

FASE R

FASCICOLO DI SPIEGAZIONE E SISTEMATIZZAZIONE

Lo spettro di emissione di una sorgente è la distribuzione di energia in funzione della frequenza (o della lunghezza d'onda). Se accendiamo una lampada essa emette radiazione elettromagnetica composta da un intervallo di frequenze diverse.

Il fenomeno della dispersione cromatica ci permette di evidenziare le diverse componenti dello spettro. Il modo più semplice di spiegare il fenomeno della dispersione della luce è pensare che un raggio di luce bianca sia composto da una serie di radiazioni di diversa frequenza e lunghezza d'onda, le quali insieme generano alla vista umana l'effetto di colore bianco; facendo ruotare rapidamente un disco colorato a spicchi con vari colori (la ruota dei colori) il disco appare bianco. Lo spettro può essere osservato utilizzando un prisma trasparente oppure un reticolo di diffrazione. Nel primo caso si utilizza il fenomeno della rifrazione della luce, nel secondo quello dell'interferenza (vedi fase O2).

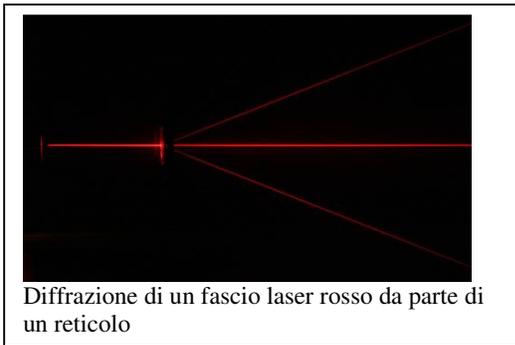


Il prisma a sezione triangolare provoca due rifrazioni successive aria-vetro e vetro-aria, aumentando in tal modo la deviazione totale dei raggi luminosi. Le radiazioni di diverso colore della luce si propagano con la stessa velocità nel vuoto ma con una diversa velocità nei mezzi materiali trasparenti (vetro, acqua, plastica, aria...). Come conseguenza, i differenti colori hanno un diverso indice di rifrazione, cioè sono deviati in modo diverso nel passaggio dall'aria ad un altro mezzo trasparente, secondo la legge:

Legge dei seni
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Il violetto è il colore che ha indice di rifrazione maggiore e quindi viene deviato di più. Questo è coerente con le osservazioni sperimentali: ogni colore della luce, attraverso un materiale trasparente, segue una direzione diversa dagli altri. La grandezza che caratterizza il colore di un fascio luminoso è la frequenza f , che non è influenzata dal mezzo di propagazione, ma dipende dalle caratteristiche della sorgente e dal modo in cui la luce stessa viene generata: la frequenza ci dà la percezione di un colore diverso. Lo spettro di una lampada ad incandescenza o del Sole è un insieme continuo di frequenze, il nostro occhio percepisce certi colori.

Il **reticolo di diffrazione** è un componente ottico costituito da una lastra di vetro o di plastica

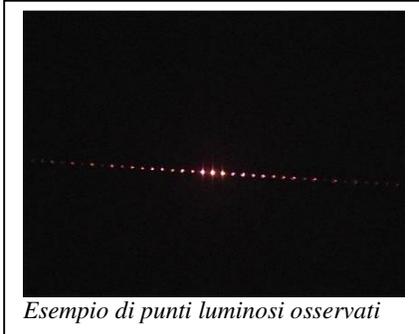


Diffrazione di un fascio laser rosso da parte di un reticolo

trasparente sulla cui superficie è incisa una trama di linee parallele opache, uguali ed equidistanti, a distanze confrontabili con la lunghezza d'onda della luce. Viene usato per separare i colori della luce, sfruttando la sua natura ondulatoria. Un fascio luminoso monocromatico che incide su un reticolo dà origine ad un fascio non deviato e a vari fasci diffratti, ad angoli che dipendono dal rapporto fra la distanza d tra le righe del reticolo e la lunghezza d'onda λ della luce, secondo la formula $d \cdot \sin \theta = n \lambda$ oppure approssimata se $d \ll L$ con $\sin \theta \approx x/L$ $d \cdot x/L = n \lambda$ dove

x è la distanza dal punto centrale corrispondente alla posizione del raggio non deviato

Quindi, se il fascio luminoso è composto di più lunghezze d'onda, percepite dall'occhio umano come colori differenti, si ottiene la scomposizione del fascio nelle sue componenti. La luce con una lunghezza d'onda più grande viene deviata ad un angolo più grande rispetto alla direzione incidente (angolo di diffrazione). Su uno schermo posto a distanza L parallelo al reticolo, per ogni lunghezza d'onda si possono osservare più righe o punti luminosi.



Esempio di punti luminosi osservati

Il numero di righe o punti che si contano dalla riga centrale, che non risulta deviata rispetto al fascio incidente ed è presa come riferimento, è detto «ordine» o «modo» di diffrazione. I reticoli a diffrazione possono agire sia per trasmissione sia per riflessione della luce incidente a seconda che la dispersione della luce avvenga dal lato opposto o sullo stesso lato della sorgente luminosa. I reticoli in trasmissione sono composti da una lastra trasparente sulla quale vengono create tante piccole strisce opache alla radiazione. In questo modo si ottengono molte fenditure la cui figura generata su uno schermo si risolve

con le leggi dell'interferenza. I reticoli in riflessione sono costituiti da uno strato riflettente sul quale vengono create tante piccole strisce o solchi. La distanza tra le fenditure, detta "passo del reticolo", nei reticoli usati in spettroscopia è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce da analizzare. Nella pratica i reticoli sono solitamente caratterizzati dal numero di incisioni per unità di lunghezza, spesso espressa in linee per millimetro (per esempio 500 linee/mm, quindi un passo $d=1/500 \text{ mm}=2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$). La proprietà fondamentale dei reticoli è che l'angolo di deviazione di tutti i fasci rifratti dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente. Quindi, un reticolo separa un fascio di luce policromatica nelle varie lunghezze d'onda che lo compongono, esso è uno strumento dispersivo. Ogni lunghezza d'onda in ingresso è deviata in una direzione diversa dalle altre: utilizzando della luce bianca si ottengono i colori dell'iride. Il risultato visivo è simile a quello che si ottiene con un prisma, tuttavia questi due strumenti utilizzano fenomeni diversi per separare le diverse lunghezze d'onda, come detto prima, cioè la rifrazione e l'interferenza. Un fascio di luce policromatica viene suddiviso nelle sue componenti dal violetto (che è il colore caratterizzato dalla



Le scanalature di un compact disc agiscono come un reticolo di diffrazione producendo delle riflessioni iridescenti.

lunghezza d'onda minore) al rosso; in un prisma di vetro invece l'angolo di deviazione è maggiore per il viola, quindi la successione dei colori è invertita.

I comuni CD e DVD sono esempi quotidiani di reticoli di diffrazione per riflessione: si può notare la loro capacità di scomporre la luce incidente osservandone la superficie. Questo è un effetto collaterale della produzione, infatti la superficie di un CD o di un DVD è ricoperta di molte piccole scanalature concentriche nella plastica ricoperte da un sottile strato di metallo. Le scanalature agiscono come un reticolo di diffrazione producendo delle riflessioni iridescenti. I reticoli di diffrazione sono presenti anche in natura. Per esempio, i colori iridescenti delle piume del pavone, della madreperla, le ali

delle farfalle e di altri insetti sono originati da strutture molto regolari che diffrangono la luce.

Sulla diffrazione e sull'interferenza, vedi anche il fascicolo teorico O2.

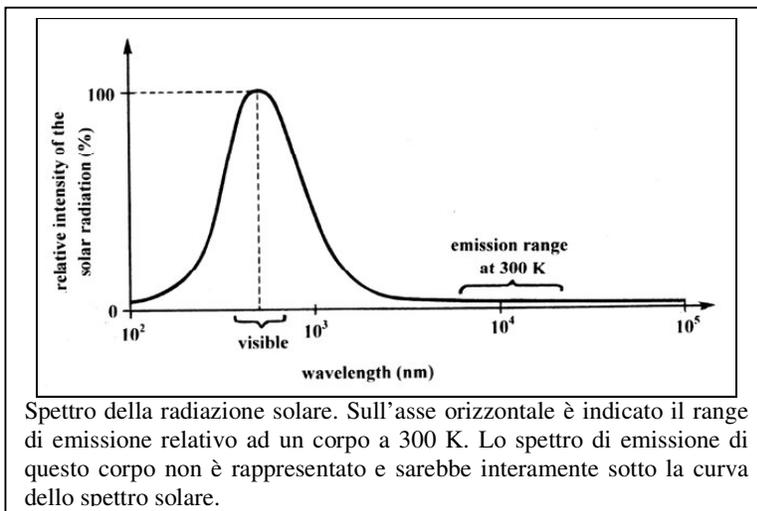
La **radiazione infrarossa (IR)** è la radiazione elettromagnetica con una frequenza inferiore a quella della luce visibile, ma maggiore di quella delle onde radio. Il termine significa "sotto il rosso" (dal latino *infra*, "sotto"), perché il rosso è il colore visibile con la frequenza più bassa. La radiazione infrarossa ha una lunghezza d'onda compresa tra 700 nm e 1 mm. Tutti gli oggetti emettono spontaneamente radiazione in questa banda e aumentando la temperatura, il picco delle radiazioni emesse si sposta sempre più verso il visibile finché l'oggetto non diviene incandescente. Per questo motivo la radiazione emessa in questo modo è spesso chiamata "radiazione termica".

L'intensità della radiazione emessa dai corpi aumenta con la temperatura secondo la legge di Stefan – Boltzmann.

Nel 1879 Josef Stefan trovò empiricamente che l'energia irradiata nell'unità di tempo da un corpo avente una data temperatura è direttamente proporzionale alla superficie del corpo e alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Cinque anni più tardi Ludwig Boltzmann giunse teoricamente alle stesse conclusioni, perciò la relazione tra l'energia irradiata da un corpo e la sua temperatura è oggi indicata come legge di Stefan-Boltzmann. Essa si può scrivere nella forma:

$$P = e \sigma S T^4$$

Dove P è la potenza irradiata, S è la superficie del corpo, T la sua temperatura assoluta, σ è una costante universale, chiamata costante di Stefan, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$. Il parametro e , chiamato emissività, è un numero compreso tra 0 e 1 e dipende dalla natura della superficie del corpo; per un radiatore ideale $e = 1$ ".



All'aumentare della temperatura lo spettro si sposta verso lunghezze più piccole e frequenze più grandi, seguendo la legge di Wien:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{costante}$$

dove λ_{\max} è il valore di λ corrispondente al punto di massimo dell'energia relativa dello spettro ad una certa temperatura.

La **legge di Wien**, scritta dal fisico tedesco Wilhelm Wien nel 1893, detta anche *legge dello spostamento di Wien*, esprime la relazione fra la temperatura e la

lunghezza d'onda per cui è massima l'intensità della radiazione emessa da un corpo nero. Ciò significa che il grafico dell'intensità di energia emessa da un corpo nero in funzione della frequenza o della lunghezza d'onda presenta un massimo che si sposta verso le alte frequenze all'aumentare della temperatura stessa. Inoltre, il massimo di energia irradiata cresce con la sua temperatura. Più caldo è un oggetto, più corte sono le lunghezze d'onda a cui emetterà più radiazione. Per esempio, la temperatura superficiale del Sole è di 5778 K, il che dà un picco a circa $\lambda = 500 \text{ nm}$: questa lunghezza d'onda è vicina al centro dello spettro visibile. Una lampadina ha un filamento luminoso con una temperatura più bassa, per esempio 2700 K che risulta in un'emissione di luce con colorazione tendente all'arancione, mentre un oggetto che si trovi al "calor rosso" è ancora meno caldo. La potenza emessa da un corpo sotto forma di radiazioni dipende dalla temperatura alla quale si trova: più un corpo è caldo, maggiore è la potenza della radiazione emessa. Se riscaldiamo un pezzo di ferro, mentre la sua temperatura aumenta, si avverte la sua emissione di energia anche solo avvicinando una mano. La radiazione emessa, però, non è visibile ad occhio nudo, perché è una radiazione infrarossa. Quando la temperatura diventa di circa 1000 °C, il ferro diventa prima rosso poi giallo e poi bianco a 1500°C circa.

La radiazione emessa da un oggetto a temperature ordinarie (diciamo da -20° a 100° C) ha un massimo nella zona infrarossa (con λ dell'ordine di 10^{-5} m), noi lo vediamo perché riflette e diffonde la luce del sole o delle lampade, non perché emette radiazione infrarossa.

La presenza di radiazione invisibile infrarossa è osservabile attraverso i suoi effetti termici, e nel vicino infrarosso per mezzo di macchine fotografiche digitali o di telecamere digitali.

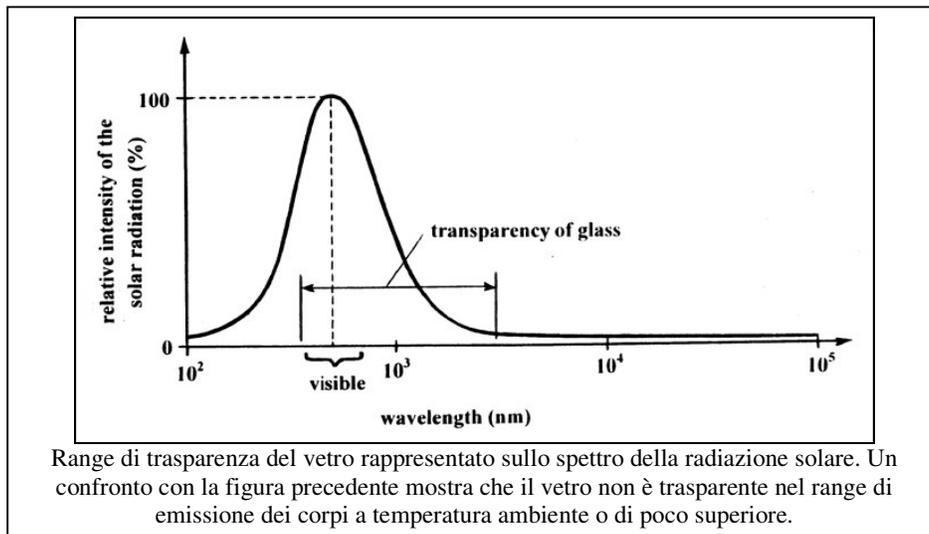
Un **radiometro** è un dispositivo utilizzato per misurare l'intensità relativa della radiazione infrarossa emessa da un oggetto per effetto della sua temperatura e rilevata dal sensore del radiometro stesso.



Radiometro

I radiometri possono usare diversi tipi di rilevatori. Alcuni rilevano la radiazione elettromagnetica mediante un aumento di temperatura del rilevatore che poi produce un segnale elettrico, altri tramite un fotodiode che produce direttamente un segnale elettrico. Il radiometro usato nel nostro esperimento è del primo tipo e, producendo una tensione elettrica, misura la differenza di temperatura fra la parte del rilevatore che è investita dalla radiazione da misurare e la parte del circuito interna allo strumento.

Interponendo del vetro o una plastica trasparenti tra il radiometro e l'oggetto si nota che l'intensità della radiazione misurata diminuisce, questo vuol dire che la radiazione infrarossa non passa attraverso il vetro o la plastica, ma viene assorbita e riflessa da questi. La luce invece passa, infatti si può vedere l'oggetto oltre il vetro o la plastica trasparente. La trasparenza o l'opacità dipendono dalla natura del materiale e dalla frequenza della radiazione considerata. Il vetro è trasparente alla luce visibile ma è opaco alle radiazioni infrarosse e ultraviolette (non ci si abbronzia dietro un vetro). Anche lo spessore incide: aumentando lo spessore, diminuisce l'intensità della radiazione trasmessa.



Abbiamo osservato con il radiometro che tutti i corpi emettono radiazione. Quando una radiazione colpisce un oggetto e viene da questo assorbita, trasferisce la sua energia alle molecole che lo compongono, che a loro volta aumentano l'energia cinetica media e di conseguenza la temperatura. Il colore di un corpo a temperatura ordinaria, non incandescente, cioè che non emette radiazione visibile, dipende dal fatto che i materiali assorbono diversamente le differenti regioni, frequenze, dello spettro della radiazione incidente: un materiale lucido o chiaro assorbe meno radiazioni elettromagnetiche di uno scuro, uno rosso assorbe tutte le radiazioni incidenti riflettendo solo quelle con lunghezze d'onda corrispondenti al rosso.

L'emissione e l'assorbimento di radiazioni da parte di un corpo opaco dipendono dalle caratteristiche della superficie. Un corpo perfettamente nero è facile da studiare, perché assorbe completamente ed emette radiazioni di ogni colore (il caso del nostro cilindro nero incontrato già nella fase T e poi in questa fase R). Anche il sole può essere considerato un corpo nero perché assorbe completamente le radiazioni a tutte le frequenze. C'è una differenza di senso della parola

‘nero’ nel linguaggio comune e in fisica. In fisica si dice nero un corpo che *assorbe* tutte le radiazioni, ma a temperature abbastanza elevate tale corpo non appare nero agli occhi umani, può essere colorato o bianco, perché *emette* radiazioni visibili.



Gli allievi possono osservare che la copertura del telecomando è opaca alla luce visibile ma è trasparente all'infrarosso vicino.



Telecomando inattivo osservato con una telecamera digitale che emette e rileva radiazione nell'infrarosso vicino.

La radiazione infrarossa viene usata in apparecchi di visione notturna, quando non c'è abbastanza luce visibile. I sensori infrarossi convertono la radiazione in arrivo in un'immagine: questa può essere monocromatica (ad esempio, gli oggetti più caldi risulteranno più chiari), oppure può essere usato un sistema di falsi colori per rappresentare le diverse temperature. Questi apparecchi si sono diffusi inizialmente negli eserciti di numerosi Paesi, per poter vedere i loro obiettivi anche al buio. Tra le applicazioni della radiazione infrarossa è la cosiddetta termografia, evoluzione in campo civile della tecnologia di visione notturna nata per scopi militari. Il fumo è più trasparente nell'infrarosso rispetto alla luce visibile, perciò i pompieri possono usare apparecchi infrarossi per orientarsi in ambienti pieni di fumo. Un utilizzo molto comune dell'infrarosso è come mezzo di trasmissione dati: nei telecomandi dei televisori (per evitare interferenze con le onde radio del segnale televisivo), tra computer portatili e fissi, palmari, telefoni cellulari e altri apparecchi elettronici. Attraverso lo schermo di una macchina fotografica digitale è possibile osservare anche la componente non visibile del vicino infrarosso dello spettro.

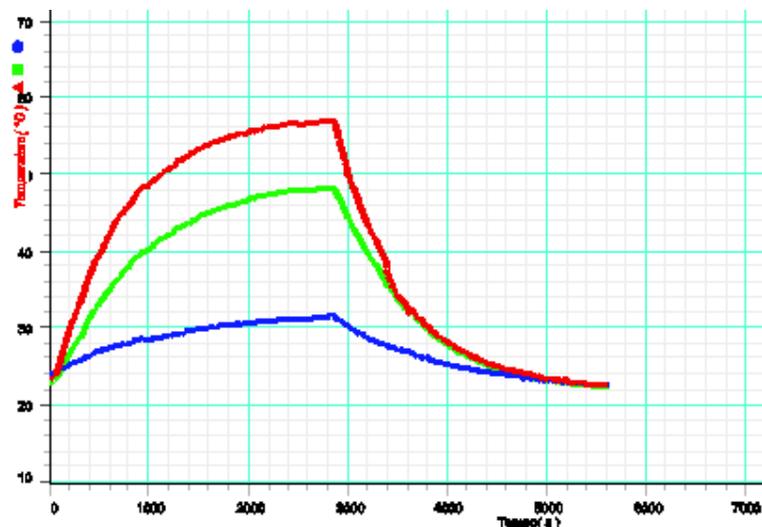
Anche la radiazione usata nelle fibre ottiche è spesso infrarossa. Inoltre la radiazione infrarossa è utilizzata nella spettroscopia infrarossa, usata nella caratterizzazione dei materiali.

Ecco il funzionamento di un telecomando: Il **telecomando** emette i segnali codificati: ogni volta che premiamo un tasto (*key*), il codice corrispondente (*code*) viene trasmesso più volte. Viaggiando su un fascio di radiazione infrarossa, i segnali emessi vanno a colpire il ricevitore: qui vengono captati e convertiti in impulsi logici a 0...5 volt. Questi impulsi rispecchiano il codice di partenza, ma non sono ancora utilizzabili: infatti vanno interpretati dal **decodificatore** per determinare il pulsante premuto in origine. I telecomandi sono oggi molto diffusi, e si trovano in commercio già pronti (TV, HiFi e videoregistratori). I ricevitori sono particolari circuiti integrati o micromoduli che necessitano soltanto dell'alimentazione a 5 volt per potere funzionare. Dispongono di uno o più piedini di uscita dove prelevare il segnale ricevuto, pronto per la decodifica.

Riscaldamento e raffreddamento dei cilindretti

Ragioniamo ora sull'esperimento con i tre cilindretti.

Nella figura riportiamo il grafico completo di un possibile risultato dell'esperimento dell'esposizione alla luce di una lampada dei tre cilindretti e del successivo raffreddamento.



Curva rossa: cilindro nero; curva verde: cilindro bianco; curva azzurra: cilindro lucido.

Grafico	Cilindri	T_{amb}	m (g)	h (mm)	diametro (mm)
	Nero	23°C	29,5	38	19
	Bianco	23°C	29,3	38	19
	Lucido	23°C	27,5	38	19

Analizziamo la parte di grafico registrato a **lampada accesa** utilizzando le indicazioni che ci offre e facendo opportune deduzioni

- La T dei cilindretti aumenta, significa che la luce apporta energia ai cilindretti e l'energia entrante (dovuta alla radiazione assorbita) è maggiore dell'energia uscente dal sistema e produce un aumento della componente termica dell'energia interna.
- Il cilindretto nero assorbe in un certo tempo più energia degli altri, il bianco e il lucido ne assorbono meno perché diffondono e riflettono parte della luce incidente.
- L'interno dei tre cilindri è dello stesso materiale, masse e volumi sono praticamente uguali, significa che a fare la differenza è lo strato superficiale; a parità di luce incidente hanno comportamenti diversi.
- Non essendoci reazioni chimiche, cambiamenti di stato o altro, l'aumento della T indica che la variazione di energia interna è $\Delta U = m c \Delta T$ (dove m è la massa del sistema e c il suo calore specifico).
- Utilizziamo la relazione che abbiamo visto essere valida in generale per il principio di conservazione dell'energia:

$$\text{Energia (che entra nel sistema)} = \Delta U + \text{Energia ceduta all'esterno}$$

In base a questa relazione cerchiamo di interpretare i grafici sperimentali della temperatura in funzione del tempo:

- L'andamento quasi lineare nel tempo del primo tratto può essere spiegato con il fatto che l'energia fornita dalla sorgente nell'unità di tempo è costante e l'energia uscente è inizialmente molto minore di quella entrante.

$$\text{Energia IN} - \text{Energia OUT} = m \cdot c \cdot \Delta T = \text{costante} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Trascurando, nella fase iniziale, Energia OUT, la pendenza del grafico è il rapporto tra l'energia entrante nell'unità di tempo (potenza assorbita) e la capacità termica:

Coefficiente angolare = $\Delta T / \Delta t$ è la velocità con cui aumenta la T
 Ponendo $E = \text{Energia IN}$ si ha: $E / \Delta t = m \cdot c \cdot \Delta T / \Delta t$
 dalla (1) dividendo per Δt : $\Delta T / \Delta t = (E / \Delta t) / m \cdot c$

- Possiamo supporre che nella prima fase l'assorbimento di energia sia indipendente dalla T cioè avvenga sempre allo stesso modo, con la stessa rapidità durante tutto il processo.
- Nel suo complesso però il grafico non è lineare e dopo la prima fase notiamo che la pendenza diminuisce, con il tempo, cioè la T aumenta sempre meno rapidamente.
- Il grafico ci indica quindi che al crescere della temperatura aumenta l'energia ceduta all'ambiente, cioè il termine Energia OUT nella (1), cresce e non può più essere trascurato.
- In particolare, il raggiungimento di una temperatura costante, a lampada accesa, ci suggerisce che l'energia ceduta aumenta all'aumentare della temperatura fino a bilanciare l'energia entrante, a quel punto la T non aumenta più e quindi neppure l'energia emessa.
- La situazione ha delle analogie con questo esempio idraulico: si immagina di gonfiare un palloncino che abbia anche un piccolo foro; l'aria vi è soffiata sempre con la stessa intensità ma l'aria in uscita aumenta all'aumentare della pressione interna; inizialmente il palloncino si gonfia perché entra più aria di quanta ne esce; ad un certo punto però la pressione sarà tale che l'aria in uscita sarà uguale a quella in entrata, il palloncino smetterà di gonfiarsi, la sua pressione interna sarà stazionaria e più alta di quella esterna .
- Come passa l'energia dai cilindretti all'ambiente? Risponderemo dopo aver analizzato in dettaglio la parte di grafico relativa al raffreddamento (lampada spenta).
- la condizione di stazionarietà è caratterizzata da temperature diverse per i tre oggetti, superiori a quella ambiente. Come può essere spiegata questa differenza? Anche in questo caso la risposta richiede un'analisi accurata del processo di raffreddamento.

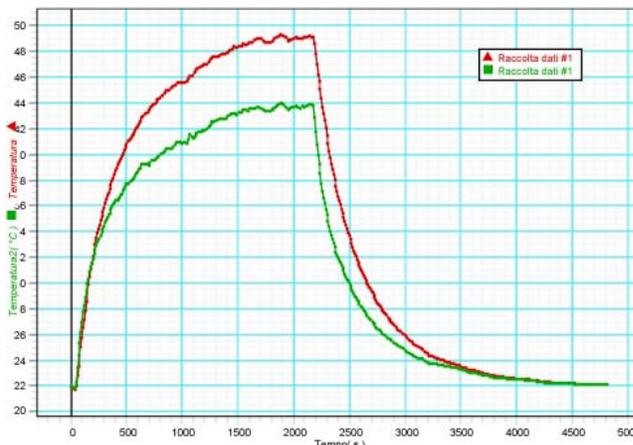
Analizziamo i grafici del raffreddamento dei tre cilindretti, cioè le parti relative a **lampada spenta**.

- La diminuzione di T indica una diminuzione dell'energia interna e quindi un passaggio di energia dai cilindretti all'ambiente: come?
 - per contatto con l'aria immediatamente circostante che aumenta la sua temperatura (conduzione termica) e dà origine a moti convettivi che distribuiscono più rapidamente l'energia nell'ambiente (convezione).
 - emettendo radiazione elettromagnetica la cui potenza (energia emessa nell'unità di tempo) aumenta con la temperatura secondo la legge di Stefan - Boltzmann.
- La radiazione emessa dai cilindretti a queste temperature è infrarossa e quindi non visibile; a temperature molto più elevate emetterebbero luce visibile, sarebbero incandescenti.
- Il grafico di raffreddamento dei cilindretti bianco e nero è in parte sovrapposto, hanno quasi la stessa velocità di raffreddamento.
- Tutti ritornano alla stessa temperatura, in equilibrio con l'ambiente.

Analizziamo ora il grafico nella sua interezza:

- Anche durante il riscaldamento i cilindri emettono radiazione infrarossa. La radiazione emessa dai cilindretti è evidentemente non visibile. Vediamo il cilindretto perché riflette e diffonde la luce del sole o delle lampade, al buio non si vedrebbe, anche se continua ad emettere radiazione.
- I tempi di riscaldamento e di raffreddamento sono diversi: per esempio, il cilindro nero impiega 1000 secondi per passare da 48° a 55° e poi 400 secondi per passare da 55° a 48°. Il riscaldamento è veloce a basse temperature e poi sempre più lento, il raffreddamento fa il contrario.
- I cilindretti nero e bianco si comportano in modo diverso per l'assorbimento della radiazione della lampada ma in modo simile per l'emissione della radiazione termica nel lontano infrarosso: questo contribuisce a determinare la differenza tra le temperature stazionarie raggiunte. Infatti, la temperatura stazionaria si raggiunge quando la potenza (energia per unità di tempo) assorbita dal cilindretto uguaglia quella ceduta dal cilindretto. Poiché la potenza che il cilindro nero assorbe dalla radiazione della lampada è maggiore di quella assorbita dal cilindro bianco, per avere una temperatura stazionaria anche la potenza ceduta dal cilindro nero deve essere maggiore di quella ceduta dal cilindro bianco. I cilindretti cedono energia in due modi: mediante calore, per conduzione e convezione con l'aria, e mediante radiazione termica. Il calore ceduto è indipendente dal colore della superficie, dunque è uguale per i due cilindretti a parità di temperatura. Poiché il potere emissivo dei due cilindri nella regione del lontano infrarosso è circa uguale, anche l'energia ceduta mediante radiazione è circa uguale per i due cilindretti, a parità di temperatura (si può dire che sono entrambi quasi neri per il lontano infrarosso). Quindi, per emettere più energia del cilindro bianco, il cilindro nero deve raggiungere una temperatura stazionaria maggiore. Questo è un altro esempio del fatto che la materia si comporta diversamente a seconda della regione dello spettro della radiazione con cui interagisce.

Analogamente a quanto fatto con i tre cilindretti metallici diversamente colorati si può confrontare il comportamento di due cilindretti di plexiglass con le stesse dimensioni, uno dei quali è stato dipinto di nero. Ecco i grafici ottenuti in un esperimento condotto con le stesse modalità usate con i cilindretti metallici:



Quali interpretazioni si possono dare dell'andamento della temperatura per i due cilindri?