulla corrente elettrica condotti da *André-Marie Ampère*. Per mezzo di una bilancia viene misurata la forza di Lorentz agente su un conduttore attraversato da corrente e immerso in un campo magnetico. Nel presente esperimento il conduttore di corrente è agganciato a un meccanismo di sospensione fisso ed esercita sul magnete permanente, che induce il campo magnetico, una forza uguale ed opposta alla forza di Lorentz. Questa condizione provoca un'apparente variazione del peso del magnete permanente.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set bilancia elettrodinamica	1019188
1	Bilancia elettronica Scout Pro 200 g (230 V, 50/60 Hz)	1009772
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	1003312
1	Asta di supporto, 250 mm	1002933
1	Base di supporto, 3 gambe, 150 mm	1002835
1	Commutatore bipolare	1018439
3	Coppia di cavi per esperimenti, 75 cm	1002850

BASI GENERALI

La bilancia elettrodinamica si basa sugli esperimenti sulla corrente elettrica condotti da *André-Marie Ampère*. Con l'ausilio di una bilancia viene misurata la forza agente su un conduttore attraversato da corrente e immerso in un campo magnetico. Nell'esperimento viene impiegata una moderna bilancia elettronica di precisione per misurare il peso di un magnete permanente. Il peso varia in funzione della 3ª legge di Newton, nel momento in cui il campo magnetico, in cui è immerso il conduttore di corrente, esercita su quest'ultimo una forza di Lorentz.

Sulla bilancia è appoggiato un magnete permanente che genera un campo magnetico B orizzontale. Un conduttore di corrente orizzontale di lunghezza L , appeso a una barra rigida, è immerso verticalmente nel campo magnetico generato dal suddetto magnete permanente. Sul conduttore agisce la forza di Lorentz

$$(1) \quad \mathbf{F}_L = N \cdot e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

e : carica fondamentale, N : numero totale di tutti gli elettroni interessati dalla conduzione di corrente

La velocità di deriva media v è tanto più alta, quanto maggiore è la corrente I che scorre attraverso il conduttore:

$$(2) \quad I = n \cdot e \cdot A \cdot v$$

n : densità numerica di tutti gli elettroni interessati dalla conduzione di corrente, A : sezione trasversale del conduttore

Da

$$(3) \quad N = n \cdot A \cdot L$$

L : lunghezza del conduttore

ricaviamo

$$(4) \quad \mathbf{F}_L = I \cdot L \cdot \mathbf{e} \times \mathbf{B}$$

oppure

$$(5) \quad F_L = I \cdot L \cdot B$$

poiché il versore e , indicante la direzione del conduttore, è perpendicolare al campo magnetico. In base alla 3ª legge di Newton, sul magnete permanente agisce una forza uguale e opposta F che, a seconda del segno, provoca un aumento o una diminuzione del peso G del magnete permanente posto sulla bilancia. La funzione di taratura della bilancia consente di compensare elettronicamente il peso G , in modo tale che la bilancia indichi direttamente la forza antagonista F .

ANALISI

Si dimostra che la dipendenza dalla corrente della forza di Lorentz è ben descritta da una retta passante per l'origine (fig. 2). Ciò non vale per la dipendenza dalla lunghezza (fig. 3), dato che in questo caso entrano in gioco gli effetti di bordo sulle estremità del conduttore. Il campo magnetico del magnete permanente completamente montato viene calcolato in base agli incrementi lineari $a_2 = B L$ in fig. 2 e $a_3 = B I$ in fig. 3.

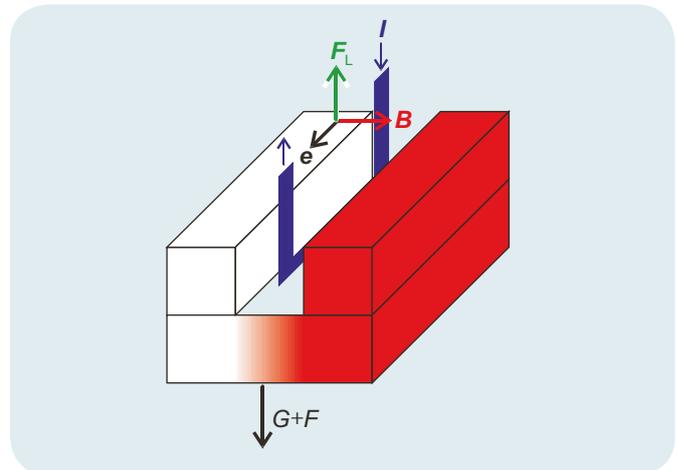


Fig. 1: Rappresentazione schematica della forza di Lorentz F_L esercitata sul conduttore attraversato da corrente e della forza antagonista $G + F$ esercitata sulla bilancia

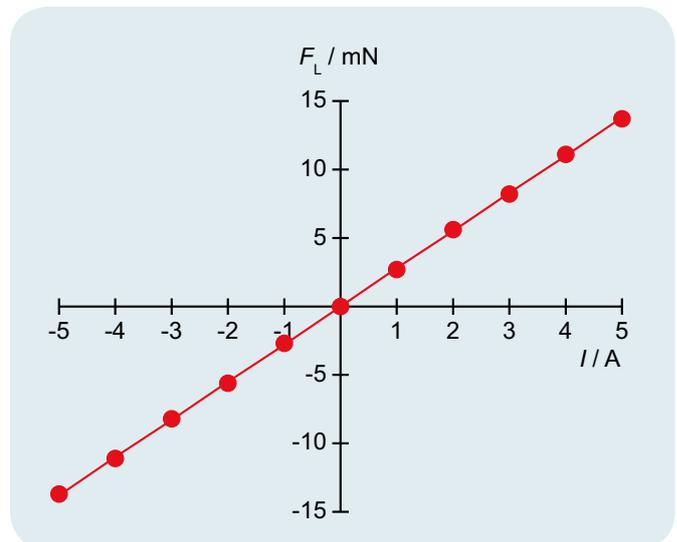


Fig. 2: Forza F_L in funzione dell'intensità di corrente I

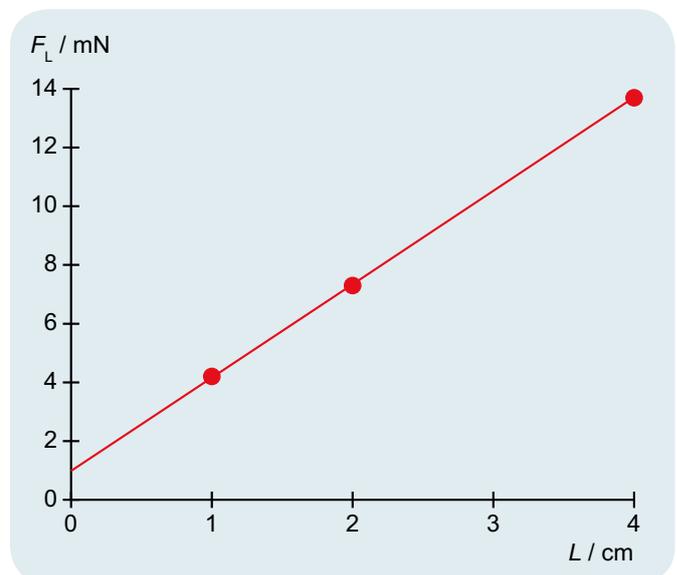
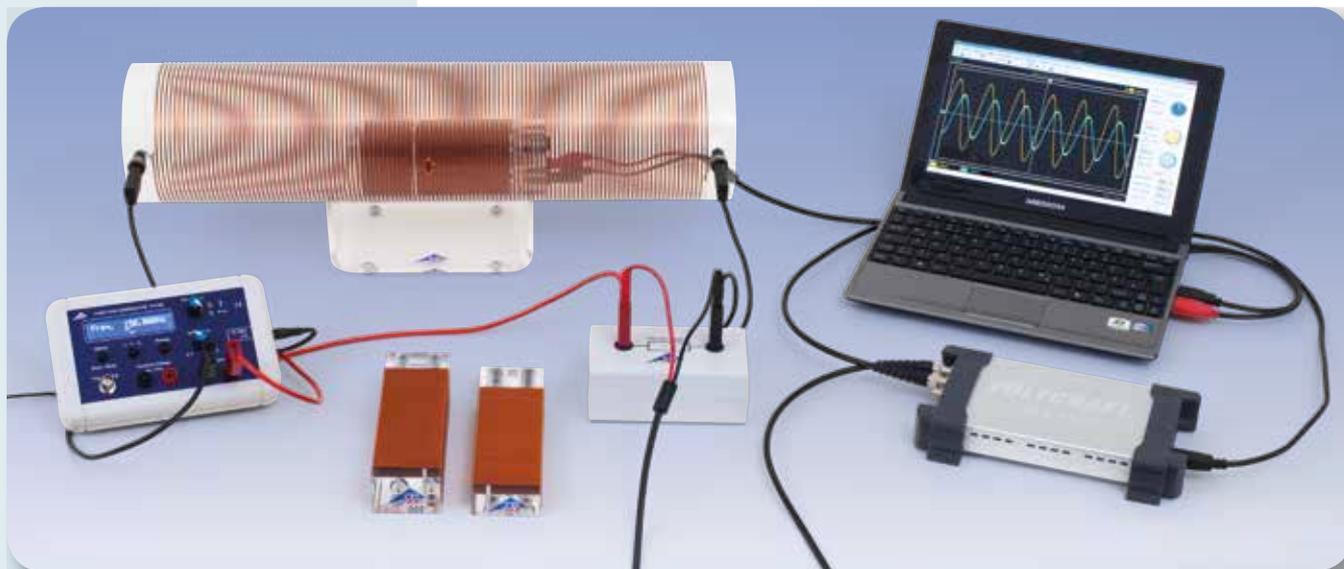


Fig. 3: Forza F_L in funzione della lunghezza del conduttore L

UE3040300

**INDUZIONE IN CAMPO
MAGNETICO VARIABILE****FUNZIONI**

- Misurazione della tensione indotta in funzione del numero di spire N della bobina di induzione.
- Misurazione della tensione indotta in funzione della sezione trasversale A della bobina di induzione.
- Misurazione della tensione indotta in funzione dell'ampiezza I_0 della corrente alternata inducente.
- Misurazione della tensione indotta in funzione della frequenza f della corrente alternata inducente.
- Misurazione della tensione indotta in funzione della forma del segnale della corrente alternata inducente.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1**SCOPO**

Misurazione della tensione indotta in una bobina di induzione

RIASSUNTO

Un conduttore con N spire chiuse è posto in un solenoide in cui scorre corrente alternata. La variazione nel tempo del flusso magnetico causa l'induzione di una tensione elettrica ai capi del conduttore. Tale tensione di induzione dipende dal numero di spire, dalla sezione trasversale della spira, così come dalla frequenza, dall'ampiezza e dalla forma del segnale della corrente alternata applicata alla bobina di campo. Si intende analizzare tali dipendenze e confrontarle con la teoria.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Set 3 bobine d'induzione	1000590
1	Bobina di campo 120 mm	1000592
1	Supporto per bobine cilindriche	1000964
1	Resistenze di precisione 1 Ω	1009843
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	Oscilloscopio USB 2x50 MHz	1017264
2	Cavo ad alta frequenza, connettore 4 mm / BNC	1002748
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm, nero	1002849
1	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75 cm, rosso/blu	1017718

BASI GENERALI

Qualsiasi variazione del flusso magnetico attraverso un conduttore con N spire chiuse induce ai capi di quest'ultimo una tensione elettrica. Tale variazione si verifica, ad esempio, quando il conduttore si trova in un solenoide in cui scorre corrente alternata.

Per la tensione indotta e dipendente dal tempo vale la legge dell'induzione elettromagnetica formulata da Faraday:

$$(1) \quad U(t) = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}(t).$$

Il flusso magnetico Φ che attraversa una superficie A viene così definito

$$(2) \quad \Phi = B \cdot A$$

B : densità di flusso magnetico,

quando la densità del flusso magnetico B attraversa la superficie A perpendicolarmente. Dall'equazione (1) consegue che:

$$(3) \quad U(t) = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}(t).$$

La bobina di campo genera nel conduttore ad anello la densità di flusso magnetico:

$$(4) \quad B = \mu_0 \cdot \frac{N_F}{L_F} \cdot I$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$: permeabilità del vuoto, N_F : numero di spire della bobina di campo, L_F : lunghezza della bobina di campo, I : corrente attraverso la bobina di campo

Dall'equazione (3) consegue che:

$$(5) \quad U(t) = -\mu_0 \cdot N \cdot A \cdot \frac{N_F}{L_F} \cdot \frac{dI}{dt}(t).$$

Innanzitutto, nell'esperimento si invia un segnale sinusoidale alla bobina di campo con l'ausilio di un generatore di funzione. L'ampiezza I_0 della corrente $I(t)$ che attraversa la bobina di campo viene determinata mediante una resistenza interposta e collegata in serie. Viene misurata l'ampiezza U_0 della tensione indotta $U(t)$ in funzione del numero di spire N e delle sezioni trasversali A della bobina di induzione, così come della frequenza f del segnale sinusoidale e dell'ampiezza I_0 della corrente che attraversa la bobina di campo. Oltre al segnale sinusoidale, per una bobina di induzione con numero di spire fisso, sezione trasversale fissa e frequenza fissa, vengono inviati alla bobina di campo anche un segnale ad onda triangolare e un segnale ad onda quadra. In ciascuno dei casi vengono eseguiti dei fermoimmagini (screenshot).

ANALISI

Per corrente sinusoidale

$$I = I(t) = I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t),$$

vale

$$U(t) = U_0 \cdot [-\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)]$$

con

$$U_0 = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_F}{L_F} \cdot N \cdot A \cdot I_0 \cdot f.$$

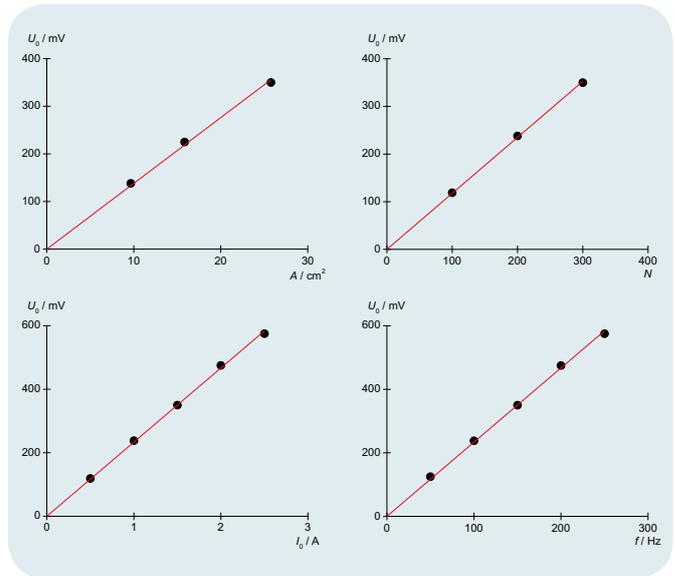


Fig. 1: Ampiezza della tensione indotta in base al numero di spire e alla sezione trasversale della bobina di induzione, all'ampiezza della corrente che attraversa la bobina di campo e alla frequenza del segnale sinusoidale inviato alla bobina di campo.

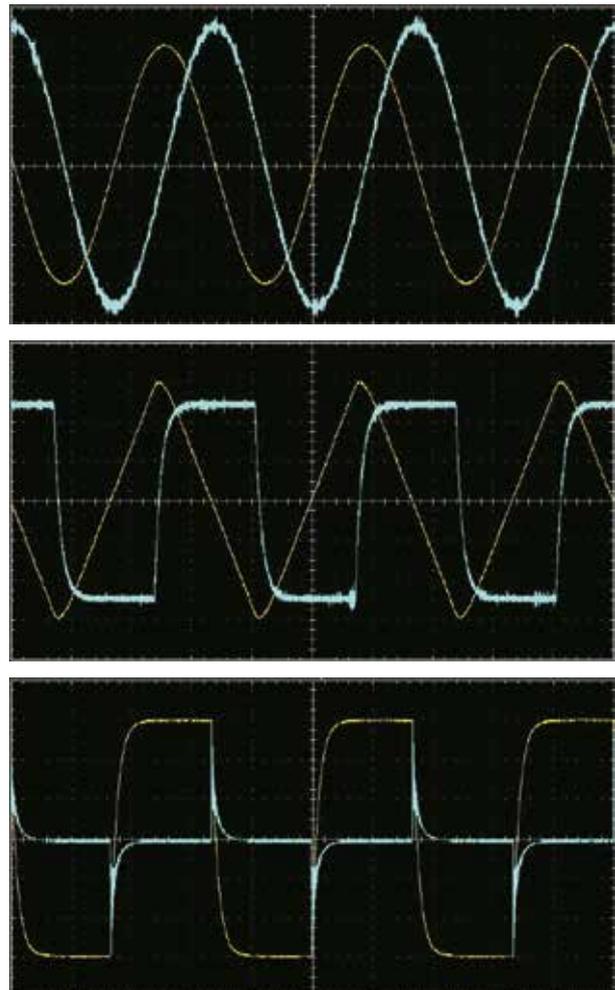


Fig. 2: Fermoimmagini degli andamenti temporali della tensione indotta per il segnale sinusoidale (in alto a destra), il segnale a onda triangolare (in alto a sinistra) e il segnale a onda quadra (in basso).



FUNZIONI

- Dimostrazione della legge della riflessione su uno specchio piano.
- Determinazione della distanza focale di uno specchio concavo e dimostrazione della legge della riflessione.
- Determinazione della distanza focale virtuale di uno specchio convesso.

SCOPO

Analisi della riflessione su specchi piani e curvi

RIASSUNTO

I raggi luminosi che incidono su uno specchio vengono riflessi con un angolo di incidenza corrispondente all'angolo di riflessione. Questa legge della riflessione è valida sia per specchi piani, che per specchi curvi. Tuttavia solo su uno specchio piano raggi incidenti paralleli generano raggi riflessi paralleli, poiché in questo caso l'angolo di incidenza è uguale per tutti i raggi luminosi. Gli specchi concavi o convessi non mantengono il parallelismo dei raggi incidenti che, al contrario, vengono concentrati in un unico punto focale.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico U, 1200 mm	1003039
3	Cavaliere ottico U, 75 mm	1003041
1	Cavaliere ottico U, 30 mm	1003042
1	Lampada ottica con LED	1020630
1	Diaframma ad iride su asta	1003017
1	Portaoggetti su asta	1000855
1	Disco ottico con accessori	1003036
1	Set di 5 diaframmi di fenditura e di apertura	1000607

BASI GENERALI

I raggi luminosi che incidono su uno specchio vengono riflessi con un angolo di incidenza corrispondente all'angolo di riflessione. Questa legge della riflessione è valida sia per specchi piani, che per specchi curvi. Tuttavia solo su uno specchio piano raggi incidenti paralleli generano raggi riflessi paralleli, poiché solo in questo caso l'angolo di incidenza è uguale per tutti i raggi luminosi.

Se i raggi luminosi paralleli colpiscono uno specchio piano con un angolo α , vengono riflessi con un angolo β in base alla legge della riflessione

$$(1) \quad \alpha = \beta$$

α : angolo di incidenza, β : angolo di riflessione.

Nell'esperimento si dimostra quanto affermato sopra sull'esempio di tre raggi paralleli e si determina l'angolo di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza.

Quando un raggio luminoso parallelo all'asse ottico colpisce uno specchio concavo, per la legge della riflessione, esso viene riflesso simmetricamente alla normale alla superficie e taglia l'asse ottico a una distanza dallo specchio pari a



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

$$(2) \quad f_{\alpha} = r - \overline{MF} = r \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot \cos \alpha}\right)$$

(vedere fig. 1 Percorso del raggio sul lato sinistro). Per i raggi prossimi all'asse si ha approssimativamente $\cos \alpha = 1$ e quindi

$$(3) \quad f = \frac{r}{2}$$

indipendentemente dalla loro distanza dall'asse ottico. Quindi, dopo essere stati riflessi dallo specchio, tutti i raggi paralleli vicini all'asse si incontrano in un punto focale sull'asse ottico che giace a una distanza f dallo specchio concavo. Se i raggi paralleli incontrano l'asse ottico con un angolo α , vengono riflessi in un punto comune esterno all'asse ottico.

I rapporti geometrici con lo specchio convesso corrispondono a quelli con lo specchio concavo, con la differenza che, dopo essere stati riflessi dallo specchio, i raggi luminosi divergono; i loro prolungamenti immaginari convergono in un punto focale virtuale f' posto dietro allo specchio (vedere fig. 1 Percorso dei raggi sul lato destro). Per la distanza focale virtuale f' di uno specchio convesso vale:

$$(4) \quad f' = -\frac{r}{2}$$

Nell'esperimento vengono determinate la distanza focale dello specchio concavo e la distanza focale dello specchio convesso in base ai comportamenti dei raggi luminosi su un disco ottico. Viene verificata la validità della legge della riflessione per il raggio mediano.

ANALISI

I raggi luminosi paralleli che colpiscono uno specchio piano vengono riflessi come raggi paralleli. In questo caso è valida la legge della riflessione. Nella riflessione di un fascio di raggi luminosi paralleli che incidono su uno specchio concavo, l'angolo di incidenza di ogni singolo raggio varia in modo che tutti i raggi vengono focalizzati in un unico punto focale. Analogamente, nella riflessione su uno specchio convesso, i prolungamenti dei raggi convergono in un punto focale che giace dietro allo specchio.

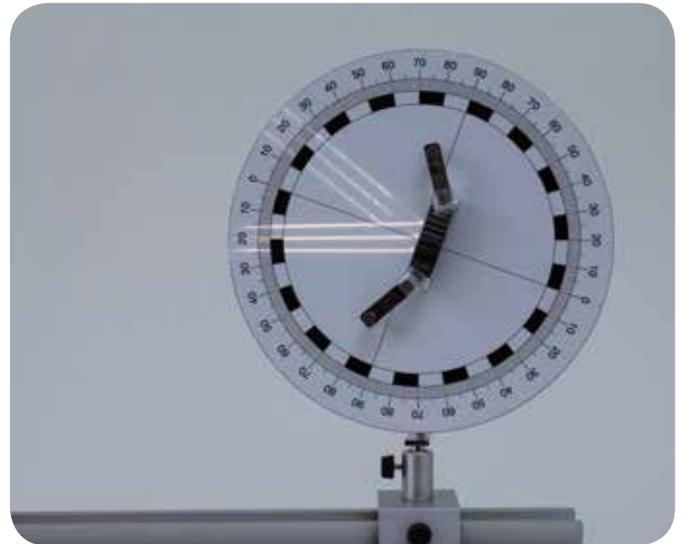


Fig. 2: Riflessione di tre raggi paralleli su uno specchio piano

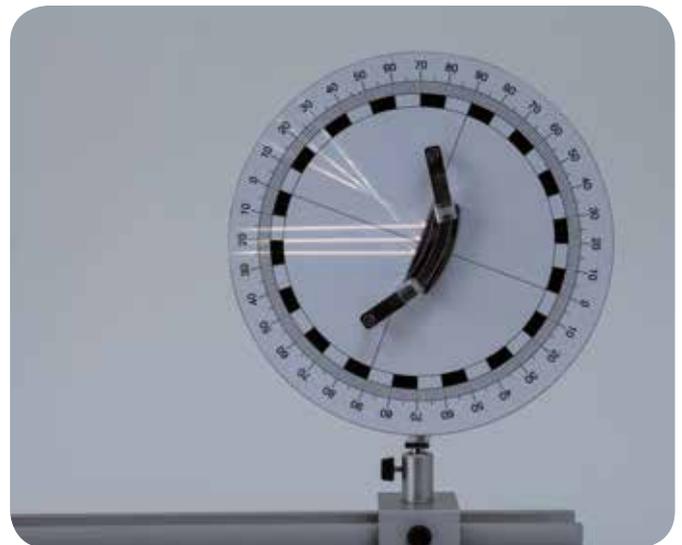


Fig. 3: Riflessione di tre raggi paralleli su uno specchio concavo

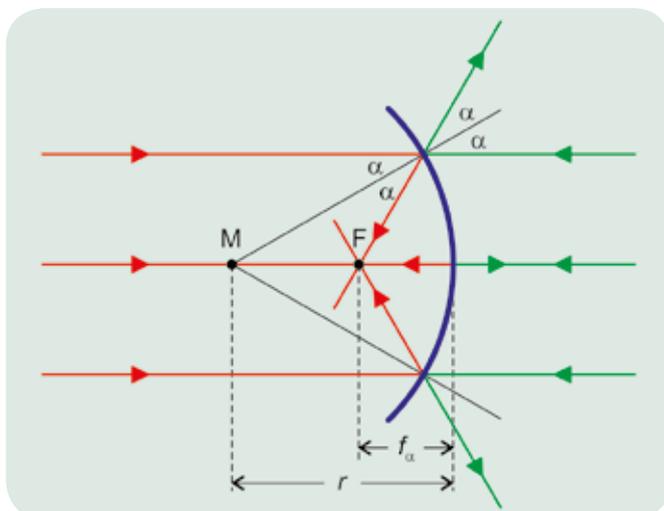


Fig. 1: Rappresentazione schematica della determinazione della distanza focale dello specchio concavo e dello specchio convesso

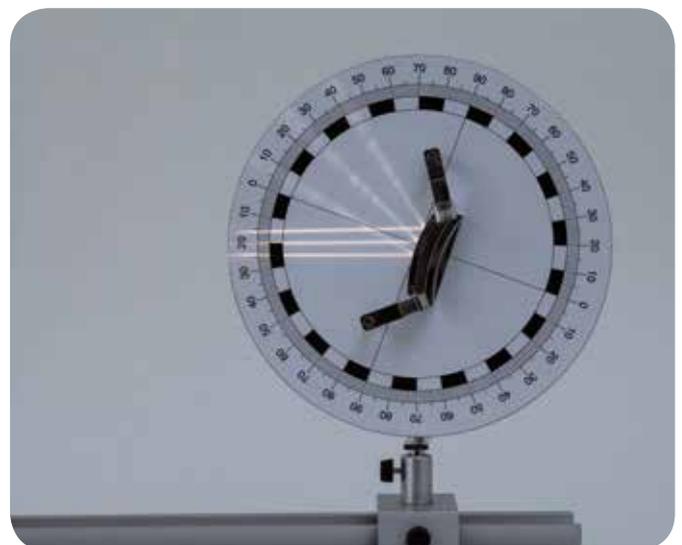


Fig. 4: Riflessione di tre raggi paralleli su uno specchio convesso



FUNZIONI

- Dimostrazione della legge di rifrazione di Snell.
- Determinazione dell'indice di rifrazione e dell'angolo limite della riflessione totale per il plexiglas.
- Osservazione e misurazione dell'andamento dei raggi sfalsati parallelamente nel caso di rifrazione in una lastra piano-parallela.
- Osservazione dell'andamento dei raggi attraverso un prisma di deviazione e inversione.
- Osservazione dell'andamento dei raggi attraverso una lente convessa e una lente concava.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

SCOPO

Analisi della rifrazione della luce in diversi elementi ottici

RIASSUNTO

La luce si propaga in mezzi diversi con diverse velocità di propagazione. La velocità di propagazione della luce attraverso un mezzo a bassa densità ottica è superiore a quella attraverso un mezzo a densità ottica maggiore. Pertanto, quando un raggio luminoso colpisce diagonalmente la superficie di separazione dei due mezzi, si genera una deviazione, la quale dipende dal rapporto degli indici di rifrazione dei mezzi interessati e viene descritta dalla legge di Snell. Nell'esperimento si prende in esame questo fenomeno utilizzando elementi ottici in plexiglas.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico U, 1200 mm	1003039
3	Cavaliere ottico U, 75 mm	1003041
1	Cavaliere ottico U, 30 mm	1003042
1	Lampada ottica con LED	1020630
1	Diaframma ad iride su asta	1003017
1	Portaoggetti su asta	1000855
1	Disco ottico con accessori	1003036
1	Set di 5 diaframmi di fenditura e di apertura	1000607

BASI GENERALI

La luce si propaga in mezzi diversi con diverse velocità di propagazione. La velocità di propagazione della luce attraverso un mezzo a bassa densità ottica è superiore a quella attraverso un mezzo ottico a densità ottica maggiore.

Il rapporto fra la velocità della luce c_0 nel vuoto e la velocità della luce in un mezzo viene definito indice di rifrazione assoluto n . Per la velocità della luce c in un mezzo vale quindi:

$$(1) \quad c = \frac{c_0}{n}$$

Quando un fascio luminoso passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 a un altro mezzo con indice di rifrazione n_2 , si verifica una deviazione in corrispondenza della superficie di separazione, la quale viene descritta dalla legge di rifrazione di Snell:

$$(2) \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1}$$

α, n_1, c_1 : angolo di incidenza, indice di rifrazione e velocità di propagazione nel mezzo 1

β, n_2, c_2 : angolo di rifrazione, indice di rifrazione e velocità di propagazione nel mezzo 2

Pertanto, nel passaggio da un mezzo ottico a uno più denso, il raggio luminoso rifratto si avvicina alla normale, mentre nel passaggio da un mezzo ottico a un altro meno denso, il raggio luminoso rifratto si allontana dalla normale. Nel secondo caso esiste un angolo limite α_T , in cui il raggio rifratto si propaga sulla superficie di separazione fra i due mezzi. Con un angolo di incidenza ancora maggiore non si ha più alcuna rifrazione dei raggi e la luce incidente viene totalmente riflessa.

Nell'esperimento si prende in esame il fenomeno della rifrazione in un corpo semicircolare, una lastra piano-parallela, un prisma, una lente convessa e una lente concava in plexiglas. Il corpo semicircolare è particolarmente adatto per la dimostrazione della legge di rifrazione poiché, se il raggio incide al centro della faccia piana con un angolo a piacere, il raggio rifratto è sempre perpendicolare alla superficie semicircolare e non viene nuovamente rifratto in uscita (vedere fig. 1).

Nel caso della doppia rifrazione su due facce opposte della lastra piano-parallela, ha luogo nel complesso uno spostamento parallelo di una certa distanza d che dipende dall'angolo di incidenza α . Vale (vedere fig. 1):

$$(3) \quad d = h \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}, \quad h: \text{spessore della lastra.}$$

Un prisma di 90° funge da prisma di deviazione quando i raggi luminosi incidono perpendicolarmente attraverso un cateto. Vengono riflessi sull'ipotenusa e fuoriescono dal prisma con un angolo di 90° . Disponendolo diversamente (prisma di inversione) i raggi luminosi incidono parallelamente attraverso l'ipotenusa e vengono riflessi su entrambi i cateti. Fuoriescono dal prisma parallelamente al raggio luminoso incidente nella direzione opposta (vedere fig. 1).

Una lente convessa devia i raggi luminosi incidenti, facendoli convergere, mentre una lente concava li fa divergere. (vedere Fig. 1) I raggi luminosi si incontrano in un punto focale F che giace dietro alla lente oppure sembrano divergere dal punto focale virtuale F' davanti alla lente.

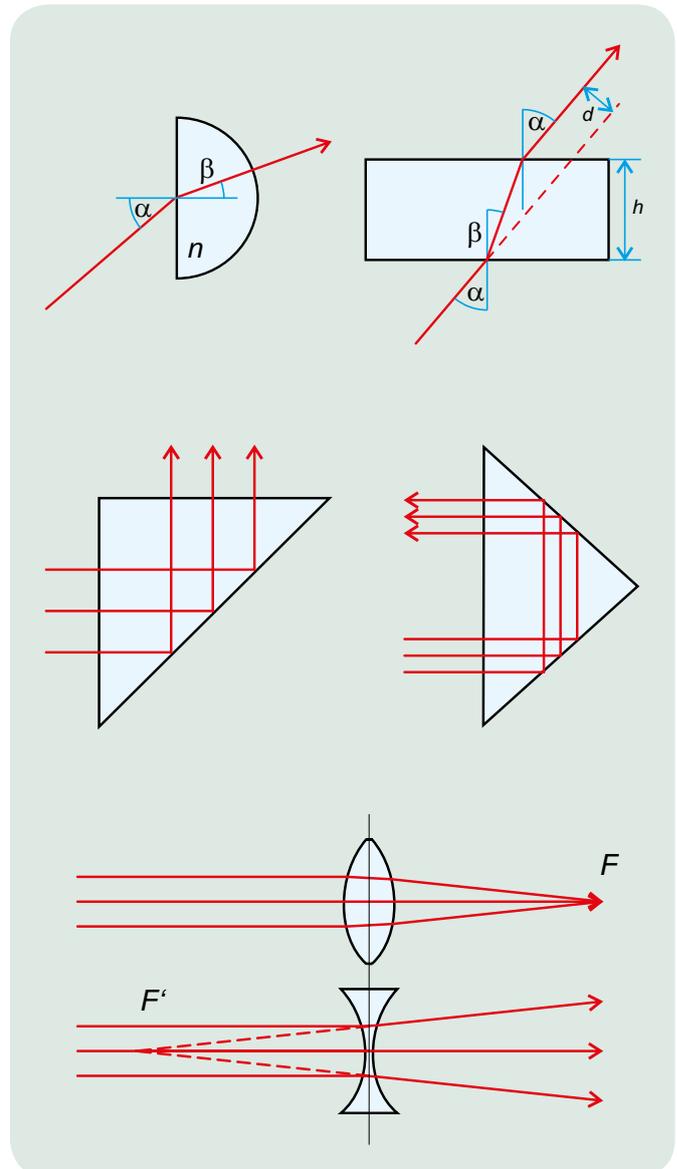


Fig. 1: Rifrazione in un corpo semicircolare, andamento dei raggi attraverso una lastra piano-parallela, prisma di deviazione e inversione, andamento dei raggi attraverso una lente convessa e attraverso una lente concava

ANALISI

Nell'esperimento, per il mezzo aria si assume con sufficiente precisione $n_1 = 1$.

Se l'angolo di incisione corrisponde all'angolo limite α_T della riflessione totale, l'angolo di rifrazione è $\beta = 90^\circ$. Pertanto da (2) è derivabile l'indice di rifrazione n del plexiglas.

$$\sin \alpha_T = \frac{1}{n}$$

Per la rifrazione sulla lastra piano-parallela si ottiene in base a (2) e (3):

$$d = h \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \beta) = h \cdot \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right)$$

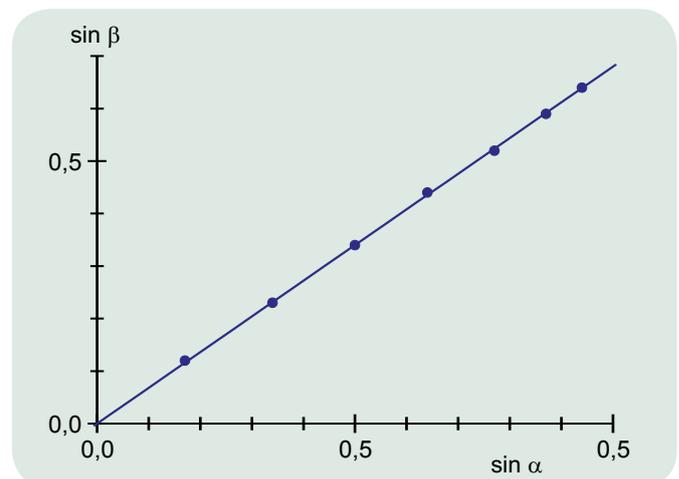
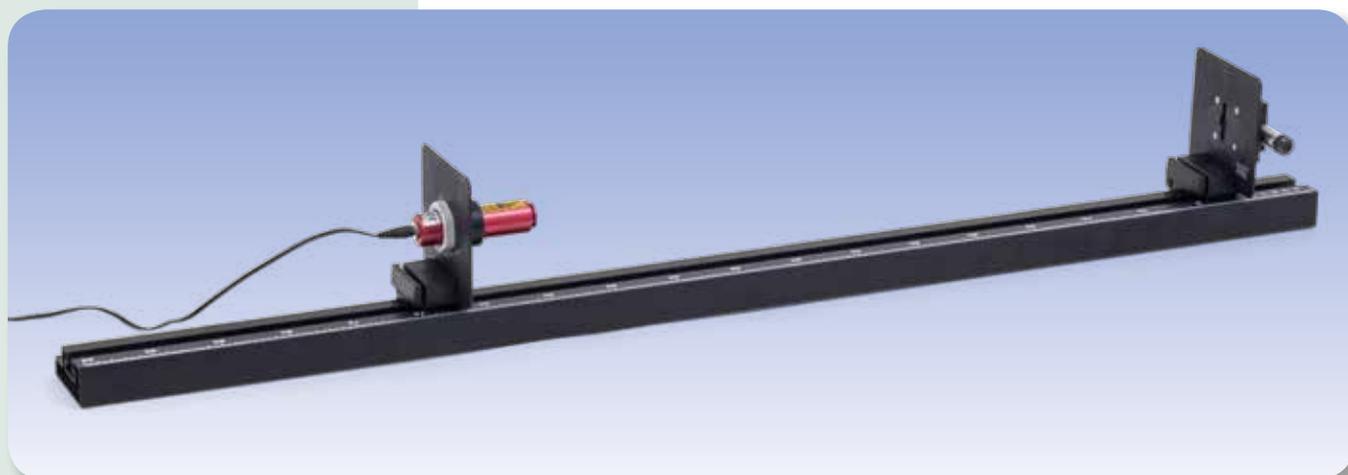


Fig. 2: Definizione per via grafica dell'indice di rifrazione n

UE4030100

DIFFRAZIONE DA SINGOLA FENDITURA



FUNZIONI

- Analisi della diffrazione da singola fenditura con fenditure di larghezza diversa.
- Analisi della diffrazione da singola fenditura con diverse lunghezze d'onda.
- Analisi della diffrazione da singola fenditura e ponte (principio di Babinet).

SCOPO

Dimostrazione della natura ondulatoria della luce e determinazione della lunghezza d'onda

RIASSUNTO

È possibile descrivere la diffrazione della luce da una fenditura singola mediante la sovrapposizione di onde elementari coerenti che, secondo il principio di Huygens, si propagano da ogni punto illuminato della fenditura. A seconda dell'angolo di propagazione, le onde dietro la fenditura interferiscono in maniera costruttiva o distruttiva. A partire dalla distanza tra due frange scure del modello di interferenza 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	Diodo laser, rosso	1003201
1	Modulo laser, verde	1003202
1	Banco ottico K, 1000 mm	1009696
2	Cavaliere ottico K	1000862
1	Fenditura impostabile	1008519
1	Supporto K per diodo laser	1000868

Dotazione supplementare necessaria

Filo



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

BASI GENERALI

È possibile descrivere la diffrazione della luce da una fenditura singola mediante la sovrapposizione di onde elementari coerenti che, secondo il principio di Huygens, si propagano da ogni punto illuminato della fenditura. La sovrapposizione in determinate direzioni porta a un'interferenza costruttiva o distruttiva. Dietro la fenditura si osserva un sistema di frange chiare e scure su uno schermo.

L'estinzione completa, quindi l'oscurità massima, si osserva quando per ogni onda elementare emessa da un punto di metà della fenditura c'è un'onda elementare emessa da un punto dell'altra metà della fenditura che interferisce con essa distruttivamente. Tale condizione è soddisfatta se il ritardo ottico Δs_n tra il raggio che origina dal punto centrale e il raggio che origina dal bordo è un multiplo intero n di mezza lunghezza d'onda λ :

$$(1) \quad \Delta s_n = n \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{b}{2} \cdot \sin \alpha_n$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$: ordine di diffrazione
 b : larghezza fenditura,
 α_n : angolo di propagazione

I punti di massima oscurità si trovano in posizione simmetrica rispetto al raggio primario (v. Fig. 1). La distanza dal raggio primario, misurata nel piano di osservazione, è uguale a

$$(2) \quad x_n = L \cdot \tan \alpha_n$$

L : distanza tra fenditura e superficie di osservazione

Ne consegue per angoli piccoli

$$(3) \quad \alpha_n = x_n = \frac{\lambda \cdot L}{b} \cdot n = \Delta \cdot n \quad \text{con} \quad \Delta = \frac{\lambda \cdot L}{b}$$

Δ : distanza tra i minimi

Una fenditura ed un ponte di uguale larghezza sono oggetti di diffrazione complementari. Secondo il principio di Babinet, la diffrazione su questi oggetti genera immagini di diffrazione identiche al di fuori del fascio di luce indisturbato. I minimi di diffrazione si trovano quindi in entrambe le immagini di diffrazione negli stessi punti.

L'esperimento prende in esame la diffrazione da singola fenditura con fenditure di larghezza diversa e diverse lunghezze d'onda. Esso mostra inoltre che, nella diffrazione da singola fenditura e ponte di identica larghezza, si ottengono immagini di diffrazione complementari.

ANALISI

Nella direzione del raggio primario la luminosità è massima. La grandezza Δ è calcolabile come incremento lineare rappresentando le distanze x_n in funzione di n in un grafico. Essendo Δ inversamente proporzionale alla larghezza fenditura b , è possibile riportare il quoziente Δ/L in relazione a $1/b$ in un diagramma e ottenere la lunghezza d'onda λ dall'incremento lineare dei dati misurati.

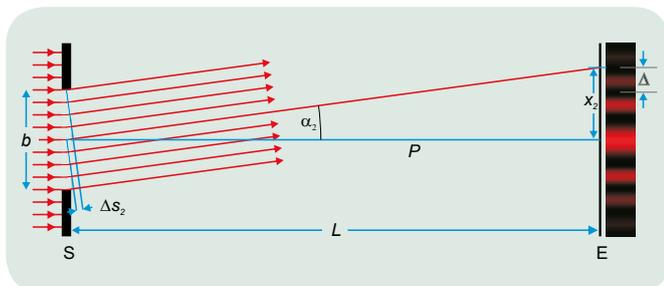


Fig. 1: Rappresentazione schematica della diffrazione della luce da singola fenditura (S: fenditura, b : larghezza fenditura, E: piano di osservazione, P : raggio primario, L : distanza dello schermo di osservazione rispetto alla fenditura, x_2 : distanza del secondo minimo dal centro, α_2 : direzione di osservazione per il secondo minimo, Δs_2 : ritardo ottico tra raggio del punto centrale e raggio del bordo).

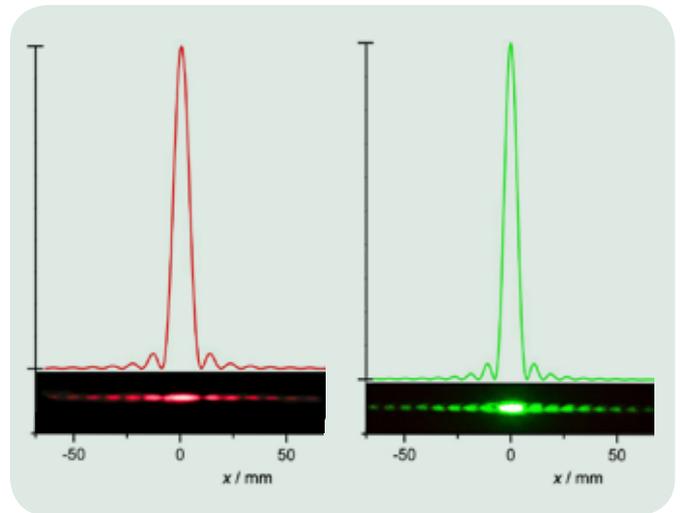


Fig. 2: Intensità calcolata e osservata nella diffrazione da fenditura con larghezza 0,3 mm per $\lambda = 650$ nm e per $\lambda = 532$ nm.

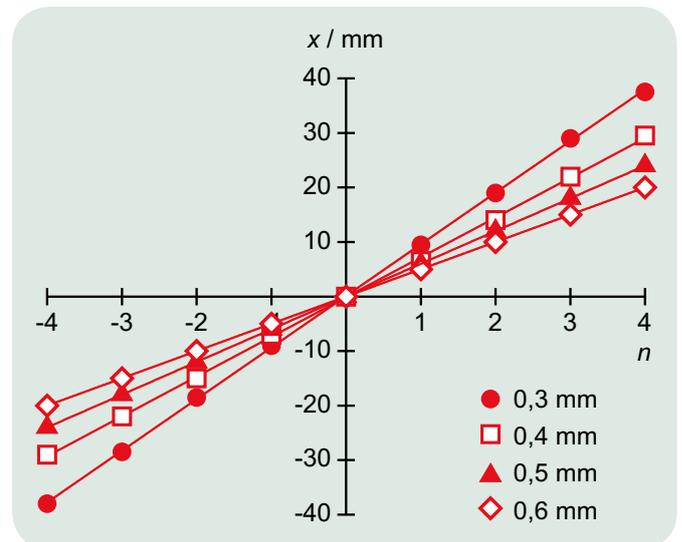


Fig. 3: Distanze x_n in funzione dell'ordine di diffrazione n per diverse larghezze fenditura b per $\lambda = 650$ nm.

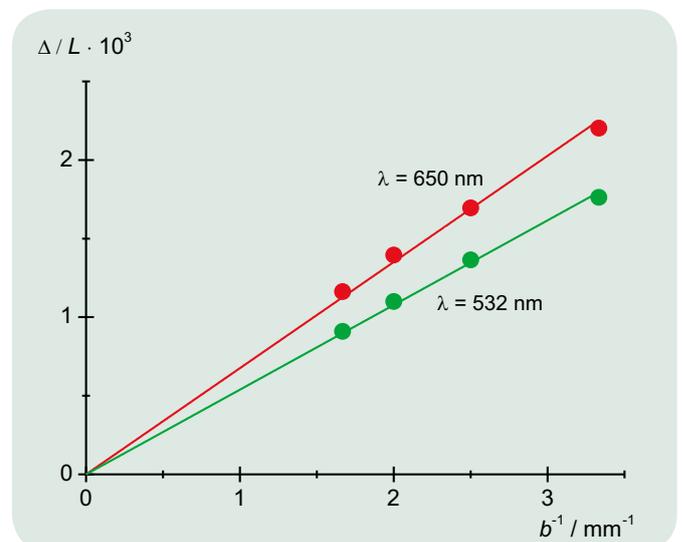
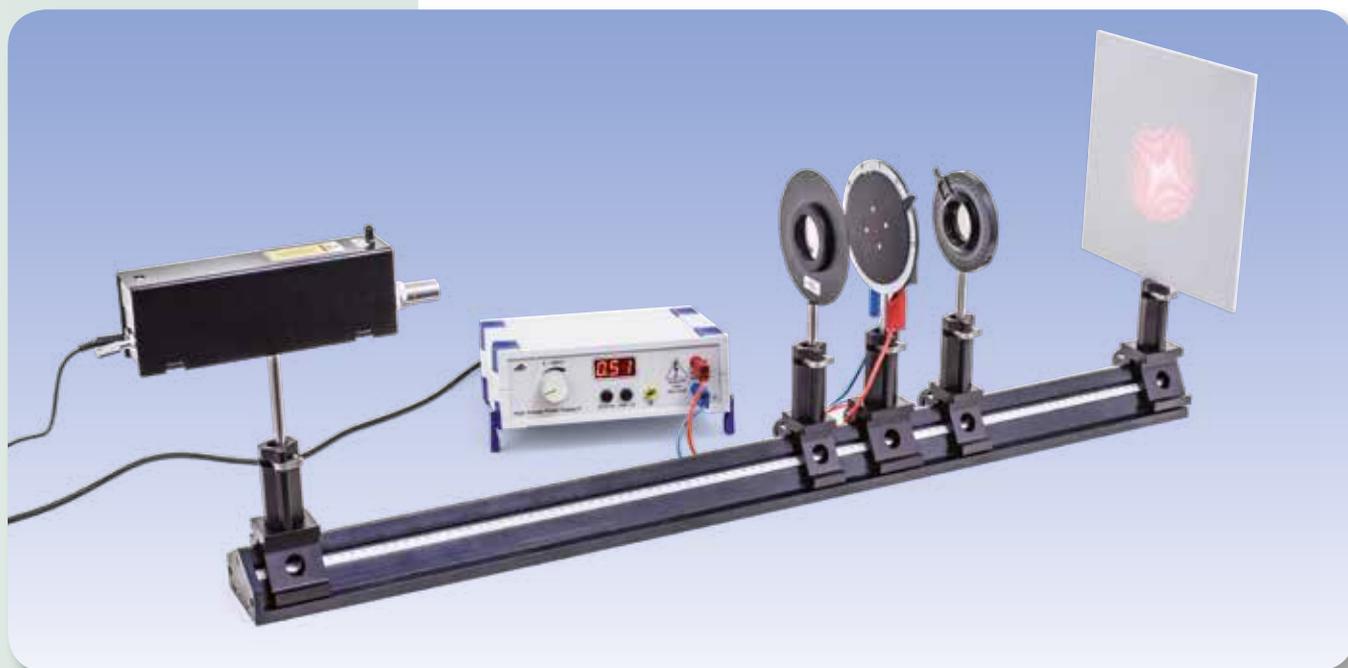


Fig. 4: Quoziente tra la distanza relativa Δ dei minimi e la distanza L in relazione al reciproco della larghezza della fenditura $1/b$.

UE4040500

EFFETTO POCKELS



FUNZIONI

- Dimostrazione della birifrangenza in un fascio conoscopico.
- Variazione del fenomeno di birifrangenza mediante l'applicazione di un campo elettrico.
- Determinazione della tensione di semionda.

SCOPO

Dimostrazione dell'effetto Pockels in un fascio conoscopico

RIASSUNTO

L'effetto Pockels consiste nell'effetto elettro-ottico per il quale, in un materiale idoneo, un campo elettrico divide un fascio luminoso in due fasci parziali polarizzati perpendicolarmente l'uno rispetto all'altro. Tale capacità di birifrangenza deriva dalla variabilità dell'indice di rifrazione in funzione della direzione di propagazione e polarizzazione della luce. Nel caso dell'effetto Pockels, essa aumenta in maniera lineare con l'intensità del campo elettrico e, nell'esperimento, viene dimostrata su un cristallo di niobato di litio (LiNbO_3) posizionato in un fascio conoscopico. La figura di interferenza è composta da due fasci di iperboli dalle quali si ricava direttamente la posizione dell'asse ottico della doppia rifrazione.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Cella di Pockels su asta	1013393
1	Banco ottico di precisione D, 1000 mm	1002628
3	Cavaliere ottico D, 90/50	1002635
2	Cavaliere ottico D, 90/36	1012401
1	Laser elio-neon	1003165
1	Obiettivo acromatico 10x/ 0,25	1005408
1	Filtro di polarizzazione su asta	1008668
1	Lente convergente su asta $f = 50$ mm	1003022
1	Schermo di proiezione	1000608
1	Alimentatore ad alta tensione E 5kV (230 V, 50/60 Hz)	1013412 o
	Alimentatore ad alta tensione E 5kV (115 V, 50/60 Hz)	1017725
1	Coppia di cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002849



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

BASI GENERALI

L'effetto Pockels consiste nell'effetto elettro-ottico per il quale, in un materiale idoneo, un campo elettrico divide un fascio luminoso in due fasci parziali polarizzati perpendicolarmente l'uno all'altro. Tale capacità di birifrangenza deriva dalla variabilità dell'indice di rifrazione in funzione della direzione di propagazione e polarizzazione della luce. Nel caso dell'effetto Pockels, essa aumenta in maniera lineare con l'intensità del campo elettrico e, nell'esperimento, viene dimostrata su un cristallo di niobato di litio (LiNbO₃) posizionato in un fascio conoscopico.

Il cristallo è situato in una cella di Pockels trasversale nella quale viene applicato un campo elettrico in direzione dell'asse ottico della birifrangenza (v. Fig. 1). Il raggio luminoso che attraversa perpendicolarmente il cristallo si scinde in un fascio parziale ordinario e uno straordinario, cioè un fascio parziale polarizzato in direzione dell'asse ottico della doppia rifrazione e uno polarizzato ad esso perpendicolare. Effettuando la misurazione alla lunghezza d'onda del laser He-Ne $\lambda = 632,8$ nm, l'indice di rifrazione del fascio parziale ordinario in niobato di litio risulta pari a $n_o = 2,29$ e quello del fascio straordinario a $n_e = 2,20$. Il ritardo ottico tra il fascio ordinario e quello straordinario risulta

$$(1) \quad \Delta = d \cdot (n_o - n_e),$$

dove $d = 20$ mm corrisponde allo spessore del cristallo in direzione del fascio.

Per la dimostrazione della birifrangenza si utilizza un percorso luminoso classico, proposto a tal fine in numerosi libri di testo di ottica. Si illumina il cristallo con un fascio luminoso divergente polarizzato linearmente e si osserva la luce trasmessa dietro un analizzatore ortogonale. L'asse ottico della birifrangenza emerge chiaramente nell'immagine di interferenza, poiché la sua simmetria genera un contrasto evidente. Nell'esperimento, è disposto parallelamente alla superficie di entrata e di uscita, perciò l'immagine di interferenza è formata da due fasci di iperboli ruotati di 90° l'uno rispetto all'altro. L'asse di simmetria del primo fascio di iperboli ha andamento parallelo, quello del secondo è invece perpendicolare all'asse ottico della birifrangenza.

Le frange scure dei fasci di iperboli sono generate da raggi luminosi per i quali la differenza dei percorsi ottici del fascio parziale ordinario e straordinario nel cristallo rappresenta un multiplo intero della lunghezza d'onda. Tali raggi luminosi mantengono dopo il passaggio attraverso il cristallo la propria polarizzazione lineare originaria e vengono eliminati dall'analizzatore.

Il ritardo ottico corrisponde a circa 2800 lunghezze d'onda della luce laser utilizzata. Tuttavia, in generale Δ non è esattamente un multiplo intero di λ , bensì si porrà piuttosto tra i due valori $\Delta_m = m \cdot \lambda$ e $\Delta_{m+1} = (m + 1) \cdot \lambda$. Alle frange scure del primo fascio di iperboli vanno associati i ritardi ottici Δ_{m+1} , Δ_{m+2} , Δ_{m+3} , ecc., a quelle del secondo fascio di iperboli i ritardi ottici Δ_m , Δ_{m-1} , Δ_{m-2} , ecc. (v. Fig. 2). La posizione delle frange scure, e più esattamente la loro distanza dal centro, dipende dall'entità della differenza tra Δ e $m \cdot \lambda$. L'effetto Pockels aumenta o riduce la differenza degli indici di rifrazione principali $n_o - n_e$ a seconda del segno della tensione applicata. Ciò va a variare la differenza $\Delta - m \cdot \lambda$ e dunque anche la posizione delle frange di interferenza scure. Andando ad applicare la cosiddetta tensione di semionda U_π , Δ varia di una mezza lunghezza d'onda. Le frange di interferenza scure migrano nella posizione delle chiare e viceversa. Il processo si ripete ad ogni ulteriore aumento della tensione del valore U_π .

ANALISI

Ad una tensione U_1 , le frange di interferenza scura di ordine +1 si trovano esattamente al centro, alla tensione successiva U_2 quelle di ordine +2. La tensione di semionda è quindi

$$U_\pi = \frac{U_2 - U_1}{2}$$

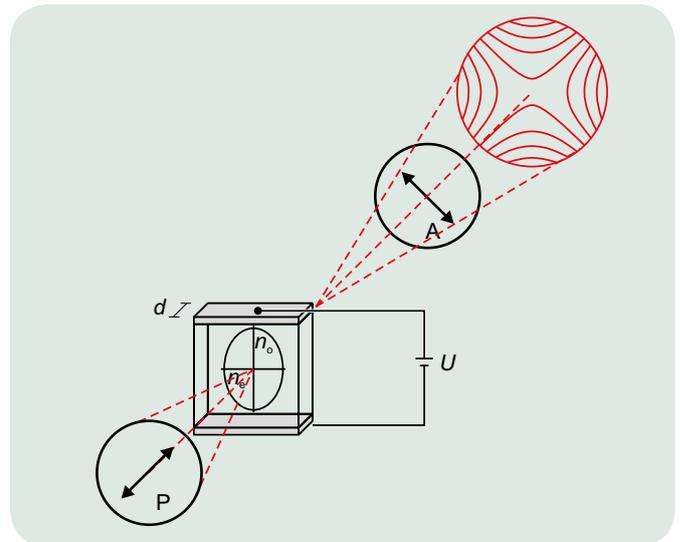


Fig. 1: Rappresentazione schematica della cella di Pockels in un fascio conoscopico fra polarizzatore e analizzatore

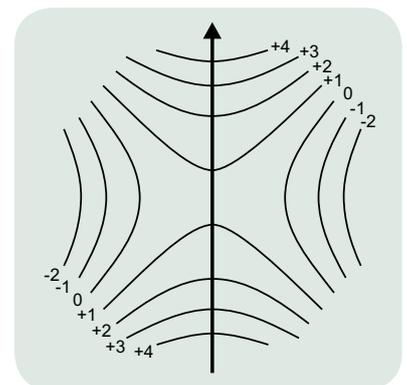


Fig. 2: Figura di interferenza con asse ottico del cristallo nella direzione della freccia. L'indice delle frange di interferenza scure corrisponde al ritardo ottico fra il raggio ordinario e straordinario in unità di lunghezza d'onda.

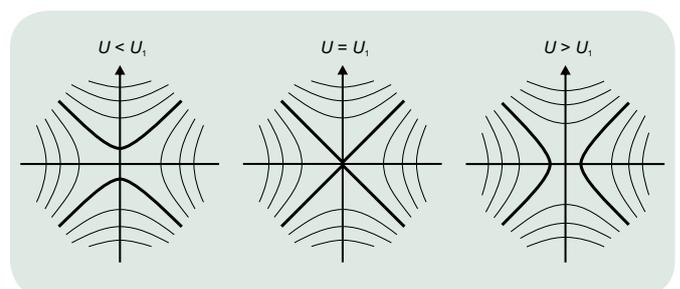


Fig. 3: Variazione della figura di interferenza mediante l'effetto Pockels. Le iperboli in grassetto sono quelle di ordine +1.

UE4080100

SPETTROMETRO A PRISMA



SCOPO

Regolazione e calibrazione di uno spettrometro a prisma

RIASSUNTO

Lo spettrometro a prisma utilizza la scomposizione della luce nei colori dello spettro al passaggio attraverso un prisma per misurare spettri ottici. Al fine di misurare le lunghezze d'onda è necessaria una calibrazione, poiché tale dispersione angolare non è lineare. Nell'esperimento, si utilizza lo spettro "noto" di una lampada Hg per la calibrazione e si misura successivamente lo spettro "non noto" di una lampada Cd.

FUNZIONI

- Regolazione dello spettrometro a prisma e calibrazione con le linee spettrali di una lampada Hg
- Misurazione dell'angolo di deviazione minimo a $\lambda = 546,07 \text{ nm}$.
- Determinazione dell'indice di rifrazione di vetro flint a $\lambda = 546,07 \text{ nm}$ e dei parametri Cauchy b e c dell'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda.
- Calcolo di una curva di calibrazione in base alla formula di dispersione di Hartmann.
- Misurazione di uno spettro lineare non noto.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Spettrometro-goniometro	1002912
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/Cd	1003546
1	Lampada spettrale Hg 100	1003545

BASI GENERALI

Con uno spettrometro a prisma si misurano spettri ottici utilizzando la scomposizione della luce nei colori dello spettro al passaggio attraverso un prisma. Tale dispersione è da ricondursi alla dipendenza dell'indice di rifrazione del vetro prismatico dalla lunghezza d'onda. Essa non è lineare. Per questo, per poter misurare le lunghezze d'onda con spettrometri a prisma, è necessaria una calibrazione.

Nello spettrometro, la luce analizzata incide attraverso la fenditura S sull'obiettivo O_1 che, insieme alla fenditura, forma un collimatore e genera un largo fascio luminoso parallelo (v. Fig. 1). Dopo aver subito una doppia rifrazione attraverso il prisma, il fascio esce parallelo e viene riunito sul piano focale dell'obiettivo O_2 in un'immagine della fenditura osservabile tramite l'oculare OC . Il cannocchiale formato dall'obiettivo O_2 e dall'oculare OC è fissato a un braccio orientabile, solidale al nonio N . La doppia rifrazione della luce attraverso il prisma è descritta attraverso gli angoli α_1 , α_2 , β_1 e β_2 (v. Fig. 2). Per un prisma equilatero vale

$$(1) \quad \sin \alpha_1 = n(\lambda) \cdot \sin \beta_1(\lambda), \quad n(\lambda) \cdot \sin \beta_2(\lambda) = \sin \alpha_2(\lambda), \quad \beta_1(\lambda) + \beta_2(\lambda) = 60^\circ.$$

L'angolo di ingresso α_1 è modificabile ruotando il prisma nel fascio incidente parallelo. Gli angoli α_2 , β_1 e β_2 dipendono dalla lunghezza d'onda λ , poiché l'indice di rifrazione n dipende dalla lunghezza d'onda.

Dall'angolo di ingresso α_1 e da quello di uscita α_2 si ricava l'angolo di deviazione

$$(2) \quad \delta(\lambda) = \alpha_1 + \alpha_2(\lambda) - 60^\circ$$

tra collimatore e cannocchiale. Esso raggiunge il minimo δ_{\min} quando il percorso dei raggi risulta essere simmetrico al prisma. A quel punto, la dispersione angolare $d\delta/d\lambda$ è al massimo. Pertanto, lo spettrometro a prisma viene regolato in modo da ottenere un percorso dei raggi simmetrico per una

lunghezza d'onda di riferimento λ_0 . Nell'esperimento, si seleziona a tale scopo la linea spettrale verde ($\lambda_0 = 546,07 \text{ nm}$) di una lampada spettrale Hg.

Dall'angolo di deviazione minimo si determina l'indice di rifrazione del prisma alla lunghezza d'onda di riferimento data. Per simmetria, vale $\beta_1(\lambda_0) = \beta_2(\lambda_0) = 30^\circ$ e $\alpha_2(\lambda_0) = \alpha_1$ e dunque

$$(3) \quad \sin \alpha_1 = n(\lambda_0) \cdot \frac{1}{2} \quad \text{con} \quad \alpha_1 = \frac{\delta_{\min}}{2} + 30^\circ.$$

A causa della dispersione, le restanti linee spettrali risultano spostate rispetto a δ_{\min} di piccoli angoli $\Delta\delta$. Esse vengono lette con l'ausilio del nonio con precisione al minuto angolare. Poiché la variazione Δn dell'indice di rifrazione sull'intero campo visibile è di piccola entità, è sufficiente considerare esclusivamente i termini lineari delle variazioni. Dalle equazioni 1 – 3 si ricava pertanto la seguente correlazione tra lunghezza d'onda e deviazione:

$$(4) \quad \Delta\delta(\lambda) = \Delta\alpha_2(\lambda) = \frac{\Delta n(\lambda)}{\cos \alpha_1} = \frac{\Delta n(\lambda)}{\sqrt{1 - \frac{(n(\lambda_0))^2}{4}}}$$

Nel campo visibile dello spettro l'indice di rifrazione n diminuisce all'aumentare della lunghezza d'onda λ . Tale considerazione è formulabile tramite l'equazione di Cauchy nella forma

$$(5) \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}.$$

Da (4) e (5) si evince in principio una descrizione matematica per la curva di calibrazione. Tuttavia è più pratico l'utilizzo della formula di dispersione di Hartmann

$$(6) \quad \delta(\lambda) = \delta_H + \frac{K}{\lambda - \lambda_H}$$

dove δ_H , K e λ_H non hanno però alcun particolare significato fisico. Nell'esperimento, si ricorre pertanto alle linee spettrali della lampada spettrale Hg utilizzando (6) per la calibrazione e poi si misurano le linee di uno spettro "non noto" (v. Tab. 1).

ANALISI

Dall'equazione 3 segue l'indice di rifrazione $n(\lambda_0)$. I parametri di Cauchy dell'indice di rifrazione si calcolano nella rappresentazione $\Delta n = n(\lambda) - n(\lambda_0) = f(1/\lambda^2)$ servendosi di un adattamento parabolico.

Tab.1: Lunghezze d'onda delle linee spettrali del Cd

Denominazione	Misura λ / nm	Valore di letteratura λ / nm
blu (media)	466	466
blu (intensa)	468	468
verde-blu (media)	479	480
verde scuro (intensa)	509	509
verde scuro (debole)	515	516
rosso (intensa)	649	644

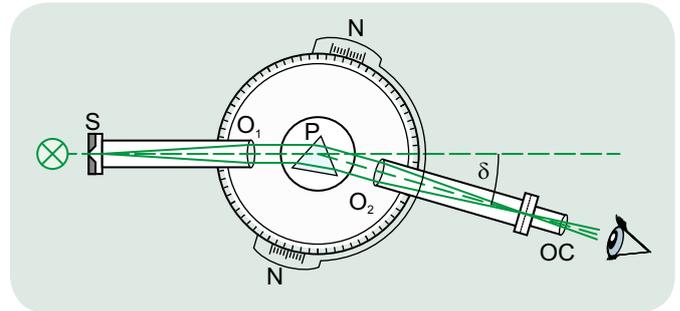


Fig. 1: Rappresentazione schematica di uno spettrometro a prisma. S: fenditura d'ingresso, O₁: obiettivo del collimatore, P: prisma, O₂: obiettivo del cannocchiale, OC: oculare del cannocchiale, δ : deviazione

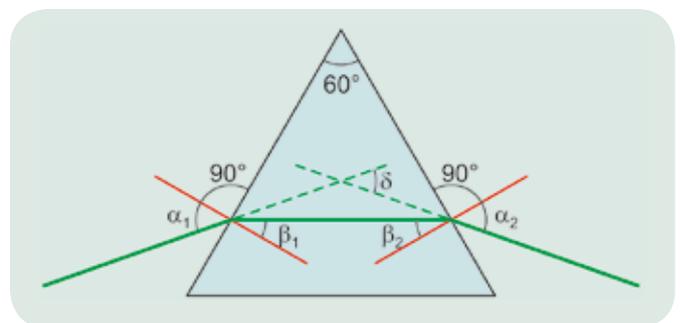


Fig. 2: Percorso dei raggi nel prisma

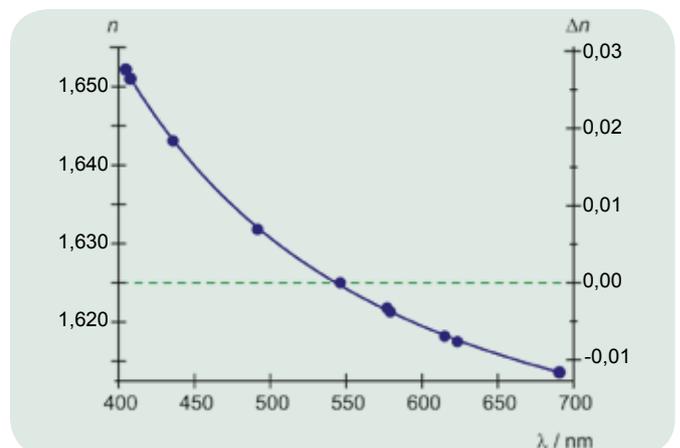


Fig. 3: Indice di rifrazione del prisma in vetro flint in funzione della lunghezza d'onda

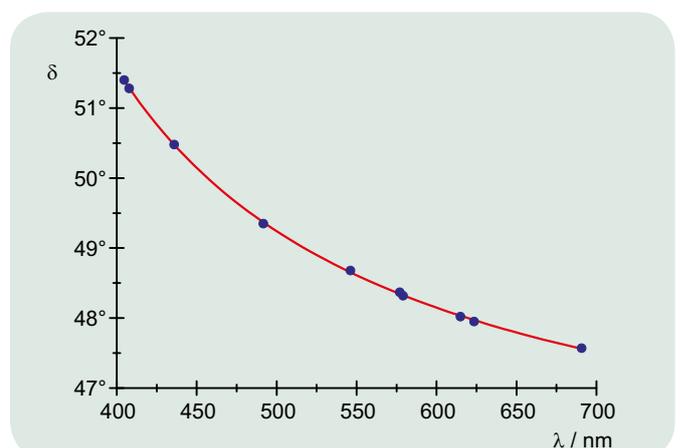


Fig. 4: Curva di calibrazione dello spettrometro a prisma

UE5010400

ESPERIMENTO DI MILLIKAN



SCOPO

Conferma del valore della carica elementare sulla base dell'esperimento di Millikan eseguito su goccioline d'olio cariche elettricamente

RIASSUNTO

Fra il 1910 e il 1913 *Robert Andrews Millikan* riuscì a determinare la carica elementare con una precisione sconosciuta fino a quel momento e, di conseguenza, a confermare la quantizzazione della carica elettrica. L'esperimento che porta il suo nome si basa sulla misurazione della quantità di carica di goccioline d'olio cariche elettricamente che, se sottoposte al campo elettrico di un condensatore a facce piane parallele, salgono in aria, mentre in assenza di campo elettrico scendono. L'apparato sperimentale impiegato in questo esperimento è un apparecchio compatto ideato sulla base di quello di Millikan che tuttavia non utilizza una sorgente di radiazioni radioattive.

trico di un condensatore a facce piane parallele, salgono in aria, mentre in assenza di campo elettrico scendono. L'apparato sperimentale impiegato in questo esperimento è un apparecchio compatto ideato sulla base di quello di Millikan che tuttavia non utilizza una sorgente di radiazioni radioattive.

FUNZIONI

- Formazione delle goccioline d'olio cariche elettricamente, selezione di quelle idonee e osservazione nel campo elettrico.
- Misurazione della velocità di salita all'interno del campo elettrico e della velocità di discesa in assenza di campo elettrico.
- Conferma del valore della carica elementare.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Apparecchio di Millikan (230 V, 50/60 Hz)	1018884 o
	Apparecchio di Millikan (115 V, 50/60 Hz)	1018882

BASI GENERALI

Fra il 1910 e il 1913 *Robert Andrews Millikan* riuscì a determinare la carica elementare con una precisione sconosciuta fino a quel momento e, di conseguenza, a confermare la quantizzazione della carica elettrica. Per questi studi vinse il premio Nobel per la fisica. L'esperimento che porta il suo nome si basa sulla misurazione della quantità di carica di goccioline d'olio cariche elettricamente che, se sottoposte al campo elettrico di un condensatore a facce piane parallele, salgono in aria, mentre in assenza di campo elettrico scendono. Il valore determinato da Millikan $e = (1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19}$ C si discosta solamente dello 0,6% dal valore stabilito al giorno d'oggi.

Le forze agenti su una gocciolina d'olio, la cui forma presunta è sferica e che galleggia in aria all'interno di un campo elettrico generato da un condensatore a facce piane parallele, sono la forza peso,

$$(1) \quad F_G = m_2 \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_2 \cdot g,$$

m_2 : massa della gocciolina d'olio, r_0 : raggio della gocciolina d'olio, ρ_2 : densità dell'olio, g : accelerazione di caduta

la spinta di Archimede in aria,

$$(2) \quad F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_1 \cdot g,$$

ρ_1 : densità dell'aria



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

la forza dovuta al campo elettrico E ,

$$(3) \quad F_E = q_0 \cdot E = \frac{q_0 \cdot U}{d},$$

q_0 : carica della gocciolina d'olio, U : tensione presente fra le piastre del condensatore, d : distanza fra le piastre del condensatore

e la forza di attrito viscoso di Stokes

$$(4) \quad F_{R1,2} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_0 \cdot v_{1,2}$$

η : viscosità dell'aria, v_1 : velocità di salita, v_2 : velocità di discesa

Quando viene applicato un campo elettrico e la gocciolina d'olio sale, vale l'equilibrio fra le forze

$$(5) \quad F_G + F_{R1} = F_E + F_A,$$

mentre in assenza di campo elettrico la gocciolina scende e si ha

$$(6) \quad F_G = F_{R2} + F_A.$$

È quindi possibile determinare il raggio e la carica della gocciolina d'olio:

$$(7) \quad r_0 = \sqrt{\frac{9}{2} \cdot \frac{\eta \cdot v_2}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}}$$

e

$$(8) \quad q_0 = \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot (v_1 + v_2)}{U} \cdot r_0.$$

Il raggio r_0 è dell'ordine di grandezza del cammino libero medio delle molecole d'aria e pertanto occorre correggere la forza di attrito viscoso di Stokes. Per il raggio corretto r e la carica corretta q si utilizzano le relazioni:

$$(9) \quad r = \sqrt{r_0^2 + \frac{A^2}{4}} - \frac{A}{2} \quad \text{con} \quad A = \frac{b}{p}$$

$b = 82 \mu\text{m} \cdot \text{hPa} = \text{costante}$, p : pressione atmosferica

$$(10) \quad q = q_0 \cdot \left(1 + \frac{A}{r}\right)^{-1.5}$$

L'apparato sperimentale impiegato in questo esperimento è un apparecchio compatto ideato sulla base di quello di Millikan che tuttavia non utilizza una sorgente di radiazioni radioattive. Le goccioline d'olio cariche elettricamente vengono formate mediante un apposito nebulizzatore. Una volta formatesi le goccioline, la loro carica, generatasi casualmente, non subisce più alcun influsso esterno. Come nell'apparato di Millikan, le goccioline d'olio vengono inserite nella camera di sperimentazione dall'alto. Tramite l'osservazione con un microscopio di misura si selezionano le goccioline d'olio idonee alla misurazione e se ne determina la carica. Per ogni gocciolina d'olio si misura il tempo di salita, quando viene applicato un campo elettrico, e il tempo di discesa, in assenza di campo elettrico, per una distanza compresa fra due punti marcati su una scala oculare. La polarità delle piastre del condensatore viene selezionata in funzione del segno della carica. In alternativa, è possibile mantenere le goccioline d'olio in equilibrio nell'aria all'interno del campo elettrico. Sul touch screen vengono visualizzati il tempo di salita, il tempo di discesa di una gocciolina d'olio carica elettricamente, nonché i parametri importanti ai fini della determinazione, quali la temperatura, la viscosità e la pressione.

ANALISI

Partendo dai tempi di salita e discesa t_1 e t_2 misurati si determina la velocità di salita e discesa

$$v_{1,2} = \frac{s}{V \cdot t_{1,2}},$$

s : distanza fra due punti marcati sulla scala oculare,

$V = 2$: ingrandimento dell'obiettivo

e dall'equazione (10) la carica q della gocciolina d'olio.

Le cariche q_i (Tab. 1) determinate dalla misurazione vengono divise per un numero intero n_i in modo tale che i valori risultanti siano il meno dispersi possibile rispetto al valor medio. La misura della dispersione è la deviazione standard. Il migliore valore stimato e per la carica elementare e l'errore standard Δe vengono determinati a partire dai valori e_i delle singole misurazioni e dai rispettivi errori di misurazione Δe_i (Tab. 1) mediante il calcolo della media ponderata procedendo come segue:

$$e \pm \Delta e = \frac{\sum w_i \cdot e_i}{\sum w_i} \pm \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \quad \text{con} \quad w_i = \left(\frac{1}{\Delta e_i}\right)^2.$$

Con i valori dalla Tab. 1 si ricava:

$$e \pm \Delta e = \frac{1286}{799} \pm \frac{1}{28} = (1,61 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

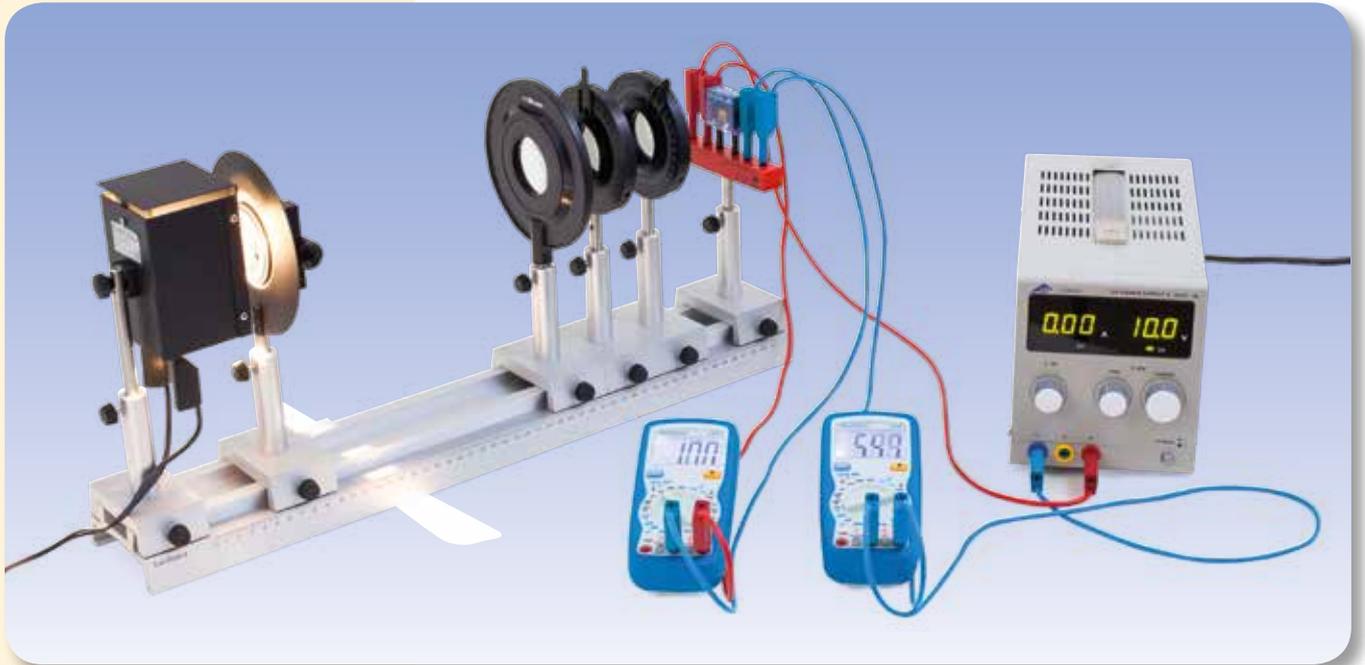
Il risultato è tanto più attendibile quanti più valori vengono misurati. Migliori risultati si ottengono per piccoli valori del numero di cariche n per ogni gocciolina d'olio. A causa delle imprecisioni in particolare in relazione alla distanza delle piastre del condensatore e della lettura sulla scala del microscopio n dovrebbe essere ≤ 7 .

Tab. 1: Cariche q_i misurate di dieci diverse goccioline d'olio e valori e_i ricavati per la carica elementare.

i	Polarità	q_i 10^{-19} C	Δq_i 10^{-19} C	n	e_i 10^{-19} C	Δe_i 10^{-19} C
1		-11,1	0,9	-7	1,59	0,13
2		-7,9	0,6	-5	1,58	0,12
3		-6,2	0,4	-4	1,55	0,10
4		3,5	0,2	2	1,75	0,10
5		4,9	0,3	3	1,63	0,10
6		6,3	0,5	4	1,58	0,13
7		6,6	0,4	4	1,65	0,10
8		7,6	0,6	5	1,52	0,12
9		10,2	0,8	6	1,70	0,13
10		10,6	0,8	7	1,51	0,11

UE6020400

FOTOCONDUZIONE



FUNZIONI

- Misurazione della corrente in funzione della tensione a intensità di radiazione diverse.
- Misurazione della corrente in funzione dell'intensità di radiazione a tensioni diverse.

SCOPO

Registrazione delle caratteristiche di una fotoresistenza

RIASSUNTO

La fotoconduzione sfrutta l'assorbimento di luce attraverso l'effetto fotoelettrico interno in un semiconduttore per la formazione di coppie libere di elettroni-lacune. Uno speciale semiconduttore con effetto fotoelettrico interno particolarmente forte è il solfuro di cadmio, utilizzato per la costruzione di fotoresistenze. Nell'esperimento, una fotoresistenza CdS viene illuminata con la luce bianca di una lampadina, la cui intensità di radiazione sul punto della fotoresistenza viene variata attraverso l'angolo tra due filtri di polarizzazione.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	Banco ottico U, 600 mm	1003040
6	Cavaliere ottico U, 75 mm	1003041
1	Lampada sperimentale con lampadina alogena	1003038
1	Fenditura regolabile su asta	1000856
1	Lente convergente su asta $f = 150$ mm	1003024
2	Filtro di polarizzazione su asta	1008668
1	Supporto per elementi a spina	1018449
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 digitale P1035	1002781
3	Paio di cavi di sicurezza per esperimenti 75 cm, rosso/blu	1017718



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

2

BASI GENERALI

La fotoconduzione sfrutta l'assorbimento di luce attraverso l'effetto fotoelettrico interno in un semiconduttore per la formazione di coppie libere di elettroni-lacune. L'effetto non dipende solo dal materiale di base, ma anche dai difetti reticolari. In alcuni semiconduttori l'effetto generato dalla ionizzazione delle impurezze agisce per tempi dell'ordine dei millisecondi come un drogaggio e aumenta la conducibilità elettrica del materiale. Uno speciale semiconduttore con effetto fotoelettrico interno particolarmente forte è il solfuro di cadmio, utilizzato per la costruzione di fotoresistenze.

L'assorbimento della luce aumenta la conducibilità del semiconduttore di

$$(1) \quad \Delta\sigma = \Delta p \cdot e \cdot \mu_p + \Delta n \cdot e \cdot \mu_n$$

e : carica fondamentale,
 Δn : variazione della densità di elettroni,
 Δp : variazione della densità di lacune,
 μ_n : mobilità degli elettroni,
 μ_p : mobilità delle lacune

Applicando una tensione U , passa una fotocorrente

$$(2) \quad I_{ph} = U \cdot \Delta\sigma \cdot \frac{A}{d}$$

A : sezione della traiettoria, d : lunghezza della traiettoria

Il semiconduttore agisce quindi in un circuito come una resistenza fotosensibile, il cui valore varia inversamente all'intensità della luce. La dipendenza dall'intensità di radiazione Φ a tensione costante è descrivibile nella forma

$$(3) \quad I_{ph} = a \cdot \Phi^\gamma \text{ con } \gamma \leq 1$$

dove γ fornisce informazioni sui processi di ricombinazione nel materiale semiconduttore.

Nell'esperimento, una fotoresistenza CdS viene illuminata con la luce bianca di una lampadina. A intensità di radiazione costante Φ si misura la dipendenza della corrente I dalla tensione applicata U e a tensione costante U la dipendenza della corrente I dall'intensità di radiazione Φ , dove quest'ultima viene variata attraverso l'angolo di due filtri di polarizzazione.

Se si supera la potenza massima ammessa pari a 0,2 W, la fotoresistenza si danneggia. Per questa ragione, nell'esperimento l'intensità di luce incidente viene limitata per mezzo di una fenditura regolabile situata direttamente dietro la sorgente luminosa.

ANALISI

Le caratteristiche corrente-tensione della fotoresistenza CdS coincidono con (2) su una retta passante per l'origine.

Per la descrizione delle caratteristiche corrente-intensità di radiazione, il termine $\cos^2\alpha$ viene calcolato come misura relativa dell'intensità di radiazione, mentre α è l'angolo tra le direzioni di polarizzazione dei due filtri. Tuttavia, i filtri di polarizzazione non estinguono il fascio completamente neppure in posizione ortogonale. Inoltre, nella camera sperimentale non è possibile evitare totalmente una certa luminosità residua. Pertanto, (3) viene modificata in

$$I = a \cdot \Phi^\gamma + b \text{ con } \gamma \leq 1$$

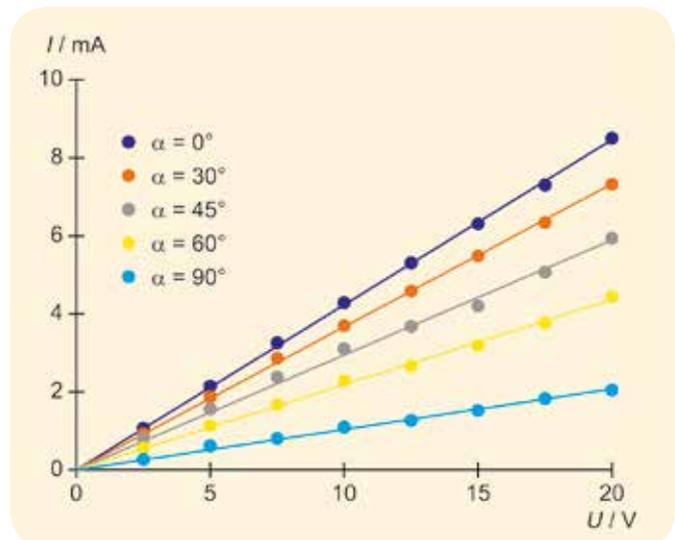


Fig. 1: Caratteristiche corrente-tensione della fotoresistenza CdS a intensità di radiazione diverse.

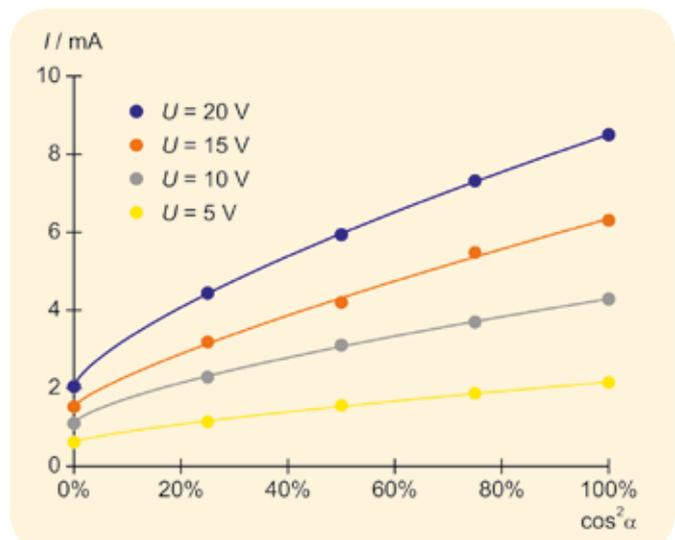


Fig. 2: Caratteristiche corrente-intensità di radiazione della fotoresistenza CdS a tensioni diverse.



SCOPO

Misurazione delle curve caratteristiche di un modulo fotovoltaico in funzione dell'intensità luminosa

FUNZIONI

- Misurazione delle curve caratteristiche $I-U$ di un modulo fotovoltaico in presenza di varie intensità luminose.
- Confronto delle curve caratteristiche misurate con le previsioni del modello a diodo singolo.
- Determinazione della relazione fra la tensione a vuoto e la corrente di cortocircuito per varie intensità di illuminazione.

RIASSUNTO

Un sistema fotovoltaico trasforma l'energia luminosa della luce solare in energia elettrica. Per fare ciò si utilizzano celle solari costruite, ad esempio, con silicio opportunamente drogato e che corrispondono in linea di principio a un fotodiodo di superficie ampia. La luce assorbita nella cella solare libera i portatori di carica dai legami cristallini generando una fotocorrente inversa rispetto alla direzione della giunzione p-n. La corrente, che può essere immessa in un carico esterno, viene limitata dalla corrente di diodo della cella solare. Alla cosiddetta tensione a vuoto U_{OC} , la corrente raggiunge il valore zero, poiché proprio in quel punto la fotocorrente e la corrente di diodo si compensano, e diventa negativa se viene applicata una tensione superiore alla tensione a vuoto. Nel range di correnti positive è possibile utilizzare la cella solare come generatore, per immettere energia elettrica in un carico esterno. Nell'esperimento si procede a misurare le curve caratteristiche corrente-tensione di tale generatore in funzione dell'intensità luminosa e a descriverle con un semplice set di parametri.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	SES Energia solare (230 V, 50/60 Hz)	1017732 o
	SES Energia solare (115 V, 50/60 Hz)	1017731
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

BASI GENERALI

“Fotovoltaico” è un termine composto che deriva dalla parola greca Phos (luce) e dal cognome Volta. Il termine onora, infatti, la memoria di *Alessandro Volta* inventò tra le altre cose la prima batteria elettrochimica funzionante. Un sistema fotovoltaico trasforma l'energia luminosa della luce del sole, che possiamo assumere gratuita ed illimitata, in energia elettrica senza emissione di CO_2 . Questa trasformazione è a opera di celle solari che, nella maggior parte dei casi, sono realizzate con silicio opportunamente drogato e funzionano come un fotodiodo di superficie ampia. La luce assorbita nella cella solare libera portatori di carica dai legami cristallini (effetto fotoelettrico interno) che si muovono nel campo elettrico della giunzione p-n, ottenuta tramite drogaggio, fino a raggiungere i contatti esterni della cella solare; gli elettroni migrano verso la regione di tipo n, mentre le lacune migrano verso la regione di tipo p (fig. 1). In questo modo si genera una fotocorrente inversa rispetto alla direzione della giunzione p-n che può cedere energia elettrica a un carico esterno.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

La fotocorrente I_{ph} è proporzionale all'intensità luminosa Φ :

$$(1) \quad I_{ph} = \text{cost} \cdot \Phi$$

Essa si sovrappone alla corrente di diodo

$$(2) \quad I_D = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

I_s : corrente di saturazione, U_T : tensione termica

e diventa tanto più forte, quanto più la tensione U presente ai terminali supera la tensione di diffusione U_D . Pertanto la corrente I immessa all'esterno viene limitata dalla corrente di diodo:

$$(3) \quad I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

Alla cosiddetta tensione a vuoto U_{oc} la corrente raggiunge il valore zero, poiché a tale tensione la fotocorrente e la corrente di diodo si compensano, e diventa negativa se viene applicata una tensione $U > U_{oc}$.

Nel range di correnti positive è possibile utilizzare la cella solare come generatore, per immettere energia elettrica in un carico esterno. L'equazione (3) descrive la curva caratteristica $I-U$ di questo generatore. Poiché nella pratica la fotocorrente I_{ph} è notevolmente più grande della corrente di saturazione I_s , dall'equazione (3) è possibile derivare per la tensione la relazione

$$(4) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right)$$

Se vengono cortocircuitati i contatti della cella solare, quest'ultima produce corrente di cortocircuito I_{sc} che, in base all'equazione (3), per $U = 0$ corrisponde alla fotocorrente. Pertanto si ha

$$(5) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right) \text{ con } I_{sc} = I_{ph}$$

L'equazione 2 descrive il comportamento del diodo nell'ambito del cosiddetto modello standard. In questo caso la corrente di saturazione I_s è una grandezza materiale che dipende dai dati geometrici ed elettrici della cella solare. Per la tensione termica U_T vale

$$(6) \quad U_T = \frac{m \cdot k \cdot T}{e}$$

$m = 1 \dots 2$: fattore ideale
 k : costante di Boltzmann, e : carica fondamentale,
 T : temperatura in Kelvin

Osservando più precisamente la curva caratteristica, occorre prendere in considerazione anche le correnti di fuga sui bordi della cella solare e i cortocircuiti puntiformi della giunzione p-n che possono essere modellizzati come una resistenza in parallelo R_p . Pertanto l'equazione 3 diventa.

$$(7) \quad I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

Nella pratica, per ottenere tensioni utili nel range fra 20 e 50 V, vengono collegate in serie svariate celle solari in un singolo modulo fotovoltaico. Nell'esperimento, un simile collegamento in serie formato da 18 celle solari viene illuminato con una lampada alogena a illuminazione variabile, così da poter tracciare le curve caratteristiche corrente-tensione del modulo in presenza di diverse intensità luminose.

ANALISI

La famiglia di curve caratteristiche corrente-tensione del modulo fotovoltaico (fig. 2) può essere descritto con l'equazione 7 se, indipendentemente dall'intensità luminosa, si utilizza sempre lo stesso set di parametri I_s , U_T e R_p e se si sceglie una fotocorrente I_{ph} dipendente dall'intensità luminosa. Tuttavia la tensione termica è 18 volte il valore determinato nell'equazione 6, poiché il modulo è costituito da 18 celle solari collegate in serie.

Come schema elettrico sostitutivo per il modulo fotovoltaico è possibile considerare il collegamento in parallelo di una sorgente elettrica ideale, 18 diodi semiconduttori collegati in serie e una resistenza ohmica, vedere fig. 3. La sorgente elettrica produce una corrente, che varia a seconda dell'intensità luminosa, in polarizzazione inversa.

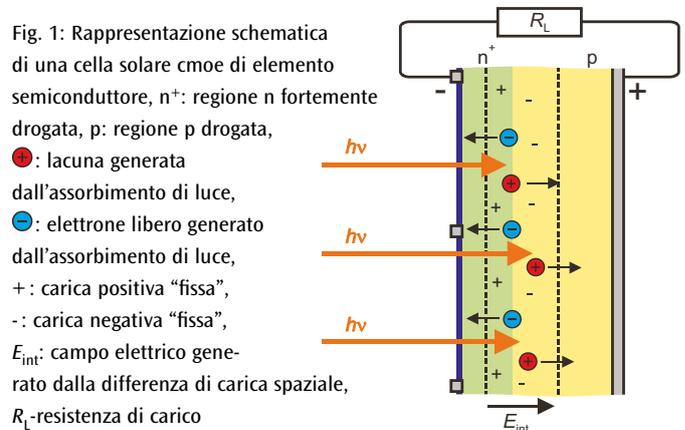


Fig. 1: Rappresentazione schematica di una cella solare cmoe di elemento semiconduttore, n+: regione n fortemente drogata, p: regione p drogata, ●: lacuna generata dall'assorbimento di luce, ●: elettrone libero generato dall'assorbimento di luce, +: carica positiva "fissa", -: carica negativa "fissa", E_{int} : campo elettrico generato dalla differenza di carica spaziale, R_L -resistenza di carico

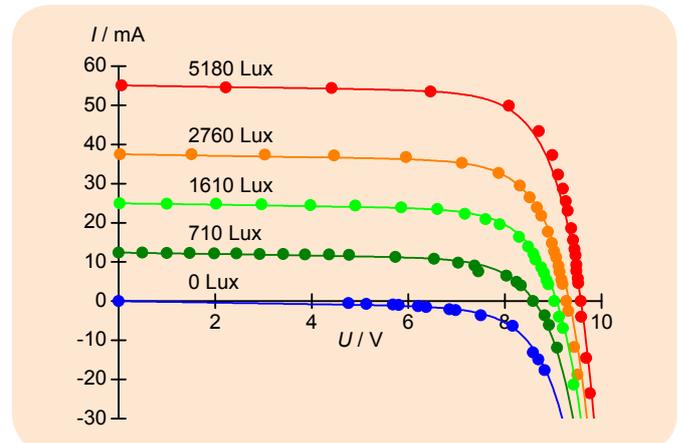


Fig. 2: Fascio di curve caratteristiche corrente-tensione per cinque diverse intensità luminose

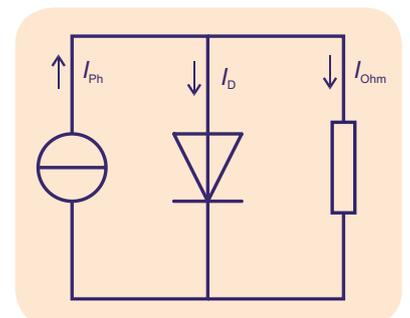


Fig. 3: Schema elettrico sostitutivo per il modulo fotovoltaico



SCOPO

Analisi dell'influenza dell'ombreggiamento parziale

FUNZIONI

- Misurazione e analisi della caratteristica $I-U$ e della caratteristica $P-R$ di un collegamento in serie tra due moduli fotovoltaici.
- Misurazione e analisi delle caratteristiche in condizioni di parziale ombreggiamento con e senza la protezione fornita da diodi di bypass.
- Dimostrazione della tensione di interdizione presso il modulo ombreggiato non protetto.
- Determinazione della perdita di potenza dovuta all'ombreggiamento parziale.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

RIASSUNTO

Negli impianti fotovoltaici, diversi moduli vengono solitamente collegati in serie a formare una stringa. I moduli sono a loro volta collegamenti in serie composti da molte celle solari. Da un punto di vista pratico, si hanno ombreggiamenti parziali. I singoli elementi dell'impianto vengono irraggiati con un'intensità ridotta e forniscono solo una piccola fotocorrente che limita il flusso attraverso l'intero collegamento in serie. Ciò viene evitato utilizzando diodi di bypass. Nell'esperimento, due moduli da 18 celle solari ciascuno rappresentano un impianto fotovoltaico semplice. Essi vengono alternativamente collegati in serie con e senza diodi di bypass supplementari e irradiati con la luce di una lampada alogena.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	SES Energia solare (230 V, 50/60 Hz)	1017732 o
	SES Energia solare (115 V, 50/60 Hz)	1017731

BASI GENERALI

Negli impianti fotovoltaici, diversi moduli vengono solitamente collegati in serie a formare una stringa. I moduli sono a loro volta collegamenti in serie composti da molte celle solari.

Il calcolo della corrente e della tensione in un collegamento in serie di tale tipo segue le leggi di Kirchhoff attenendosi alla caratteristica corrente-tensione delle celle solari. Tutti i moduli del collegamento in serie sono attraversati dalla medesima corrente I e la tensione totale

$$(1) \quad U = \sum_{i=1}^n U_i$$

n : numero dei moduli

è la somma di tutte le tensioni U_i tra le connessioni dei singoli moduli.

La caratteristica corrente-tensione di una cella solare e di un modulo può essere spiegata con l'ausilio di un circuito equivalente costituito, come una connessione in antiparallelo, da una sorgente di corrente costante erogante fotocorrente e un "diodo semiconduttore". Le perdite ohmiche corrispondono a una resistenza supplementare collegata in parallelo (v. esperimento UE8020100 e Fig. 1). La fotocorrente è proporzionale all'intensità di radiazione della luce. In presenza della medesima intensità di radiazione, tutti i moduli si comportano alla stessa maniera e generano la medesima tensione singola. Si ricava quindi dall'equazione 1:

(2) $U = n \cdot U_1$

Nella realtà, in un impianto fotovoltaico possono tuttavia verificarsi ombreggiamenti parziali. I singoli moduli dell'impianto vengono irraggiati con un'intensità ridotta e forniscono solo una piccola fotocorrente che limita il flusso attraverso l'intero collegamento in serie. Tale limitazione di corrente ha come conseguenza la generazione di tensioni U_1 differenti sui singoli moduli.

Nella situazione più estrema, le tensioni sui moduli interamente illuminati raggiungono in caso di cortocircuito ($U = 0$) valori fino alla tensione a vuoto, v. anche Fig. 2. Nei moduli ombreggiati, la somma di tali tensioni si trova in interdizione. Ciò può provocare un massiccio surriscaldamento e distruggere il rivestimento o persino le celle solari. Per proteggere gli impianti fotovoltaici, si utilizzano diodi di bypass, in grado di invertire la corrente sull'elemento ombreggiato.

Nell'esperimento, due moduli da 18 celle solari ciascuno rappresentano un impianto fotovoltaico semplice. Essi vengono alternativamente collegati in serie con e senza diodi di bypass supplementari e irradati con la luce di una lampada alogena. Dapprima i due moduli vengono illuminati con la medesima intensità, poi un modulo viene ombreggiato di modo che fornisca solamente metà della fotocorrente.

In ciascun caso, si registrano e comparano le caratteristiche $I-U$ dal cortocircuito al funzionamento a vuoto. Si calcola inoltre la potenza come funzione della resistenza di carico per determinare la perdita di potenza dovuta all'ombreggiamento e l'influenza dei diodi di bypass.

Nel caso del cortocircuito, si misura altresì separatamente la tensione sul modulo ombreggiato. Se il modulo non è protetto con un diodo di bypass, essa raggiunge -9 V.

ANALISI

Quando un modulo fornisce ad esempio solo metà della fotocorrente, in assenza di un diodo di bypass tale situazione comporta il cortocircuito del collegamento in serie.

Il diodo di bypass fa sì che il modulo interamente illuminato fornisca una corrente più elevata fino a quanto questa inizia a diminuire perché viene raggiunta la tensione a vuoto del singolo modulo.

Il modello matematico per l'adeguamento dei valori misurati nelle fig. 3 e 4 tiene conto delle leggi di Kirchhoff e utilizza la caratteristica corrente-tensione dei singoli moduli rilevata nell'esperimento UE8020100 con i parametri I_s , U_T e R_p . Per tener conto dei diodi di bypass su utilizza la rispettiva caratteristica.

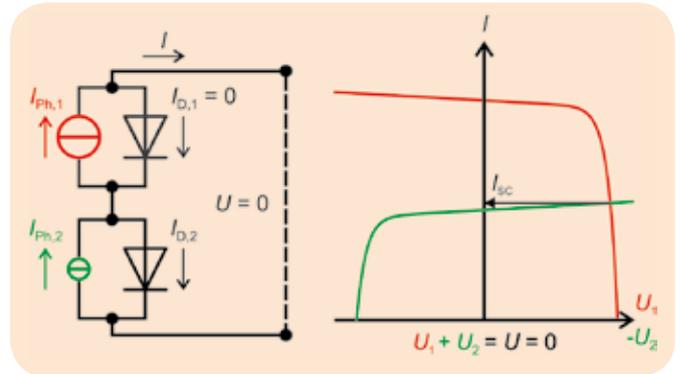


Fig. 2: Modello schematico di un'ombreggiamento parziale del collegamento in serie tra due moduli senza bypass, in cortocircuito ($U = 0$). La caratteristica del modulo ombreggiato (verde) è rappresentata riflessa. Qui si manifesta una tensione U_2 in interdizione.

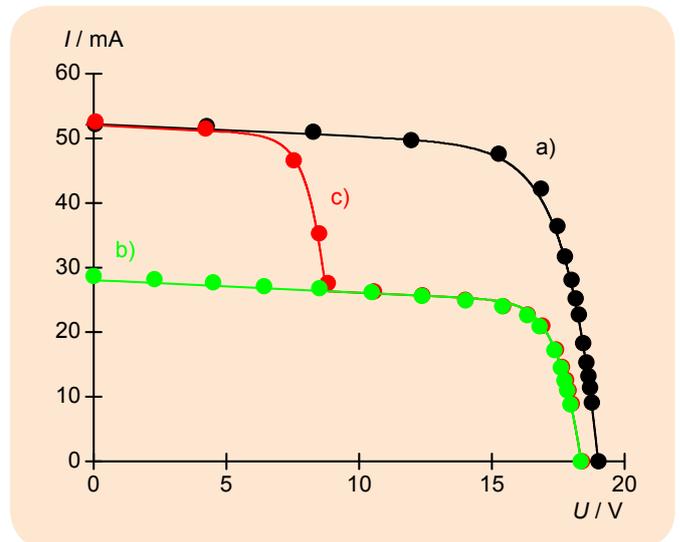


Fig. 3: Caratteristica $I-U$ del collegamento in serie tra due moduli. a) senza ombreggiamento, b) ombreggiamento parziale, senza bypass, c) ombreggiamento parziale, con bypass

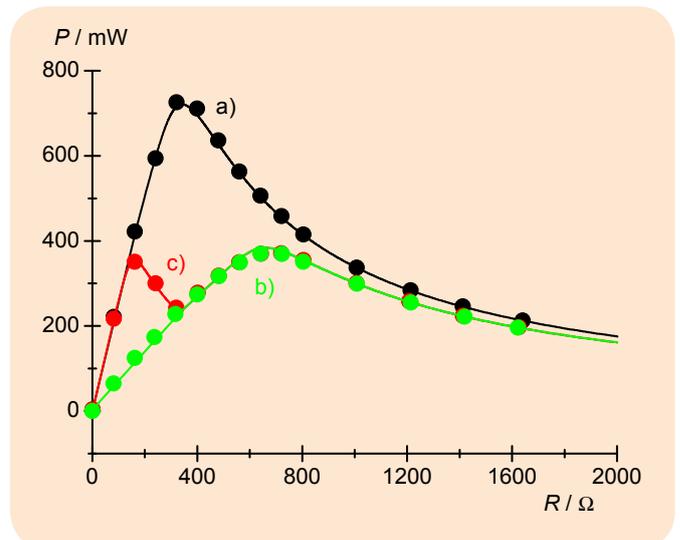


Fig. 4: Caratteristica $P-R$ del collegamento in serie tra due moduli. a) senza ombreggiamento, b) ombreggiamento parziale, senza bypass, c) ombreggiamento parziale, con bypass

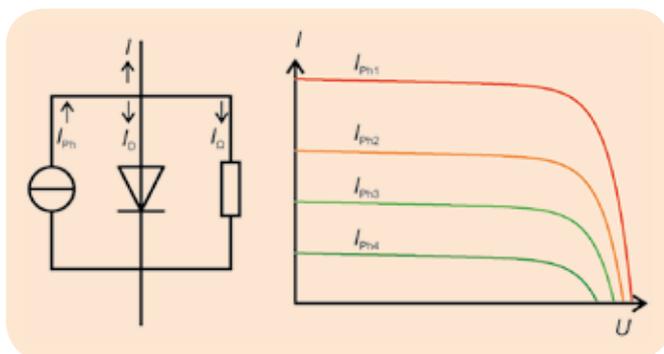


Fig. 1: Schema del circuito equivalente e caratteristiche di una cella solare

UE8020250

IMPIANTI A ISOLA



SCOPO

Analisi di un impianto a isola per la produzione e l'immagazzinamento di energia elettrica

FUNZIONI

- Determinazione della corrente di esercizio del contatore di carica elettronico e dell'intensità luminosa minima necessaria per il funzionamento.
- Analisi del bilancio di corrente dell'impianto a isola in presenza di vari carichi ohmici e varie intensità luminose nell'impiego in laboratorio.
- Misurazione della potenza solare e della corrente di carica e scarica in funzione della corrente di carico per varie intensità luminose.



I dati tecnici delle apparecchiature sono disponibili su 3bscientific.com

1

RIASSUNTO

Gli impianti a isola sono impianti di alimentazione elettrica non collegati a una rete elettrica pubblica che producono e immagazzinano energia elettrica. Spesso vengono impiegati moduli fotovoltaici per la produzione di energia e accumulatori per immagazzinare l'energia. Per esaminare un simile impianto a isola, nell'esperimento vengono impiegati due moduli fotovoltaici che caricano un accumulatore nichel-metallo idruro. All'accumulatore è collegato un motore a corrente continua che funge da utenza di consumo, mentre un contatore di carica elettronico misura la carica in entrata o in uscita. Mediante due moduli collegati in serie si ottiene un caricamento affidabile dell'accumulatore anche a bassa intensità luminosa, poiché la tensione a vuoto è notevolmente superiore alla tensione dell'accumulatore.

APPARECCHI NECESSARI

Numero	Apparecchio	Cat. n°
1	SES Energia solare (230 V, 50/60 Hz)	1017732 o
	SES Energia solare (115 V, 50/60 Hz)	1017731
1	Contatore di carica con accumulatore	1017734
1	Motoriduttore con puleggia	1017735
1	Set pesi a fessura 5 x 100 g	1018597
1	Corda, 100 m	1007112
1	Commutatore bipolare	1018439
1	Set di 15 cavi per esperimenti, 75 cm, 1 mm ²	1002840
1	Timer	1003009

BASI GENERALI

Gli impianti a isola sono impianti di alimentazione elettrica non collegati a una rete elettrica pubblica. Producono e immagazzinano energia elettrica e vengono impiegati, quando non è possibile realizzare l'allacciamento a una rete elettrica pubblica oppure quando l'allacciamento non è conveniente o risulta essere una soluzione troppo poco flessibile e mobile. Spesso vengono impiegati moduli fotovoltaici per la produzione di energia e accumulatori per l'immagazzinamento dell'energia. Per esaminare un simile impianto a isola, nell'esperimento vengono

impiegati due moduli fotovoltaici con una potenza nominale di 5 W che caricano un accumulatore nichel-metallo idruro con una capacità di 220 mAh. All'accumulatore è collegato un motore a corrente continua che funge da utenza di consumo, mentre un contatore di carica elettronico misura la carica in entrata o in uscita. Diversamente dalla pratica comune si rinuncia all'impiego di un regolatore di carica.

La tensione nominale U_{Accu} dell'accumulatore è di 8,4 V, tuttavia dipende dallo stato di carica e dalla corrente di carica I_{Accu} e nella pratica arriva a un valore max di 10 V. Essa determina la tensione in tutti i rami collegati in parallelo (vedere fig. 1):

$$(1) \quad U_{Accu} = U_{Op} = U_L = U_{Solar}$$

La corrente fornita I_{Solar} viene impiegata come corrente di esercizio I_{Op} dal contatore di carica elettronico, come corrente di carica I_{Accu} dall'accumulatore e come corrente I_L dal carico ohmico collegato. Il bilancio di corrente

$$(2) \quad I_{Solar} = I_{Accu} + I_{Op} + I_L$$

vale anche in caso di correnti di carica negative I_{Accu} , ovvero durante il ciclo di scarica dell'accumulatore.

La corrente di esercizio $I_{Op} = 10$ mA viene determinata dal circuito elettronico del contatore di carica, mentre la corrente di carica I_L dipende dalla resistenza ohmica R_L del carico collegato. L'accumulatore viene dunque caricato, quando l'impianto fotovoltaico fornisce corrente e la resistenza di carico non è troppo piccola.

Per garantire un ciclo di carica affidabile dell'accumulatore anche in presenza di bassa intensità luminosa, l'impianto fotovoltaico è configurato in modo tale che la sua tensione a vuoto U_{OC} è notevolmente superiore alla tensione U_{Accu} . Il confronto con le curve caratteristiche misurate nell'esperimento UE8020100 mostra che ciò può essere ottenuto con certezza tramite un collegamento in serie di due moduli. L'elettricità solare I_{Solar} è, con buona approssimazione, proporzionale all'intensità luminosa E e in condizioni di laboratorio raggiunge valori di max 50 mA, che sono ottimali per il caricamento rapido dell'accumulatore.

Come carichi ohmici vengono impiegati un motore a corrente continua e resistenze collegate a cascata che consentono di esaminare la curva caratteristica corrente di carica-corrente di carico dell'impianto a isola. Inoltre viene confermato che la corrente solare fornita è indipendente dal carico ohmico. Ne risulta che è possibile determinare, ad esempio, la luminosità minima necessaria a caricare l'accumulatore in assenza di tutti i carichi.

NOTA

Se si utilizzano i moduli fotovoltaici a cielo aperto e alla luce diretta del sole è possibile ottenere correnti nettamente superiori. In tal caso non utilizzare l'accumulatore senza carico ohmico collegato, il quale assicura che non venga superata la corrente di carica $I_{Accu} = 44$ mA.

ANALISI

La corrente di esercizio del contatore di carica viene determinata da una carica in uscita dall'accumulatore di 30 s, quando non sono collegati né il modulo, né l'utenza.

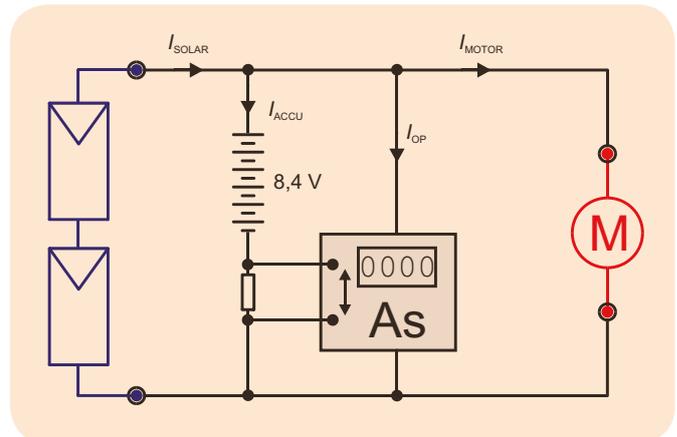


Fig. 1: Schema elettrico a blocchi dell'impianto a isola

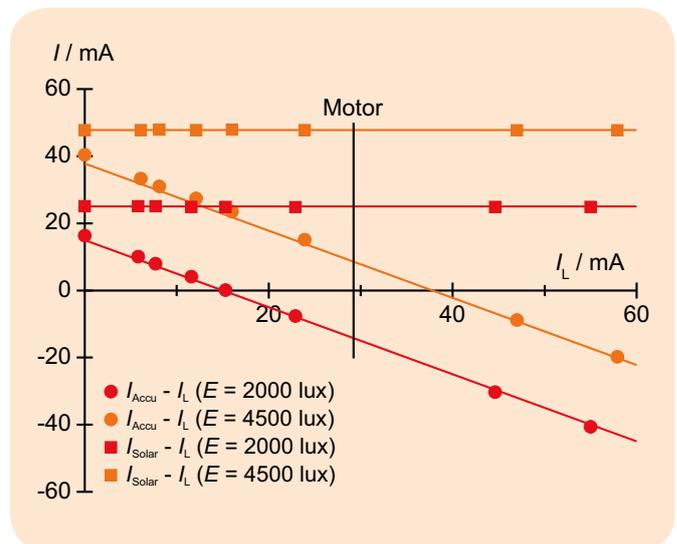


Fig. 2: Curve caratteristiche di sollecitazione dell'impianto a isola

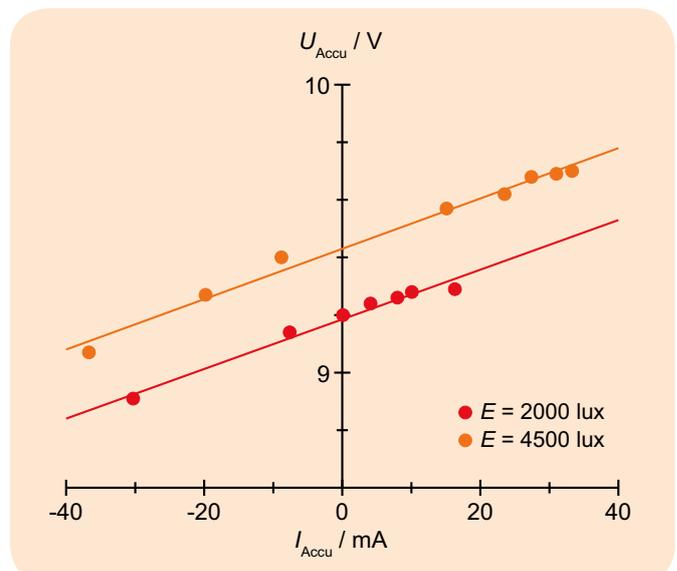
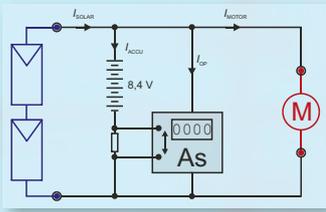
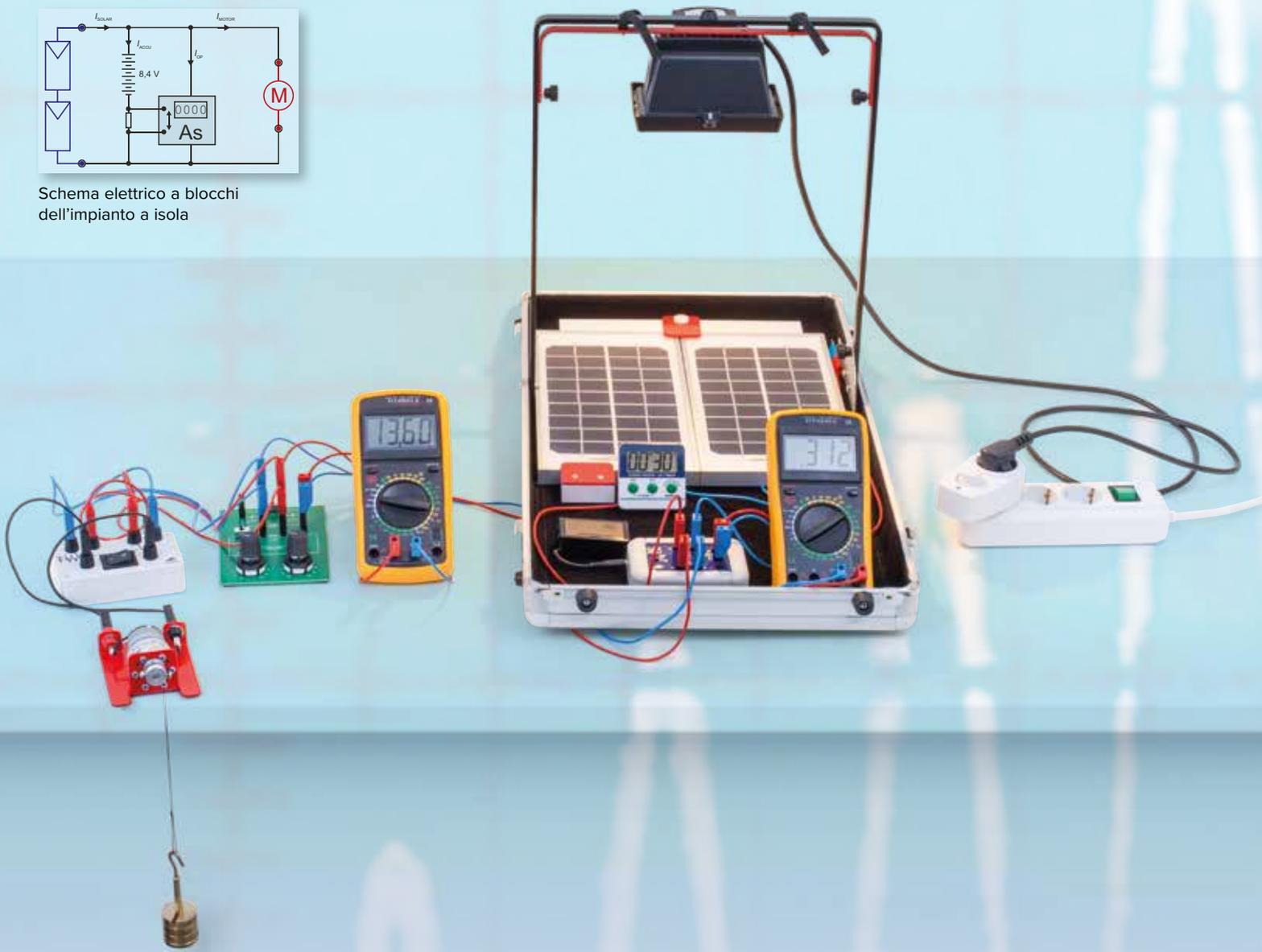


Fig. 3: Curve caratteristiche dell'accumulatore misurate in presenza di diverse intensità luminose. Queste curve caratteristiche si spostano lungo l'asse y verso l'alto o verso il basso a seconda dello stato di carica dell'accumulatore.



Schema elettrico a blocchi dell'impianto a isola



Impianti fotovoltaici (UE8020250):

Analisi di un impianto a isola per la produzione e l'immagazzinamento di energia elettrica

Gli impianti a isola sono impianti di alimentazione elettrica non collegati a una rete elettrica pubblica che producono e immagazzinano energia elettrica. Spesso vengono impiegati moduli fotovoltaici per la produzione di energia e accumulatori per l'immagazzinamento dell'energia. Per esaminare un simile impianto a isola, nell'esperimento vengono impiegati due moduli fotovoltaici che caricano un accumulatore nichel-metallo idruro. All'accumulatore è collegato un motore a corrente continua che funge da utenza di consumo, mentre un contatore di carica elettronico misura la carica in entrata o in uscita. Mediante due moduli collegati in serie si ottiene un caricamento affidabile dell'accumulatore anche a bassa intensità luminosa, poiché la tensione a vuoto è notevolmente superiore alla tensione dell'accumulatore.