

CHE COSA SIGNIFICA "VEDERE"?

Questo problema ha incuriosito per secoli il genere umano: dall'inizio della storia della scienza e del pensiero, scienziati e filosofi si sono confrontati sul significato di questa domanda e hanno prodotto diversi modelli interpretativi fino ad introdurre un ente chiamato

"LUCE"

e a studiarlo anche separatamente dalla visione.

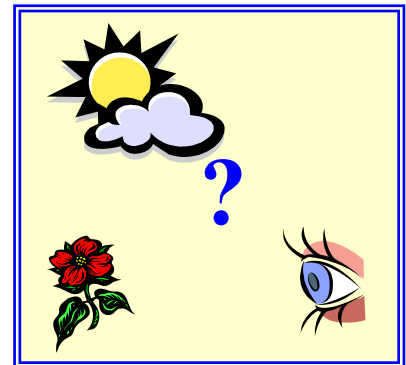
Collegamento a: [cenni storici](http://www.liceorecanati.it/fisica/testi/indice.htm)
<http://www.liceorecanati.it/fisica/testi/indice.htm>

Una prima schematizzazione dei fenomeni luminosi in un mezzo omogeneo trasparente porta ad individuare tre categorie di corpi:

Chi produce luce: sorgenti → ([collegamento a pag. 2](#))

Oggetti visibili: sorgenti secondarie

Occhio, strumento,: sensori di luce → ([collegamento a pag. 9](#))



e la LUCE come ente mediatore tra loro.

Ogni volta che vogliamo descrivere uno degli oggetti indicati e i fenomeni in cui sono coinvolti non possiamo fare a meno di chiederci:

**Cosa chiamiamo luce?
Qual è la natura della luce, quali modelli utilizziamo per descriverla?**

([collegamento a pag. 3](#))

SORGENTI DI LUCE

Certi oggetti ci appaiono luminosi di per sé come il sole, i diversi tipi di fiamma, una lucciola...

sono sorgenti primarie, emettono luce utilizzando energia prodotta da processi che avvengono al loro interno:



Sole

reazioni nucleari → **energia luminosa**



Fuoco

reazione chimica: la combustione → **energia luminosa**



Lampadina

riscaldamento fino ad incandescenza del filamento → **energia luminosa**



Lucciola

reazione chimica catalizzata da un enzima → **energia luminosa**

Dunque le sorgenti di luce sono in grado di trasformare energia da una forma ad un'altra che viene emessa come luce.

Altri corpi (sorgenti secondarie) come la luna e molti degli oggetti che ci circondano "non sanno" trasformare energia in luce: ricevono energia luminosa da una sorgente primaria e la riemettono, in parte trasformata, ma sempre sotto forma di energia luminosa.

Un oggetto illuminato può talvolta servire ad illuminarne un altro: così la luna illumina la terra di notte.

La visione degli oggetti avviene quando la luce emessa dagli oggetti entra nell'occhio.

NB stiamo utilizzando un **modello**:

la luce è "qualcosa" che viene emessa continuamente dalla sorgente primaria, si propaga nello spazio, viene riflessa/diffusa da alcuni oggetti e stimola delle reazioni in altri.

Una ulteriore schematizzazione è la distinzione tra sorgenti puntiformi (sorgenti ideali che si immaginano costituite da un solo punto) e sorgenti estese.

Una sorgente puntiforme è immaginata come un punto-sorgente nello spazio vuoto o in un mezzo omogeneo; l'emissione è simmetrica intorno al punto e la luce diffonde in tutto lo spazio ([collegamento a pag.11](#)).

Per immaginare come possa propagarsi nello spazio qualcosa che lo riempie tutto si sono utilizzati storicamente (e in un certo senso ancora coesistono) due modelli ([collegamento a pag.3](#)): uno che immagina che la sorgente emetta in tutte le direzioni **particelle** velocissime che si susseguono, l'altro che la sorgente emetta **onde sferiche** che hanno origine nel punto e vanno via allargandosi nello spazio mentre altre vengono emesse.

In entrambi i casi occorre qualcosa che indica la direzione in cui la luce (onde o particelle) "si propaga", un buon modello per questo può essere quello "**a raggi**" ([collegamento a pag. 5-6](#)); essi vanno intesi come gli assi centrali di conetti elementari in cui tutto lo spazio si immagina suddiviso, per non incappare nel problema del "cadere tra un raggio e l'altro" nel caso di un fascio divergente.

Si può immaginare qualsiasi sorgente estesa di luce (primaria o secondaria) come fatta di infiniti punti sorgente che emettono luce nello spazio.

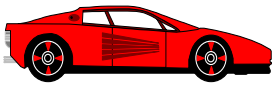
Per approfondimenti:
Collegamento alla pag. SeCiF

MODELLI

Nel **linguaggio comune** la parola modello ha un gran numero di significati.



Modello: abito con un taglio particolare



Modello: riproduzione in scala di un oggetto



Modella: presenta abiti ad una sfilata di moda



Modello: persona che si presta come soggetto per un pittore

Nel **linguaggio della fisica** si utilizza il termine modello nel significato di *rappresentazione di un fenomeno o di un sistema complesso di elementi interagenti*.

I modelli possono essere qualitativi, semiquantitativi e quantitativi; la maggior parte dei modelli fisici fa parte di quest'ultima categoria in quanto modelli espressi attraverso il linguaggio matematico.

Il modello viene utilizzato per interpretare le cause e predire le conseguenze del fenomeno fisico che si propone di descrivere.

Nel corso della storia, studiando i fenomeni luminosi, l'uomo ha ideato alcuni modelli differenti, ma non necessariamente contrapposti; ciascuno di essi è in grado di rappresentare con efficacia uno o più fenomeni:

Ecco alcuni esempi:

Modello degli spazi di luce

[\(collegamento a pag. 5-6\)](#)

Modello dei raggi di luce

[\(collegamento a pag. 7-8\)](#)

Modello corpuscolare

Modello ondulatorio

Collegamento a progetto SeCiF, parte di ottica fisica fatta dall'unita' di Udine

Nell'azione didattica non si può fare a meno di utilizzare i modelli per descrivere i fenomeni luminosi, ma questa operazione deve essere svolta con consapevolezza ([collegamento a pag. 4](#)).

MODELLI E DIDATTICA

Per descrivere ed interpretare i fenomeni luminosi l'uomo ha ideato nel corso della storia modelli differenti che hanno avuto fortune alterne; ciascuno di essi è stato in grado di interpretare con efficacia gruppi di fenomeni noti e di predire di nuovi.

Ancora oggi coesistono due modelli fondamentali: quello corpuscolare e quello ondulatorio seppure ai termini particella e onda vanno attribuiti significati diversi da quelli intuitivi o della fisica classica.



Spesso nell'azione didattica si passa implicitamente da un modello all'altro, utilizzando di volta in volta quello più funzionale alla rappresentazione del fenomeno in esame dal punto di vista disciplinare.

Questa procedura è fonte di disorientamento per l'alunno non consapevole:

- ⇒ del fatto che **il modello è una rappresentazione concettuale di un fenomeno reale ed è ben distinto dal fenomeno stesso;**
- ⇒ del processo di modellizzazione che ha portato alle rappresentazioni e interpretazioni che gli vengono proposti dal libro o dall'insegnante;



Disorientamento viene creato anche dalla mancata esplicitazione delle relazioni esistenti tra i vari modelli:

- il modello dei raggi di luce e quello particellare non sono contrapposti: i raggi si possono immaginare come la rappresentazione delle traiettorie delle particelle;
- il modello dei raggi di luce e quello ondulatorio non sono contrapposti: il raggio può rappresentare la direzione di propagazione dell'onda; l'onda però ha qualcosa in più del raggio perché porta altre informazioni oltre alla direzione di propagazione;
- tra il modello degli spazi di luce e di ombra e quello a raggi di luce c'è il nodo del passaggio da una descrizione continua ad una discontinua;
- inoltre va gestita l'incompatibilità che il senso comune attribuisce alla natura di onda e di particella

Collegamento
a rosa SENIS

**Per approfondimenti: collegamento a progetto SeCiF,
parte di ottica fisica fatta dall'unità di Udine**



Un aspetto critico è anche quello del salto tra la rappresentazione **bidimensionale e tridimensionale**:

la luce occupa spazio; le fenomenologie fisiche legate alla luce, al suo propagarsi e interagire con la materia avvengono nello spazio tridimensionale.

Tali sono anche i modelli che li descrivono e li interpretano, ma usualmente dai libri di testo sono proposte solo rappresentazioni con pochi raggi tracciati su sezioni piane.



Un aspetto che può essere opportuno non dare per scontato è che lo stesso fenomeno può essere efficacemente interpretato con modelli diversi: es. riflessione, con modello ondulatorio e a raggi.

Ogni modello ha molti vantaggi, ma ha inesorabilmente dei limiti di applicabilità e degli aspetti che non prende in considerazione.

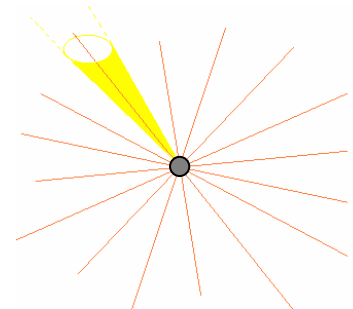
MODELLO DEI RAGGI DI LUCE

Il modello a raggi descrive i fenomeni luminosi utilizzando porzioni di rette che collegano i tre attori della visione: sorgente, oggetto, recettore.

Il modello “a raggi” non dice nulla della natura della luce, ma soddisfa l’esigenza di indicare la direzione in cui la luce si propaga ed è utilizzato per descrivere numerosi fenomeni:

Emissione di luce da sorgenti puntiformi:

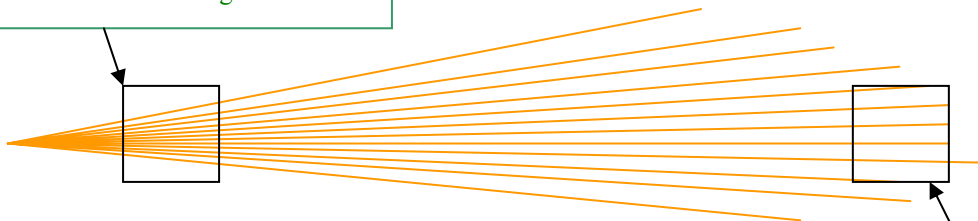
un punto-sorgente nello spazio vuoto o in un mezzo omogeneo emette in modo simmetrico intorno a se stesso e la luce occuperà tutto lo spazio. L'emissione viene rappresentata dai **raggi**, semirette uscenti in modo simmetrico dalla sorgente.



Per non incappare nel problema del "cadere tra un raggio e l'altro" nel caso di un fascio divergente, i raggi sono intesi come gli assi centrali di conetti elementari in cui si immagina suddiviso tutto lo spazio.

Utilizzando questo modello si possono interpretare ed unificare due fenomeni apparentemente diversi: luce emessa dal sole (raggi paralleli) e luce emessa da una lampadina (raggi divergenti, cioè che si allontanano tra loro nel verso di propagazione)

In prossimità della sorgente i raggi sono chiaramente divergenti.

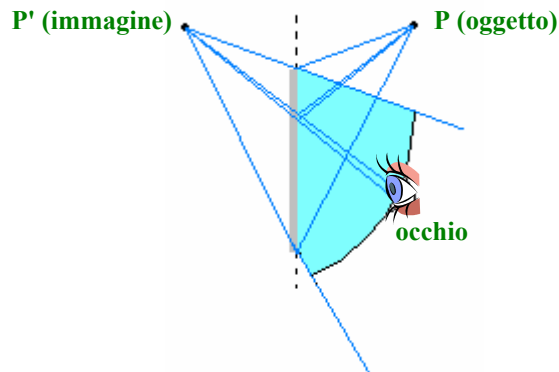


Allontanandosi della sorgente la divergenza non è più percepibile, i raggi ci sembrano paralleli

NB: questa schematizzazione dell'emissione di una sorgente puntiforme è già selettiva: l'emissione luminosa non è rappresentata in tutto lo spazio, ma limitata solo all'angolo utile per la spiegazione corrente.

Riflessione

Immagine formata da uno specchio piano. I raggi provenienti dall'oggetto P, che incidono sullo specchio ed entrano nell'occhio, sembrano provenire da un oggetto posto dietro lo specchio.



L'immagine può essere vista dall'occhio in ogni punto della zona ombreggiata

NB: Perché nel disegno sono stati tracciati solo 4 raggi e non altri?

Tutta l'**ottica geometrica** utilizza ampiamente il modello a raggi per studiare la formazione di immagini di specchi e lenti.

L'utilizzo didattico di rappresentazioni grafiche di fenomeni luminosi, basate su questo modello presenta alcuni **aspetti critici**:

- il salto tra rappresentazione **bidimensionale e tridimensionale**: i fenomeni luminosi sono tridimensionali, la maggior parte dei disegni basati su questo modello è bidimensionale.
- usualmente nei disegni viene rappresentato il percorso di **un numero finito di "raggi notevoli"**, scelti, tra gli infiniti possibili, secondo criteri precisi; tuttavia i criteri raramente vengono esplicitati

- non va inoltre dimenticato che alla parola raggio i ragazzi possono attribuire il **duplice significato di raggio di vista o di raggio di luce**.

L'idea che "qualcosa" esca dall'occhio e vada verso l'oggetto permettendoci di vedere è molto forte e può interferire nella corretta formazione del concetto di raggio; catturare la luce con l'acchiapparaggi può contribuire alla costruire l'idea di raggio di luce.

Se la mediazione didattica non conduce i ragazzi a riflessioni consapevoli su questi aspetti, l'utilizzo in classe di queste rappresentazioni grafiche rischia di ridursi ad un gioco di prestigio.

SPAZI DI LUCE E DI OMBRA

A cura di Enrica Giordano e Annalisa Salomone

Nella vita quotidiana siamo immersi in un mare di luce che diamo per scontato e di cui non ci rendiamo conto. La **luce non si vede**, per studiarla bisogna costringerla a mostrarsi facendola interagire con materiali ed oggetti diversi: possiamo cercare di "acchiapparla" facendola passare attraverso tubi e fori o interponendo superfici.

Si può cominciare a lavorare in interno con sorgenti il più possibili puntiformi (oppure in esterno col sole) e con fori abbastanza grandi creati in schermi opachi.

Gli **spazi riempiti dalla luce** dopo aver attraversato i fori possono essere studiati guardando le intersezioni con superfici diversamente orientate (si ripropone la discretizzazione del continuo).

Analogamente si può lavorare ponendo di fronte alla sorgente oggetti che intercettano la luce e fanno ombra: **gli spazi d'ombra sono allora i "complementari" degli spazi di luce.**¹

Come la luce anche **l'ombra non si vede nello spazio**, ma deve essere intercettata².

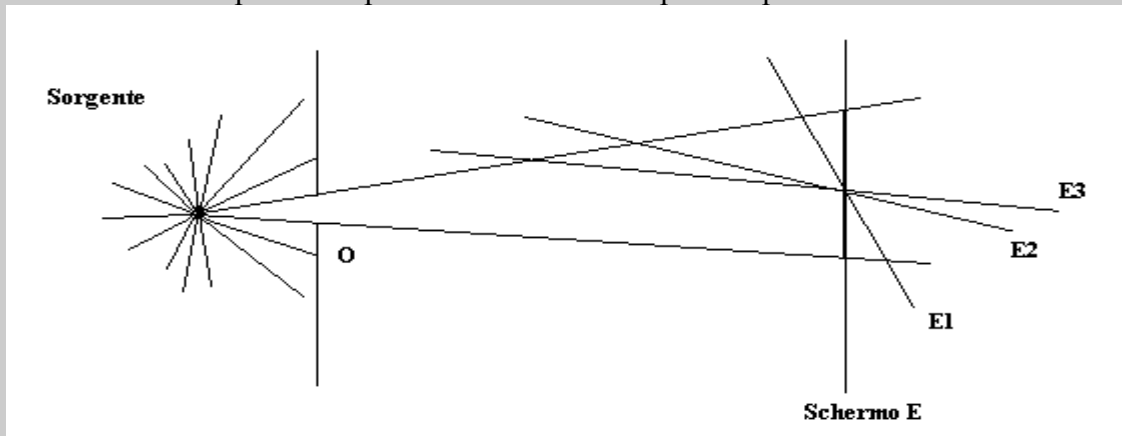
E' bene notare che i ragazzi individuano gli **spazi** di luce e di ombra solo attraverso prove pratiche.

Ogni spiegazione sulla carta o sulla lavagna non è di immediata interpretazione e richiede un livello piuttosto alto di astrazione.

I disegni che seguono sono alcuni degli esempi più comuni tra quelli che si trovano generalmente sui libri di testo. Queste rappresentazioni apparentemente di facile lettura, contengono in realtà una serie di scelte non esplicite e di difficoltà di interpretazione.

SPAZI di LUCE

Consideriamo una sorgente puntiforme e riceviamo su uno schermo E la luce emessa dalla sorgente e che ha attraversato una apertura O praticata su una sottile parete opaca:



La macchia luminosa osservata sullo schermo E è nettamente delimitata e corrisponde alla sezione con lo schermo del cono avente come vertice la sorgente e che si appoggia sul contorno del foro O.

Se spostiamo lo schermo mantenendolo parallelo al piano che contiene il foro, le macchie luminose osservate sono omotetiche e hanno la sorgente come centro di omotetia.

Se il foro O è circolare, la macchia sullo schermo E sarà:

- circolare, se lo schermo e la parete con il foro sono paralleli (E)
- può risultare un'ellisse (E1), una parabola (E2) o un'iperbole (E3) a seconda che lo schermo sia più o meno inclinato rispetto all'asse del fascio.

DIFFICOLTA':

- il disegno è stato ottenuto sfruttando il modello a raggi, utilizzando solo pochi raggi sulla cui selezione non sono stati esplicitati i motivi;
- il disegno è una rappresentazione bidimensionale di un fenomeno tridimensionale: è una sezione dello spazio lungo un piano perpendicolare allo schermo;

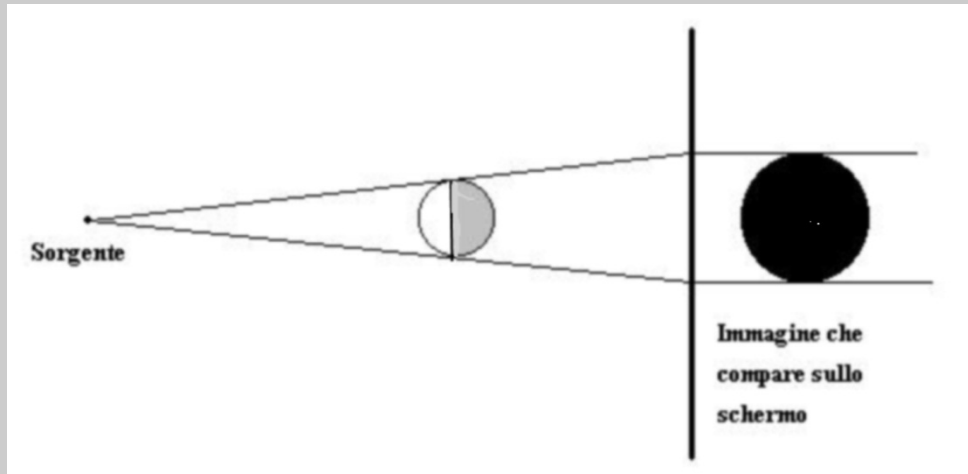
¹ Facciamo riferimento ad esempio a figure piane che fanno ombra ritagliate da cartoncini opachi nei quali quindi si crea un foro. Gli spazi di luce e ombra nei due casi sono "complementari" possiamo dire

² si può anche sentire col proprio corpo la tridimensionalità entrando e uscendo dagli spazi d'ombra, è sempre una intersezione ma vissuta "dall'interno"

- nel disegno non si vedono la forma del foro sul primo schermo e della macchia di luce sul secondo;
- tutto quanto detto fino ad ora presuppone che i due piani contenenti i foro O e lo schermo E siano paralleli e questo fatto non è esplicitato e neppure evidente nella figura (il fatto che due rette appartenenti a due piani siano parallele non è una condizione sufficiente perché lo siano anche i due piani)

SPAZI di OMBRA

1) Con una sorgente puntiforme e oggetto sferico sullo schermo compare un'ombra con contorno netto.

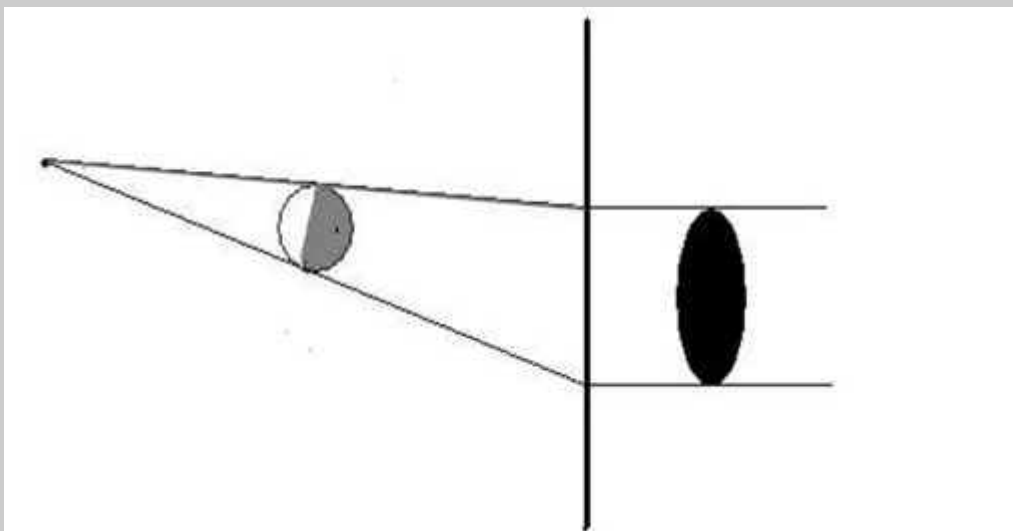


DIFFICOLTA':

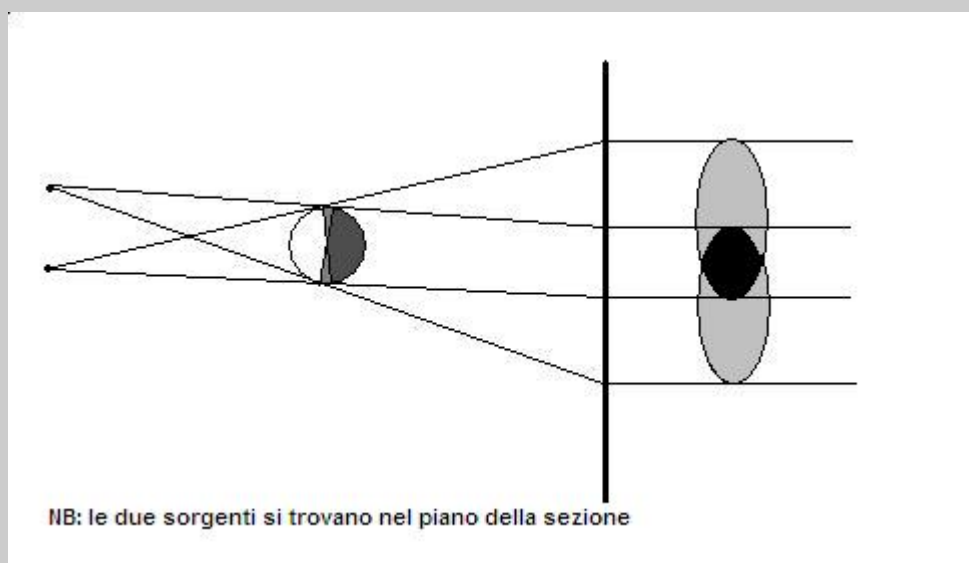
- come nel caso precedente il disegno è stato ottenuto sfruttando il modello a raggi, utilizzando solo pochi raggi, sulla cui selezione non sono stati esplicitati i motivi;
- il disegno è una rappresentazione bidimensionale di un fenomeno tridimensionale; in questo caso la difficoltà di interpretazione è aggravata dal fatto che sono rappresentate due sezioni perpendicolari tra loro;
- questo disegno inoltre può produrre l'**erronea convinzione che la forma dell'ombra sia sempre la stessa di quella del corpo** o di una sua parte o sezione che intercetta la luce; in realtà questo fatto avviene solo in condizioni molto particolari: 1) la sorgente puntiforme ed il centro dell'oggetto sferico stanno in un piano perpendicolare allo schermo; 2) la sorgente puntiforme ed il centro dell'oggetto sferico stanno su una retta di questo piano perpendicolare allo schermo.

2) Ecco alcune situazioni con sorgenti puntiformi e con il corpo sferico che intercetta la luce, nelle quali l'ombra non è circolare (la figura d'ombra non può in ogni caso essere sferica).

- Una sorgente puntiforme:



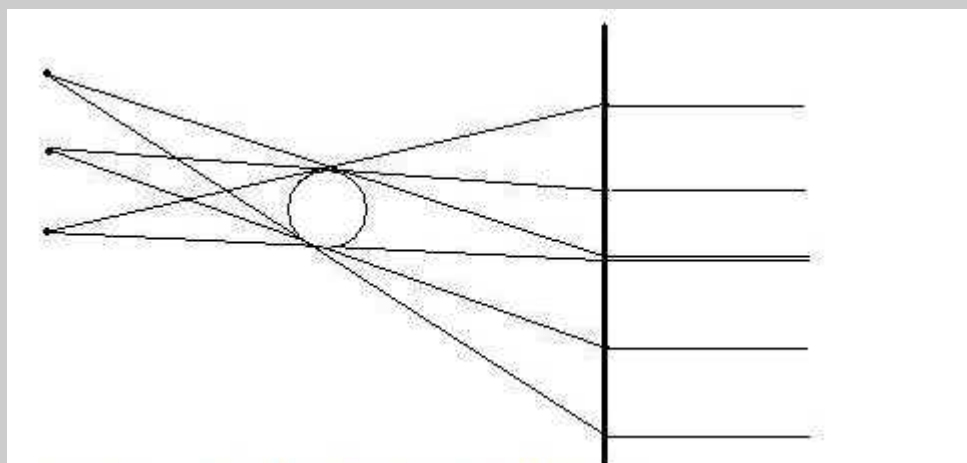
- Due sorgenti puntiformi:



DIFFICOLTA': oltre alle difficoltà comuni con i disegni precedenti, osservando gli ultimi due disegni si rischia di non prendere coscienza del fatto che sono ancora realizzati in situazioni particolari: ciascuna sorgente ed il centro del corpo opaco giacciono su una retta non perpendicolare alla sezione rappresentata dello schermo, tuttavia le due rette giacciono su un piano perpendicolare allo schermo. Senza questa restrizione l'ombra risulterebbe ulteriormente deformata.

ESERCIZIO: prova a disegnare:

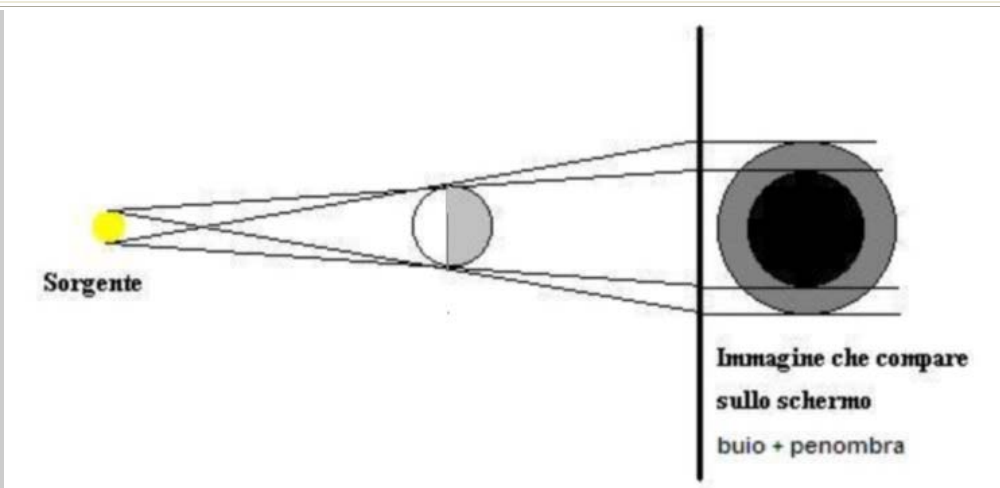
- che cosa accade con tre sorgenti puntiformi, completando il seguente disegno (nella situazione particolare in cui il piano dove si trovano le sorgenti ed il centro del corpo opaco è perpendicolare al piano dello schermo)



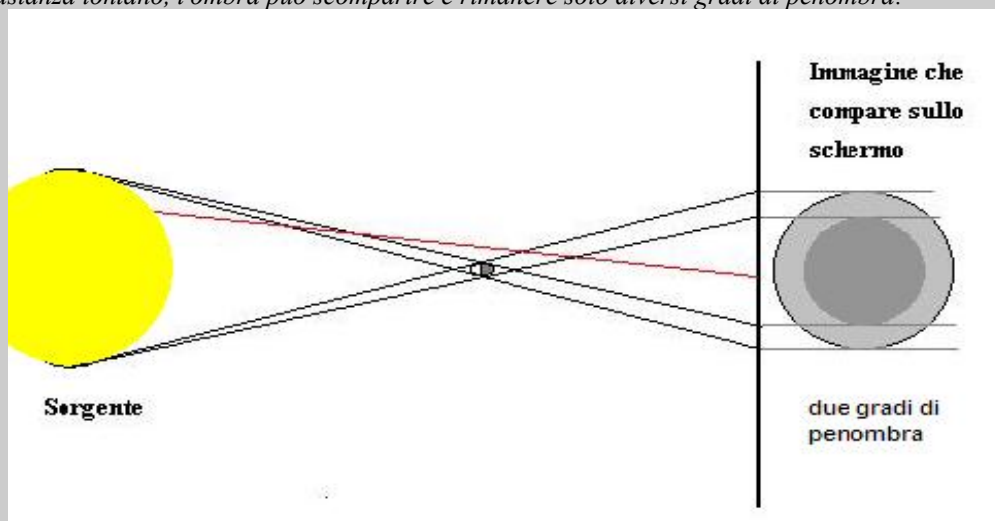
- che cosa accadrebbe se anche il piano in cui si trovano le sorgenti ed il centro del corpo opaco non fosse perpendicolare al piano dello schermo.

3) La rappresentazione si complica ulteriormente se prendiamo in considerazione sorgenti estese. Sui libri si trovano generalmente rappresentazioni di situazioni particolari che possono generare **errate convinzioni**. Ecco due esempi:

(a) Se la sorgente è estesa una zona di penombra degradante separa l'ombra dalla zona illuminata:



(b) Se la sorgente estesa è più grande dell'oggetto che produce ombra e se lo schermo di osservazione è abbastanza lontano, l'ombra può scomparire e rimanere solo diversi gradi di penombra:



PROBLEMI:

- questi disegni sono **veri solo in condizioni molto particolari** che la rappresentazione in due dimensioni nasconde: (1) il centro della sorgente ed il centro dell'oggetto sferico stanno in un piano perpendicolare allo schermo; (2) il centro della sorgente ed il centro dell'oggetto sferico stanno su una retta di questo piano perpendicolare allo schermo.
- questi disegni possono produrre **l'erronea convinzione che la forma dell'ombra sia sempre la stessa di quella del corpo** che intercetta la luce; in realtà questo fatto avviene solo in condizioni molto particolari;
- i confini tra le zone di ombra e penombra non sono in realtà così netti e definiti, come spesso appaiono nei disegni dei libri..

ESERCIZIO:

prova a disegnare che cosa accade nella situazione (a) quando vale solo la condizione (1)

Possibili approfondimenti in matematica:

- Sezioni di un cono.
- Posizioni reciproche di piani e rette nello spazio.
- Trasformazioni geometriche

SENSORI DI LUCE

I sensori di luce sono oggetti che, quando stimolati dalla radiazione luminosa, forniscono una risposta di varia natura, avente un'ampiezza dipendente dal tipo e dall'intensità di luce che li colpisce.

Esistono:

sensori di luce "naturali"

sono organi presenti negli esseri viventi che trasformano i segnali luminosi in segnali biochimici.

L'occhio appartiene a questa categoria, è sensibile alle radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra:



380 nm (limite dell'ultravioletto) e 780 nm (limite dell'infrarosso)

All'interno di questo intervallo di lunghezze d'onda, l'apparato visivo umano compie le proprie funzioni: ricevere, selezionare, strutturare le sensazioni provenienti dall'esterno e trasformarle in segnali nervosi da inviare ai lobi della corteccia cerebrale, dove sono codificati attraverso una complessa catena di reazioni fisico-chimiche, che presiede al fenomeno della percezione visiva.

La risposta dell'occhio ([collegamento a pag. 10](#)) non è uniforme in tutto l'intervallo delle lunghezze d'onda visibili.

Collegamento a
fisiologia ed
anatomia
dell'occhio.

Sensori artificiali

Sono strumenti prodotti dall'uomo capaci di convertire la radiazione luminosa ricevuta in segnali elettrici.

Ciascun tipo di sensore compie le sue funzioni in un intervallo di lunghezze d'onda ben definito, detto campo di sensibilità e fornito dal costruttore con le specifiche tecniche.

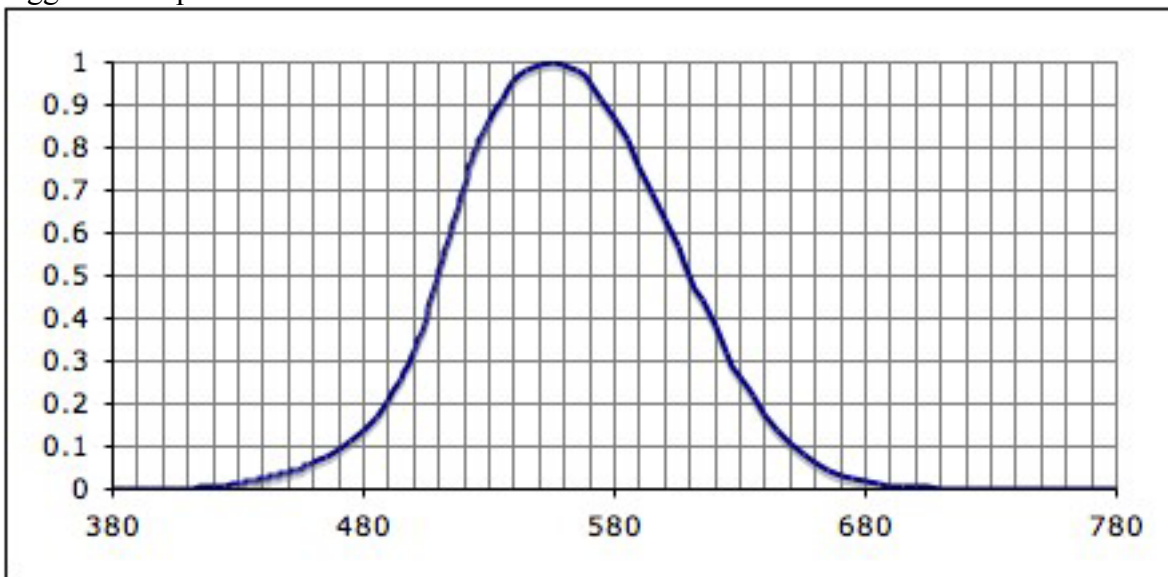
Anche i sensori artificiali hanno risposte ([collegamento a pag. 10](#)) dipendenti dalla lunghezza d'onda della luce che li colpisce.

RISPOSTA ALLO STIMOLO LUMINOSO

Occhio:

uguali quantità di flusso di energia raggiante di diverse lunghezze d'onda non danno la stessa sensazione di luminosità. ([collegamento a pag. 11](#))

Sono stati condotti accurati esperimenti su molti osservatori per determinare l'efficacia del flusso raggiante nel provocare la sensazione di luminosità nell'occhio umano.



I risultati sono rappresentati nella figura. *La grandezza rappresentata in ordinata indica la capacità del flusso raggiante di diverse lunghezze d'onda nel produrre sensazioni visive di uguale brillantezza; è denominata **efficienza luminosa** o **luminosità relativa** o **fattore di visibilità*** ([collegamento a pag. 16](#)).

Il massimo della risposta si trova nei dintorni della lunghezza d'onda 555 nm che corrisponde ad una luce di colore giallo-verde

In situazioni di bassa illuminazione, come in una camera oscura o alla luce delle stelle, la sensibilità dell'occhio aumenta sensibilmente e il massimo si sposta verso le lunghezze d'onda più basse (507 nm).

Lo spostamento del massimo di sensibilità è denominato effetto Purkinije ed è dovuto all'utilizzo, da parte dell'occhio, dei coni o dei bastoncelli.

I bastoncelli, che funzionano in condizioni di bassa visibilità e vedono meglio il blu di quello che fanno i coni, i quali possono vedere luce rossa, che per i bastoncelli appare nera.

Se si hanno due pezzi di carta colorata rossa e blu, con il primo che appare più luminoso del secondo in condizioni di buona luminosità, passando alla penombra sarà il blu a sembrare più luminoso.

Sensori artificiali:

Anche per i sensori artificiali, uguali quantità di flusso di energia raggiante di diverse lunghezze d'onda danno segnali-risposta di ampiezza diversa.

Il campo di sensibilità e la curva di risposta in funzione della lunghezza d'onda sono caratteristiche tipiche di ciascun sensore che vengono fornite costruttore.

Intensità di una sorgente luminosa

Introduzione delle grandezze energetiche e fotometriche

L'esperienza quotidiana ci suggerisce che ci sono sorgenti più "intense" e sorgenti più "deboli";

- alcune lampadine fanno luce di altre
- muovendo il regolatore di una lampada alogena è possibile variare l'intensità della luce emessa.

Tuttavia se vogliamo valutare quantitativamente:

- quanta energia emette una sorgente
 - quanta dell'energia emessa può essere raccolta con un sensore
- occorre tenere presenti alcuni aspetti non immediatamente suggeriti dall'esperienza quotidiana.

I sensori di luce e quindi anche il nostro occhio, quando vengono colpiti dalla radiazione luminosa, forniscono una risposta la cui intensità (ampiezza) dipende:

- dalla quantità di energia trasportata dalla radiazione
- dalla sua lunghezza d'onda
- dall'estensione della superficie del sensore esposta allo stimolo.

A seconda che si valuti un aspetto o l'altro di questa complessa interazione si definiscono ed utilizzano grandezze diverse.

E' necessario inoltre definire due famiglie di queste grandezze:

- **grandezze energetiche** definite in relazione all'energia emessa dalla sorgente o raccolta dal sensore
- **grandezze fotometriche** definite in relazione all'energia della radiazione, ma anche alla sua capacità di stimolare una risposta del sensore.

Iniziamo definendo le grandezze energetiche: partiamo dall'esperienza quotidiana:

- la lampada alogena emette meno energia nella posizione di minimo rispetto a quanta ne emette nella posizione di massimo;
- tuttavia l'energia emessa dipende anche dal tempo in cui rimane accesa.

Per confrontare sorgenti diverse è necessario valutare **l'energia emessa nell'unità di tempo: questa grandezza si chiama potenza (P) ed è misurata in Watt** (questa grandezza viene anche chiamata flusso energetico o raggiante).

- una lampadina da 100 watt nello stesso intervallo di tempo emette più energia di una da 60 watt, quindi è più potente.

Consideriamo una **sorgente puntiforme** cioè un punto-sorgente nello spazio vuoto o in un mezzo omogeneo; l'emissione è costante nel tempo e simmetrica intorno al punto e la luce diffonde in tutto lo spazio.

Nessun sensore di luce è in grado di raccogliere tutta la luce emessa da questa sorgente in tutte le direzioni. Per semplificare, immaginiamo di porre davanti alla sorgente uno schermo con un foro circolare; oltre lo schermo passerà solo un fascio di luce con la forma di un cono, con il vertice nella sorgente e la superficie laterale tangente al contorno del foro.

Piani perpendicolari all'asse del cono individuano sezioni circolari la cui area cresce all'aumentare della distanza.

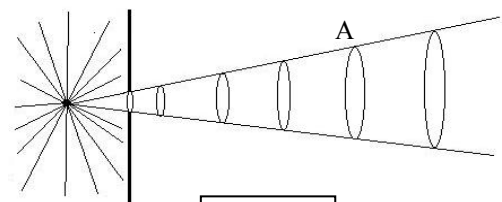


Figura 1

A questo punto possono interessare **due aspetti del problema**:

1) Quanta dell'energia luminosa emessa dalla sorgente passa attraverso il foro e si propaga oltre lo schermo?

Questa quantità non dipende solo dalla potenza della sorgente, ma anche dal raggio del foro e dalla distanza dello schermo dalla sorgente.

Viene introdotta una grandezza chiamata **intensità I** (vedi approfondimento 1)

2) Quanta dell'energia luminosa emessa all'interno del cono può essere raccolta da un sensore?

La radiazione emessa all'interno del cono si allontana dal punto sorgente, ma si conserva.

In tempi successivi arriva a colpire sezioni del cono sempre più lontane e sempre più grandi: la stessa quantità di energia si distribuisce su superfici sempre più grandi.

Pur conservandosi nel suo complesso, l'energia per unità di superficie è sempre più bassa, man mano che ci si allontana dalla sorgente.

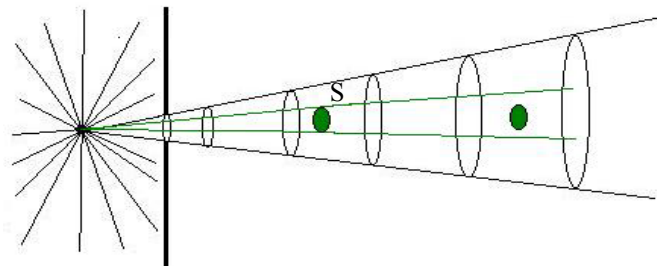
E' necessario introdurre una nuova grandezza che fornisca un'indicazione sulla "densità dell'energia" che colpisce una superficie: viene definito **illuminamento E** (o illuminazione) il rapporto tra il l'energia per unità di tempo (potenza P) che riceve l'elemento di superficie e la sua area A:

$$E = P/A$$

facendo riferimento al modello della figura 1 si può dimostrare (vedi approfondimento 2) che l'area (A) delle sezioni circolari aumenta in modo direttamente proporzionale al quadrato della sua distanza (d) dal vertice del cono; l'illuminamento è quindi inversamente proporzionale al quadrato della distanza:

$$E = k P/d^2$$

Supponiamo di porre all'interno del cono di luce di figura 1 un sensore avente un'area sensibile (S), disposta perpendicolarmente alla direzione della luce:



se spostiamo il sensore all'interno del cono di luce l'energia raccolta sarà inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal vertice del cono.

L'energia raccolta dipende anche dall'area della superficie sensibile e dall'inclinazione del sensore (vedi approfondimento 3).

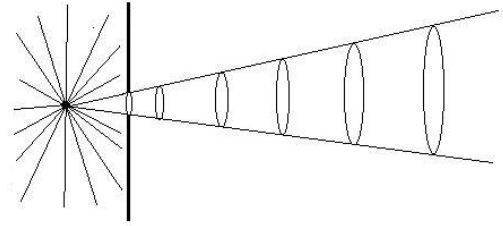
Riassumendo sono state introdotte tre grandezze:

- due si riferiscono all'energia emessa dalla sorgente: **POTENZA** e **INTENSITÀ**
- una all'energia raccolta dal sensore: **ILLUMINAMENTO**

Per ogni grandezza energetica (potenza, illuminamento ed intensità) può essere definita la corrispondente grandezza fotometrica. ([collegamento a pag. 13](#)).

Approfondimento 1: definizione dell'intensità luminosa

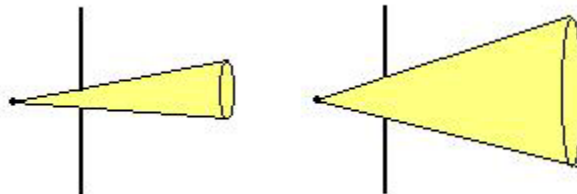
Consideriamo una **sorgente puntiforme** cioè un punto-sorgente nello spazio vuoto o in un mezzo omogeneo; l'emissione è costante nel tempo e simmetrica intorno al punto e la luce diffonde in tutto lo spazio.



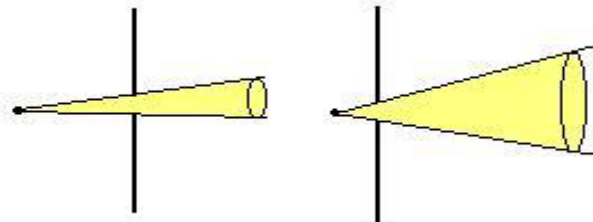
Immaginiamo di porre davanti alla sorgente uno schermo con un foro circolare; oltre lo schermo passerà solo un fascio di luce con la forma di un cono con il vertice nella sorgente e la superficie laterale tangente al contorno del foro.

Cambiando il raggio del foro e la distanza dallo schermo cambia anche l'ampiezza del cono di luce:

- aumentando, a parità di distanza, il raggio del foro otterremo un cono più ampio



- diminuendo, a parità di raggio del foro, la distanza dello schermo dalla sorgente, otterremo un cono più ampio.



L'ampiezza del cono è definita univocamente una volta fissati il raggio del foro e la distanza dello schermo dalla sorgente. Queste due grandezze possono essere correlate alla misura (Ω) dell'angolo solido al vertice del cono.

Collegamento a Rosa
ANGOLO SOLIDO

A parità di sorgente l'energia luminosa che si propaga oltre lo schermo dipende dall'ampiezza del cono.

E' necessario introdurre una grandezza l'**intensità I** definita dal rapporto tra l'energia emessa all'interno del cono e l'ampiezza del cono stesso:

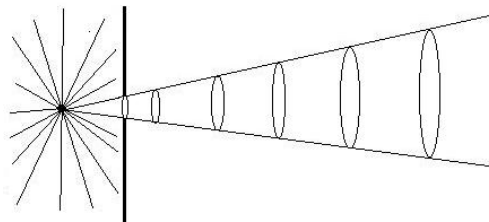
$$I = P/\Omega$$

Approfondimento 2:

l'illuminamento E di una sezione del cono perpendicolare all'asse risulta inversamente proporzionale al quadrato della distanza

Consideriamo una **sorgente puntiforme** cioè un punto-sorgente nello spazio vuoto o in un mezzo omogeneo; l'emissione è costante nel tempo e simmetrica intorno al punto e la luce diffonde in tutto lo spazio.

Immaginiamo di porre davanti alla sorgente uno schermo con un foro circolare; oltre lo schermo passerà solo un fascio di luce con la forma di un cono con il vertice nella sorgente e la superficie laterale tangente al contorno del foro.



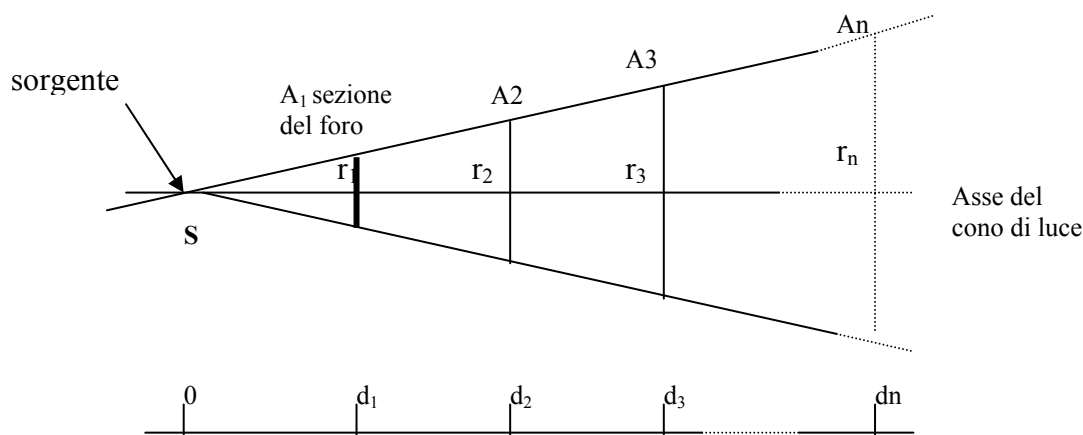
Consideriamo un cono di vertice S ed alcune sezioni perpendicolari al suo asse, la sua ampiezza è univocamente determinata una volta fissati il raggio (r_1) del foro e la distanza (d_1) dello schermo dalla sorgente.

Indichiamo con:

A_2, A_3, \dots, A_n = le aree di sezioni circolari normali all'asse del cono

r_2, r_3, \dots, r_n = i raggi delle sezioni

d_2, d_3, \dots, d_n = le distanze delle sezioni dal vertice del cono



E' possibile individuare la relazione che lega l'area delle sezioni con la loro distanza dal vertice (ripreso da supporto didattico all'esperienza 4.2 dell'unità sull'intensità luminosa).

distanza	raggio	area cerchio	rapporto tra raggio e r_1	rapporto tra distanza e d_1	rapporto tra area e A_1
d_1	r_1	$A_1 = \pi r_1^2$	1	1	1
$d_2 = 2d_1$	$r_2 = 2r_1$	$A_2 = \pi r_2^2 = 4\pi r_1^2$	$r_2/r_1 = 2r_1/r = 2$	1/2	1/4
$d_3 = 3d_1$	$r_3 = 3r_1$	$A_3 = \pi r_3^2 = 9\pi r_1^2$	$r_3/r_1 = 3r_1/r = 3$	1/3	1/9
$d_n = nd_1$	$r_n = nr_1$	$A_n = \pi r_n^2 = n^2 \pi r_1^2$	$R_n/r_1 = nr_1/r = n$	1/n	1/n ²

Scriviamo la proporzione, ricavata dalla tabella precedente:

$$A_1 : A_n = d_1^2 : d_n^2 ;$$

ricaviamo A_n :

$$A_n = (A_1 \cdot d_n^2) / d_1^2 = (A_1/d_1^2) \cdot d_n^2 ;$$

A_1/d_1^2 è un rapporto costante (cioè non dipende da n), che chiamiamo h; quindi:

$$A_n = h \cdot d_n^2 \quad h = A_1/d_1^2$$

Abbiamo ottenuto due indicazioni:

- 1) L'area della sezione del cono normale al suo asse è proporzionale al quadrato della sua distanza dal vertice del cono: $A = h \cdot d^2$ con $h = A_1/d_1^2$ (*)
- 2) La costante h dipende solo dalla dimensione del foro sullo schermo e dalla distanza di questo dalla sorgente ed è quindi legata univocamente all'ampiezza dell'angolo al vertice del cono.

L'**illuminamento E** di una sezione del cono perpendicolare all'asse è definito dal rapporto tra la potenza P emessa dalla sorgente all'interno del cono e l'area A della sezione:

$$E = P/A$$

Utilizzando la relazione (*) si ricava che l'illuminamento diminuisce con il quadrato della distanza dalla sorgente:

$$E = P/(h d^2)$$

Essendo P e h costanti:

$$E = \text{cost}/d^2$$

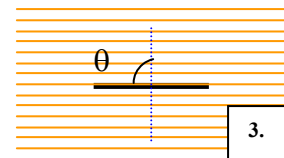
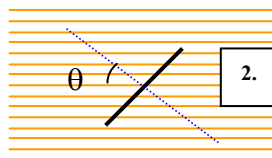
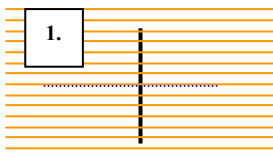
l'illuminamento E di una sezione del cono perpendicolare all'asse risulta **inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal vertice**.

Approfondimento 3

Fattori che determinano l'energia raccolta da un sensore

L'energia raccolta nell'unità di tempo da un sensore dipende da tre fattori:

- **Area sensibile del sensore:** energia raccolta è direttamente proporzionale all'area della superficie sensibile
- **Distanza dalla sorgente:** energia raccolta è inversamente proporzionale alla distanza della sorgente.
- **Inclinazione della superficie sensibile rispetto alla direzione del fascio:**
 1. la posizione più efficace è quella perpendicolare al fascio (illuminamento massimo)
 2. inclinando "si prendono meno raggi"
 3. la posizione meno favorevole è quella parallela al fascio (illuminamento nullo)



Se chiamiamo θ l'angolo tra la normale alla superficie e la direzione del fascio, l'illuminamento E risulta proporzionale al coseno di tale angolo:

1. $\theta = 0^\circ$ $\cos \theta = 1$ $E = E_{\max}$

2. $0^\circ < \theta < 90^\circ$ $1 > \cos \theta > 0$ $0 < E < E_{\max}$

3. $\theta = 90^\circ$ $\cos \theta = 0$ $E = 0$

GRANDEZZE ENERGETICHE E GRANDEZZE FOTOMETRICHE

La luce trasporta energia: è questo che determina la sua azione sui sensori e anche sull'occhio, se si tratta di luce visibile.

La radiazione luminosa è caratterizzata da due serie di grandezze:

- le **GRANDEZZE ENERGETICHE** (definite in relazione all'energia trasportata)
- le corrispondenti **GRANDEZZE FOTOMETRICHE** (definite in relazione alla sua azione sull'occhio o sul sensore)

L'energia emessa dalla sorgente e trasportata dalla radiazione per unità di tempo è detta **potenza** o anche **flusso energetico o flusso raggiante** ed è misurata in **Watt**

Il flusso raggiante valutato in relazione alla sua capacità di stimolare la sensazione di brillantezza è detto **flusso luminoso** ed è misurata in **lumen**

Uguali quantità di flusso di energia raggiante di diverse lunghezze d'onda non danno sensazioni visive di uguale brillantezza: l'efficienza luminosa varia quindi in funzione della lunghezza d'onda .

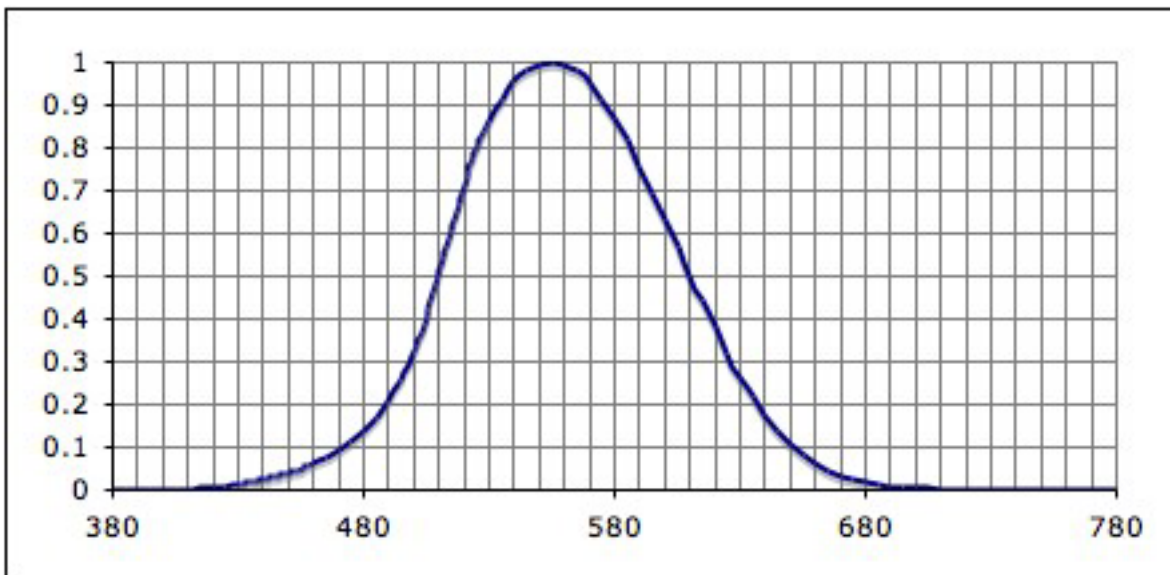
Si dice **efficienza luminosa** (K) di un campione di radiazione luminosa il rapporto tra il flusso luminoso (F) ed il flusso raggiante (P):

$$K = F / P$$

L'efficienza luminosa dipende dalla lunghezza d'onda: **$K=K(\lambda)$** .

Sono stati condotti accurati esperimenti su molti osservatori per determinare l'efficienza luminosa del flusso raggiante nel provocare la sensazione di luminosità nell'occhio umano.

I risultati sono rappresentati nella figura.

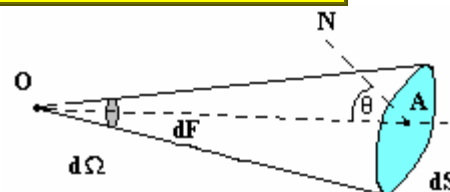


emissione luminosa in termini della risposta del sistema visivo umano, il quale presenta sensibilità non uniforme alle diverse lunghezza d'onda.

Per studiare le sorgenti luminose vengono definite le seguenti grandezze:

Nome	Simbolo	Relazione	Unità di misura
Potenza Flusso energetico o radiante	P		Watt (W)
Flusso luminoso	F		Lumen (lm)
Efficienza luminosa	K	F/P	Lumen/Watt
Intensità energetica	I^*	$I^* = dP/d\Omega$	Watt/steradiante (W/sr)
Intensità luminosa	I	$I = dF/d\Omega$	Candela (cd)
Illuminamento energetico	E^*	dP/dS	Watt/metro quadro (W/ m ²)
Illuminamento	E	dF/dS	Lux (lx)

Per comprendere il loro significato consideriamo una **SORGENTE PUNTIFORME O**: il fascio che essa invia su una superficie dS è contenuto in un cono di vertice O che si appoggia sul contorno di dS .



Se dS è molto piccola il flusso luminoso dF del fascio è proporzionale all'angolo solido sotteso dal cono: il rapporto $I = dF/d\Omega$ è chiamato **intensità luminosa** della fonte O nella direzione OA. La sua unità di misura è chiamata **candela (cd)**.

1 candela è definita come il flusso luminoso di 1 lumen emesso da una sorgente uniforme entro un angolo solido di 1 steradiante

L'**intensità energetica** è data dal quoziente: $I^* = dP/d\Omega$

Il rapporto tra il flusso che riceve l'elemento di superficie e la sua area: $E = dF/dS$ è chiamato **illuminamento** (o illuminazione). La sua unità di misura è chiamata **lux (lx)**.

1 lux è definito come il flusso di 1 lumen uniformemente distribuito su 1 m².

La corrispondente grandezza energetica è l'**illuminamento energetico** $E^* = dP/dS$

Esiste una relazione tra intensità luminosa e illuminamento: per la sorgente puntiforme rappresentata nella figura della pagina precedente, posto $AO=x$, si ha:

$$E = I \cos\theta / x^2$$

Dimostrazione:

La superficie dS è inclinata rispetto alla direzione di propagazione della radiazione, la normale N forma un angolo θ con la direzione della radiazione e quindi: $d\Omega = dS \cos\theta / x^2$.

$$I = dF/d\Omega \quad dF = I d\Omega \quad d\Omega = dS \cos\theta / x^2 \quad dF = I dS \cos\theta / x^2$$

$$E = dF/dS \quad dF = E dS$$

Uguagliando il secondo membro delle due espressioni in grassetto e semplificando per dS si ottiene la relazione cercata.

Nelle varie situazioni pratiche ci si trova di fronte a situazioni assai diverse dal punto dell'illuminamento:

Sorgente	Illuminamento(Lux)
Sole allo zenith	$1.2 \cdot 10^5$
Cielo azzurro	10^4
Cielo nuvoloso	10^3
Lampada incandescente da 60 W a 1 metro	10^2
Candela a 1 metro	1
Luna piena allo zenith	0.27
Luna nuova a cielo coperto	10^{-4}

NB va ulteriormente sottolineato che l'energia trasportata dalla radiazione non è direttamente connessa all'illuminamento:

- una lampada abbronzante, che emette prevalentemente nell'ultravioletto e quindi fuori dal campo visibile, emette pochissimi Lux, ma può trasportare, in relazione alla sua intensità quantità ingenti di energia.
- La stessa cosa si può dire di una sorgente che emette radiazione con lunghezze d'onda nel campo dell'infrarosso.