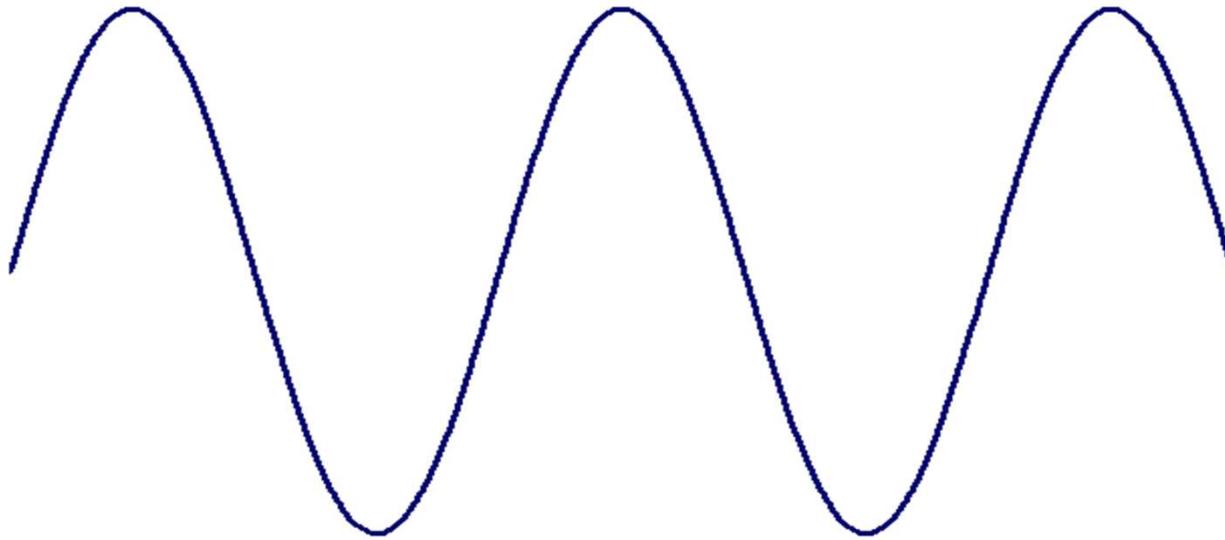


Onde: lunghezza d'onda e frequenza

Immaginiamo di far ondeggiare verticalmente l'estremità di una corda tesa il cui capo opposto sia stato fissato "molto lontano". La corda stessa trasmette questo moto oscillatorio con una propagazione che noi chiamiamo *ondosa*.



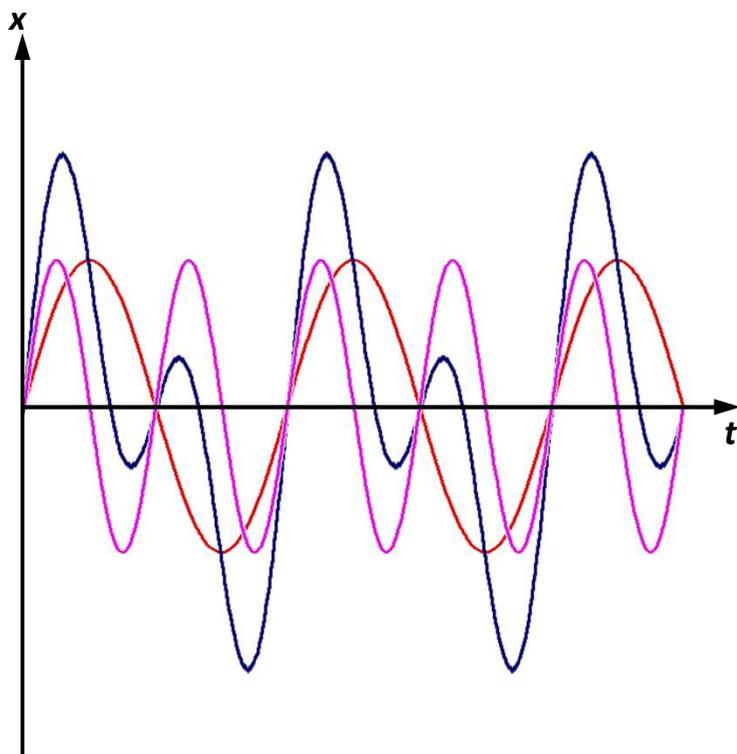
Immaginiamo di realizzare una fotografia della corda ad un certo istante: se l'oscillazione impressa all'estremo ha determinate caratteristiche, il profilo della corda sarà di forma sinusoidale. La distanza tra due massimi definisce la *lunghezza d'onda*.

Guardiamo invece un punto fisso: nel tempo, lo vedremo andare su e giù, periodicamente. Il tempo trascorso per compiere un'oscillazione completa (da su a giù e ritorno) si definisce il periodo: l'inverso del periodo è detto *frequenza*.

Sovrapposizione di onde sinusoidali

Se l'oscillazione non conferisce alla corda la “comoda” oscillazione sinusoidale, non possiamo definire allo stesso modo frequenza e lunghezza d'onda. Tuttavia, ci viene in soccorso un importante risultato matematico.

In figura, due onde sinusoidali (in rosso e magenta) sono sommate punto per punto, danno come risultato una terza onda, rappresentata in blu, di forma *non* sinusoidale.



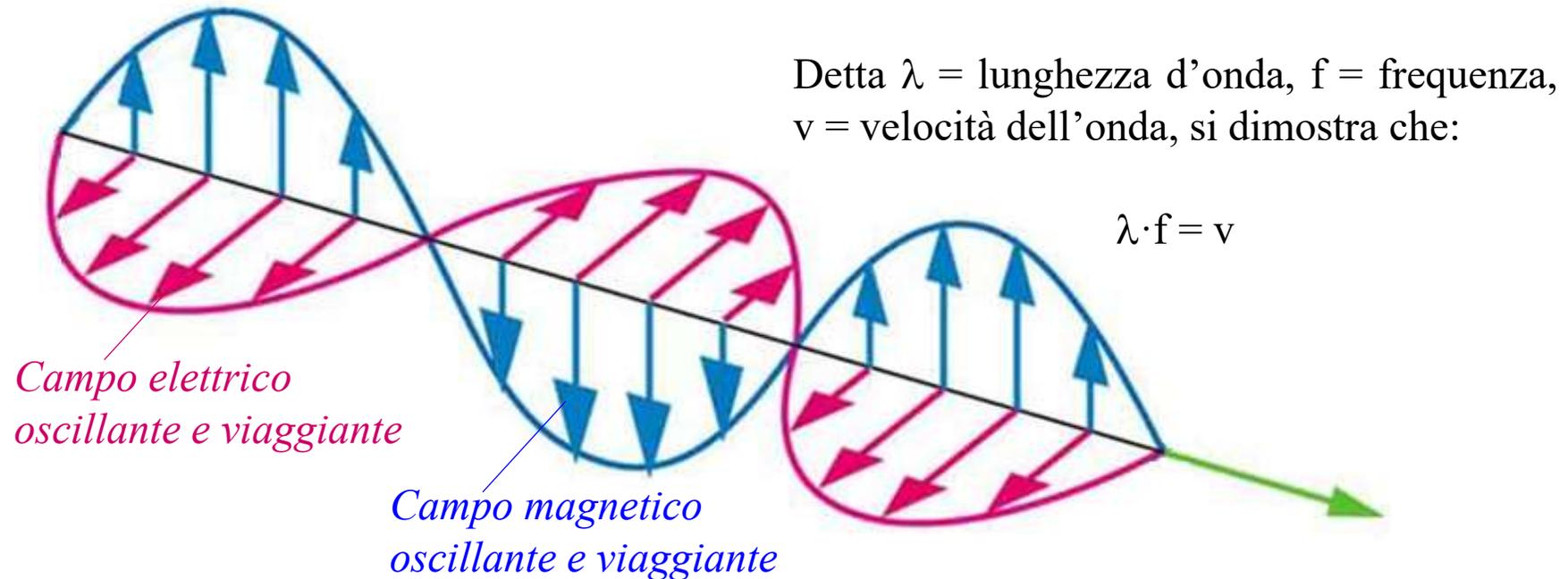
L'oscillazione in blu è composizione delle due oscillazioni sinusoidali rossa e magenta: in un certo senso, per essa non si può definire una frequenza come per le altre due, ma potremmo dire che è “costituita da due frequenze” (da due componenti, onde, di determinata frequenza).

Il discorso si può ripetere per un qualsivoglia numero di onde componenti, di ampiezze non necessariamente uguali (come sono invece le due rappresentate in figura). In questo modo possiamo ottenere forme d'onda di forma generica, perfino non periodica.

All'inverso, si dimostra che una qualsivoglia onda può vedersi come composizione di un certo numero di onde sinusoidali di determinate frequenze e ampiezze (eventualmente un numero infinito di frequenze, anche su un intervallo continuo).

Radiazione elettromagnetica

Anche la radiazione elettromagnetica può essere descritta tramite una propagazione ondosa: si tratta di campi elettromagnetici oscillanti e viaggianti (un po' meno intuitivo delle oscillazioni sulla corda tesa, certo, ma il concetto è quello!).



Nel caso delle onde elettromagnetiche nel vuoto (a differenza delle onde meccaniche, le onde elettromagnetiche possono viaggiare anche nel vuoto!), la v è la stessa per tutte le frequenze: $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

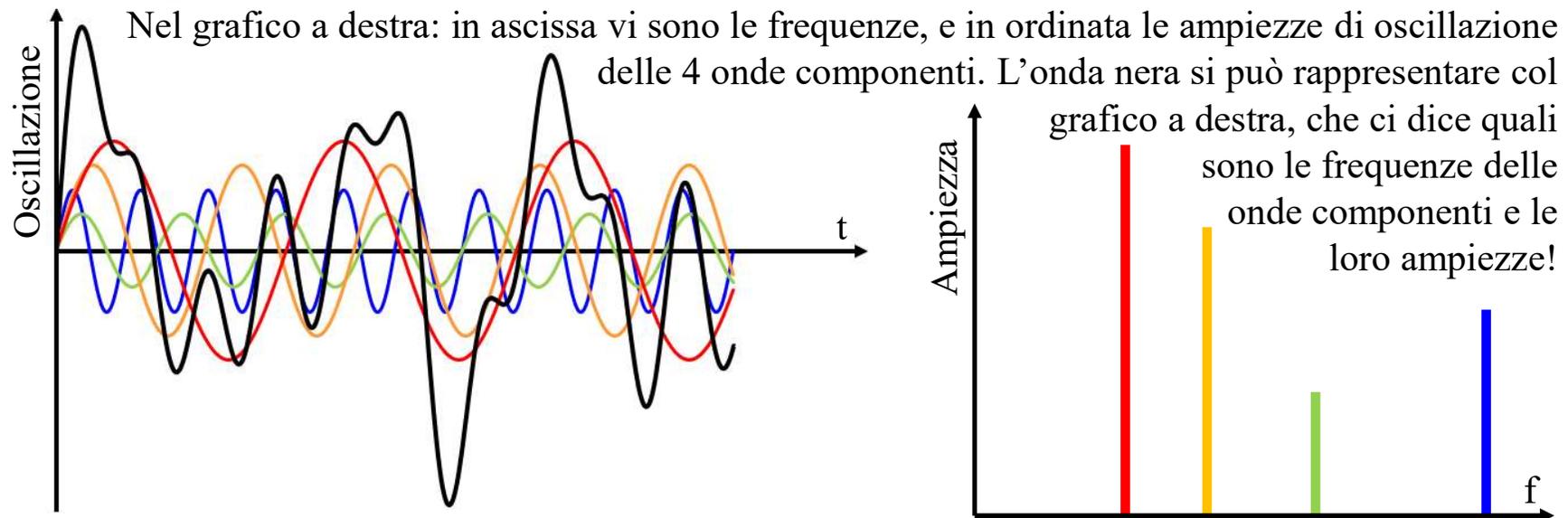
Questo vuol dire che lunghezza d'onda e frequenza sono legate, ed è indifferente ragionare in termini dell'una o dell'altra.

Spettro di un'onda

Ma non tutte le onde hanno la comoda forma sinusoidale: che fine fanno le nostre definizioni di frequenza e lunghezza d'onda?

In questo caso, si ricorre al risultato matematico menzionato in precedenza: una oscillazione di qualunque "forma" (nel tempo e nello spazio) può essere scomposta in numerose (eventualmente infinite, eventualmente continue) componenti di fissata frequenza o lunghezza d'onda [Nota: in realtà, dal punto di vista matematico, questo risultato è subordinato al verificarsi di certe ipotesi... Ma possiamo tranquillamente assumere che le oscillazioni in natura siano sufficientemente "oneste" da soddisfarle!]

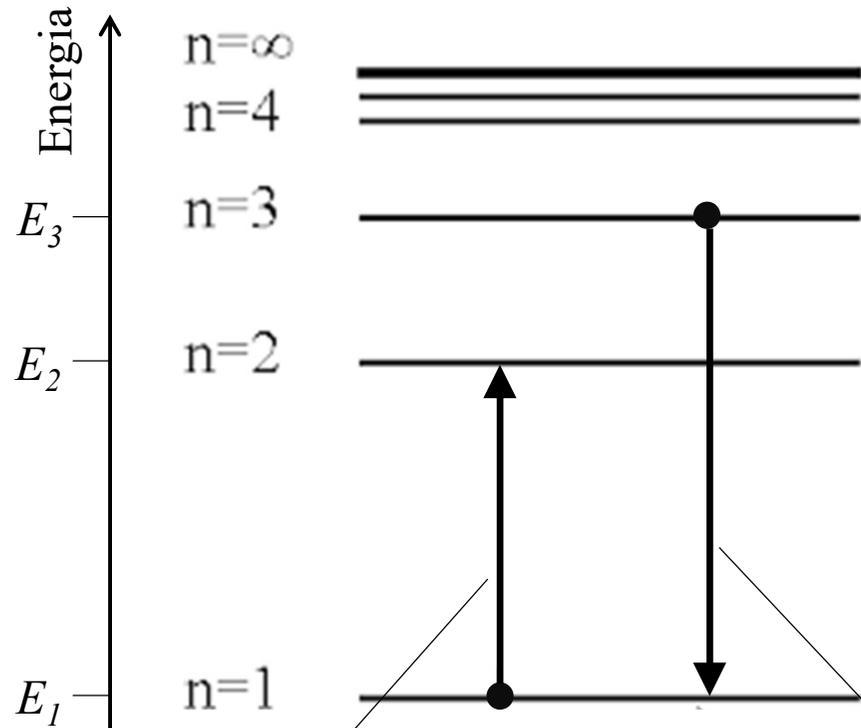
Nella figura a sinistra, l'onda nera (*non* sinusoidale) è somma della 4 onde colorate sinusoidali.



L'insieme delle frequenze (o lunghezze d'onda) "componenti" di un'onda, unitamente alle loro ampiezze, costituisce quello che si chiama lo *spettro* dell'onda.

Spettroscopia e energie quantizzate

La *spettroscopia* studia la dipendenza delle proprietà della radiazione elettromagnetica dalla sua frequenza (o lunghezza d'onda). Per capire come ciò possa essere utile per lo studio delle proprietà della materia, partiamo da un'importante caratteristica degli atomi.



In un atomo, i livelli energetici degli elettroni sono quantizzati.

Questo implica che un elettrone può “saltare” verso un livello energetico più alto solo se assorbe *esattamente* l'energia pari alla differenza tra i due livelli.

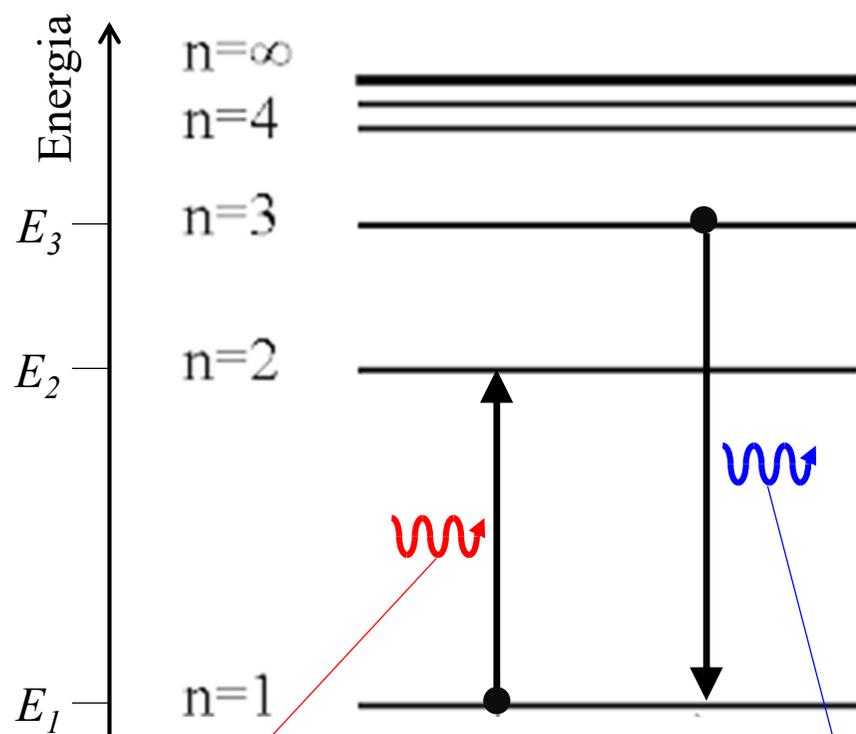
Allo stesso modo, un elettrone che passi ad un livello energetico più basso rilascia (emette) un'energia pari *esattamente* alla differenza di energia tra i livelli energetici coinvolti.

Per compiere il salto dal livello 1 al livello 2, questo elettrone deve assorbire un'energia pari a $E_2 - E_1$

Nel realizzare il salto dal livello 3 al livello 1, questo elettrone emette un'energia pari a $E_3 - E_1$

Assorbimento e emissione di fotoni

Un possibile meccanismo di assorbimento o di emissione di energia da parte di un atomo è ovviamente tramite radiazione elettromagnetica.



*Fotone assorbito, di frequenza
 $f = E_2 - E_1 / h$*

*Fotone assorbito, di frequenza
 $f = E_3 - E_1 / h$*

La teoria quantistica ci insegna che una radiazione di frequenza f può scambiare energia solo come multipli di un quanto (un “mattoncino” elementare) pari ad $h \cdot f$ (h è detta costante di Planck). Questo quanto di energia è detto *fotone*.

Questo vuol dire che all'assorbimento [emissione] di una certa energia in forma di radiazione elettromagnetica da parte dell'elettrone di un atomo, corrisponde l'assorbimento [emissione] di un fotone di frequenza legata al salto di energia ΔE dalla relazione $h \cdot f = \Delta E$.

Qualche considerazione numerica

Quali sono i valori delle tipiche energie che intervengono nei processi di transizioni elettroniche in un atomo?

Un'unità di misura particolarmente utile è quella chiamata *elettronvolt*, *eV*: le energie coinvolte in processi elettronici negli atomi e nella materia in generale vanno da piccole frazioni di eV a migliaia di eV. Si tenga presente che per sollevare di un metro un peso di 100 g spendiamo un'energia pari a più di un miliardo di miliardi di eV: *l'eV è un'energia estremamente piccola sulla nostra scala, certamente non misurabile meccanicamente!*

La frequenza si può misurare in *Hertz*, *Hz*: 1 Hz = un ciclo al secondo.

La lunghezza d'onda ha, ovviamente, le dimensioni fisiche di una lunghezza. Per quanto segue, è importante avere presente le seguenti unità di misura di lunghezza:

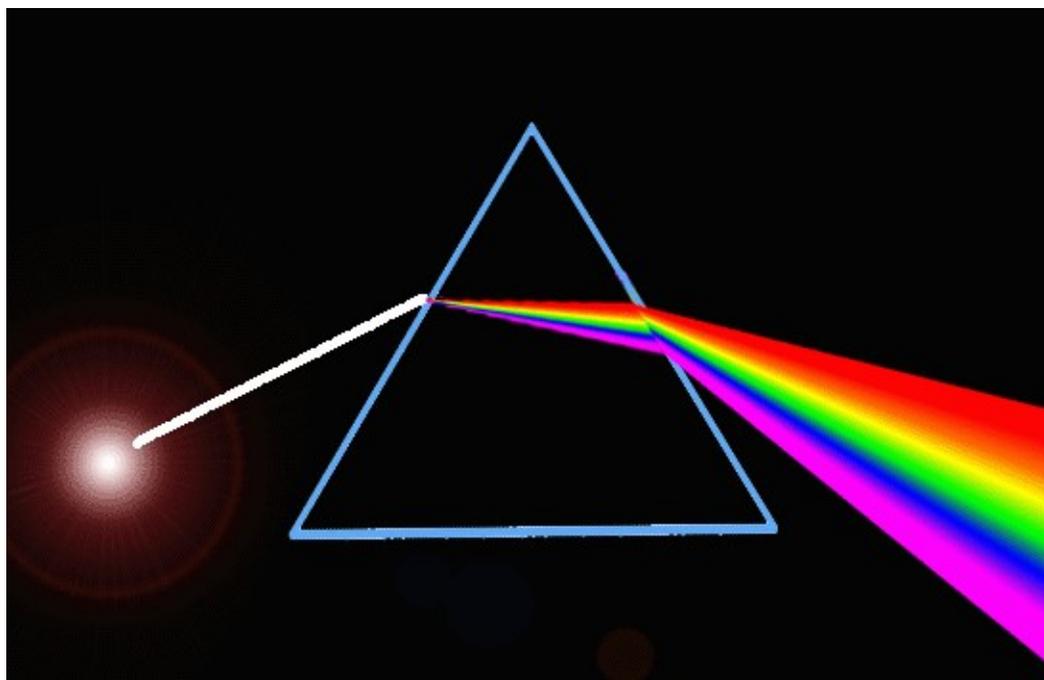
- nanometro, nm: 1 nm = un miliardesimo di metro = 10^{-9} m
- angstrom, Å: 1 Å = un decimo di miliardesimo di metro = 0.1 nm = 10^{-10} m

Ad una energia di 4 eV corrisponde una frequenza del fotone di quasi un milione di miliardi di Hz (10^{15} Hz, un'oscillazione del campo elettromagnetico associato di quasi un milione di miliardi di volte al secondo), ed una lunghezza d'onda di circa 300 nm. Anche frequenze e lunghezze d'onde di questi ordini di grandezza non sono misurabili "meccanicamente", ma nel seguito vedremo che si può misurarle con grande accuratezza con opportune tecniche.

Separazione delle componenti di uno spettro

Una legittima perplessità sarebbe: in una radiazione “generica”, come facciamo a “isolare” le varie frequenze, sia per inviarle su un atomo (per misure di assorbimento) sia per distinguere quelle che l’atomo emette?

Al di là dei dettagli fisici, basti sapere che si tratta di qualcosa che sperimentalmente si riesce a fare molto bene. Si pensi, ad esempio, alla scomposizione della luce bianca in diversi colori operata da un prisma di vetro (o dall’aria umida quando si forma l’arcobaleno).

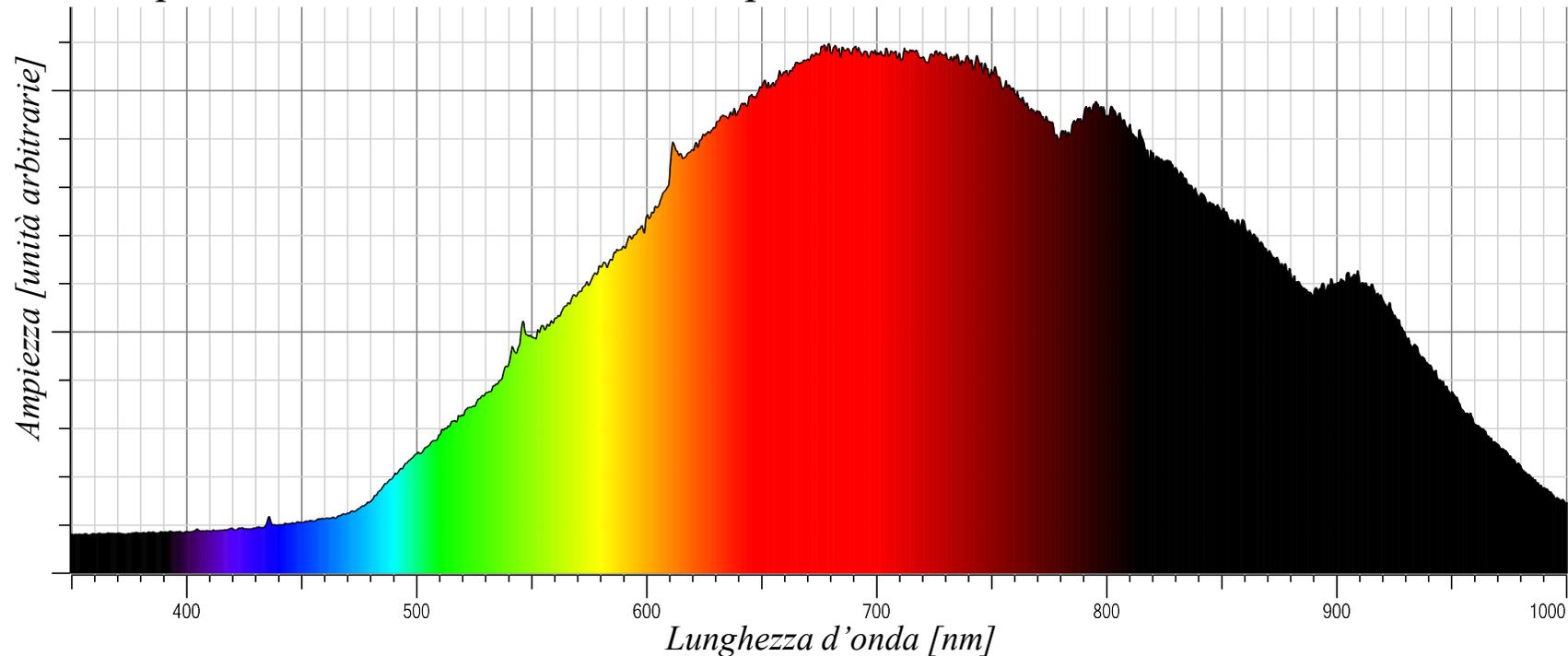


Le diverse frequenze della luce visibile sono tradotte dal nostro apparato visivo come diversi colori: pertanto, quando vediamo un arcobaleno (in aria o “su banco” con un prisma) stiamo assistendo alla scomposizione di un’onda elettromagnetica nelle sue componenti sinusoidali di fissata frequenza (e l’intensità di ciascun colore è legata all’ampiezza della sinusoide).

Con questo e con strumenti più raffinati, la separazione delle diverse frequenze o lunghezze d’onda di una radiazione è un aspetto sperimentale che controlliamo benissimo, sia come produzione e “indirizzamento” che come “raccolta” e misura

La nostra prima misura spettroscopica

Questo è un tipico *spettro* che potremmo misurare scomponendo in frequenze la luce solare o quella emessa da una comune lampada ad incandescenza.

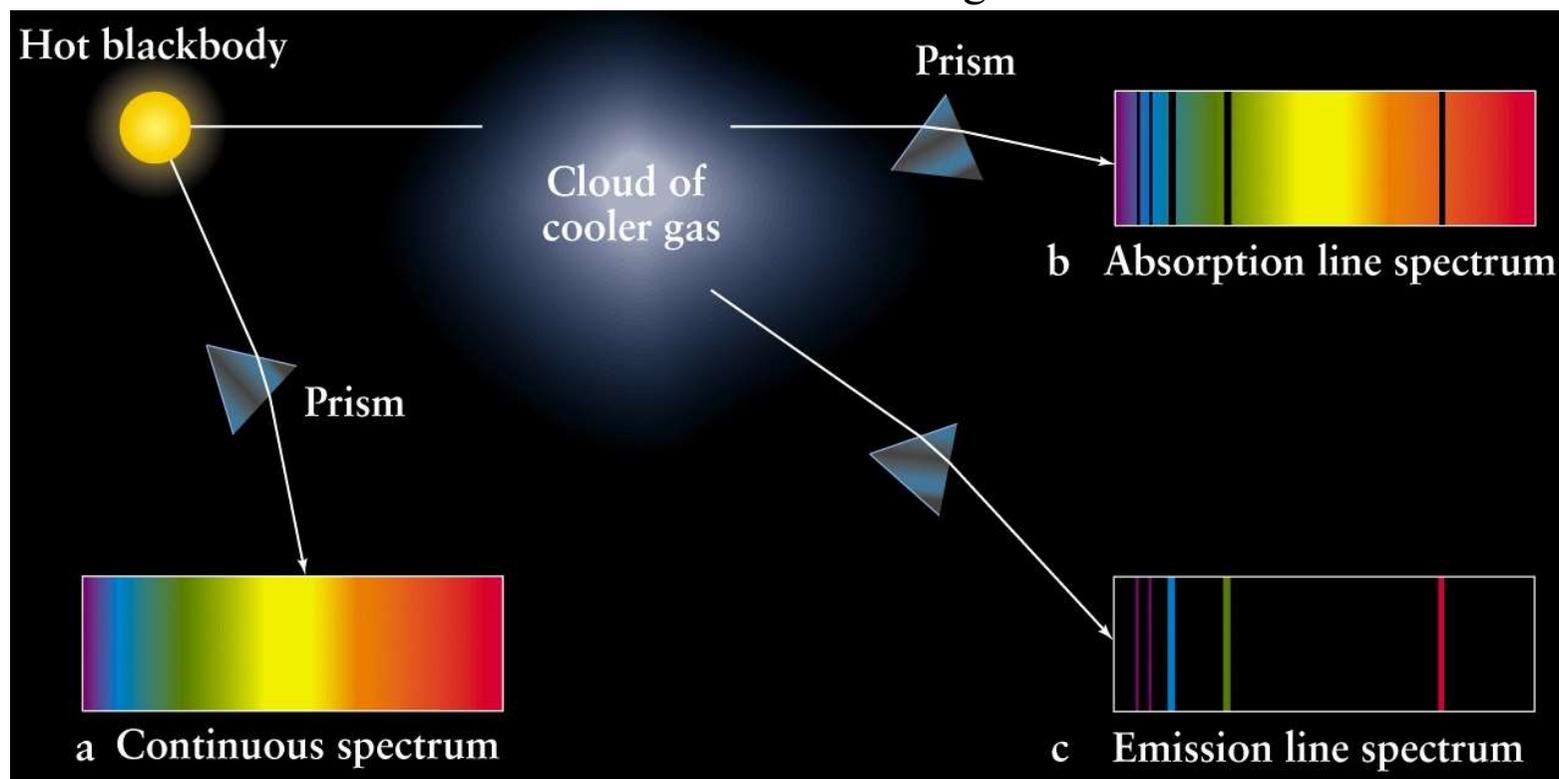


Alle lunghezze d'onda tra 400 nm e 800 nm circa è associato il corrispondente colore “prodotto” dal nostro occhio (al di fuori di questo intervallo noi non vediamo la radiazione elettromagnetica).

Questo spettro non è costituito da un insieme discreto di frequenze! In effetti l'emissione dei corpi “caldi” è dominata sostanzialmente dalla temperatura: questa forma dello spettro è ben descritta da quella che si chiama *emissione di corpo nero* (al variare della temperatura la forma resta la stessa: a temperature più alte l'intensità complessivamente emessa è maggiore e il massimo è spostato verso lunghezze d'onda minori).

Possibili misure spettroscopiche

Questo schema aiuta a chiarire la diversa fenomenologia.

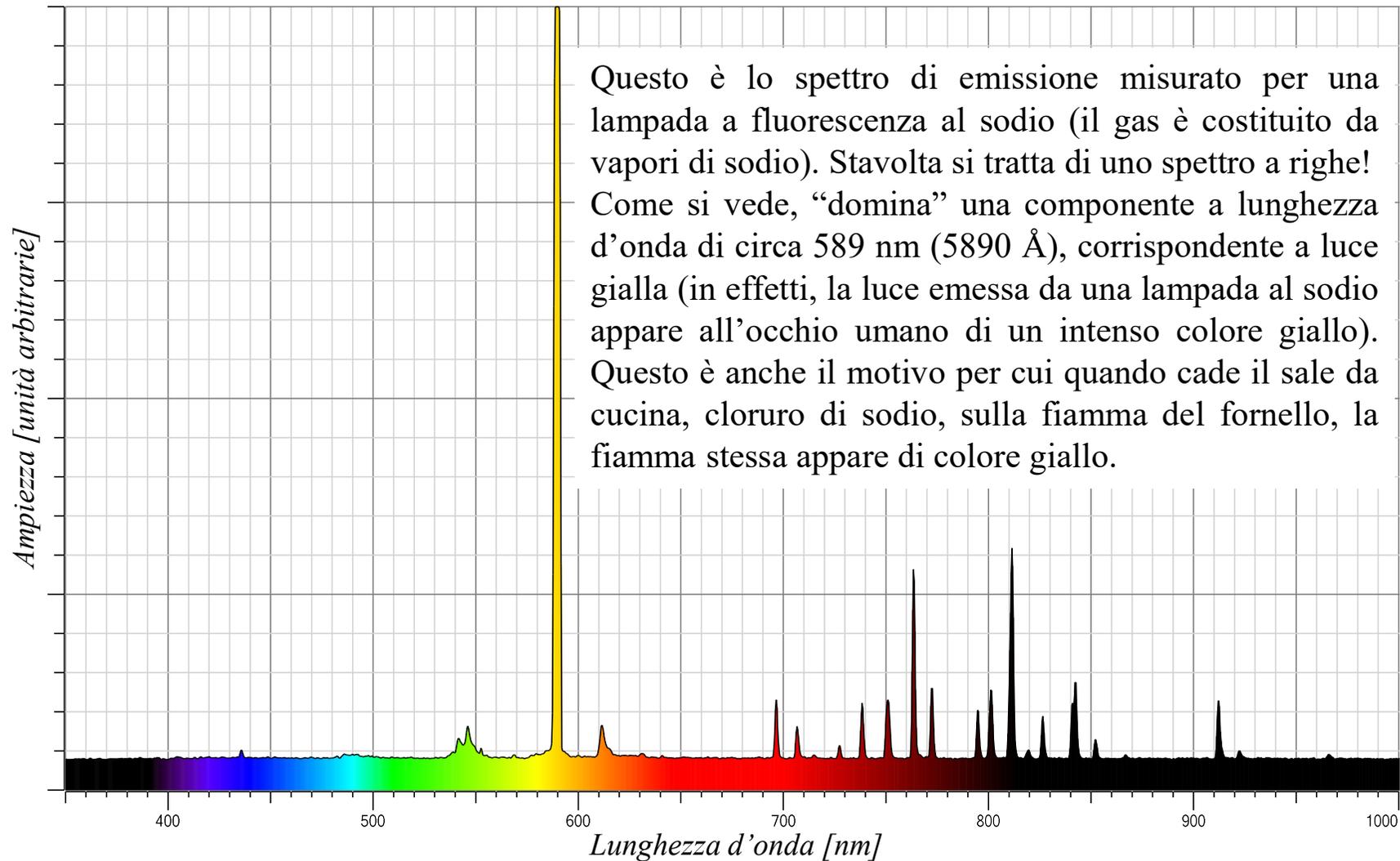


La radiazione emessa da una sorgente “tradizionale” (il Sole, o una lampada a incandescenza, “Hot blackbody” in alto a sinistra in figura) è costituita da un continuo di frequenze (*spettro continuo*): se la scomponiamo con un prisma otteniamo un “arcobaleno continuo” (processo “a” in figura).

Inviando questa radiazione su un gas (atomi isolati, quindi!), lo spettro che ne emerge, rispetto a quello continuo originario, è privato di alcune specifiche frequenze, assorbite dagli atomi del gas (*spettro di assorbimento*, processo “b” in figura). Altresì, se raccogliamo la radiazione emessa da questo gas riscaldato dalla radiazione incidente, osserviamo che solo alcune frequenze sono presenti (*spettro di emissione*, processo “c” in figura), esattamente quelle “mancanti” nello spettro di assorbimento. I due spettri dei processi “b” e “c” sono detti *spettri a righe*.

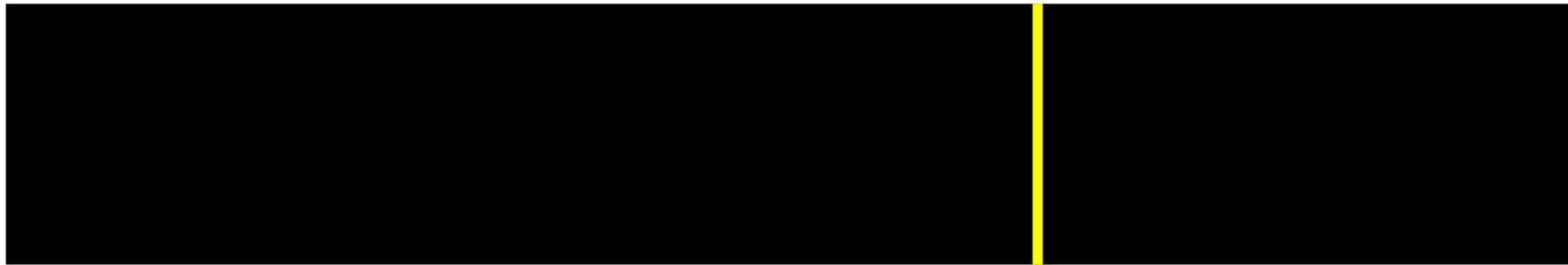
Spettro di emissione di una lampada a fluorescenza

Una lampada a fluorescenza si basa proprio su un gas “riscaldato” dal passaggio da corrente elettrica: la corrente fornisce l’energia per far “saltare” gli elettroni verso livelli “alti”. Nel “ricadere” verso livelli energetici “bassi”, gli elettroni provocano l’emissione di una radiazione che contiene le specifiche frequenze associate ai “salti” di energia.



Esperimento con lampada al sodio

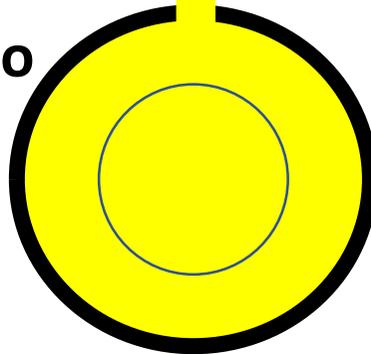
Un esperimento comune nei laboratori didattici di ottica si realizza proprio con una lampada al sodio, la cui luce emessa viene scomposta con un *reticolo di diffrazione* (un sistema che agisce come il prisma visto prima, ma lo fa con maggiore risoluzione! Come per il prisma, in questa sede non siamo interessati al suo principio di funzionamento).



Reticolo di diffrazione



Lampada al sodio



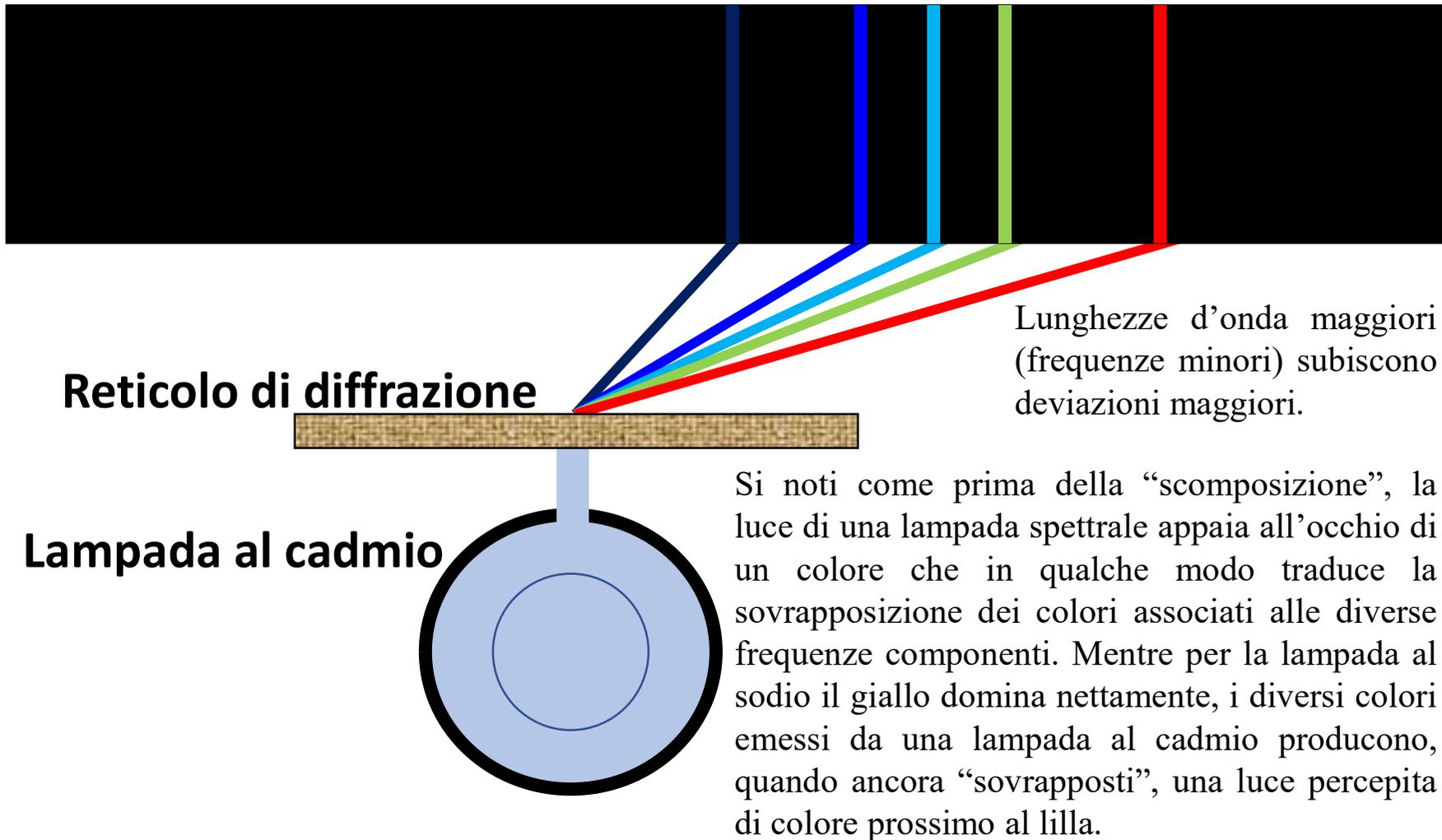
Il reticolo di diffrazione “devia” con diversi angoli le diverse lunghezze d’onda della radiazione che incide su di esso. In figura, la luce gialla del sodio è deviata in una ben specifica posizione su uno schermo.

La misura della lunghezza d’onda viene allora realizzata misurando l’angolo di deviazione (essendo nota la legge che li lega), e può essere effettuata con estrema accuratezza (si veda, al riguardo, tra due diapositive).

[alternativamente, se si assume nota la lunghezza d’onda di una determinata radiazione, questa misura può servire a “tarare” il reticolo]

Esperimento con lampada al cadmio

Sempre nei laboratori didattici di Fisica, lo stesso esperimento si può realizzare con lampade a fluorescenza il cui spettro evidenzia più di una riga. Le lampade a fluorescenza sono talvolta anche denominate *lampade spettrali*.

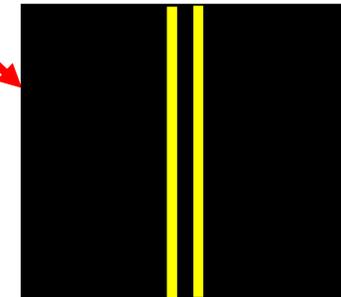


Considerazioni numeriche sul “doppietto del sodio”

Sempre con la semplice strumentazione da laboratorio didattico, è possibile vedere che in realtà la “riga gialla” emessa dal sodio è costituita da due righe prossime, corrispondenti quindi a due lunghezze d’onda diverse.



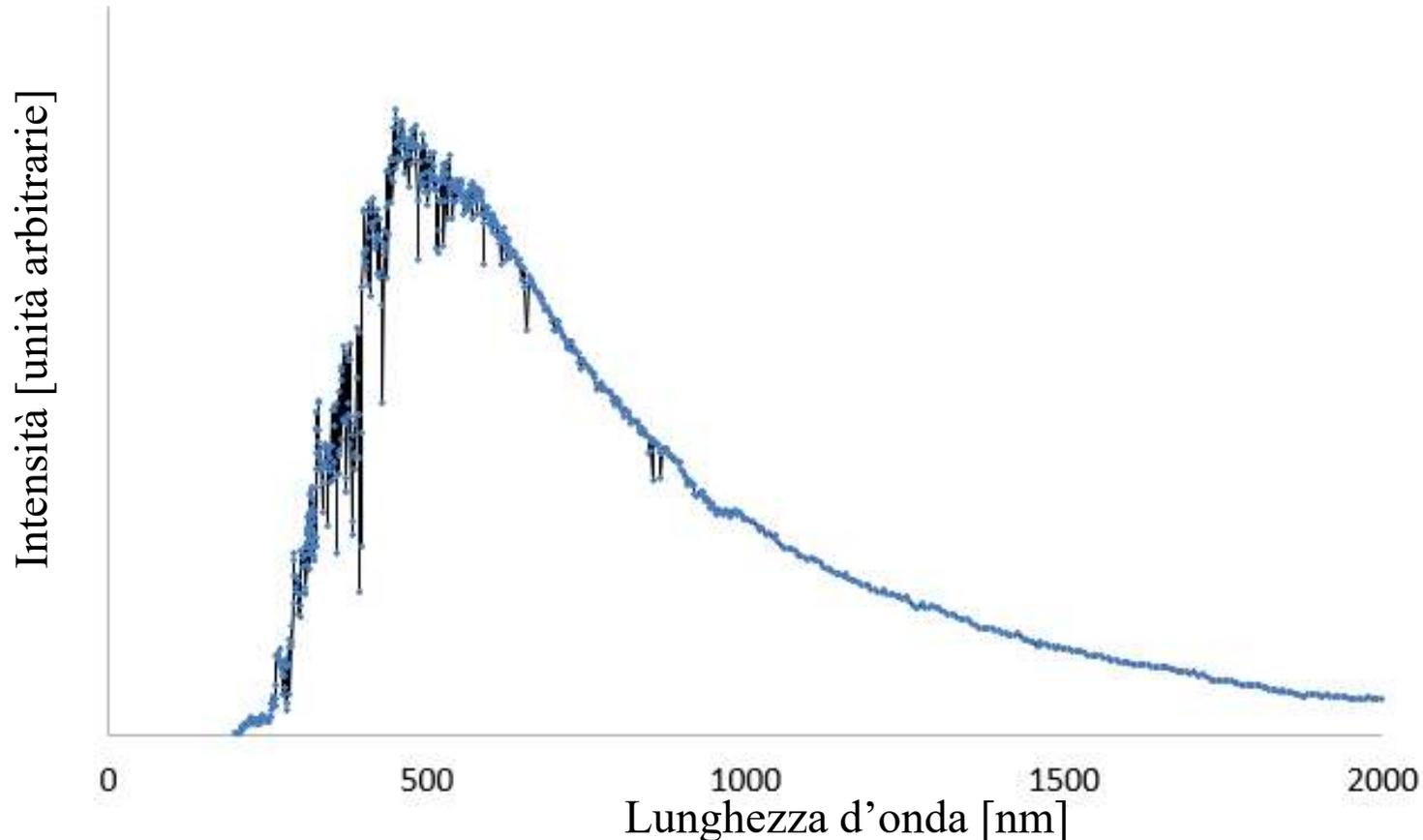
Una valutazione quantitativa basata sulla conoscenza delle caratteristiche del reticolo di diffrazione, sul suo principio di funzionamento, e sulla misura degli angoli di deviazione delle due righe, mostra che esse corrispondono ai seguenti due valori di lunghezza d’onda: 5890 Å e 5896 Å.



Le due lunghezze d’onda differiscono quindi di circa l’uno per mille del proprio valore. Anche le due frequenze quindi differiranno di circa l’uno per mille, e così le energie dei due fotoni. Considerato che questa energia è di circa 2 eV, questo vuol dire che anche con questa semplice (e spesso usurata!) strumentazione da laboratorio didattico, siamo in grado di distinguere spettroscopicamente transizioni elettroniche che differiscono per qualche millesimo di eV.

Spettro di emissione solare e righe di assorbimento

Tornando allo spettro di emissione solare, un'occhiata al dettaglio mostra che in realtà allo spettro di emissione “termico” (quello che abbiamo chiamato “di corpo nero”) sono sovrapposte delle righe di assorbimento (cioè, per alcune frequenze vi sono degli “ammanchi” nello spettro). Esse sono dovute all'assorbimento degli strati solari più esterni. Queste righe forniscono, per il Sole come per altre stelle, una “impronta digitale” dei gas che lo costituiscono.



Considerazioni conclusive

Ci siamo sempre riferiti ad atomi in quanto sopra, perché ragionare con livelli discreti di energia aiuta la comprensione elementare.

In aggregati più complessi di atomi e molecole, quali solidi e liquidi, la situazione è più complessa sia per la vastità di combinazioni sia, soprattutto, per la differente fenomenologia che non si limita a livelli discreti di energia. Questo vuol dire che non sempre una misura spettroscopica su materia aggregata è di ovvia interpretazione, non vale più il discorso dell’“impronta digitale”.

Non vuol dire però che la spettroscopia sia meno utile in questi casi, anzi! La Fisica coinvolta sarà più complicata che per i singoli atomi o i gas, e anche la strumentazione è ben oltre un prisma o un reticolo di diffrazione da laboratorio didattico: tuttavia, quanto illustrato aiuta bene a comprendere, al di là dei dettagli, i principi che sottostanno alle misure spettroscopiche con radiazione elettromagnetica, e come le tecniche spettroscopiche costituiscano un importante strumento per lo studio della materia.