

La misura dell'energia proveniente dal Sole

Non solo Sole

Il Museo Tridentino di Scienze Naturali ed il Laboratorio di Comunicazione delle Scienze Fisiche del Dipartimento di Fisica, nell'ambito della convenzione e dell'intesa che li vede partner per la ideazione, progettazione, realizzazione, sperimentazione e attuazione di laboratori di didattica delle scienze fisiche, propongono all'attenzione delle classi di licei e istituti secondari superiori delle attività dedicate all'astronomia e all'astrofisica, con particolare riguardo ai bilanci energetici da irraggiamento solare.

Più nello specifico, queste attività sono destinate ad illustrare, con approcci sia *tradizionali* (frontali) che di *sperimentazione diretta* ("hands-on") e supportata dal *computer* (simulazioni, informazione online via internet), le caratteristiche fisiche e astronomiche della stella Sole per quanto riguarda il suo potere emissivo elettromagnetico: si tratta di misurare, con varia strumentazione (sia di tipo semplice che tecnologicamente più evoluta) la quantità di energia elettromagnetica che investe il nostro pianeta o, indirettamente, l'energia emessa dalla superficie del Sole. L'accento di questa proposta è da porsi su vari aspetti, in particolare quelli di tipo scientifico/disciplinare in senso stretto ("come misurare con strumenti appropriati una grandezza fisica", "valutazione ed elaborazione delle indeterminazioni strumentali e delle procedure di misura", "strumenti di misura ed osservazione in fisica e astrofisica", "termodinamica di sistemi irraggianti", "la radiazione di corpo nero", "lo spettro elettromagnetico del Sole", ecc.), nonché quelli di tipo più *trasversale* ("bilanci energetici sole-terra", "energie alternative e consumi", "astronomia solare ed applicazioni terrestri", "celle fotovoltaiche e pannelli solari", ecc.). Lo scopo dell'iniziativa è quello di condurre gli utenti a una più attenta costruzione di certi saperi scientifici, intesi come affinamento ed arricchimento culturale e non solo come tecnologia e approccio disciplinare in senso stretto. Si vuole comunicare con linguaggio e attenzione appropriati ai diversi livelli di scolarità il fatto che la scienza (astronomica, ma non solo) è al servizio di un benessere sociale rispettoso delle esigenze della quotidianità moderna.

La sperimentazione proposta in questa sede ha come scopo la misura della radiazione solare al suolo, e viene eseguita con una serie di strumenti (piroeliometri) autoassemblati i cui sostituenti possono essere ricavati da materiali facilmente reperibili.

Dopo una breve introduzione all'esperimento da parte dell'operatore ogni pireliometro è affidato ad un gruppo di 4-5 studenti. La sessione delle misure ha una durata massima prevista di circa 1 ora, durante la quale gli studenti possono già tracciare il grafico della temperatura in funzione del tempo per i primi calcoli.

In un successivo incontro con l'operatore, vengono discusse le relazioni elaborate dagli studenti traendone le considerazioni finali con particolare attenzione alla propagazione delle incertezze sulla misura.

E' prevista la pubblicazione su web dei risultati ottenuti.

Conoscenze richieste:

1. Calorimetria;
2. Trigonometria elementare (solo per l'estensione 2);
3. Legge del corpo nero (solo per l'estensione 3).

Scopo dell'esperienza:

Stimare la quantità d'energia solare che giunge sulla superficie terrestre ogni secondo su un metro quadro.

Apparato sperimentale:

Disco metallico annerito a contatto con un termometro. L'apparato prende il nome di calorimetro o piroeliometro.

Vantaggi didattici:

1. Esperienza di gruppo svolta all'aperto. Possibilità di confrontare le misure con altre scuole in altri siti (vedi esperienza di Firenze e Lagos (Portogallo)), in periodi diversi dell'anno oppure in differenti condizioni meteorologiche.
2. Confidenza con le misure strumentali di temperatura, tempo, altezza angolare del Sole sull'orizzonte;
3. Osservazione e descrizione delle condizioni atmosferiche;
4. Materiali facilmente reperibili e poco costosi;
5. Sensibilizzazione all'uso dell'energia solare per le necessità energetiche a "misura d'uomo".

Estensioni:

1. Effetto serra: una lastra di plexiglas applicata alla sommità del tubo dello strumento simula l'atmosfera. Per questo motivo la temperatura del disco annerito subisce un aumento rispetto a quella d'equilibrio raggiunta in precedenza.
2. Tenendo conto dell'assorbimento atmosferico (variabile durante l'anno e il giorno), si può stimare la *costante solare* che è definita come la quantità di energia che giunge nell'unità di tempo su una superficie di area unitaria, esposta perpendicolarmente al Sole al di fuori dell'atmosfera (circa 1371 W/m^2).
3. Approssimando il Sole ad un *corpo nero* e facendo uso della legge di Stefan-Boltzmann, si può dedurre la temperatura superficiale del Sole (circa 5800 K).

Schema e modello reale del calorimetro utilizzato per la misura della radiazione solare:

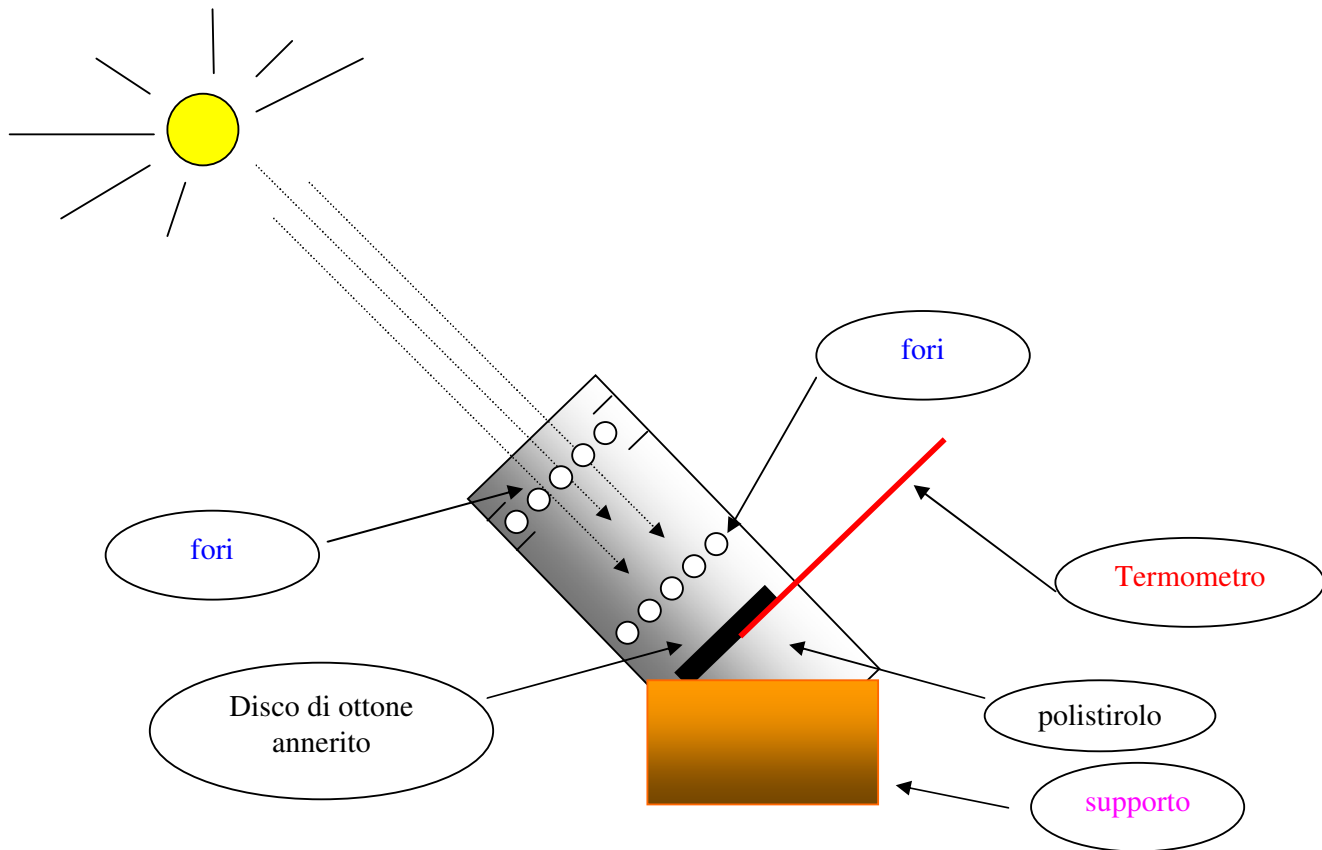


fig. 1. Schema dell'apparato sperimentale



fig. 2. Modello reale.

Descrizione sintetica dell'esperimento (Per una descrizione “passo passo” si veda l'Appendice A):

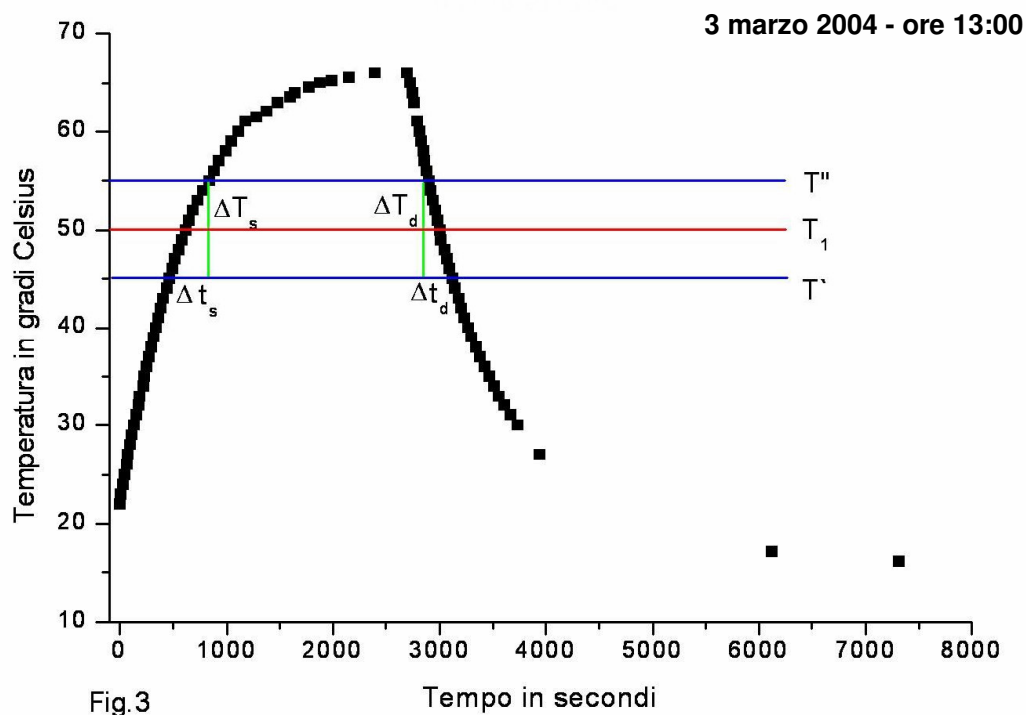
Un disco metallico annerito esposto al Sole, aumenta la sua temperatura.

Vengono riportati in tabella, ad ogni aumento di un grado di temperatura, i corrispondenti tempi di misura.

Non è necessario raggiungere la massima temperatura.

Si continua ad annotare il tempo e la temperatura (in diminuzione) anche dopo l'interposizione di uno schermo tra il Sole e il disco annerito.

Un esempio di curva di temperatura, in funzione del tempo, che si ottiene quando il disco annerito è esposto al Sole e poi schermato:



Intervalli di tempo e di temperature scelti nella regione “più lineare”:

$$\Delta T_{sal} = \Delta T_{di} = T'' - T'$$

$$\Delta t_{sal} = t(T''_{sal}) - t(T'_{sal})$$

$$\Delta t_{di} = t(T''_{di}) - t(T'_{di})$$

Potenza assorbita dal disco:

Per questo calcolo faremo uso della relazione fondamentale della calorimetria.

Un corpo a temperatura T_a e uno a temperatura T_b si scambiano una certa quantità di calore:

$$Q = mc\Delta T \quad (0)$$

dove

m = massa del corpo;

C = calore specifico del corpo;

$$\Delta T = T_a - T_b$$

Per ricavare la potenza assorbita dal disco di massa m e area S , dividiamo la (0) per $S \Delta t$ ottenendo:

$$q_i = \frac{mc}{S} \frac{\Delta T}{\Delta t} = C \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

dove C è la costante del calorimetro.

Nel caso pratico della potenza q_i che ci giunge dal Sole al livello del suolo vale:

$$q_i = C \left[\left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{sal} + \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)_{di} \right] \quad \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

dove

$$C = \frac{mc}{S} = 9936 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

ΔT_{sal} : intervallo di temperatura nella fase di riscaldamento (salita);

ΔT_{di} : intervallo di temperatura nella fase di raffreddamento (discesa);

$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{sal}$: pendenza della curva, nella fase di riscaldamento dello strumento, in un tratto rettilineo opportunamente scelto in prossimità di una certa temperatura di riferimento T_1 ;

$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{di}$: pendenza della curva nella fase di raffreddamento, in valore assoluto, nello stesso intervallo di temperature considerate nella fase di riscaldamento.

La relazione

$$q_i = C \left[\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{sal} + \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{di} \right] \quad (1)$$

si spiega nel modo seguente.

Indichiamo con Q_{inc} l'energia che **incide** sulla lastrina nel tempo Δt , mentre con Q_{ced} la corrispondente energia che nello stesso tempo Δt viene **ceduta** dal disco all'ambiente esterno (più freddo).

Quando la temperatura del disco non aumenta più, significa che queste due quantità di calore sono in valore assoluto uguali, cioè l'energia per unità di tempo e di superficie che assorbe il disco è pari a quella che dissipa.

Nella fase iniziale in cui il disco aumenta la sua temperatura (parte del grafico "in salita"), una certa quantità d'energia Q_{abs} è assorbita (abs) o immagazzinata, nel tempo t , nel disco stesso.

Per la *conservazione dell'energia* potremo quindi scrivere che l'energia incidente Q_{inc} è pari alla somma di quella assorbita dal disco Q_{abs} e di quella che il disco cede all'ambiente (più freddo) Q_{ced} (parte del grafico "in discesa") nello stesso intervallo di tempo Δt .

Ora, in base alla relazione fondamentale della calorimetria, l'energia immagazzinata Q_{abs} può essere così espressa:

$$Q_{abs} = mc\Delta T_{abs} \quad (2)$$

Questo termine è quindi "facile" da valutare.

Più problematica è la valutazione dell'energia Q_{ced} ceduta o dissipata dal disco. A questo serve l'analisi della curva nella fase di raffreddamento, quando lo strumento è schermato.

Infatti, ora il disco perde calore verso l'ambiente proprio come quando era illuminato dal Sole ed era alla stessa temperatura, poiché non c'è ragione di pensare che la perdita di calore sia diversa (se non sono cambiate le condizioni meteorologiche o la temperatura dell'aria con cui scambia il disco annerito).

Perciò si può ancora utilizzare la relazione fondamentale della calorimetria, scritta per la fase di riscaldamento, nel calcolo dell'energia perduta dal disco nel tempo Δt considerato.

Ricapitolando, il bilancio energetico del disco può essere così formalizzato:

$$Q_{inc} = Q_{abs} + Q_{ced} \quad (3)$$

Dividendo tutto per $S\Delta t$, si ha:

$$\frac{Q_{inc}}{S\Delta t} = \frac{Q_{abs}}{S\Delta t} + \frac{Q_{ced}}{S\Delta t} \quad (4)$$

Ora, il primo membro può essere indicato con q_i e le sue unità di misura sono $\frac{J}{m^2 s}$, ovvero rappresenta proprio l'energia che arriva per unità di area e di tempo, a livello del suolo.

Esplicitando i vari termini nella (4), si ottiene la relazione finale (1).

Se valutiamo la pendenza delle due parti della curva (riscaldamento e raffreddamento), attorno a due diversi valori di temperatura, si devono ottenere due valore di q_i simili (entro gli errori sperimentali).

Dati campione:

Nel seguente procedimento, non viene trattata la propagazione delle incertezze sulla misura che verrà ripresa in appendice B.

Supponiamo di aver scelto un intervallo di temperature in cui il grafico sia il più lineare possibile, attorno alla temperatura di riferimento $T_1 = 50^\circ C$ (cfr. fig.3):

$$\Delta T_{sal} = \Delta T_{di} = T'' - T'$$

dove, nel tratto “in riscaldamento”, risulta:

$$T' = (45 + 273)^\circ\text{C} = 318\text{K}$$

$$t = 463\text{s}$$

$$T'' = (55 + 273)^\circ\text{C} = 328\text{K}$$

$$t = 834\text{s}$$

$$\Delta T_{sal} = 10\text{K} \quad \Delta t = 371\text{s}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{sal} = 0.027 \frac{\text{K}}{\text{s}}$$

e nel tratto “in raffreddamento”:

$$T' = (45 + 273)^\circ\text{C} = 318\text{K}$$

$$t = 3123\text{s}$$

$$T'' = (55 + 273)^\circ\text{C} = 328\text{K}$$

$$t = 2904\text{s}$$

$$\Delta T_{disc} = 10\text{K} \quad \Delta t = 219\text{s}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{di} = 0.046 \frac{\text{K}}{\text{s}}$$

L'energia che ci giunge dal Sole può essere ricavata dalla relazione

$$q_i = C \left[\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{sal} + \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{di} \right]$$

dove

$$C = \frac{mc}{S} = 9936 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{è la caratteristica del calorimetro.}$$

Sostituendo i valori trovati:

$$q_i = 9936 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \left(0.027 \frac{\text{K}}{\text{s}} + 0.046 \frac{\text{K}}{\text{s}} \right) = 725 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{s}} = 725 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}.$$

Caratteristiche del disco annerito (ottone):

$$\begin{aligned} \text{massa} \quad m &= (0,200 \pm 0,005) \text{ kg} ; \\ \text{raggio} \quad r &= (0,0500 \pm 5 \times 10^{-4}) \text{ m} ; \\ \text{spessore} \quad h &= (3 \times 10^{-3} \pm 10^{-4}) \text{ m} ; \end{aligned}$$

$$\text{calore specifico } c_{\text{ottone}} = 390 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} ;$$

$$\text{area} \quad S = (7,85 \times 10^{-3} \pm 1,57 \times 10^{-4}) \text{ m}^2 .$$

Considerazioni sulla misura

L'elaborazione dei dati sperimentali porta a valori della radiazione solare al suolo (potenza) compresi tra circa 600 e 900 W/ m² . Le cause di questa variabilità di risultati sono da imputare principalmente alla diversa all'altezza del Sole sull'orizzonte e alle diverse condizioni meteorologiche.

Bibliografia:

Vittorio Zanetti – “L'energia che riceviamo dal Sole”, Scheda n.9 – Insetto de “La Fisica nella Scuola”, Vol. XX – fasc. 3 – 1987.

Web:

http://www-phys.science.unitn.it/lcosfi/astroattivita_sole.html

Sito dell'esperimento: presso la “casetta” del Liceo Scientifico “Galileo Galilei” , via Bolognini, 92 – Trento.

Centralino: 0461 913479.

Appendice A

Ogni serie di misure può essere fatta da un gruppo di quattro studenti:

- il primo guida il disco la cui superficie annerita deve essere esposta perpendicolarmente ai raggi solari;
- il secondo controlla il termometro e a ogni grado di temperatura raggiunto dà il via al terzo e al quarto;
- il terzo fa una lettura del cronometro e ne prende nota;
- il quarto prende nota della misura dell'altezza del Sole sull'orizzonte, dell'ora civile (facendo attenzione all'ora legale), della temperatura ambiente e delle condizioni meteorologiche.

Quando si individua una certa linearità nei dati (tempo e temperatura) che si stanno registrando, se il tempo a disposizione è limitato, si può decidere di oscurare il disco con l'ombra di uno schermo prima che si raggiunga la temperatura massima di equilibrio, continuando a prendere nota dei dati mentre la temperatura è in fase di diminuzione.

Con i risultati di una serie di misure si traccia un grafico (cfr. fig.3):

- in ascissa i tempi in cui sono state effettuate le letture del termometro;
- in ordinata le temperature.

Sito dell'esperimento: presso la "casetta" del Liceo Scientifico "Galileo Galilei", via Bolognini, 92 – Trento.

Centralino: 0461 913479.