

Verifica delle leggi di radiazione
con il cubo di *Leslie*

Obiettivi dell'esperimento

- Misurare l'intensità di radiazione emessa da ciascuna faccia del cubo in funzione della temperatura mediante la termopila di Moll.
- Rappresentare graficamente l'intensità di radiazione di ciascuna faccia del cubo in funzione della temperatura.
- Verificare la legge di radiazione di *Kirchhoff*.
- Confermare la validità della legge di *Stefan-Boltzmann* nell'intervallo di temperatura in cui si esegue la misura identificando le facce del cubo come "corpo grigio".

Principio fisico

Tutti i corpi emettono calore. L'energia termica corrispondente genera radiazioni elettromagnetiche la cui intensità dipende dalle caratteristiche della superficie del corpo ed aumenta con la temperatura.

Un corpo, non solo genera, ma assorbe anche le radiazioni elettromagnetiche e l'entità di tale assorbimento dipende dalle caratteristiche della superficie. Secondo la legge di *Kirchhoff*, ad una data temperatura, maggiore è la radiazione emessa da un corpo, tanto più esso è in grado di assorbire energia radiante. Più precisamente, si ha:

$$\varepsilon = \alpha \tag{I}$$

dove la radiazione ε è definita dal rapporto:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_B} \tag{II}$$

(M : radiazione emessa dal corpo,
 M_B : radiazione emessa dal corpo nero)

mentre il fattore di assorbimento α è dato da

$$\alpha = \frac{\Phi}{\Phi_0} \tag{III}$$

Φ : potenza della radiazione assorbita dal corpo
 Φ_0 : potenza della radiazione totale incidente sul corpo
Per corpo nero s'intende quel corpo in grado di assorbire completamente la radiazione elettromagnetica incidente. Ad una data temperatura, il corpo nero ha il massimo fattore di assorbimento e quindi possiede anche la massima capacità di emissione. Il flusso di assorbimento e di radiazione di tutti gli altri corpi è inferiore a quello del corpo nero.

La legge di *Stefan-Boltzmann* stabilisce che la radiazione M_B emessa dal corpo nero è data dalla seguente relazione:

$$M_B = \sigma \cdot T^4 \tag{IV}$$

$$\left(\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} : \text{costante di Stefan-Boltzmann}\right)$$

La radiazione del corpo nero non è distribuita uniformemente su tutte le lunghezze d'onda, ma possiede una propria distribuzione spettrale. Nel caso dei corpi grigi, si ha una distribuzione spettrale molto simile a quella del corpo nero, ma i valori della radiazione ε e del fattore di assorbimento α risultano inferiori. La radiazione emessa aumenta proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura assoluta T ; per cui si ha:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{V}$$

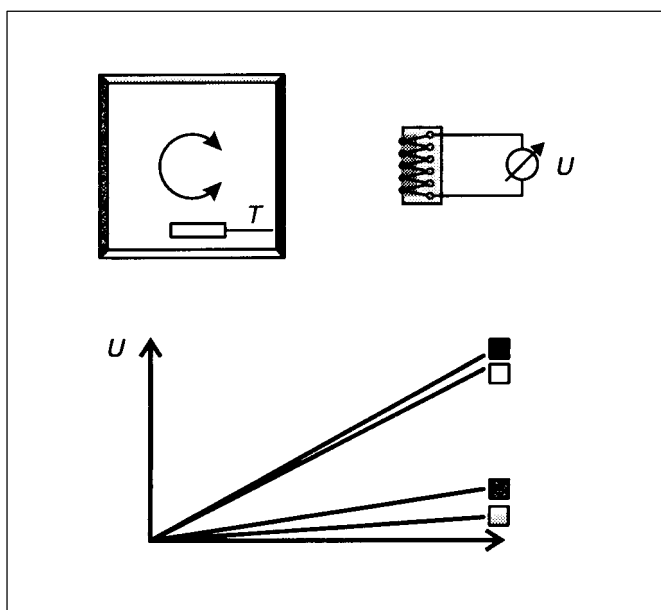
In modo analogo, un corpo assorbe dall'ambiente circostante la stessa energia che è in grado di emettere. Per questo motivo, una misura non tiene conto della radiazione totale M emessa, ma piuttosto dell'energia M' sottratta al corpo per radiazione. La radiazione che il corpo assorbe dall'ambiente circostante è data da

$$M_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_0^4 \tag{VI}$$

Quindi si ha

$$M' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \tag{VII}$$

Se la temperatura del corpo è uguale alla temperatura ambiente T_0 , si ha $M' = 0$.



Apparecchiature

1 Cubo di Leslie	389 26
1 Agitatore per cubo di Leslie	389 28
1 Supporto per forno elettrico	555 84
1 Termometro digitale con un ingresso	666 190
1 Sensore di temperatura, NiCr-Ni	666 193
1 Termopila di Moll	557 36
1 Microvoltmetro	532 13
1 Piccolo banco ottico	460 43
1 Piede di appoggio a V, grande	300 01
3 Morsetti Leybold	301 01
1 Riscaldatore ad immersione	303 25
1 Bicchiere di plastica, 1 l	590 06
1 Imbuto di plastica, diametro 75 mm	665 009

Inoltre si consiglia:

1 Panno assorbente, 1 foglio di cartone scuro

Il cubo di *Leslie* ha quattro facce con caratteristiche diverse, per cui anche la radiazione di ciascuna faccia ha un valore diverso. La superficie di una faccia è di tipo metallico, una di metallo levigato, una superficie è bianca ed un'altra è nera.

L'esperimento consiste nel riempire il cubo con acqua calda e quindi misurare il calore irradiato dalle quattro superfici in funzione della diminuzione di temperatura tramite la termopila di Moll. La termopila contiene un certo numero di termocoppie collegate in serie. La misura tiene conto dei punti sui quali viene dissipata quasi completamente la radiazione incidente, avendo come riferimento i punti che si trovano alla temperatura ambiente. In questo modo dall'uscita della termopila si preleva una tensione proporzionale alla radiazione emessa M' .

Configurazione del sistema di misura

Note:

L'intensità della radiazione è molto piccola; per questo motivo, il risultato della misura risente molto dai disturbi ambientali. Durante la misura, la termopila non va mai toccata con le mani.

Non lavorare chinato sopra la termopila e soprattutto non mettersi di fronte ad essa.

Durante l'esperimento, evitare correnti d'aria e variazioni della temperatura ambiente.

Evitare l'interferenza di radiazioni esterne; eventualmente, schermare il sistema di misura con del cartone.

In caso di necessità, lavorare in ambienti al buio.

Le radiazioni di disturbo possono essere causate da: radiazioni dirette del corpo caldo sulla termopila, radiazioni riflesse su una superficie (per esempio la luce colorata degli indumenti), radiatori, luce solare ed altre sorgenti luminose.

La Fig. 1 mostra la disposizione delle apparecchiature utilizzate per l'esperimento. Il cubo è montato sul supporto del forno elettrico in modo che possa ruotare liberamente; ciò facilita il posizionamento delle varie facce di fronte alla termopila. La Fig. 2 mostra il montaggio del supporto del forno elettrico. Per ruotare tale supporto bisogna allentare leggermente il morsetto Leybold **(a)**, mentre il morsetto Leybold **(b)** serve a sostenere il supporto ed il cubo.

Supporto per forno elettrico e cubo di Leslie:

- Inserire il supporto per forno elettrico e fissare il morsetto Leybold all'asta del sostegno come mostrato in Fig. 2.
- Se necessario, pulire il cubo con un panno umido quindi inserire l'agitatore nell'apertura che si trova al centro della faccia superiore del cubo.

Nota: L'intensità del calore di radiazione diminuisce con la distanza.

- Inserire il cubo di Leslie al centro del supporto in modo tale che, dopo la rotazione, la distanza s di ciascuna faccia dalla termopila di Moll rimanga costante (vedere Fig. 1).
- Orientare la faccia nera del cubo perpendicolarmente alla termopila e bloccare la rotazione del supporto per forno elettrico.

Strumenti di misura:

Note:

La finestrella di protezione in vetro della termopila assorbe di più le radiazioni con lunghezza d'onda maggiore e questo altera sistematicamente la misura dell'intensità di radiazione alle diverse temperature.

Prima di iniziare l'esperimento, lasciare scaldare il microvoltmetro per almeno 10 minuti.

Alimentare il microvoltmetro chiudendo l'interruttore che si trova sul pannello posteriore dello strumento.

- Montare la termopila come mostrato in Fig.1 in modo tale che la distanza s tra il cubo di Leslie e l'asta di sostegno della termopila si circa 10 cm; togliere la finestrella di protezione in vetro della termopila.
- Bloccare l'asta di sostegno della termopila e controllare la distanza tra le diverse facce del cubo e la termopila.
- Collegare la termopila al microvoltmetro come mostrato in Fig. 1 (campo di misura 10^{-4} V); collegare la boccia rossa della termopila alla boccia rossa del microvoltmetro.
- Regolare l'offset pigiando il tasto "auto comp"; eventualmente eseguire la regolazione fine con il potenziometro di azzeramento del display digitale (vedere il Foglio Istruzioni del microvoltmetro).
- Collegare il termometro digitale al sensore di temperatura NiCr-Ni ed alimentare lo strumento (campo di misura < 200 °C)

Esecuzione dell'esperimento

Prima fase:

- Leggere la tensione sul microvoltmetro, la temperatura ambiente sul termometro digitale e riportare questi valori nella tabella.
- Riempire il bicchiere di plastica con circa 0.9 l d'acqua e far bollire l'acqua con il riscaldatore ad immersione.
- Travasare l'acqua calda nel cubo tramite l'imbutto di plastica. Asciugare con un panno assorbente l'acqua eventualmente versata.
- Inserire il sensore di temperatura nell'imboccatura del cubo.
- Allontanare dal luogo dell'esperimento il riscaldatore ad immersione ed il bicchiere di plastica.

Note:

Poiché la temperatura del cubo è un fattore determinante per questo esperimento, prima di ogni misura mescolare l'acqua con l'apposito agitatore.

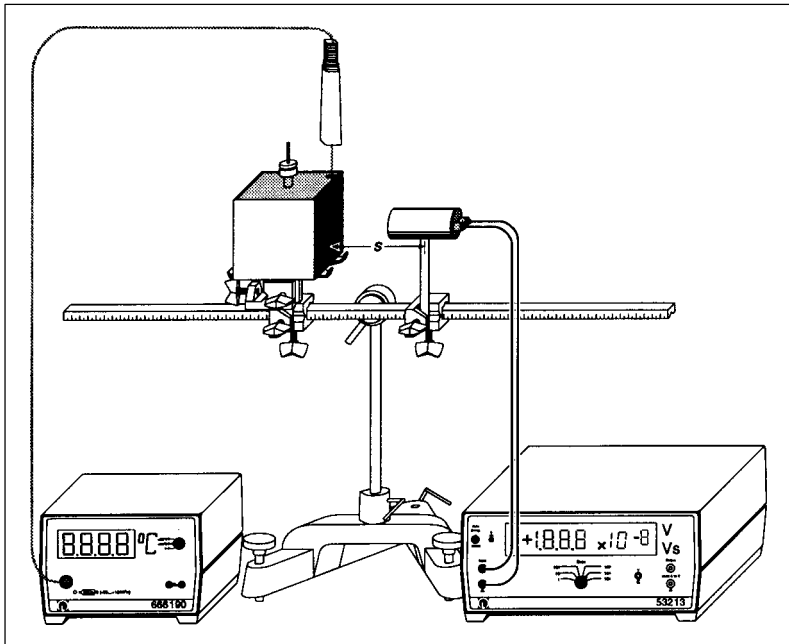


Fig. 1: Esperimento sulle leggi di radiazione

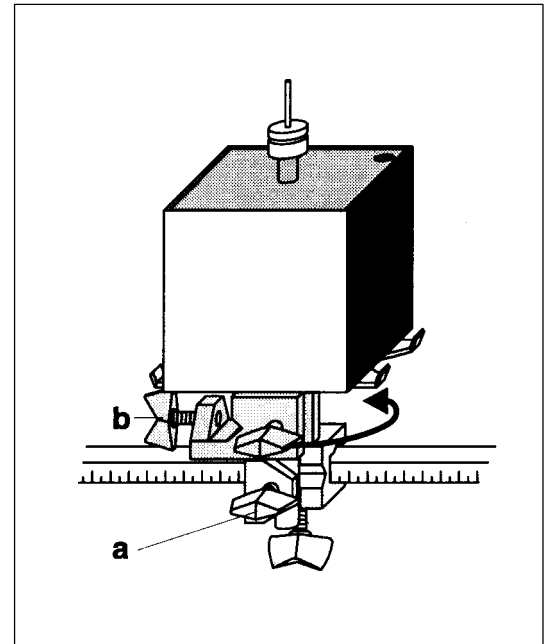


Fig. 2: Montaggio del supporto di rotazione del forno elettrico

Durante la misura, collocare il sensore di temperatura sulla parete interna del cubo che si trova sul lato opposto a quello della termopila e misurare la temperatura in modo più preciso possibile.

Durante la rotazione, evitare che il cubo si allontani dalla posizione centrale del supporto e fare in modo che ogni faccia del cubo sia perpendicolare alla direzione di radiazione. Eseguire la lettura dei dati dopo il tempo assestamento della termopila che al massimo può raggiungere un minuto.

Seconda fase:

- Mescolare l'acqua con l'apposito agitatore. Leggere il valore della tensione termica U e la temperatura ϑ della parete nera del cubo (appoggiare la punta del sensore di temperatura sulla corrispondente superficie interna) e riportare nella tabella i risultati della misura.
- Liberare l'asta di sostegno allentando leggermente il morsetto Leybold (a), ruotare il cubo in modo da orientare la faccia bianca verso la termopila quindi stringere nuovamente il morsetto.
- Mescolare l'acqua con l'apposito agitatore. Leggere il valore della tensione termica U e la temperatura ϑ della parete bianca del cubo (appoggiare la punta del sensore di temperatura sulla corrispondente superficie interna) e riportare nella tabella i risultati della misura.
- Con lo stesso procedimento, eseguire le misure sulla superficie metallica e su quella di metallo levigato.
- Ripetere le misure ad intervalli di temperatura di circa 5 °C.
- Quando l'acqua ha raggiunto una temperatura compresa tra 40 °C e 50 °C, togliere il sensore di temperatura dal cubo di Leslie ed asciugarlo. Misurare, quindi, la temperatura ambiente e scrivere il suo valore nella tabella.
- Schermare la termopila (ad esempio con del cartone scuro), controllare l'azzeramento del voltmetro e riportare in tabella questo valore.

Esempio di misura e valutazione dei risultati

(Vedere tabella a pagina 4)

La Fig. 3 mostra la tensione d'uscita U della termopila in funzione della quarta potenza della temperatura assoluta T su ciascuna faccia del cubo. I punti ottenuti dalle misure eseguite sulle singole facce individuano un andamento lineare.

Da un controllo dell'azzeramento del microvoltmetro o della temperatura ambiente, emerge che i diagrammi non sono perfettamente lineari; è necessario tenere conto di tali anomalie durante la valutazione dei risultati sperimentali.

Fig. 3: Andamento della tensione d'uscita U in funzione di $T^4 - T_0^4$.

- Quadratini neri: superficie nera
- Quadratini bianchi: superficie bianca
- Cerchietti neri: superficie metallica
- Cerchietti bianchi: superficie di metallo levigato

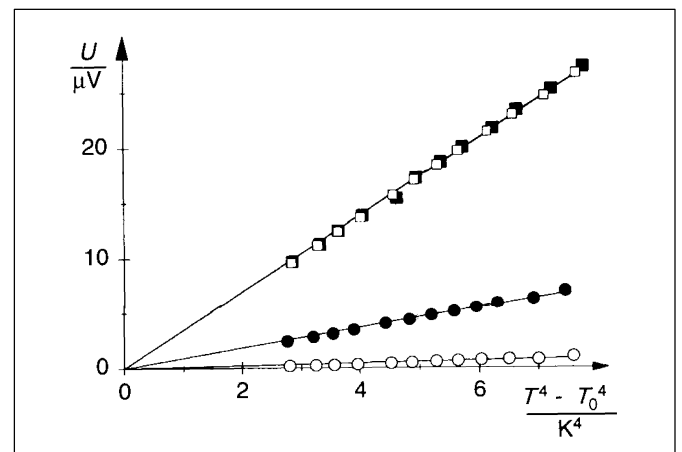


Tabella 1: Risultati delle misure (temperatura ambiente $\vartheta_0 = 26.4$ °C).

a) Superficie nera

ϑ °C	T K	$\frac{T^4 - T_0^4}{K^4}$	$\frac{U}{\mu V}$
81.5	354.7	7.77	27.2
78.5	351.7	7.24	25.2
75.1	348.3	6.66	23.3
72.7	345.9	6.26	21.7
69.5	342.7	5.74	20.0
67.2	340.4	5.37	18.67
64.6	337.8	4.96	17.20
62.4	335.6	4.63	15.38
58.5	331.7	4.05	13.84
55.6	328.8	3.63	12.44
53.4	326.6	3.32	11.24
50.0	323.2	2.85	9.67

c) Superficie di metallo levigato

ϑ °C	T K	$\frac{T^4 - T_0^4}{K^4}$	$\frac{U}{\mu V}$
80.4	353.6	7.58	1.00
77.1	350.3	7.00	0.76
74.2	347.4	6.51	0.77
71.3	344.5	6.03	0.70
68.9	342.1	5.64	0.64
66.6	339.8	5.28	0.56
64.0	337.2	4.87	0.47
61.7	334.9	4.52	0.40
57.9	331.1	3.96	0.31
55.0	328.2	3.55	0.23
52.8	326.0	3.24	0.22
49.6	322.8	2.80	0.16

b) Superficie bianca

ϑ °C	T K	$\frac{T^4 - T_0^4}{K^4}$	$\frac{U}{\mu V}$
80.8	354.0	7.65	26.6
77.8	351.0	7.12	24.6
74.7	347.9	6.59	22.9
72.1	345.3	6.16	21.4
69.0	342.2	5.66	19.7
66.8	340.0	5.31	18.42
64.4	337.6	4.93	17.00
62.0	335.2	4.57	15.66
58.3	331.5	4.02	13.65
55.5	328.7	3.62	12.34
53.1	326.3	3.28	11.13
49.9	323.1	2.84	9.55

d) Superficie metallica

ϑ °C	T K	$\frac{T^4 - T_0^4}{K^4}$	$\frac{U}{\mu V}$
79.7	352.9	7.45	7.00
76.6	349.8	6.92	6.29
73.1	346.3	6.32	5.90
70.8	344.0	5.95	5.46
68.5	341.7	5.58	5.09
66.1	339.3	5.20	4.74
63.7	336.9	4.83	4.34
61.1	334.3	4.43	3.99
57.5	330.7	3.90	3.42
54.9	328.1	3.53	3.05
52.5	325.7	3.20	2.78
49.3	322.5	2.76	2.37

Conclusioni

L'emissione di calore da parte di un corpo dipende dalle caratteristiche della sua superficie.

La superficie di un metallo levigato emette minore calore di quello emesso da una normale superficie metallica. Tutto questo concorda con la legge di *Kirchhoff* sulla radiazione, per cui una superficie levigata (riflettente) presenta anche un minore assorbimento.

La superficie bianca e quella nera presentano la massima emissione di calore. Anche se si è propensi a credere che il fattore di assorbimento sia diverso, la loro emissione risulta praticamente identica; tutto ciò sembrerebbe in contraddizione con la legge di *Kirchhoff*. A tal proposito, va tenuto pre-

sente che i termini bianco e nero sono riferiti al campo dello spettro visibile, cioè a lunghezze d'onda comprese tra 400 nm e 700 nm. La massima intensità di radiazione termica, invece, si ha ad una lunghezza d'onda di circa 7 μm e quindi in un campo completamente diverso. Questo è il motivo per cui la capacità di assorbimento della superficie bianca e della superficie nera sono praticamente identiche.

La Fig. 3, ottenuta sperimentalmente, mostra che la radiazione emessa aumenta linearmente in funzione della quarta potenza della temperatura assoluta. Quindi, nell'intervallo di temperatura in cui è stata eseguita la misura, il comportamento delle diverse facce del cubo è simile a quello del corpo grigio.