

# Analisi dello spettro

## Un mondo luminoso

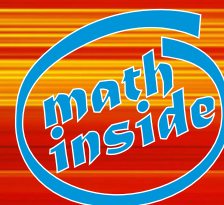


RESEARCH IN ACTION - RIA

RESEARCHINACTION.IT

Cos'hanno in comune il sole, una candela, e una lucciola? Tutti emettono luce. Ma che cos'è la luce? Verrebbe da dire che sia tutto ciò che illumina l'ambiente circostante... ma come?

Oggi noi sappiamo che ogni corpo ha una propria traccia elettromagnetica, chiamata spettro, che dipende dalle sostanze che lo compongono. I recettori dei nostri occhi percepiscono le lunghezze d'onda, quindi i colori, che non vengono trattenuti dal corpo. Non tutto lo spettro però può essere recepito dai nostri occhi ...





# RiA - Research in Action

La parola ría in inglese significa estuario, in particolare (dalla definizione che ne dà l'Oxford Living Dictionaries):

A long, narrow inlet formed by the partial submergence of a river valley ... the rias or estuaries contain very peculiar ecosystems which often contain important amounts of fish ... (a causa della loro natura, le rias o estuari contengono ecosistemi molto particolari che spesso contengono grandi quantità di pesce - [www.eurotomic.com/spain/the-rias-altas-in-spain.php](http://www.eurotomic.com/spain/the-rias-altas-in-spain.php))

quindi questo prodotto che sarà realizzato grazie all'attività di alternanza scuola-lavoro di alcuni studenti del liceo scientifico G.B.Grassi di Latina - [www.liceograssilatina.org](http://www.liceograssilatina.org) - sarà un luogo virtuale da esplorare dove *pescare* molto materiale per la didattica laboratoriale.

## Fare scienza

La scienza non è solo identificabile con la formula, il modello, la teoria. In altre parole la scienza non rappresenta solo un corpo di conoscenze organizzate e formalizzate. La scienza è anche e fondamentalmente ricerca. Una ricerca volta a conoscere e a capire sempre più e sempre meglio come è fatto e come funziona questo nostro complicatissimo mondo.

Fare scienza si identifica con l'interrogarsi, con l'indagare ed esplorare fatti e cose. Questo tipo di lavoro i bambini lo fanno spontaneamente sin dalla loro nascita ma si perde nel corso del percorso scolastico. L'intervento educativo deve tener conto di ciò e fornire stimoli, occasioni e strumenti per far acquisire agli studenti capacità sempre più ampie e affinate per poter compiere questo lavoro di indagine mantenendo viva (o risvegliando) la curiosità cognitiva, la voglia di sapere e di scoprire, la fiducia di poter capire.

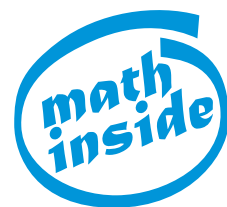
Pensare in senso creativo, in campo scientifico, significa aggredire i problemi, attivare processi vivi del pensiero, alimentare l'evoluzione dinamica dell'intelligenza duttile, dell'esercizio dell'intuizione e dell'immaginazione, della capacità di progettare e formulare ipotesi, di controllare e verificare quanto prodotto e ricercato.

Per questo è necessario bandire forme di apprendimento consumate entro schemi rigidi di elaborazione del pensiero e puntare al recupero della congettura, dell'ipotesi, di una coscienza scientifica aperta a interrogare ogni problematica.

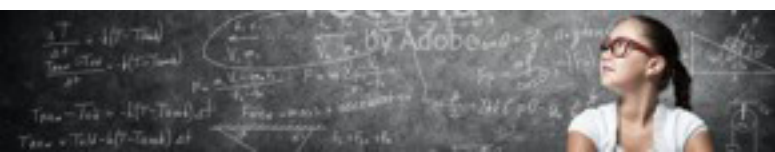


La società odierna deve far fronte ad un rinnovamento scientifico e tecnico accelerato in cui lo sviluppo delle conoscenze scientifiche e la creazione di prodotti di alta tecnologia (*hi-tech*), come anche la loro diffusione subiscono un'accelerazione sempre più rapida.

È necessaria, quindi, una diffusione della conoscenza in genere ed è indispensabile promuovere una nuova cultura scientifica e tecnica basata sull'informazione e sulla conoscenza. E quanto più è solida la base di conoscenze scientifiche scolastiche, tanto più si può approfittare dell'informazione e della conoscenza scientifica e tecnica.



» <https://www.facebook.com/Research-in-Action-341307966417448/>  
» <https://www.youtube.com/channel/UC1PA7Zu78RUMBJnkaiOR8kA/>



# Sommario dei contenuti

## Analisi dello spettro - Un mondo luminoso

### Sommario dei contenuti

#### 1. Un mondo luminoso 5

- 1.1 LA LUCE 5
- 1.2 PREREQUISITI 6
- 1.3 OBIETTIVI 6

#### 2. Di cosa ci occuperemo 7

- 2.1 LA SPETTROSCOPIA 7
- 2.2 LO SPETTROSCOPIO 7
- 2.3 COSTRUIRE UNO SPETTROSCOPIO 7
- 2.4 CELL PHONE SPECTROMETER 8
- 2.5 L'ESPERIMENTO 10
- 2.6 ASSORBIMENTO 12
- 2.7 E ORA UN PO' DI MATEMATICA 13

#### 3. Soluzioni 16

- 3.1 L'ESPERIMENTO 16
- 3.2 ASSORBIMENTO 18
- 3.3 E ORA UN PO' DI MATEMATICA 20

#### 4. Esercizi 22

- 4.1 ANALISI DELLO SPETTRO DELLA LUCE LUNARE 22
- 4.2 ANALISI DELLO SPETTRO DELLA LUCE SOLARE, UN'APPROFONDIMENTO 22
- 4.3 COMPLETARE L'APPROSSIMAZIONE 22



### Materiale disponibile per questo laboratorio:

- » il fascicolo (in formato PDF di circa 10MB): <http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2019/05/12-Analisi-dello-spettro.pdf>;
- » il laboratorio svolto con xMaxima e la rappresentazione dei dati con GeoGebra: <http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2019/05/12-Analisi-dello-spettro.pdf>.

Per il materiale didattico a supporto del fascicolo visitare anche la pagina Download del sito dedicato al progetto: <http://researchinaction.it/download/>.

Per i videotutorial è possibile visitare il canale YouTube del progetto: <https://www.youtube.com/channel/UC1PA7Zu78RUMBJnkaiOR8kA>.





# Analisi dello spettro

## Un mondo luminoso

### 1. Un mondo luminoso

Questo laboratorio è stato sviluppato da Francesco Bini, Riccardo D'Antonio, Serena Ragaglia in collaborazione con Fabio Chiarello (CNR-IFN), il progetto è stato coordinato da Gualtiero Grassucci (Isc G.B. Grassi di Latina).

#### 1.1 LA LUCE

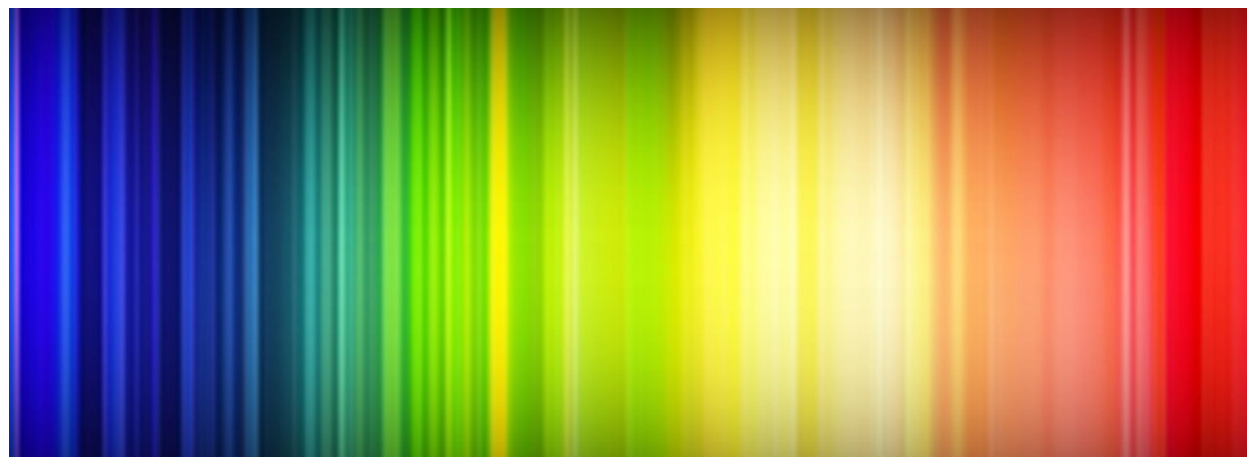
Cos'hanno in comune il sole, una candela, e una lucciola? Tutti emettono luce. Ma che cos'è la luce? Verrebbe da dire che sia tutto ciò che "illumina" l'ambiente circostante... ma come? Oggi noi sappiamo che ogni corpo ha una propria "traccia" elettromagnetica, chiamata spettro, che dipende dalle sostanze che lo compongono. Alcuni corpi, come le stelle sono in grado di emettere, sotto forma di onde elettromagnetiche, le radiazioni del proprio spettro. Una parte di queste radiazioni, ogni volta che urta un corpo, rimbalza su di esso, mentre un'altra parte viene assorbita dall'oggetto. I recettori dei nostri occhi percepiscono le lunghezze d'onda, quindi i colori, che non vengono trattiene dal corpo. Il colore bianco invece, è dato dalla somma di tutte le lunghezze d'onda visibili, ed è in grado di rifletterle tutte; il colore nero, al contrario le assorbe. Non tutto lo spettro però può essere recepito dai nostri occhi: per noi la luce è quella cosa che possiede una lunghezza d'onda compresa tra 380 e 750  $\mu\text{m}$  (milionesimi di metro;  $1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ), che equivale allo spettro luminoso. La radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda inferiore è detta ultravioletto, quella con una lunghezza d'onda maggiore infrarossi (dai colori estremi dello spettro visibile, viola e rosso).

La branca della fisica che studia i fenomeni luminosi è chiamata ottica in fisica classica, e fotonica in fisica quantistica.

La tabella che segue riporta le lunghezze d'onda della luce visibile, dell'ultravioletto e dell'infrarosso, in nanometri ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).

Colore	Ultra violetto	Viola	Indaco	Blu	Verde	Giallo	Arancione	Rosso	Infrarosso
$\lambda_{\text{min}}$		380nm	450nm	475nm	496nm	570nm	590nm	629nm	740nm
$\lambda_{\text{max}}$	380nm	450nm	475nm	496nm	570nm	590nm	620nm	740nm	

La luce è allo stesso tempo onda e corpuscolo, flusso e particella. È possibile analizzarla come fosse un fotone, cioè una particella elementare che è dotata di una determinata quantità di energia



(quanto di luce). Può essere considerata un raggio o fascio, quando la lunghezza d'onda della luce è di molto inferiore agli oggetti con cui essa interagisce, infatti i raggi sono fasci di luce che possono essere studiati geometricamente come fossero segmenti di una retta. Infine è anche onda, poiché la luce si propaga sotto forma di un'onda grazie all'oscillazione del campo elettromagnetico perpendicolare alla direzione di propagazione.

La dualità della luce (onda e particella) è molto antica ma è stata formalizzata meno di un secolo fa da Schrödinger risolvendo alcuni problemi a cui la fisica classica non riusciva a dare spiegazione e la fisica quantistica non riusciva a definire.

## 1.2 PREREQUISITI

Per comprendere al meglio questo fascicolo, è necessario:

- » una conoscenza di base dell'inglese, almeno inglese scritto (il fascicolo rimanda, infatti, ad altri documenti redatti in quella lingua);
- » la capacità di leggere e interpretare un grafico.

Per la realizzazione dell'esperimento suggerito, è necessario:

- » una fotocamera (anche del cellulare)
- » un reticolo per la diffrazione dello spettro luminoso
- » una stampante
- » cartoncini e fogli di carta (formato A4)
- » varie sorgenti luminose per fare vari tentativi

## 1.3 OBIETTIVI

Costruire ed utilizzare uno spettroscopio *economico* (con materiale cosiddetto *povero*) per analizzare lo spettro di diverse sorgenti luminose e confrontarle.



## 2. Di cosa ci occuperemo

### 2.1 LA SPETTROSCOPIA

La spettroscopia è la branca dell'ottica che studia i diversi spettri luminosi. L'insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche è detto **spettro elettromagnetico** mentre l'insieme delle radiazioni dello spettro elettromagnetico che possono essere osservate, rilevate dai nostri occhi, è detto **spettro visibile** o **della luce visibile**. Va ricordato che la luce, così come la osserviamo quotidianamente, è la somma di diverse onde elettromagnetiche, ognuna con le proprie caratteristiche e peculiarità che, sovrapponendosi, creano proprio quella che chiamiamo luce. Una sola di queste onde, che per i nostri occhi corrisponde a uno dei colori fondamentali, è detta **componente fondamentale** della luce. Ogni componente fondamentale è rappresentata matematicamente da un'onda armonica (sostanzialmente una sinusoidale), la sovrapposizione di queste onde, semplicemente la somma delle singole onde armoniche, è percepita come luce.

In pratica la spettroscopia, semplificando un poco, studia la luce attraverso l'analisi delle onde elettromagnetiche emesse o assorbite dai corpi.

### 2.2 LO SPETTROSCOPIO

Lo spettroscopio è uno strumento che permette di osservare e di analizzare lo spettro luminoso di una sorgente di luce. In altre parole è un apparecchio che è in grado di scomporre la radiazione emessa nelle sue componenti fondamentali, ognuna delle quali corrisponde a una sola onda armonica con una ben precisa frequenza e lunghezza d'onda.

Uno spettroscopio è costituito, fondamentalmente, da un prisma o un reticolo che, sfruttando il fenomeno della rifrazione, riescono a deviare in modo diverso, in funzione della frequenza e dell'energia, onde elettromagnetiche differenti, dividendo appunto lo spettro luminoso in bande colorate. Analizzando ogni singolo spettro è possibile ricavare le sue componenti e identificare la tipologia di sorgente luminosa (led, lampada ad incandescenza, lampada al neon, etc.). Con gli strumenti adeguati si possono inoltre determinare gli elementi chimici che compongono una data sorgente luminosa a partire dallo spettro analizzato. Infatti gli elementi chimici emettono o assorbono luce perché un elettrone assorbe o emette energia a una data frequenza, gli elettroni possono emettere e assorbire solo determinate quantità di energia, ogni quantità è emessa o assorbita come onda elettromagnetica di una specifica frequenza e quindi riconoscibile come una delle componenti fondamentali di cui abbiamo parlato in precedenza.

### 2.3 COSTRUIRE UNO SPETTROSCOPIO

La realizzazione di uno spettroscopio può risultare incredibilmente semplice ed economica: in questo laboratorio vi proponiamo due modalità di costruzione di uno strumento per misurare gli spettri di vari sorgenti luminose.

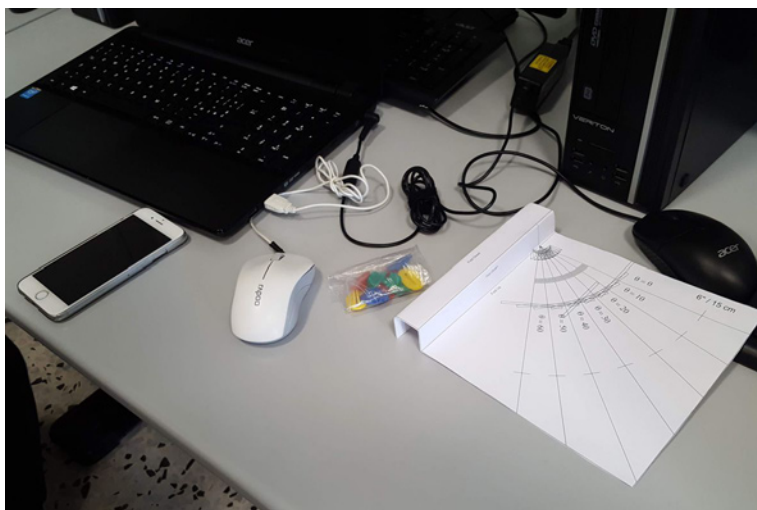
#### UN PRIMO METODO

Il primo metodo che suggeriamo, prevede l'utilizzo di:

- » un rotolo di carta stagnola;
- » un cd (l'esperimento non funziona anche con i DVD);
- » un cartoncino (preferibilmente nero);
- » un taglierino o una forbice.

Per cominciare, ritagliate un quadratino di circa un paio di centimetri sul rotolo di stagnola, questo





sarà il nostro foro di osservazione. In seguito, effettuate nella parte di rolo retrostante il foro di osservazione, un taglio di  $45^\circ$  rispetto ad uno dei lati del quadratino (più è sottile il taglio, più precisa risulterà l'analisi dello spettro).

A parte ritagliate (spezzate) un pezzo di CD lungo come il taglio effettuato in precedenza: è preferibile che un lato del pezzetto sia leggermente più lungo per permettere di inserirlo o sfilarlo meglio nel foro del rolo di carta stagnola.

Prendete a questo punto il cartoncino (meglio nero o comunque un colore scuro) e ritagliatelo in modo tale che possa essere incastrato nella *bocca* del rolo.

Praticate un piccolissimo foro al centro del cartoncino ritagliato in modo che possa passare solo un raggio di luce. La luce entrerà nel foro del cartoncino e sarà riflessa dal pezzetto di CD, il quale proietterà lo spettro dal punto di osservazione. A questo punto basterà semplicemente fotografare lo spettro ottenuto, e passare al prossimo *step* che è illustrato nelle pagine successive.

## UN SECONDO METODO

In questo caso basterà procurarsi un semplice reticolo di diffrazione (si trovano facilmente in rete, qui accanto ne mostriamo uno). Il reticolo può essere semplicemente esposto ad una sorgente luminosa in modo tale che ne mostri lo spettro luminoso; può essere supportato da una struttura che permetta di non esporlo completamente ad una sorgente luminosa troppo forte (come quella solare), per ottenere un'analisi più precisa... Tutto sta alla creatività del lettore.



Cell Phone Spectrometer è un'applicazione open source si può scaricare qui: [https://www.asdlib.org/onlineArticles/elabware/Scheeline\\_Kelly\\_SpectrophotometerV2/](https://www.asdlib.org/onlineArticles/elabware/Scheeline_Kelly_SpectrophotometerV2/)

## 2.4 CELL PHONE SPECTROMETER

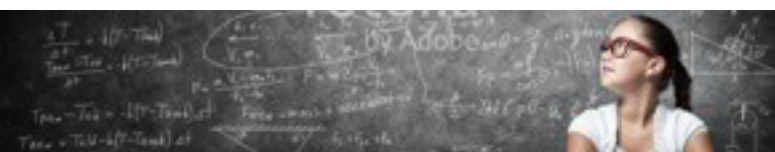
Per analizzare i dati (intensità e distribuzione delle frequenze) riguardanti lo spettro luminoso di una sorgente luminosa, esistono diverse applicazioni: in questo laboratorio abbiamo usato *Cell phone spectrometer*, un programma che permette di analizzare e confrontare gli spettri luminosi di due immagini.



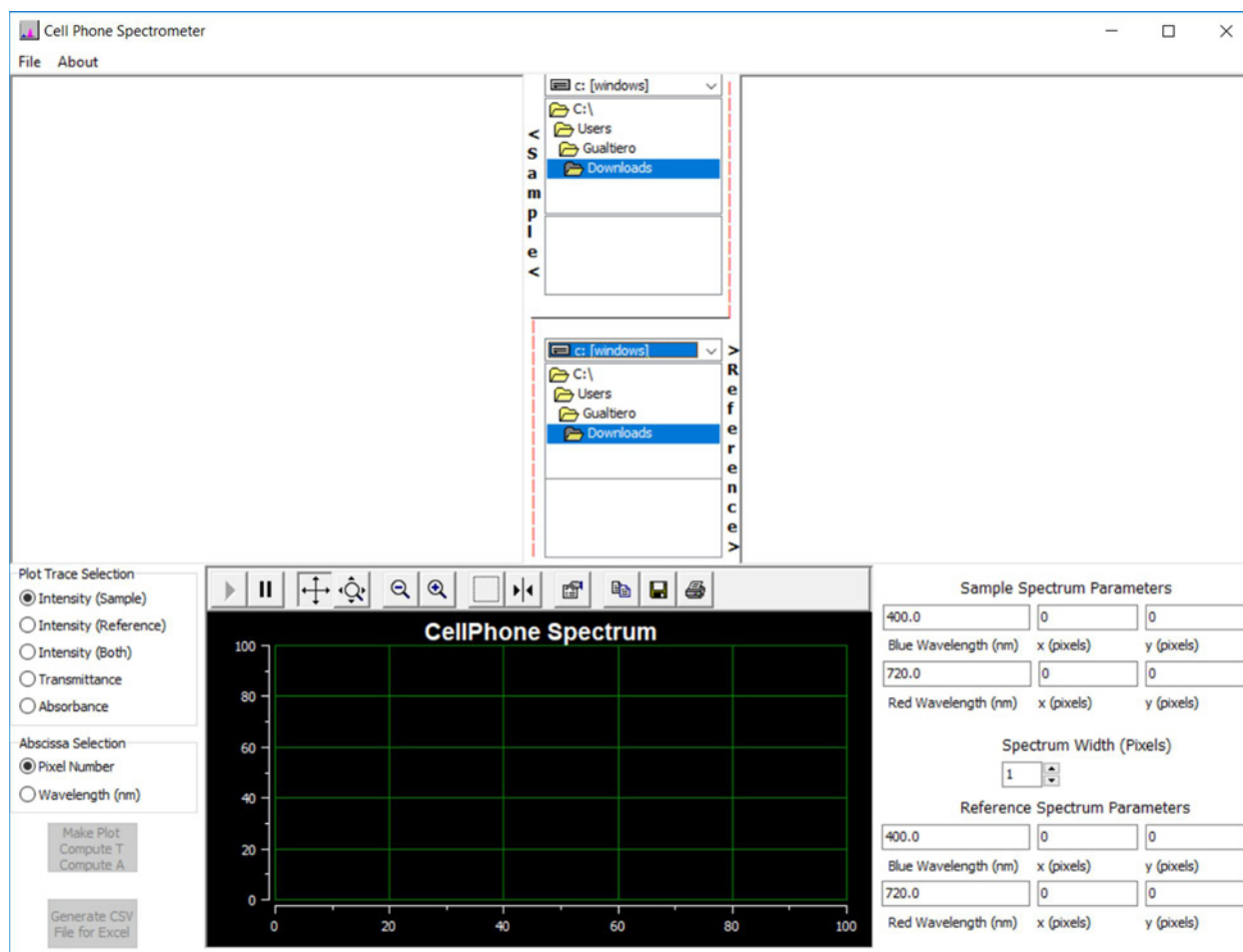
L'interfaccia dell'applicazione è mostrata nella figura che si trova nella pagina successiva. Le due *zone* bianche sono il *sample* a sinistra e il *reference* a destra e fungono da contenitori per le immagini che si intendono analizzare. Non vi è alcuna differenza tra i due, quindi la scelta di utilizzarne uno piuttosto che l'altro è totalmente libera. Le immagini da analizzare si possono caricare selezionando il file corrispondente dalle due caselle simili a un *File Explorer* (*sample* o *reference* in base alle necessità).

Per avviare l'analisi dello spettro è possibile tracciare una linea, un segmento, sull'immagine che vada dal colore blu al rosso:

- » cliccare sul punto più vicino al colore blu dello spettro e successivamente l'icona *blue end of spectrum*;
- » ripetere l'operazione sul colore più vicino al rosso selezionando però *red end of spectrum*.







A questo punto basta spostarsi nel quadro di lavoro *plot trace selection*, che si trova a sinistra dell'interfaccia. Per quello che ci riguarda, sarà necessario selezionare:

- » Il pulsante *intensity (reference)* per analizzare lo spettro dell'immagine inserita nel riquadro reference.
- » Il pulsante *intensity (sample)* per analizzare lo spettro dell'immagine inserita nel riquadro sample.
- » Il pulsante *Intensity (both)* nel caso in cui si volessero analizzare contemporaneamente gli spettri delle immagini inserite nei due riquadri

A questo punto è sufficiente un *click* del mouse nel quadro di lavoro sottostante, chiamato *abscissa selection*, l'opzione *wavelength (nm)*. Selezionando il pulsante *make a plot Compute T Compute A* si otterrà un grafico dello spettro; selezionando il pulsante *Generate tab-delimited TXT File for Excel*, il programma esporterà i dati del grafico su un foglio excel.



#### GUIDA ALLA LETTURA DI UN GRAFICO

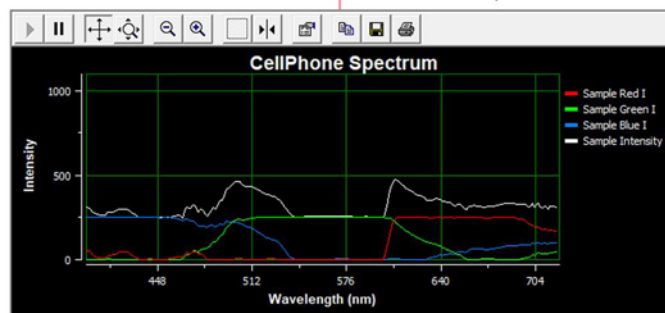
Ora vediamo come leggere un grafico elaborato dal programma. Prendiamo in esame il grafico in figura. Innanzitutto cominciamo col dire che sull'asse delle ascisse (asse orizzontale) è indicata la lunghezza d'onda della luce, mentre su quella delle ordinate (asse verticale) è indicata l'intensità. Ricordiamo che a lunghezza d'onda grande corrisponde una frequenza più bassa e quindi un'energia minore; una lunghezza d'onda più corta possiede una frequenza maggiore e quindi maggiore energia.

Come possiamo vedere nella figura che troviamo nella pagina successiva, sono presenti quattro linee: una bianca, una blu, una verde e una rossa.

La curva bianca indica l'intensità della luce (in tutte le sue componenti) corrispondente alla lun-

ghezza d'onda in ascissa. Le altre tre curve misurano l'intensità della sorgente nei tre colori fondamentali rosso, verde e blu.

La lettura di questo grafico è abbastanza semplice: a partire da sinistra vediamo come la linea blu all'inizio abbia un picco in corrispondenza delle lunghezze d'onda minori, infatti la componente blu è quella con maggiore energia. Per fare un confronto, nella figura la curva rossa mostra come questa componente emetta luce soprattutto a bassa energia (lunghezze d'onda maggiori).



## 2.5 L'ESPERIMENTO

Mettiamo ora alla prova il nostro spettroscopio analizzando gli spettri di diverse sorgenti luminose.

**Attenzione: non guardare direttamente il Sole o il laser verde, può essere dannoso anche uno sguardo di una frazione di secondo.**

Come abbiamo accennato in precedenza, la luce di colore rosso è quella con una lunghezza d'onda maggiore e quindi con minore energia: in genere essa è così poco dannosa per l'occhio umano che la pupilla non tende nemmeno a contrarsi per diminuire l'intensità della luce che raggiunge la parete interna dell'occhio. È per questo motivo che nei sommergibili si usa (e si usava) illuminare gli ambienti con una luce di questo colore. Al contrario, la luce verde corrisponde a una lunghezza d'onda molto minore e una frequenza maggiore, ed è quindi in grado di trasportare molta più energia, tanto da poter danneggiare i recettori dell'occhio umano.

### LASER

Come prima cosa proviamo ad analizzare uno spettro semplice, quello di un laser, grazie all'aiuto del programma di cui abbiamo parlato prima. prima di proseguire però cerchiamo di capire cosa sia un laser.

Un laser (acronimo per *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) è un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce compatto e monocromatico, concentrato in un fascio rettilineo. In sostanza un fascio di fotoni con la stessa frequenza e la stessa lunghezza d'onda.



Questo strumento è composto da tre parti fondamentali:

- » un materiale che emette la luce (come un gas o un liquido), chiamato mezzo attivo;
- » un sistema che fornisce energia al mezzo attivo, chiamato sistema di pompaggio;
- » una cavità capace di intrappolare la luce.

Dal mezzo attivo, il quale emette radiazioni elettromagnetiche, dipende la lunghezza d'onda dell'emissione. L'energia viene trasmessa dal sistema di pompaggio al mezzo attivo sotto forma di radiazione. Il mezzo attivo, si trova tra due specchi, uno dei quali è unidirezionale. La radiazione emessa dal mezzo attivo viene amplificata da questi due specchi (che compongono il risonatore); contemporaneamente la radiazione lascia lo stesso risonatore attraverso lo specchio unidirezionale, emettendo dunque la luce monocromatica tipica di un laser.

Ora che sappiamo cos'è un laser, prendi lo spettroscopio, il telefono e il laser stesso. Punta la luce di uno dei due laser sullo strumento e scatta una foto dello spettro. A questo punto utilizzando



un'applicazione come *Cell phone spectrometer* analizza le foto per ricavare le curve di intensità in funzione della lunghezza d'onda. Abbiamo descritto, in breve, la procedura per caricare la foto nell'applicazione e per ricavare da questa le informazioni sulla distribuzione dell'intensità (cfr. 2.4 Cell phone spectrometer a pagina 8).

**Cosa puoi capire dalle curve che lo spettro del laser che hai appena analizzato forma? Cosa succede alla curva che misura la luce verde? E quello delle altre due?**

Se non capisci, non sai rispondere o non sei convinto, non ti preoccupare. Proviamo a fare lo stesso esperimento con un laser di colore differente.

**Ripeti l'esperimento con un laser di colore rosso e ricava, di nuovo, la distribuzione dell'intensità rispetto alla lunghezza d'onda. Cos'è cambiato? Quali sono le somiglianze e le differenze?**

Per quanto differenti le analisi degli spettri dei due laser hanno qualcosa in comune, qualcosa che in effetti caratterizza la luce monocromatica.

LED

Ora che ci siamo avvicinati a capire cosa dobbiamo fare, proviamo a ripetere l'esperimento con una fonte luminosa totalmente diversa, il LED.

Un LED, acronimo di *Light Emitting Diode*, o diodio a emissione luminosa, è uno strumento che emette fotoni con frequenza nella luce visibile. Sono oggetti ormai molto comuni: li troviamo nei semafori, nei telecomandi, nelle torce del telefono, nei fari delle auto, e in molti altri strumenti elettronici.

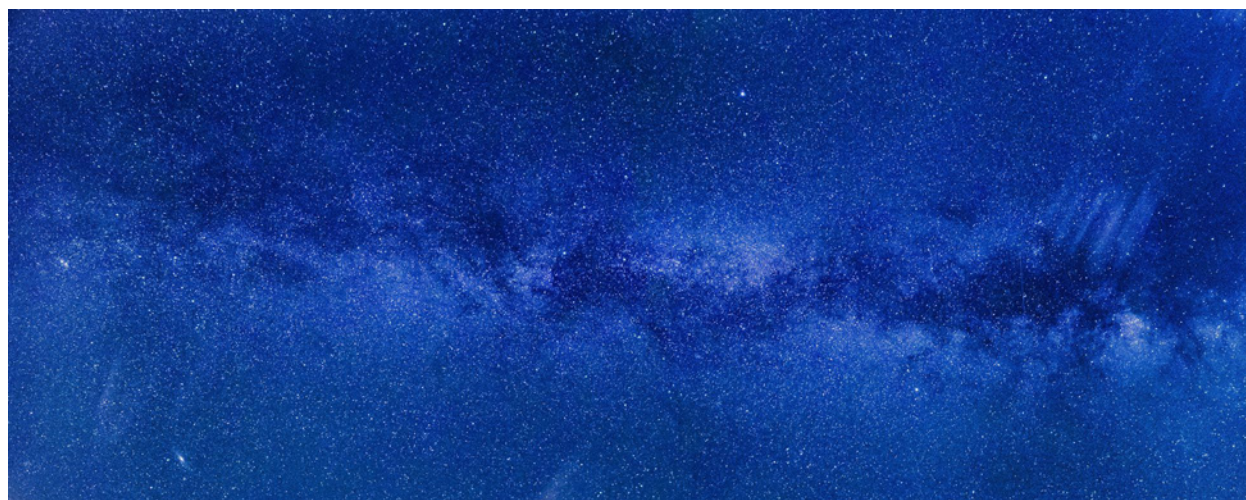
**Osserviamo lo spettro luminoso generato da un emettitore LED attraverso il nostro reticolo di diffrazione. Per prima cosa utilizza lo spettrometro che hai costruito per scattare una foto dello spettro della luce emessa dal LED.**

Già a questo punto si dovrebbero notare le prime (evidenti) differenze con le foto precedenti. Questa foto dovrebbe essere molto più gratificante e interessante rispetto alle immagini ottenute fotografando lo spettro dei due laser.

**Ripeti la procedura già vista fino a ottenere la distribuzione dell'intensità luminosa rispetto alla lunghezza d'onda. Come viene plottato dal programma lo spettro di un LED? E' uguale a quello di un laser? Cosa cambia? Riesci a spiegare le differenze?**



Il Toolbox:  
<http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2018/11/00-Toolbox.pdf>  
suggerisce alcuni metodi per il calcolo dell'errore (cfr. Calcolo dell'errore a pagina 5).



La luce bianca, quella del LED che abbiamo analizzato, appare molto più complessa rispetto a quella del laser.

## 2.6 ASSORBIMENTO

La spettroscopia è spesso applicata all'astronomia poiché lo spettro luminoso offre indizi sulla composizione chimica del corpo che emette le radiazioni ma anche sulle sostanze che sono attrattive perché possono assorbire una parte dello spettro stesso.

Possiamo riprodurre la stessa situazione? Proviamo!

Proviamo ad analizzare la luce emessa dal LED ponendo tra la sorgente (il LED) e l'apparato (il reticolo di diffrazione) un contenitore trasparente riempito di acqua. Il contenitore deve avere le pareti piane, quanto più possibile, ed essere costruito in modo che le pareti stesse abbiano lo stesso spessore e la stessa densità. Si possono trovare in rete contenitori in plastica costruiti proprio a questo scopo.

### **Cosa succede allo spettro del LED? Ci sono differenze rispetto all'analisi precedente?**

Proviamo a complicare un po' l'esperimento. Versa nel contenitore un colorante che si miscela con l'acqua, magari usa contenitori differenti con coloranti/sostanze diverse ed esegui ancora una volta l'analisi della distribuzione usando lo spettrometro. Inizia con sostanze che abbiano un colore fondamentale: rosso, verde e blu.

### **Cosa si nota di diverso? Ce lo potevamo aspettare? E se anziché acqua e colorante, mettessimo altre sostanze come una bibita colorata?**

Mettendo a confronto i grafici dello spettro della luce del led pura e quella con il contenitore si nota una differenza evidente.

### **Qual è e secondo te a cosa è dovuta? In particolare: se la sostanza miscelata con l'acqua è di un certo colore, cosa succede alla distribuzione dell'intensità luminosa dello stesso colore?**

Questo esperimento dovrebbe aiutarti a capire perché in precedenza abbiamo usato il verbo assorbire parlando della luce che attraversa un mezzo interposta tra sorgente e rivelatore.



## IL SOLE

Adesso che siamo in grado di isolare degli spettri luminosi ed analizzarli, iniziamo a studiare cose più toste, come lo spettro della luce solare. Il procedimento è lo stesso che abbiamo utilizzato con la luce del laser e dei LED, l'unica differenza è che la foto dello spettro, la misura, va eseguita in presenza di luce solare, preferibilmente in una giornata tersa, con poca umidità e in presenza di cielo limpido.

Il Sole è la principale fonte di luce per il nostro pianeta, che gli orbita intorno, nonché stella madre del Sistema Solare. È una nana gialla, una stella di medie dimensioni composta principalmente da idrogeno ed elio. Il picco delle radiazioni solari, comunque in uno spettro molto ampio, è nella frequenza della luce gialla.

*Finora abbiamo lavorato con sorgenti luminose che potevamo controllare e manovrare per creare situazioni ottimali. Ora i giochi diventano più tosti, perché siamo noi a doverci muovere per ottenere risultati migliori.*

Dopo aver scattato la foto dello spettro, usiamo ancora la nostra applicazione e confrontiamola





con quella del laser e quella del LED.

**Cosa noti di diverso? Come risultano i due grafici? Cosa pensi del risultato? Ti aspettavi queste somiglianze e queste differenze? Il punto che presenta l'altezza più alta, cioè il picco di intensità luminosa, coincide nelle curve di distribuzione del LED e della luce solare? Perché? Cosa puoi dedurre?**

Bene! Adesso che abbiamo capito come si cattura uno spettro e come si analizza, possiamo andare alla scoperta delle tantissime fonti luminose con cui entriamo in contatto tutti i giorni, ben oltre quello che ti abbiamo proposto!

## 2.7 È ORA UN PO' DI MATEMATICA

Completiamo il laboratorio lavorando un po' con i dati numerici. L'applicazione per l'analisi dello spettro che stai usando sicuramente permette di esportare i dati (lunghezza d'onda e corrispondente dell'intensità luminosa totale e nelle tre componenti fondamentali) in qualche modo. *Cell Phone Spectrometer* esporta questi dati in un file di testo.

**Esporta i dati dell'analisi del laser rosso e apri il file con un foglio di calcolo.**

Adesso abbiamo quello che ci serve. Vogliamo determinare una funzione che approssimi i dati dell'intensità luminosa totale.

Se non riesci a esportare i dati puoi usare quelli che sono **nella tabella che trovi a pagina 15**.

**Scegli un sistema di riferimento precisando quale informazione sarà riportata sull'asse delle ascisse e quale sull'asse delle ordinate e individua una scala conveniente per l'asse delle ascisse e per l'asse delle ordinate (non è necessario ovviamente che i due assi abbiano la stessa scala).**

Prima di tutto decidi quale grandezza sarà rappresentata sull'asse delle ascisse e quale sull'asse delle ordinate. Tieni conto che l'intensità luminosa è in funzione della lunghezza d'onda. Inoltre la lunghezza d'onda ha valori piuttosto grandi, probabilmente sarà conveniente *traslare* i dati più vicino all'origine, per cui dovrai modificare le lunghezze d'onda in modo opportuno.

**Rappresenta ora i dati su un piano cartesiano con la scala che hai scelto.**

Adesso dobbiamo ridurre la serie di dati in modo da poter lavorare con profitto.



Scegli un sottoinsieme rappresentativo dei dati, scegli i punti che secondo te caratterizzano meglio l'andamento dell'intensità luminosa.



Il Toolbox:  
<http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2018/11/00-Toolbox.pdf>  
suggerisce alcuni metodi per l'approssimazione di dati sperimentali (cfr. Approssimazione mediante polinomi a pagina 13).

Puoi usare il grafico che trovi nella pagina successiva.

**Osserva la disposizione dei punti sul piano cartesiano e la forma della linea spezzata. Quale funzione potrebbe approssimare al meglio l'andamento dei dati che abbiamo rappresentato (una retta, una parabola, una curva esponenziale o, alla peggio, un polinomio)?**

Un modello in questo caso altro non è che una funzione il cui grafico ricalchi il più possibile l'andamento della linea spezzata che abbiamo costruito. Si tratta ora di determinare l'equazione di questa funzione, una funzione che approssimi al meglio i dati.

**Ricava l'equazione di una funzione che secondo te approssima al meglio i dati, ricorda che è sempre possibile approssimare una serie di punti con un polinomio e sei libero di scegliere il grado di questo polinomio. Traccia il grafico di questa funzione nello stesso piano cartesiano in cui hai rappresentato i dati.**

A questo punto non rimane che valutare la qualità del lavoro fatto.

**Il grafico della funzione segue lo stesso andamento, tenendo conto degli inevitabili errori, dei dati?**

Una prima misura della correttezza dell'approssimazione può essere fatta semplicemente osservando il grafico della curva e la linea spezzata che unisce i dati.

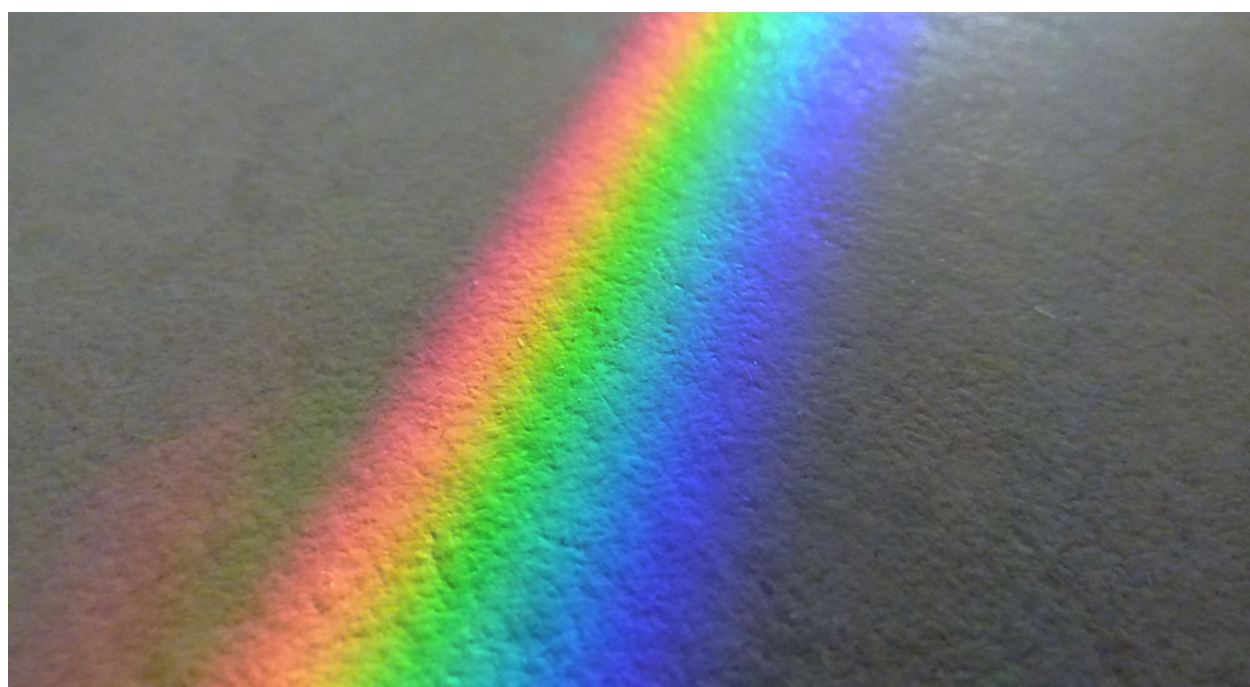


Il Toolbox:  
<http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2018/11/00-Toolbox.pdf>  
suggerisce alcuni metodi per il calcolo dell'errore (cfr. Calcolo dell'errore a pagina 5).

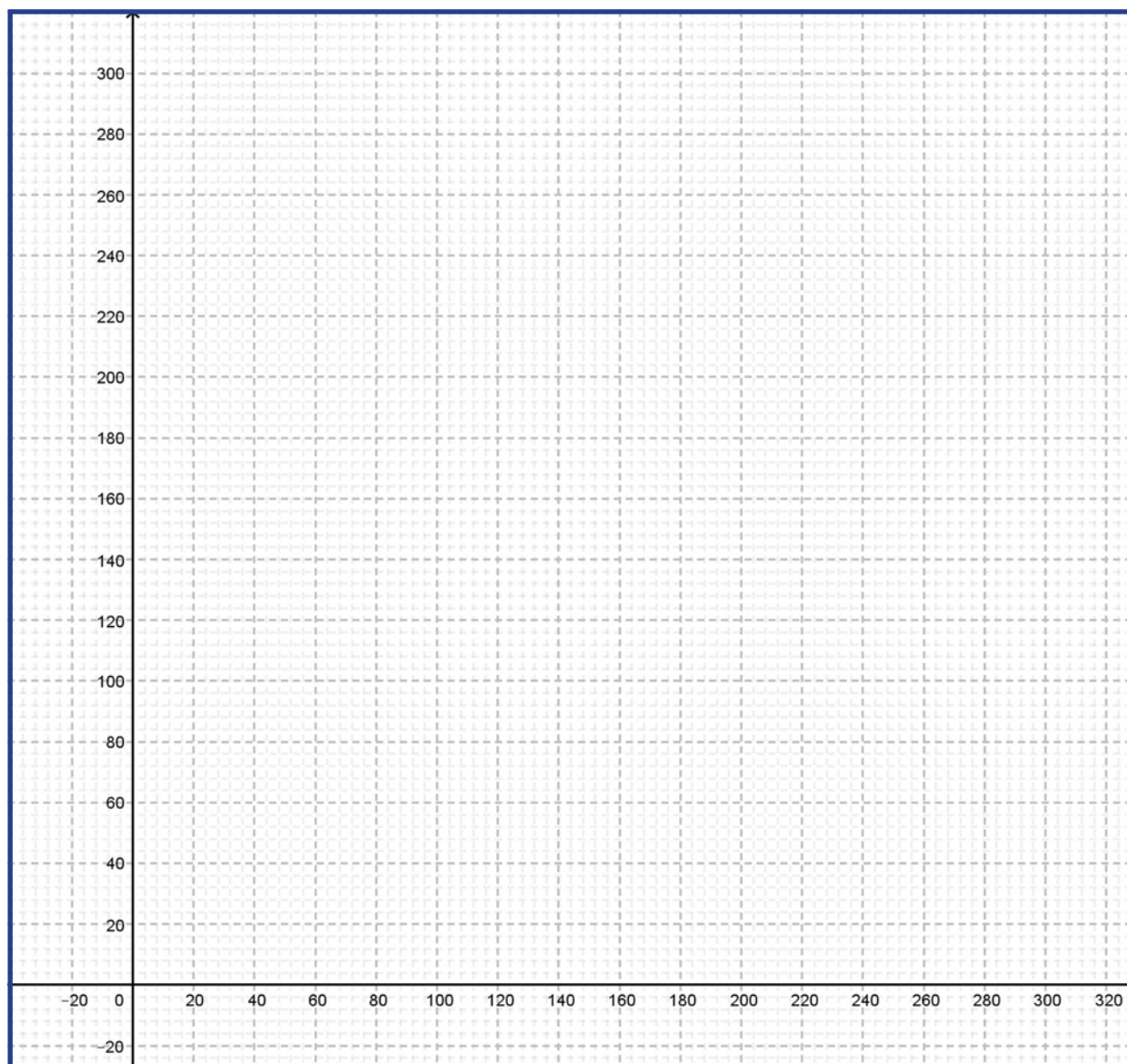
Un esperimento non si conclude con i risultati, in questo caso la legge che descrive il fenomeno, ma si deve fornire anche una misura della qualità del lavoro fatto (misure e calcoli).

**Stima l'errore che si compie calcolando l'allungamento (o la lunghezza) della barra a una certa temperatura usando la funzione che hai trovato rispetto ai valori sperimentali.**

Tieni conto che un errore nell'ordine di  $10^{-2}$  è sicuramente un buon risultato.



$\lambda$ nm	Rosso	Verde	Blu	Totale
400,0	18	154	18	190
417,8	20	161	21	202
435,6	26	169	27	222
453,3	33	222	40	295
471,1	36	223	44	303
488,9	30	213	35	278
506,7	29	210	35	274
524,4	38	216	42	296
542,2	28	231	44	303
560,0	14	223	33	270
577,8	5	221	26	252
595,6	14	219	30	263
613,3	31	224	37	292
631,1	27	201	24	252
648,9	27	201	24	252
666,7	21	183	20	224
684,4	27	199	29	255
702,2	21	172	19	212





# Soluzioni

## Analisi dello spettro - Un mondo luminoso

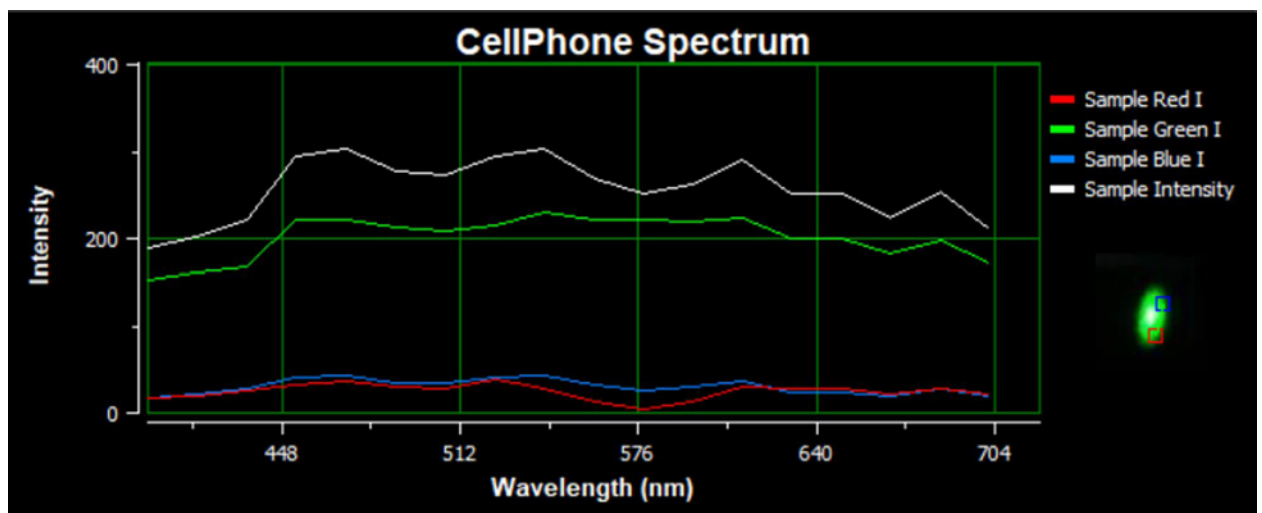
### 3. Soluzioni

#### 3.1 L'ESPERIMENTO

LASER

**Ora che sappiamo cos'è un laser, prendi lo spettroscopio, il telefono e il laser stesso. Punta la luce di uno dei due laser sullo strumento e scatta una foto dello spettro. A questo punto utilizzando un'applicazione come Cell Phone Spectrometer analizza le foto per ricavare le curve di intensità in funzione della lunghezza d'onda.**

Abbiamo descritto, in breve, la procedura per caricare la foto nell'applicazione e per ricavare da questa le informazioni sulla distribuzione dell'intensità. La figura che segue mostra il risultato dell'analisi dello spettro eseguita con *Cell Phone Spectrometer*. Nella zona in basso a destra abbiamo riportato anche la porzione di foto sulla quale abbiamo tracciato il segmento di cui abbiamo misurato l'intensità luminosa.



**Cosa puoi capire dalle curve che lo spettro del laser che hai appena analizzato forma? Cosa succede alla curva che misura la luce verde? E quello delle altre due? Come possiamo notare dai dati del grafico qui sopra, lo spettro del laser verde corrisponde ad un'unica linea, appunto verde, che rimane costante.**

Si nota chiaramente la differenza di intensità tra la componente verde e le altre componenti ma soprattutto si può vedere come l'andamento dell'intensità luminosa ricalchi quasi perfettamente l'andamento dell'intensità della componente verde (è sostanzialmente la stessa curva traslata verso l'alto). Questo sta a significare che l'unica lunghezza d'onda che compone la luce di questo laser è quella verde.

Tuttavia, si vedono anche la curva *R* (rossa) e *B* (blu), mentre ci saremmo aspettati di vedere solo la *G* (verde). Come possiamo spiegare questa anomalia? La risposta è nell'impurità dei dati raccolti ed analizzati: la fotocamera del telefono cattura la maggior intensità del fascio luminoso e la





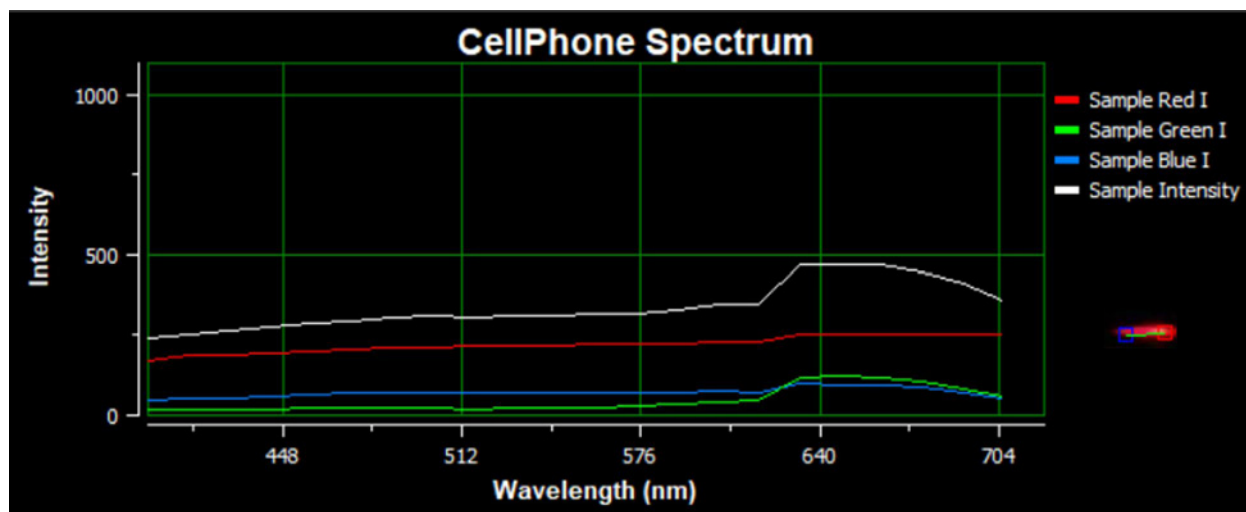
interpreta come luce composta da fasci diversi a lunghezza d'onda varia, cioè luce bianca. Questo errore è poi interpretato dal programma come una compresenza di luce verde, rossa e blu. Scegliendo opportunamente il segmento su cui misurare l'intensità si può ridurre questo effetto.

Un secondo tentativo è stato fatto con la luce di un laser rosso, dal quale abbiamo ottenuto risultati migliori.

**Ripeti l'esperimento con un laser di colore rosso e ricava, di nuovo, la distribuzione dell'intensità rispetto alla lunghezza d'onda. Cos'è cambiato? Quali sono le somiglianze e le differenze?**

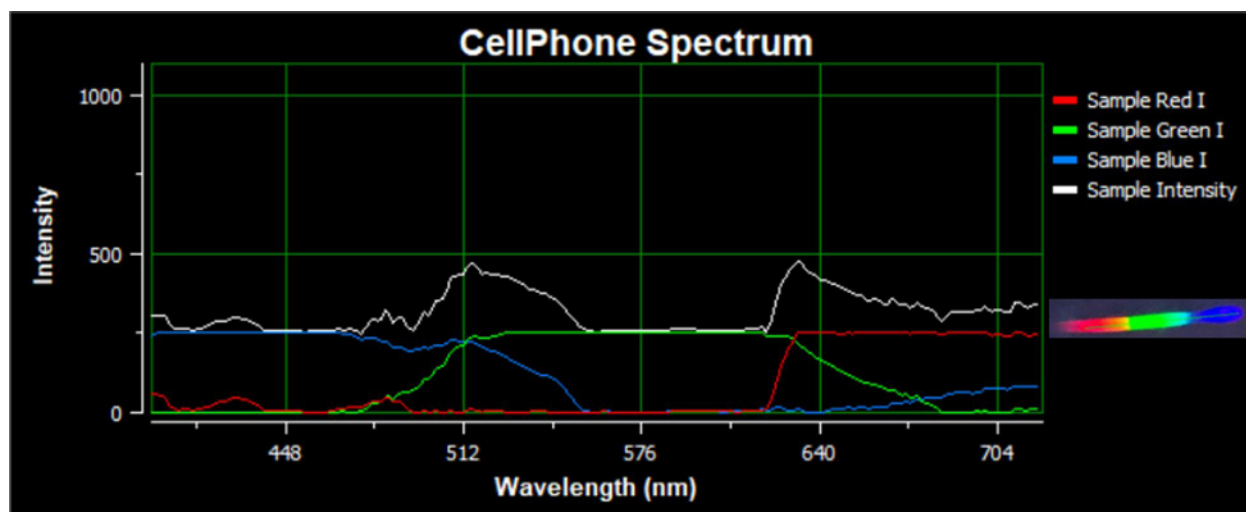
La figura che segue mostra il risultato dell'analisi. Come in precedenza, in basso a destra è mostrata la porzione della foto su cui è stata eseguita l'analisi.

È ben visibile come la linea rossa abbia un'intensità maggiore delle altre due componenti (blu e verde), ciò sta ad indicare che effettivamente l'aspetto dominante è proprio quello della luce rossa. Purtroppo persiste un'anomalia, in particolare nell'intensità della componente verde che però si riflette sull'intensità totale, dovuta a una certa sovrapposizione che produce una piccola zona di colore quasi bianco.

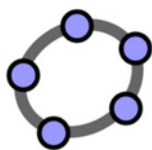


LED

**Come viene *plottato* lo spettro di un LED? E' uguale a quello di un laser? Cosa cambia? Secondo voi, perchè?**



La figura che si trova in basso nella pagina precedente mostra l'analisi eseguita con l'applicazione sulla luce di un LED. Nella stessa figura, nella zona in basso a destra, è riportata la porzione di foto sottoposta ad analisi.



L'analisi dei dati è disponibile sul sito <http://researchinaction.it/> completamente svolto con GeoGebra: <http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2019/05/12-Analisi-dello-spettro.pdf>. Nel foglio di calcolo dello stesso file è disponibile la tabella con i dati originali. GeoGebra si può scaricare qui: <https://www.geogebra.org/>.

Lo spettro di un led è molto diverso da quello di un laser, poiché la sua luce è composta di fotoni (e quindi di onde elementari) che posseggono ognuno una lunghezza d'onda differente e che danno dunque origine a diversi colori. Nell'immagine possiamo infatti notare che lo spettro del led ha picchi in diversi punti e quando la luce rossa è intensa di conseguenza nel grafico la linea rossa è alta, viceversa con la luce blu.

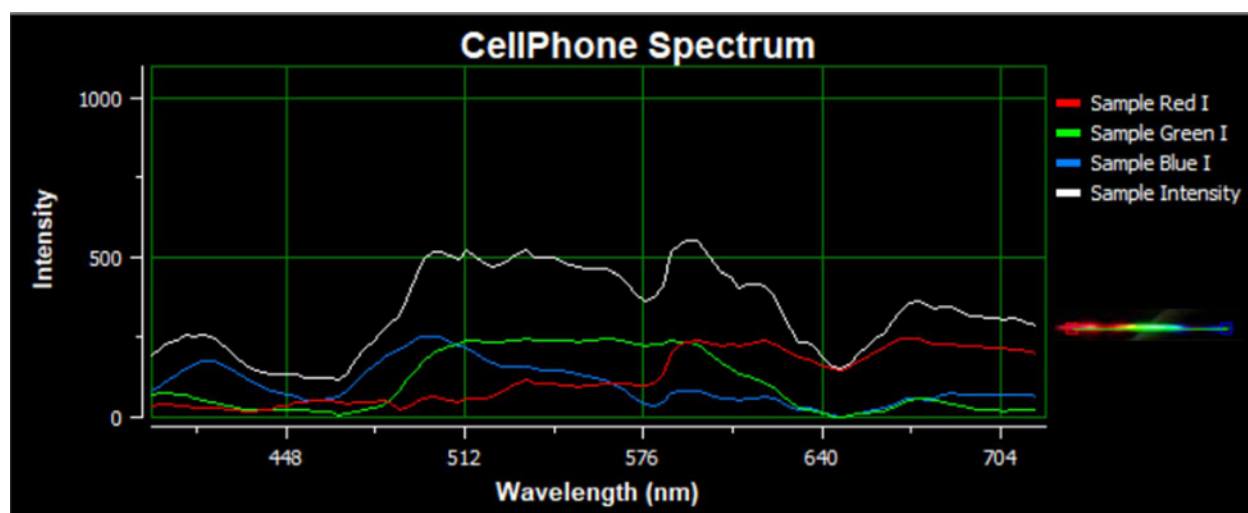
Si nota molto bene come la componente rossa abbia la massima intensità per lunghezze d'onda maggiori e quindi energia minore, la verde per lunghezze d'onda intermedie e la componente blu, infine, per lunghezze d'onda inferiori (quindi con frequenza ed energia maggiori).

La differenza sostanziale tra la luce del laser e quella di un led (o più in generale di una luce normale) è quindi la distribuzione dell'energia rispetto alla lunghezza d'onda. Questo perchè la luce del led, malgrado quanto si potrebbe pensare, non è monocromatica mentre la radiazione emessa dal laser ha un'unica componente fondamentale.

### 3.2 ASSORBIMENTO

Ritentiamo ad analizzare lo spettro di un LED con il reticolo, ma inseriamo tra i due un contenitore trasparente con dell'acqua.

**Cosa succede allo spettro del LED? Ci sono differenze rispetto all'analisi precedente?**



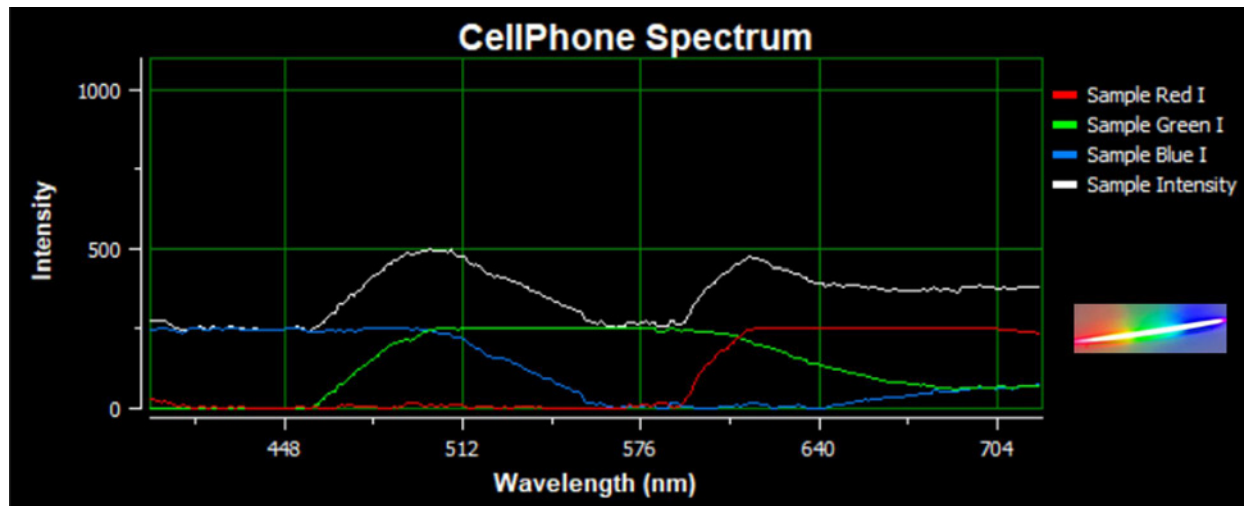
Dopo aver trovato lo spettro di un led, abbiamo provato a interporre tra la luce e il reticolo di diffrazione un piccolo contenitore trasparente contenente una famosa bevanda analcolica di colore scuro. Proprio il colore (tra il nero e il marrone) della bevanda ci ha permesso di notare come sia cambiato lo spettro. La differenza più evidente è la minore intensità della componente blu: la radiazione elettromagnetica corrispondente è stata quasi completamente assorbita dal liquido. Si nota anche che l'intensità totale è maggiore per lunghezze d'onda intermedie e ha un massimo tra il verde e il blu, non a caso.

Infatti il colore della bevanda, tra il nero e il marrone, è dato dalla somma (sintesi additiva) di verde e rosso! È evidente che nel grafico sia quasi perfettamente rappresentata la situazione reale.



**Cosa noti di diverso? Come risultano i due grafici? Cosa pensi del risultato? Ti aspettavi queste somiglianze e queste differenze? Il punto che presenta l'altezza più alta, cioè il picco di intensità luminosa, coincide nelle curve di distribuzione del LED e della luce solare? Perché? Cosa puoi dedurre?**

La figura che segue mostra l'analisi dello spettro solare. Come in precedenza, nella zona in basso a destra della figura abbiamo riportato l'area della foto analizzata.



Il Toolbox:  
<http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2018/11/00-Toolbox.pdf>  
 suggerisce alcuni metodi per il calcolo dell'errore (cfr. Calcolo dell'errore a pagina 5).

Si notano due picchi di intensità luminosa totale nelle lunghezze d'onda corrispondenti al giallo e al ciano (celeste, azzurro molto chiaro). La prima si spiega facilmente: la radiazione emessa dalla nostra stella è maggiore, ha un picco, in corrispondenza delle radiazioni elettromagnetiche corrispondenti alla luce gialle.

Il secondo picco, nelle lunghezze d'onda corrispondenti alla luce azzurra/celeste, è dovuto alla diffusione della luce causata dall'atmosfera, diffusione a sua volta causata dall'interazione della radiazione elettromagnetica con le particelle che compongono l'atmosfera stessa.

In particolare, la diffusione è tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d'onda, è infatti inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda (il fenomeno è detto scattering di Rayleigh e prende il nome dal fisico John William Strutt Rayleigh). Questa dipendenza fa sì che radiazioni di lunghezza d'onda minore (con maggiore energia) siano più diffuse di radiazioni (fotoni) con lunghezza d'onda maggiore.

Questo è anche il motivo per cui il cielo appare di colore blu o azzurro in qualsiasi direzione si guardi: i fotoni corrispondenti, interagendo maggiormente con l'atmosfera, sono molto diffusi e raggiungono l'occhio da direzioni diverse mentre i fotoni corrispondenti alla luce rossa (molto meno energetica e quindi con lunghezze d'onda più lunghe) sono poco interessati dal fenomeno e tendono a raggiungere l'osservatore direttamente dal Sole.

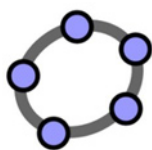
Da notare che all'alba o al tramonto la luce solare deve attraversare uno strato maggiore di atmosfera e quindi la diffusione è ancora maggiore, tanto maggiore che finisce per interessare anche la radiazione elettromagnetica corrispondente al colore giallo: sostanzialmente, in queste condizioni, solo (o prevalentemente) radiazione di colore rosso riesce ad arrivare direttamente e colpire gli oggetti che, quindi, assumono le tonalità che siamo abituati a vedere ed ammirare la sera!



### 3.3 E ORA UN PO' DI MATEMATICA

**Esporta i dati dell'analisi di un laser rosso e apri il file con un foglio di calcolo.**

L'applicazione per l'analisi dello spettro ci ha fornito quello che ci serve, ora cerchiamo l'approssimazione.



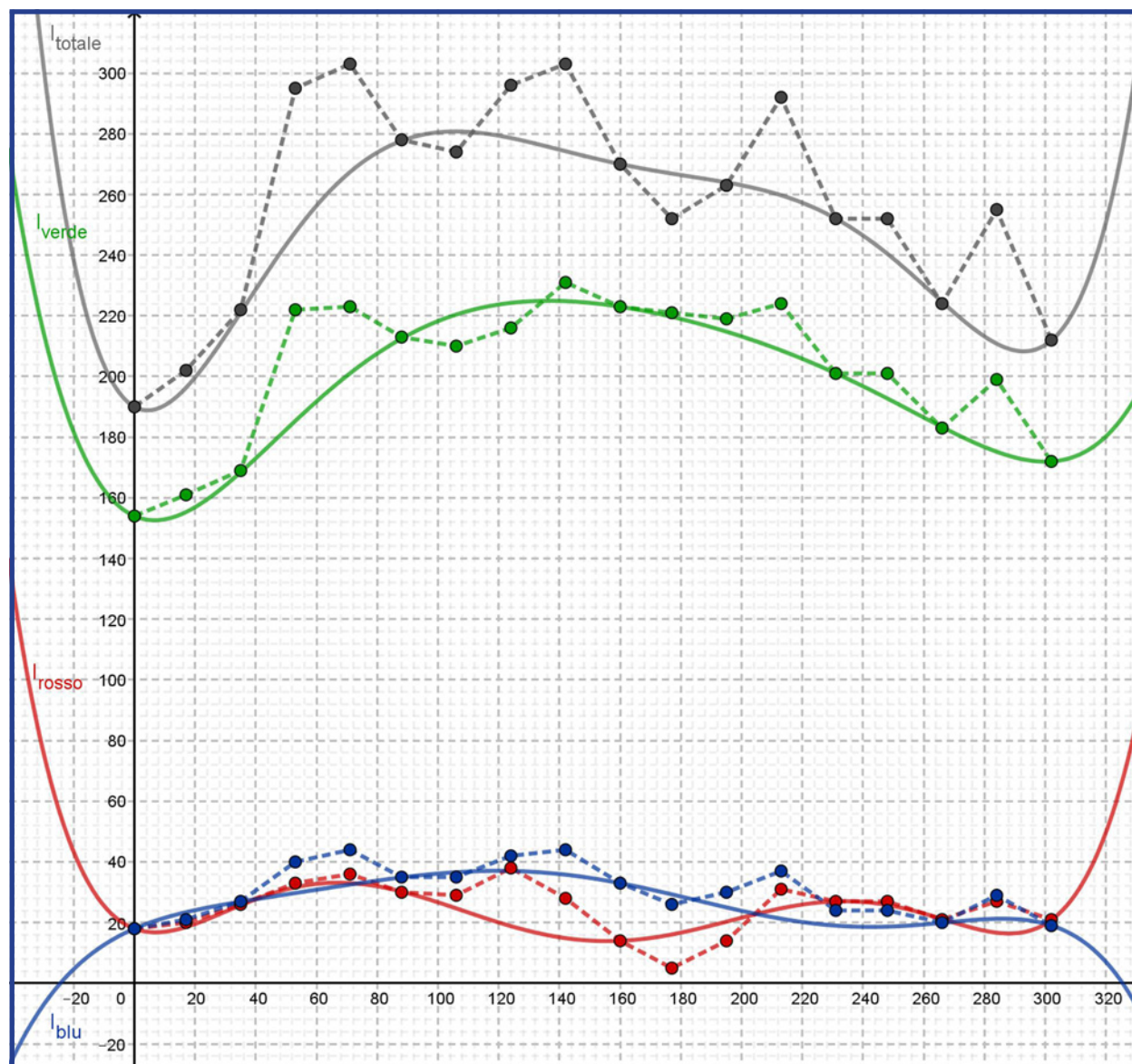
**Scegli un sistema di riferimento precisando quale informazione sarà riportata sull'asse delle ascisse e quale sull'asse delle ordinate e individua una scala conveniente per l'asse delle ascisse e per l'asse delle ordinate (non è necessario ovviamente che i due assi abbiano la stessa scala).**

L'analisi dei dati è disponibile sul sito <http://researchinaction.it/> completamente svolto con GeoGebra:  
<http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2019/05/12-Analisi-dello-spettro.pdf>.  
Nel foglio di calcolo dello stesso file è disponibile la tabella con i dati originali.  
GeoGebra si può scaricare qui: <https://www.geogebra.org/>.

Ovviamente sulle ascisse rappresentiamo la lunghezza d'onda, sulle ordinate l'intensità luminosa totale. Per comodità di lettura abbiamo *traslato* le lunghezze d'onda di  $400\text{nm}$  verso l'origine degli assi (verso *sinistra*). I dati sono rappresentati nel grafico in questa pagina in colore grigio, la spezzata che li unisce è tratteggiata nello stesso colore.

**Rappresenta ora i dati su un piano cartesiano con la scala che hai scelto.**

La figura in basso in questa pagina rappresenta i dati (la linea spezzata in colore scuro) corrispondenti all'intensità luminosa totale della luce del led di cui abbiamo parlato in precedenza.





Osserva la disposizione dei punti sul piano cartesiano e la forma della linea spezzata. Quale funzione potrebbe approssimare al meglio l'andamento dei dati che abbiamo rappresentato (una retta, una parabola, una curva esponenziale o, alla peggio, un polinomio)?



L'andamento non corrisponde a una funzione specifica nota per cui cercheremo una funzione approssimante di tipo polinomiale.

**Ricava l'equazione di una funzione che secondo te approssima al meglio i dati, ricorda che è sempre possibile approssimare una serie di punti con un polinomio e sei libero di scegliere il grado di questo polinomio. Traccia il grafico di questa funzione nello stesso piano cartesiano in cui hai rappresentato i dati.**

Abbiamo scelto di approssimare i dati con un polinomio di sesto grado (e quindi dipendente da sette parametri) e abbiamo imposto che passasse per sette punti scelti in modo da rappresentare in modo quanto più possibile preciso l'andamento della funzione. Per la precisione abbiamo scelto i punti numero 1, 9, 18, 26, 34, 42, 54 della serie. Risolto il sistema, il polinomio è:

$$I_{tot}(\lambda) = 1.9 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda^6 - 1.8 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^5 + 6.3 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^4 + 0.1 \cdot \lambda^2 - 0.6 \cdot \lambda + 190.0$$

La curva corrispondente è tracciata nel grafico che si trova nella pagina precedente in colore grigio. Nello stesso grafico sono rappresentati i dati e tracciati i polinomi approssimanti per le componenti rossa, verde e blu.

**Il grafico della funzione segue lo stesso andamento, tenendo conto degli inevitabili errori, dei dati?**

L'approssimazione è abbastanza soddisfacente ma non del tutto precisa.

Dal sito [researchinaction.it](http://researchinaction.it) è possibile scaricare l'esercizio svolto usando xMaxima: <http://researchinaction.it/wp-content/uploads/2019/05/12-Analisi-dello-spettro.pdf> xMaxima si può scaricare qui: [maxima.sourceforge.net/](http://maxima.sourceforge.net/).



## 4. Esercizi

### 4.1 ANALISI DELLO SPETTRO DELLA LUCE LUNARE

Prova a fotografare lo spettro della luce lunare, magari in una notte di Luna piena con il cielo limpido e privo di umidità.

Analizza con l'applicazione lo spettro e confrontalo con quello della luce solare. Tieni conto che la luminosità della Luna è dovuta alla luce del Sole che viene riflessa dal nostro satellite e che, quindi, parte della luce è assorbita dalla superficie satellite stesso.

### 4.2 ANALISI DELLO SPETTRO DELLA LUCE SOLARE, UN APPROFONDIMENTO

Potrebbe essere interessante, ma non è facile, analizzare lo spettro della luce del Sole a partire da una foto dello spettro stesso presa in alta montagna, magari in una giornata molto limpida.

In alta montagna il fenomeno della diffusione della luce (in particolare della componente blu) è di molto inferiore e diminuisce con l'altitudine e quindi il confronto tra lo spettro della luce solare a livello del mare e quello in altitudine potrebbe riservare qualche sorpresa.

### 4.3 COMPLETARE L'APPROSSIMAZIONE

L'analisi dello spettro del laser rosso dovrebbe aver fornito anche i dati per la componente rossa, verde e blu. Rappresenta i dati di ogni componente su un piano cartesiano e determina una buona approssimazione per ciascuna serie di dati. Se non sei riuscito ad ottenere l'analisi dello spettro o non hai i dati corrispondenti, puoi usare quelli riportati **nella tabella che trovi a pagina 15**.

A questo punto confronta il grafico della funzione approssimante per l'intensità totale e quello per l'intensità della componente rossa. Il risultato non dovrebbe più stupirti!









LSS G.B. GRASSI

LICEO SCIENTIFICO STATALE G.B. GRASSI DI LATINA

[WWW.LICEOGRASSILATINA.ORG](http://WWW.LICEOGRASSILATINA.ORG)

CNR - IAC

ISTITUTO PER LE APPLICAZIONI DEL CALCOLO MAURO PICONE

[WWW.IAC.CNR.ORG](http://WWW.IAC.CNR.ORG)

CNR - IFN ROMA

ISTITUTO DI FOTONICA E NANOTECNOLOGIE

[WWW.ROMA.IFN.CNR.ORG](http://WWW.ROMA.IFN.CNR.ORG)

CNR - INM

ISTITUTO DI INGEGNERIA DEL MARE

[WWW.INSEAN.CNR.ORG](http://WWW.INSEAN.CNR.ORG)

CNR - ISMAR

ISTITUTO DI SCIENZE MARINE

[WWW.ISMAR.CNR.ORG](http://WWW.ISMAR.CNR.ORG)