

PIANO NAZIONALE LAUREE SCIENTIFICHE



LABORATORIO DI OTTICA

<http://www.dmf.unisalento.it/LaureeScientificheFisica>
marialuisa.degiorgi@unisalento.it
fabio.paladini@unisalento.it

OTTICA

Scienza che studia la luce e i fenomeni ad essa collegati

Ottica geometrica

Ignora il carattere ondulatorio della luce e parla di raggi luminosi che si propagano in linea retta.

Fenomeni descritti dall'ottica geometrica:
riflessione e rifrazione

Ottica fisica

Si occupa della natura ondulatoria della luce.

Fenomeni interpretabili solo in termini di ottica ondulatoria:

**interferenza,
diffrazione e
polarizzazione**

Calendario incontri (orario: 15.00-18.00)

14-feb Introduzione e teoria degli errori sperimentali - Verifica della dipendenza dell'intensità luminosa dal quadrato della distanza

21-feb Introduzione su ottica geometrica e verifica della legge di Snell

07-mar Introduzione su ottica ondulatori e studio della diffrazione

21-mar Esperimenti proposti dagli studenti

Date da fissare Discussione dei dati sperimentali e Giornata conclusiva

Misura di grandezze fisiche

Si definisce **grandezza fisica** di un sistema fisico una sua caratteristica (ad esempio lunghezza, massa, velocità ...) sulla quale possa essere eseguita un'**operazione di misura** mediante una **ben definita procedura sperimentale**

La **misura** è l'operazione che assegna in modo **oggettivo e riproducibile** un certo valore alla grandezza, mediante l'uso di strumenti e metodi pratici ed analitici.

Uno strumento di misura è un dispositivo mediante il quale si stabilisce una **corrispondenza tra una grandezza e la sua misura**.

Stima delle incertezze nelle misure fisiche

La parola "errore" non significa equivoco o sbaglio

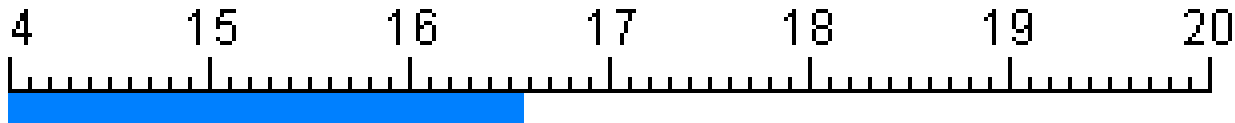
Essa assume il significato di **incertezza** da associare alla misura

**Nessuna quantità fisica può essere
misurata con completa certezza**

Il **valore vero** sarebbe il risultato di un'operazione di misura ideale, priva di errore: tale misura nella realtà è irrealizzabile

Nessuna grandezza fisica può essere determinata con precisione assoluta ma è sempre affetta da una incertezza

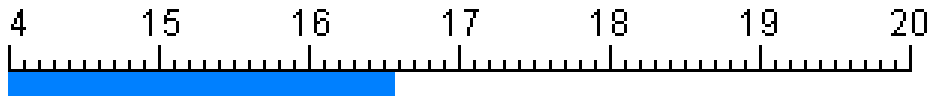
La bontà della misura dipende dal modo in cui la grandezza è misurata (*tipo di strumento, procedura,...*)



$$16.5 \text{ cm} < x < 16.6 \text{ cm}$$

$$x = (16.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

Incertezza assoluta e relativa



$$x = (16.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

L'incertezza assoluta della misura è 0.05 cm (ovvero 0.5 mm)

A parità di incertezza assoluta una misura può essere più o meno precisa a seconda del valore della grandezza misurata.

L'incertezza relativa della misura è data da $\frac{\Delta x}{x}$

$$x_1 = (4.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

$$x_2 = (53.20 \pm 0.05) \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta x_1}{x_1} = \frac{0.05}{4.55} \approx 0.01 (1\%)$$

$$\frac{\Delta x_2}{x_2} = \frac{0.05}{53.20} \approx 0.001 (0.1\%)$$

Se ripetiamo la misura con la stessa riga millimetrata, otteniamo sempre lo stesso risultato



$$16.5 \text{ cm} < x < 16.6 \text{ cm}$$

$$x = (16.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

↑
 Δx

Le misure sono **ripetibili**

&

La precisione della misura e' data dall'**errore di sensibilita'** dello strumento (0.05 cm)

Tuttavia spesso si utilizza come incertezza la divisione più piccola della scala dello strumento

$$x = (16.5 \pm 0.1) \text{ cm}$$

La propagazione degli errori

La maggior parte delle grandezze fisiche non può essere misurata attraverso una singola misura diretta, ma occorre determinarla attraverso due passi distinti: la misura diretta delle singole grandezze e, attraverso queste, il calcolo della quantità cercata.

Per esempio, per misurare l'area della superficie di un tavolo rettangolare, occorre prima effettuare direttamente le misure dei due lati valutando le relative incertezze, poi si passa a calcolare la superficie attraverso il prodotto dei due lati.

Anche la determinazione dell'errore necessita di due fasi:

- a) valutare le incertezze delle grandezze misurate direttamente
- b) trovare come tali incertezze si propagano attraverso i calcoli

La propagazione delle incertezze nelle somme e differenze

$$z_m = x_m + y_m$$

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y$$

$$z_m = x_m - y_m$$

Se diverse grandezze x, y, \dots, w sono misurate con incertezze $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta w$ e tali valori vengono utilizzati per calcolare quantità del tipo

$$z = x + \dots + y - (u + \dots + w)$$

allora l'errore nel valore calcolato di z è pari alla somma di tutti gli errori assoluti originali

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y + \dots + \Delta u + \Delta w$$

Incertezze nei prodotti e nei quozienti

$$z_m = x_m \cdot y_m$$

$$z_m = \frac{x_m}{y_m}$$

$$\frac{\Delta z}{|z_m|} \approx \frac{\Delta x}{|x_m|} + \frac{\Delta y}{|y_m|}$$

Se diverse grandezze x, y, \dots, w sono misurate con incertezze $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta w$ e tali valori vengono utilizzati per calcolare quantità del tipo

$$z = \frac{x \dots y}{u \dots w}$$

allora l'errore relativo nel valore calcolato di z è pari alla somma di tutti gli **errori relativi originali**

$$\frac{\Delta z}{|z|} \approx \frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|} + \dots + \frac{\Delta u}{|u|} + \frac{\Delta w}{|w|}$$

Cifre significative

Ogni numero e' espresso con un determinato numero di cifre

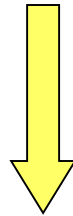
Per numero di **cifre significative** si intende il numero di tutte le cifre scritte, compreso lo 0, a partire da destra fino all'ultima $\neq 0$ a sinistra

Numero	cifre significative
123,4	4
123,42	5
123,420	6
0,04	1
0,042	2
0,0420	3

Il numero di cifre significative del risultato di una misura e' correlato alla bontà della misura e non può essere scelto arbitrariamente

Cifre significative per esprimere l'incertezza

Incertezza massima



1 cifra significativa

Valutato l'errore resta stabilito il numero di cifre significative per esprimere il valore di una misura

Cifre significative per esprimere la misura

Per esprimere una misura si riportano tante cifre in modo che l'ultima corrisponda alla cifra significativa dell'incertezza

ESEMPI

$$x = 26.7842s \quad \Delta x = 0.3472s \quad \Delta x = 0.3s \quad x = (26.8 \pm 0.3)s$$

$$x = 123.8432\text{m/s} \quad \Delta x = 0.0475\text{m/s} \quad \Delta x = 0.05\text{m/s} \quad x = (123.84 \pm 0.05)\text{m/s}$$

$$x = 233.72\text{cm} \quad \Delta x = 1.452\text{cm} \quad \Delta x = 1\text{cm} \quad x = (234 \pm 1)\text{cm}$$

Confronto di due misure e discrepanza

In molte esperienze si determinano due risultati che dovrebbero essere compatibili.

Se due misure sono in disaccordo si dice che tra loro vi è una **discrepanza**.

Numericamente si definisce **discrepanza** la differenza tra due valori misurati della stessa grandezza.

NOTA: una discrepanza **può essere o non essere** significativa.

Esempio

Due studenti misurano la capacità di un condensatore e ottengono i risultati

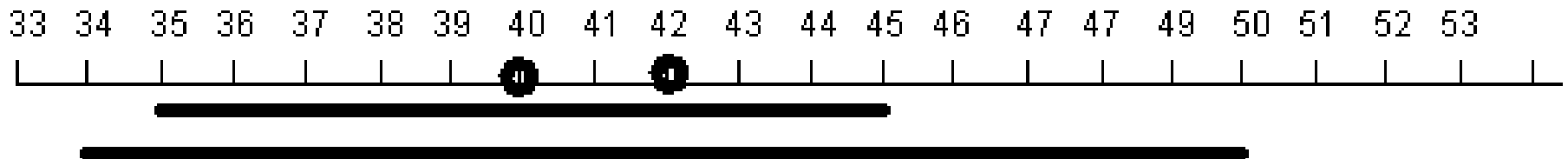
$$C_1 = (40 \pm 5) \text{ nF}$$

e

$$C_2 = (42 \pm 8) \text{ nF}$$

la discrepanza $(42 - 40)$ di 2 nF è minore dei loro errori:

le due misure sono consistenti



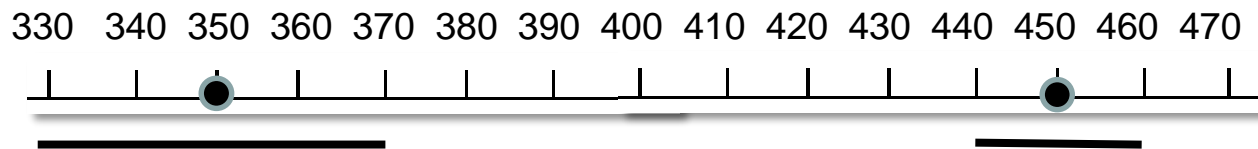
D'altra parte se i risultati fossero stati:

$$C_1 = (350 \pm 20) \text{ nF}$$

e

$$C_1 = (450 \pm 10) \text{ nF}$$

due misure sarebbero state chiaramente inconsistenti e la discrepanza di 100 nF sarebbe significativa.



Ovvero, in generale, se i due intervalli probabili non sono così vicini da sovrapporsi, le misure non sono consistenti.

Occorre verificare l'esistenza di errori, nelle misure o nei calcoli, che abbiano dato luogo a tale discrepanza.

ONDE E CORPUSCOLI

Che cos'è la luce? A partire dal 1600 sono state date due risposte diverse a questa domanda, da cui si sono sviluppati due modelli rivali: il **modello corpuscolare**, proposto da Isaac Newton, e il **modello ondulatorio**, sostenuto da Christiaan Huygens.

Secondo il **modello corpuscolare**, la luce è un flusso di particelle microscopiche (*corpuscoli*) emesse dalle sorgenti luminose.

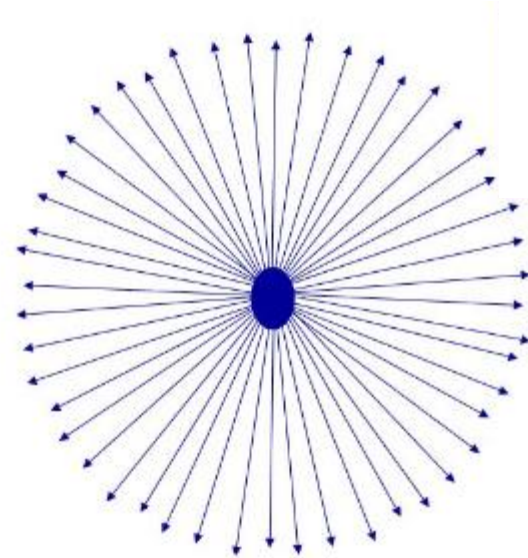


Secondo il **modello ondulatorio**, la luce è un'onda, simile alle onde che si propagano nell'acqua e alle onde sonore.

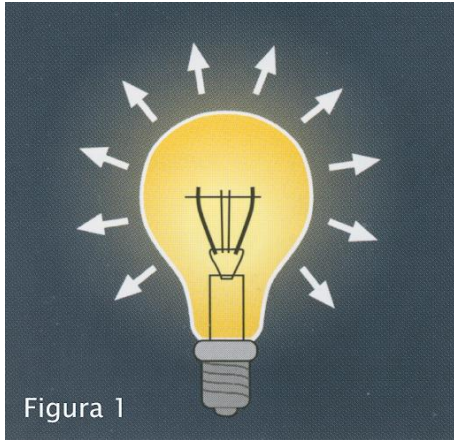


Un'onda elettromagnetica (onda luminosa) trasporta energia.

Una sorgente puntiforme S emette luce (e trasporta energia) in tutte le direzioni.



puntiforme: oggetto di dimensione piccole rispetto alle altre lunghezze in gioco (ad es. distanza di osservazione)



Come varia l'intensità (energia) luminosa di una sorgente al variare della distanza?

Grandezze radiometriche

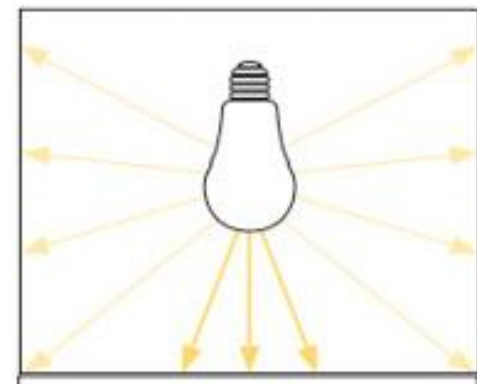
Caratterizzano un'onda luminosa a seconda degli effetti sensoriali che producono nel sistema visivo (occhio-cervello)

Grandezze radiometriche

Intensità luminosa I

Quantità di luce emessa (energia) per unità di tempo (potenza - watt) per unità di angolo solido (udm: steradianne - sr)

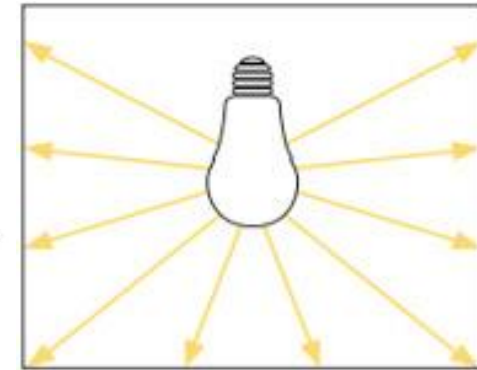
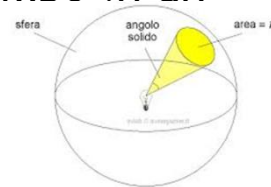
Nel S.I. l'unità di misura è la **candela (cd)**



Flusso luminoso Φ_L

Quantità di luce emessa (energia) per unità di tempo in un angolo solido Ω

$$\Phi_L = I \times \Omega$$



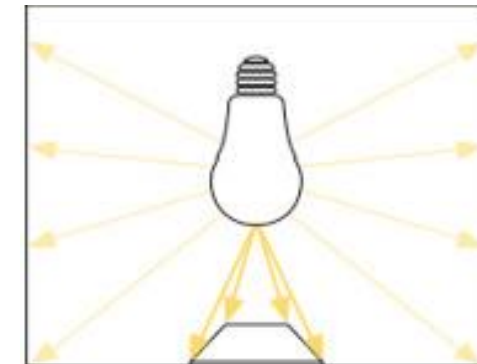
Nel S.I. l'unità di misura è il **lumen (lm)** $\rightarrow 1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \times 1 \text{ sr}$








Illuminamento E_L

È il **rapporto** fra il **flusso luminoso** che arriva perpendicolarmente su una superficie di area A e l'**area A**

$$E_L = \Phi_L / A$$

Nel S.I. l'unità di misura è il **lux (lx)** $\rightarrow 1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / 1 \text{ m}^2$



Sorgente	Potenza approssimativa in watt (W)	Intensità luminosa approssimativa in candele (cd)	
Candela di cera	N/A	1 cd	
Led poco luminosi	decine di mW	decine di mcd	
Led di potenza	qualche watt	qualche decina di cd	
Lampadina a incandescenza	40 W	40 cd	
Lampadina a incandescenza	100 W	130 cd	
Lampada fluorescente	40 W	200 cd	
Proiettore di alta potenza	decine di migliaia di W	milioni o decine di milioni di cd	

Lux e lumen sono unità di misura di due diverse grandezze fisiche:

- i lux sono l'unità di misura dell'illuminamento,
- i lumen sono l'unità di misura del flusso luminoso.

Per dare un'idea della differenza: i lumen di una lampada sono costanti, indipendentemente da quanto vicini o lontani siano i diversi oggetti illuminati, **mentre i lux con i quali gli oggetti sono illuminati variano a seconda che ci si avvicini o allontani dalla lampada.**

Es: Un flusso di 1000 lumen generato da una lampada, concentrato totalmente su una superficie di un metro quadrato, illumina quel metro quadrato per 1000 lux. Tuttavia, gli stessi 1000 lumen, distribuiti su una superficie di dieci metri quadrati, producono un'illuminazione di soli 100 lux.

L'illuminamento misurato in lux si riferisce, quindi, all'oggetto illuminato, e non alla sorgente. Ciò è fondamentale, perché determina quanto una sorgente è in grado di illuminare un corpo o una superficie.

Alcuni dati di illuminamento per dare un'idea di quanto vale un lux:

- ❑ la luce del Sole mediamente varia tra i 32 000 lx (32 klx) e i 100 000 lx (100 klx);
- ❑ sotto i riflettori degli studi televisivi si hanno circa 1 000 lx (1 klx);
- ❑ in un campo di calcio con illuminazione notturna per riprese tv si hanno da un minimo di 500 lx ad un massimo di 1200 lx;
- ❑ in un ufficio luminoso si hanno circa 400 lx;
- ❑ in un ufficio illuminato secondo l'attuale normativa europea Uni En 12464 vi sono 500 lx;
- ❑ la luce riflessa della Luna piena è pari a circa 1 lx;
- ❑ la luce di una stella luminosa è soltanto 0,00005 lx (50 μ lx).

In fisica la **legge di Lambert** riguarda l'illuminamento di una superficie posta a una certa distanza da una sorgente luminosa.

Essa afferma che l'illuminamento prodotto da una sorgente su una superficie è direttamente proporzionale all'intensità luminosa della sorgente e al coseno dell'angolo che la normale alla superficie forma con la direzione dei raggi luminosi ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente

Da questa relazione deriva la **legge dell'inverso del quadrato delle distanze**.



La legge dell'inverso del quadrato

L'illuminazione prodotta dalla sorgente di luce puntiforme, che irradia uniformemente in tutte le direzioni, segue la cosiddetta Legge dell'inverso del quadrato. Essa esprime il fatto che il quantitativo di energia che passa attraverso l'unità di area diminuisce con la distanza dalla sorgente. La totale potenza irradiata da una sorgente in tutte le direzioni (nell'intero angolo solido) rimane costante, mentre l'area totale della sfera cresce con il quadrato del raggio.

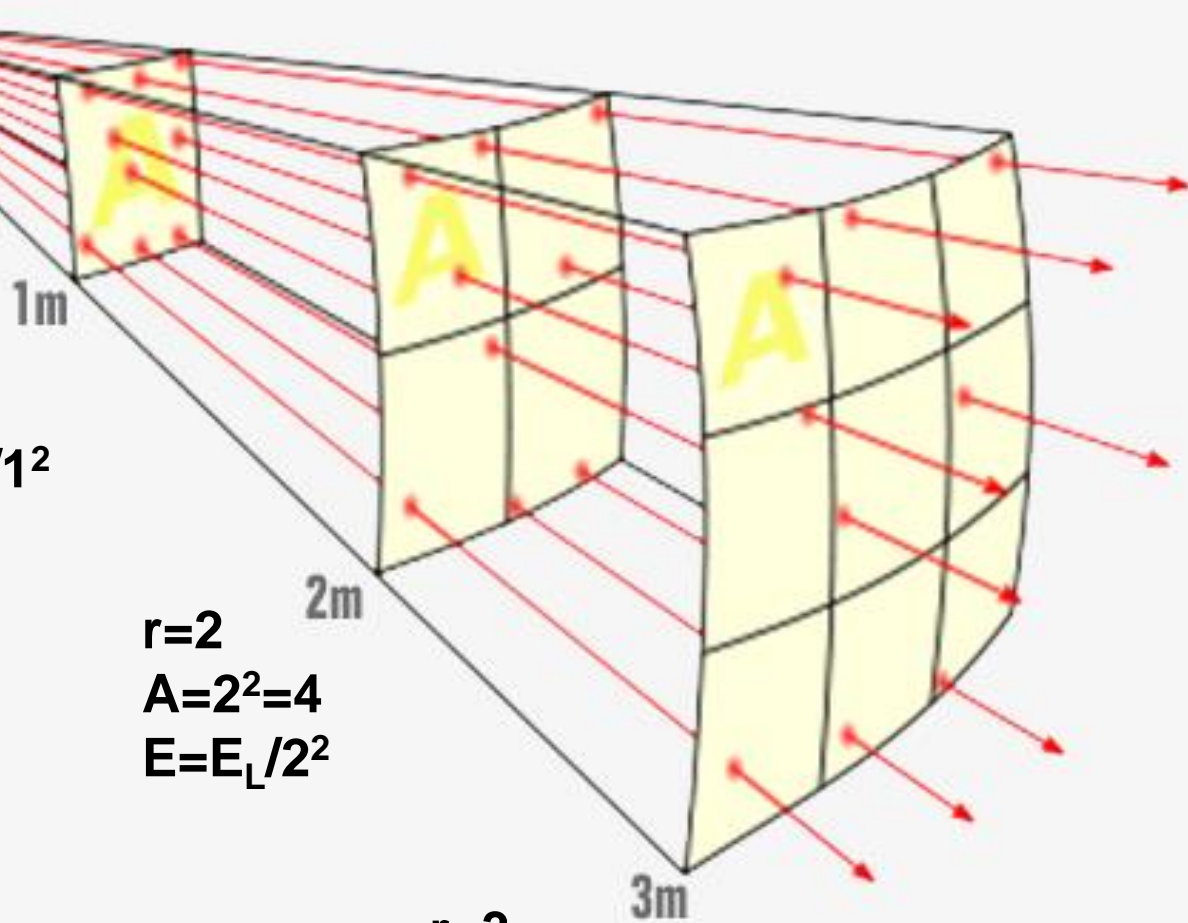
Così, la potenza per unità di area decresce - come mostrato nella figura.

sorgente luminosa

$r=1$
 $A=1$
 $E=E_L/1^2$

$r=2$
 $A=2^2=4$
 $E=E_L/2^2$

$r=3$
 $A=3^2=9$
 $E=E_L/3^2$

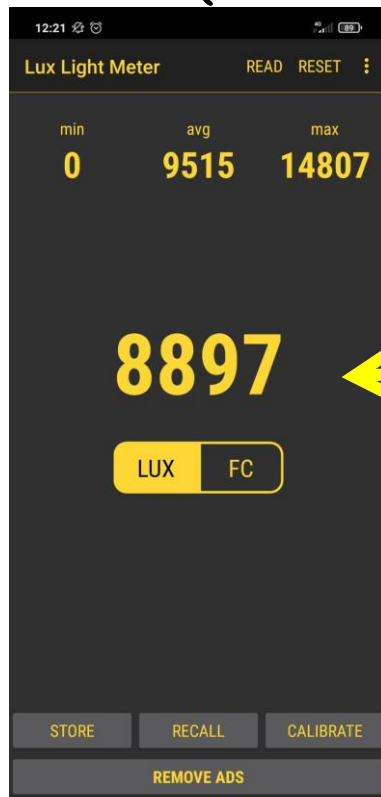


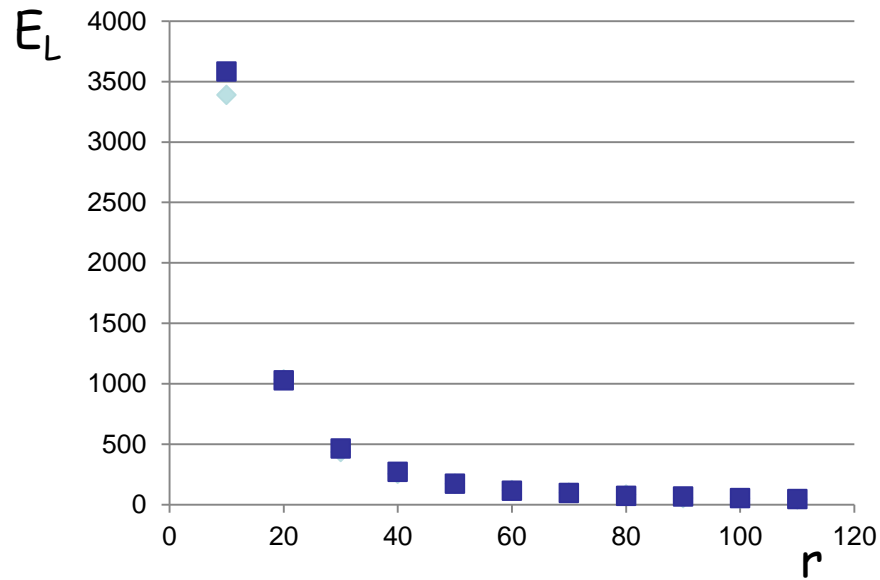
Esperienza

- Verifica della legge della legge dell'inverso della distanza al quadrato

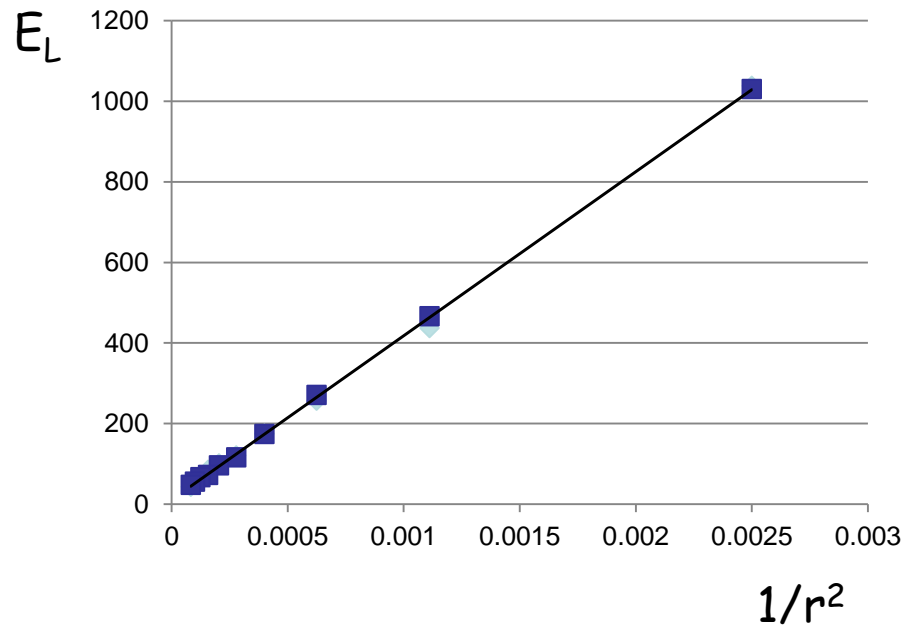
Strumentazione e materiale a disposizione

- Sorgente luminosa
- Banco ottico munito di metro
- Luxmetro (sensore misuratore dell'illuminamento)





$$E_L = f(r)$$



$$E_L = f(1/r^2)$$