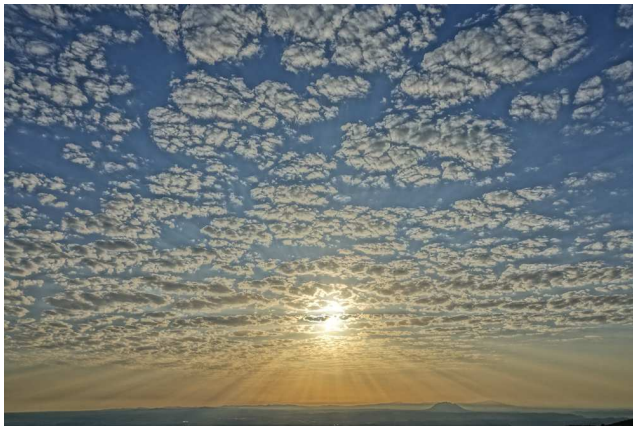


# Misurare la luce

(Da un webinar per LAB2Go)

Giulio D'Agostini

Università di Roma La Sapienza



# Sole: luce e calore



## Sole: luce e calore



► Quanto ci illumina?

## Sole: luce e calore



- ▶ Quanto ci illumina?
- ▶ Quanto ci scalda?

## Sole: luce e calore



- ▶ Quanto ci illumina?
- ▶ Quanto ci scalda? → Quanta **energia** ci fornisce?

# Energia

L'energia appare in tante forme

# Energia

L'energia appare in tante forme e passa da una forma all'altra

# Energia

L'energia appare in tante forme e passa da una forma all'altra

Ma cosa è l'energia?



# Energia

L'energia appare in tante forme e passa da una forma all'altra

Ma cosa è l'energia?

*“È ciò che scalda una pentola d'acqua”*



(Giorgio Salvini)

# Energia

L'energia appare in tante forme e passa da una forma all'altra

Ma cosa è l'energia?

*“È ciò che scalda una pentola d'acqua”*



(Giorgio Salvini)

→ 'degradazione dell'energia'

# Energia

L'energia appare in tante forme e passa da una forma all'altra

Ma cosa è l'energia?

*“È ciò che scalda una pentola d'acqua”*



(Giorgio Salvini)

→ 'degradazione dell'energia'

“Se ti cade il tappo del tubetto del dentifricio, non cercare di riprenderlo mentre rimbalza nel lavello. Aspettalo in fondo!” (G.S.)

# Energia

L'energia appare in tante forme e passa da una forma all'altra

Ma cosa è l'energia?

*“È ciò che scalda una pentola d'acqua”*



(Giorgio Salvini)

→ 'degradazione dell'energia'

“Se ti cade il tappo del tubetto del dentifricio, non cercare di riprenderlo mentre rimbalza nel lavello. Aspettalo in fondo!” (G.S.)

→ **Calorimetria**

# Calorimetria

Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

# Calorimetria

Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

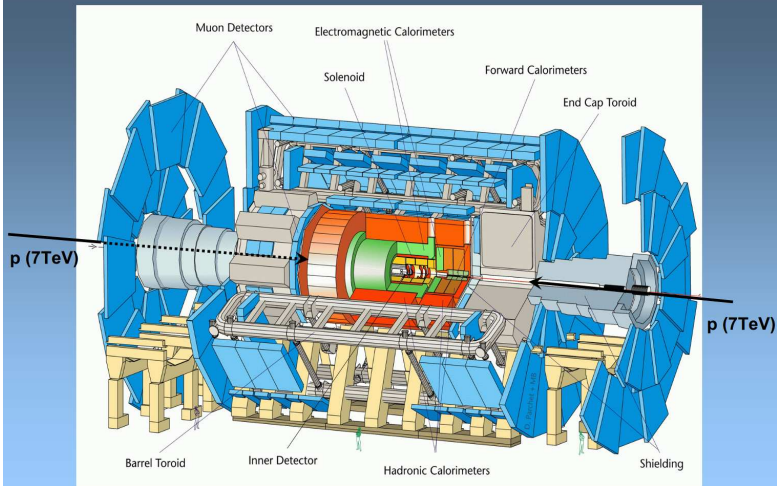
Importante il **concetto**, anche se sono mutate le tecniche

# Calorimetria

Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

Importante il **concetto**, anche se sono mutate le tecniche

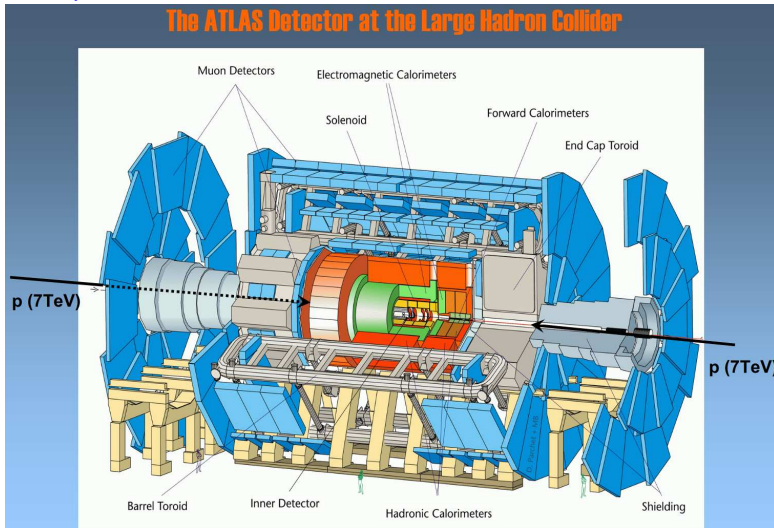
## The ATLAS Detector at the Large Hadron Collider



# Calorimetria

Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

Importante il **concetto**, anche se sono mutate le tecniche



→ Output proporzionale a energia totale rilasciata



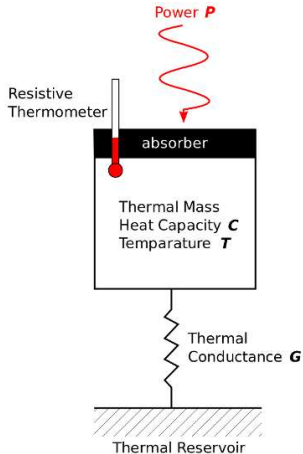
## Misurare energia radiante ( $\rightarrow$ 'radiometria')

Pentola un po' più raffinata di quelle per cuocere la pasta...

# Misurare energia radiante ( $\rightarrow$ 'radiometria')

Pentola un po' piú raffinata di quelle per cuocere la pasta...

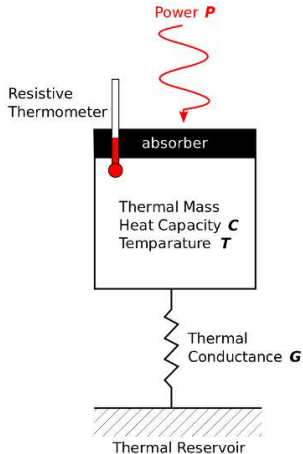
$\rightarrow$  Bolometro



# Misurare energia radiante ( $\rightarrow$ 'radiometria')

Pentola un po' piú raffinata di quelle per cuocere la pasta...

$\rightarrow$  Bolometro



$$\Rightarrow \Delta T \propto P \times \Delta t$$

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2$$

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2$$

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)



## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)

### Esercizi:

1. Quanta potenza (media) incide sul pianeta Terra?

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)

### Esercizi:

1. Quanta potenza (media) incide sul pianeta Terra?
2. Quanta potenza totale emette il Sole?

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)

### Esercizi:

1. Quanta potenza (media) incide sul pianeta Terra?
2. Quanta potenza totale emette il Sole?
3. Quanta ne emette per  $\text{m}^2$  di superficie?

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)

### Esercizi:

1. Quanta potenza (media) incide sul pianeta Terra?
2. Quanta potenza totale emette il Sole?
3. Quanta ne emette per  $\text{m}^2$  di superficie?
4. Ricordando la famosa  $E = m c^2$ ,  
→ massa è 'bruciata' al secondo

## Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.4 \text{ kW/m}^2$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00 \text{ kW/m}^2 \rightarrow \approx 1.0 \text{ kW/m}^2$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)

### Esercizi:

1. Quanta potenza (media) incide sul pianeta Terra?
2. Quanta potenza totale emette il Sole?
3. Quanta ne emette per  $\text{m}^2$  di superficie?
4. Ricordando la famosa  $E = m c^2$ ,  
→ massa è 'bruciata' al secondo
5. Quanta potenza arriva su un pannello di  $10 \text{ m}^2$  posto orizzontalmente, se il sole è inclinato di 30, 60 o 90 gradi rispetto al piano orizzontale?

E quanto ci illumina?

E quanto ci illumina?

**radiometria** → **fotometria**

E quanto ci illumina?

**radiometria** → **fotometria**

- ▶ Il sole emette **radiazione elettromagnetica** su un ampio **spettro di frequenze**.



E quanto ci illumina?

**radiometria** → **fotometria**

- ▶ Il sole emette **radiazione elettromagnetica** su un ampio **spettro di frequenze**.
- ▶ Ma l'**occhio umano è sensibile solo a un intervallo limitato di frequenze**

E quanto ci illumina?

**radiometria** → **fotometria**

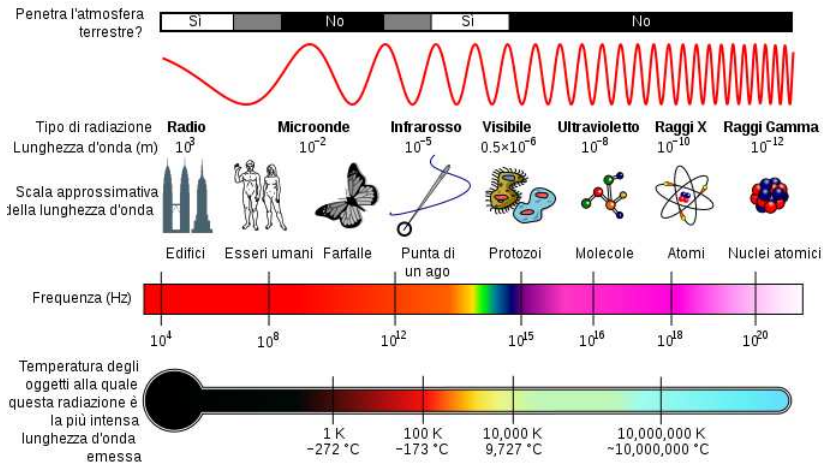
- ▶ Il sole emette **radiazione elettromagnetica** su un ampio **spettro di frequenze**.
- ▶ Ma l'occhio umano è **sensibile solo a un intervallo limitato di frequenze**  
⇒ **luce visibile**

E quanto ci illumina?

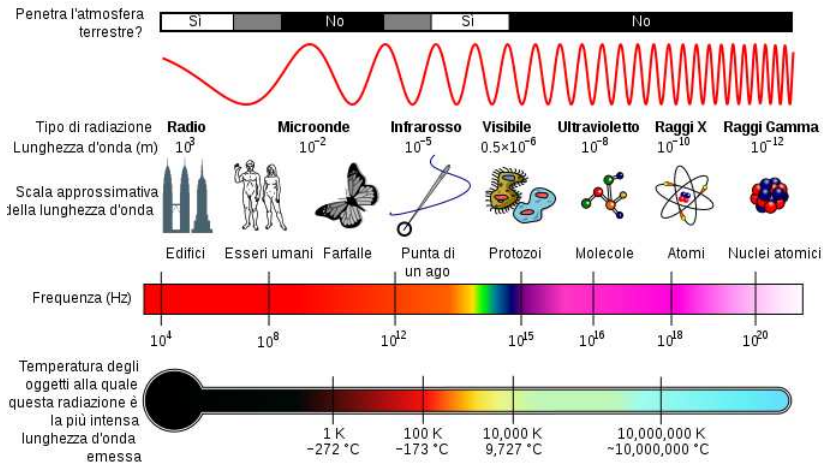
**radiometria** → **fotometria**

- ▶ Il sole emette **radiazione elettromagnetica** su un ampio **spettro di frequenze**.
- ▶ Ma l'occhio umano è sensibile solo a un intervallo limitato di frequenze  
⇒ **luce visibile**
- ▶ E *il visibile non è tutto ugualmente visibile*.

# Radiazione elettromagnetica

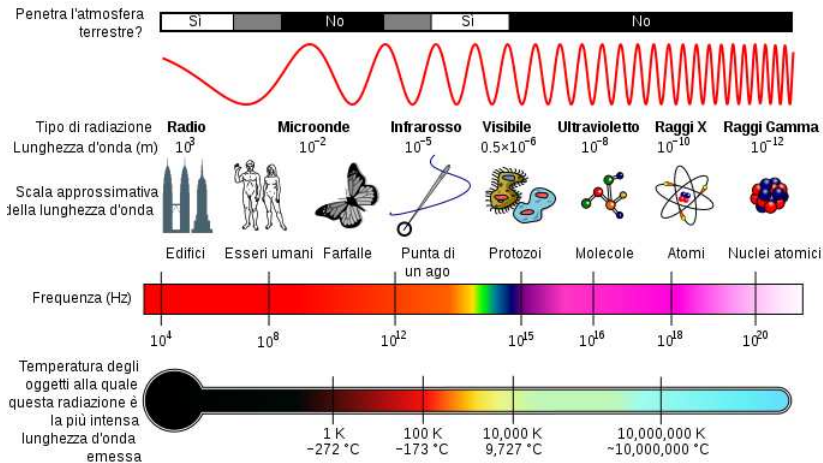


# Radiazione elettromagnetica



► relazione fra frequenza ( $\nu$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ):  $\lambda \cdot \nu = c$ .

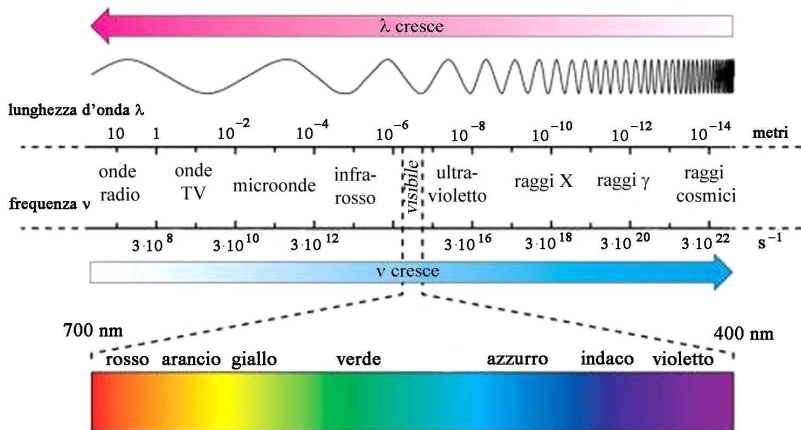
# Radiazione elettromagnetica



- ▶ relazione fra frequenza ( $\nu$ ) e lunghezza d'onda ( $\lambda$ ):  $\lambda \cdot \nu = c$ .
- ▶ Della **temperatura** parleremo dopo, ricollegandoci all'**esercizio nr. 3**.

# Radiazione elettromagnetica

Zoom nel visibile:



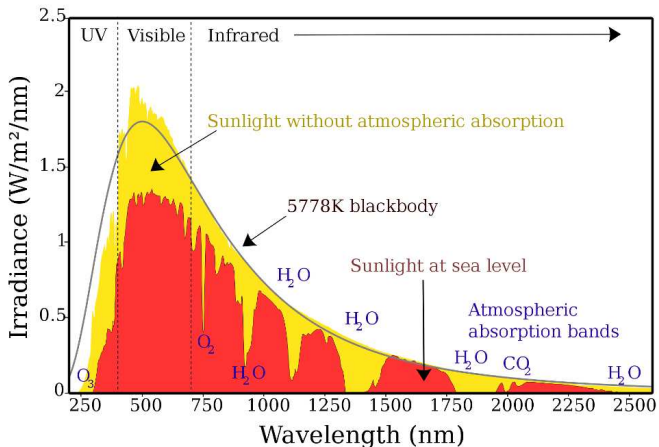
⇐ Infrarosso

Ultravioletto ⇒

# Spettro di emissione del Sole

Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

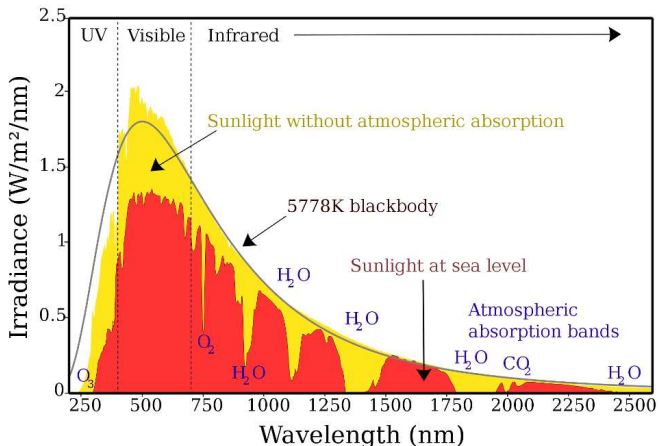




# Spettro di emissione del Sole

Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

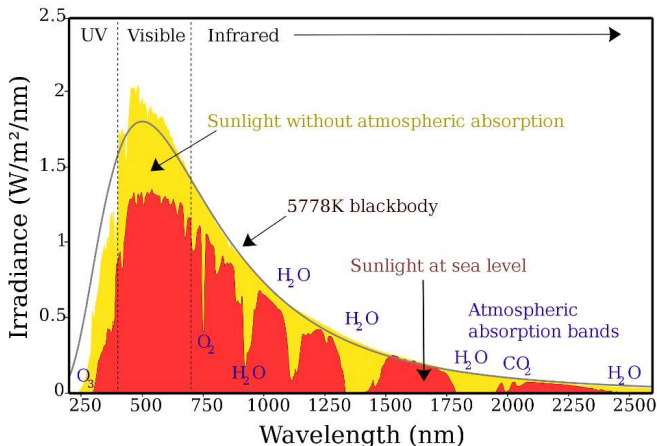


- L'area degli spettri ci dà i  $\text{W}/\text{m}^2$ .

# Spettro di emissione del Sole

Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

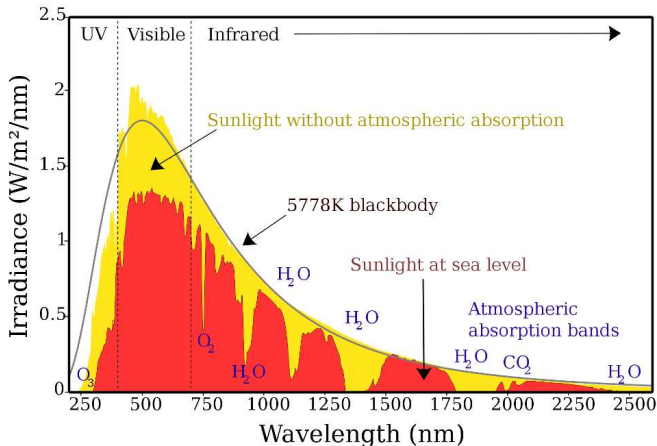


- ▶ L'area degli spettri ci dà i  $\text{W}/\text{m}^2$ .
- ▶ Della curva continua parleremo dopo.

# Spettro di emissione del Sole

Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

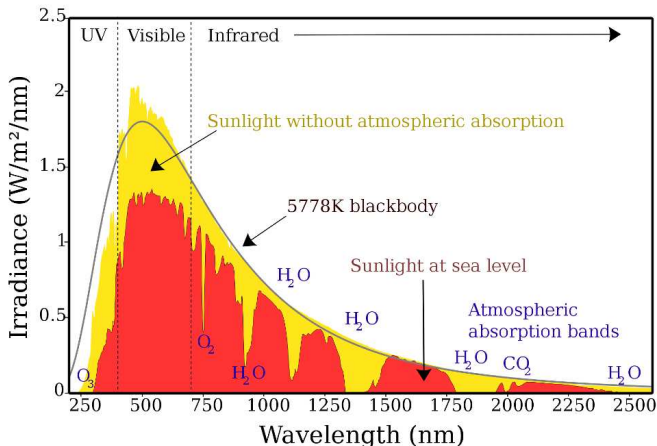


► Solo una frazione della potenza emessa è nel visibile

# Spettro di emissione del Sole

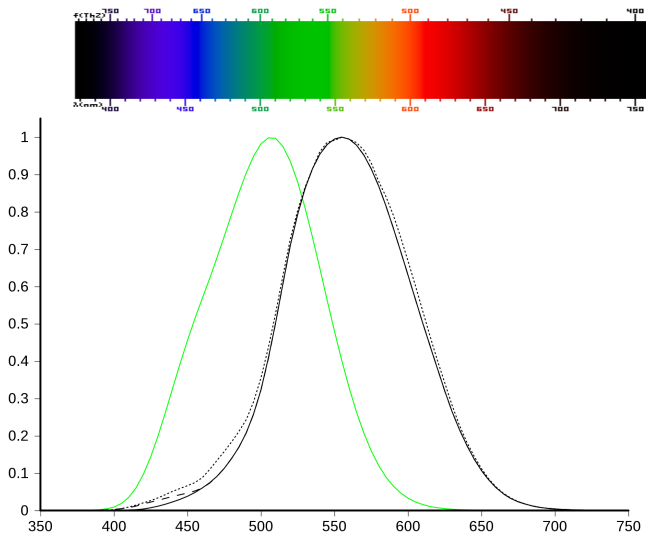
Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

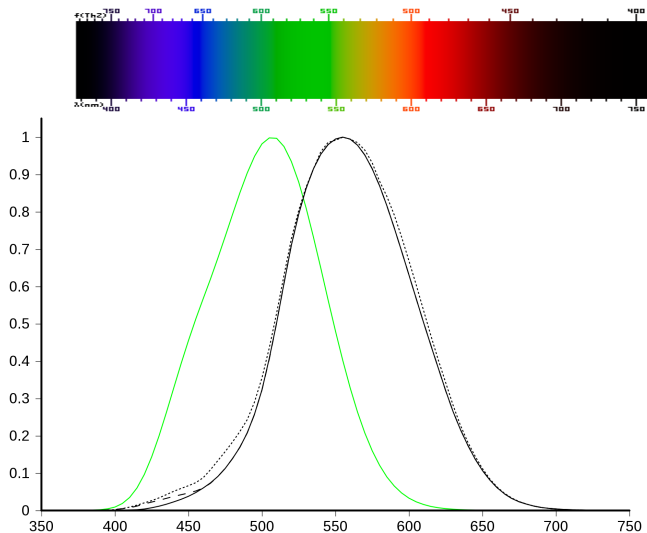


- Solo una frazione della potenza emessa è nel visibile e i nostri occhi non la vedono tutta nello stesso modo!

# Sensibilità dei nostri occhi alla 'luce visibile'

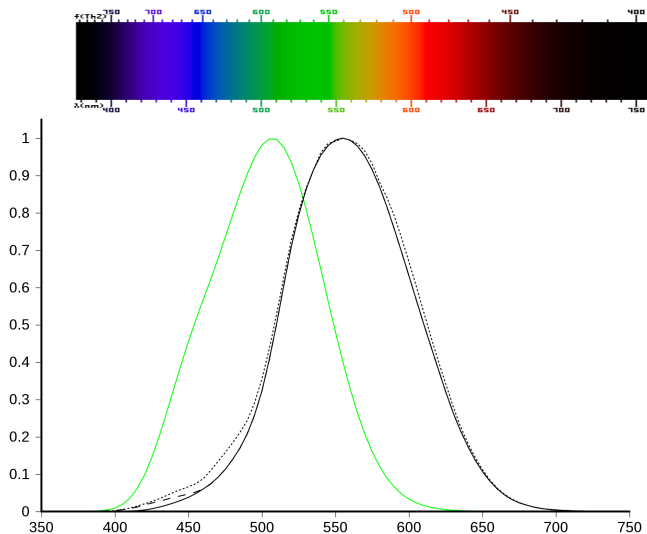


## Sensibilità dei nostri occhi alla 'luce visibile'



– Normalmente: max  $\approx$  550 nm

## Sensibilità dei nostri occhi alla 'luce visibile'



- Normalmente: max  $\approx 550$  nm (adattamento evolutivo!)
- Curva verde: 'bassa illuminazione'  $\rightarrow$  vediamo **azzurrognolo!**  
 $\Rightarrow$  tende a scomparire prima il rosso.

# Grandezze fotometriche

## **Note preliminari**



# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono 'complicate' (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono 'complicate' (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurre *per analogia*.

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono 'complicate' (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle *per analogia*.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono '**complicate**' (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla

**Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".  
⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".  
⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'  
→ è la **quantità di luce per unità di tempo**

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".  
⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'  
→ è la **quantità di luce per unità di tempo** e basta:



# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".  
⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'  
→ è la **quantità di luce per unità di tempo** e basta:
  - ▶ ad esempio **quantità di luce che entra da una finestra nell'unità di tempo**.

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurle **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".  
⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'  
→ è la **quantità di luce per unità di tempo** e basta:
  - ▶ ad esempio **quantità di luce che entra da una finestra nell'unità di tempo**.

Analogia ai  $\text{m}^3$  di aria al secondo che entrano da una porta

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurre **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".  
⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'  
→ è la **quantità di luce per unità di tempo** e basta:
  - ▶ ad esempio **quantità di luce che entra da una finestra nell'unità di tempo**.

Analogia ai **m<sup>3</sup> di aria al secondo** che entrano da una porta, ai **litri d'acqua al minuto** che fluiscono da un rubinetto

# Grandezze fotometriche

## Note preliminari

- ▶ Sono **'complicate'** (quando le si vogliono definire esattamente) per i motivi detti (serve un 'occhio umano di riferimento').
- ▶ Conviene introdurre **per analogia**.
- ▶ Successivamente possono essere definite tramite degli standard (e assumendo una curva media di sensibilità).

Cominciamo dal **flusso luminoso**, ovvero, con riferimento alla **Wiki inglese** (con precisazioni):

- ▶ "total quantity of visible light emitted by a source per unit of time".

⇒ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'

→ è la **quantità di luce per unità di tempo** e basta:

- ▶ ad esempio **quantità di luce che entra da una finestra nell'unità di tempo**.

Analogia ai **m<sup>3</sup> di aria al secondo** che entrano da una porta, ai **litri d'acqua al minuto** che fluiscono da un rubinetto o ai **Joule/s di calore** che 'fluiscono' da un radiatore.

# Lumen

**Wiki inglese:**

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of luminous flux,*

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power ([radiant flux](#))*

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power (**radiant flux**) in that radiant flux includes all electromagnetic waves emitted,*



# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power (**radiant flux**) in that radiant flux includes all electromagnetic waves emitted,*

*while luminous flux is **weighted** according to a model (a 'luminosity function') of the human eye's sensitivity to various wavelengths.*

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power (**radiant flux**) in that radiant flux includes all electromagnetic waves emitted,*

*while luminous flux is **weighted** according to a model (a 'luminosity function') of the human eye's sensitivity to various wavelengths.*

$$\Rightarrow \Phi_V \propto P$$

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power (**radiant flux**) in that radiant flux includes all electromagnetic waves emitted,*

*while luminous flux is **weighted** according to a model (a 'luminosity function') of the human eye's sensitivity to various wavelengths.*

$$\Rightarrow \Phi_V \propto P$$

- ▶ Sorgente che emette solo nel visibile (es. LED)  
→ alta **efficienza luminosa**.

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power (**radiant flux**) in that radiant flux includes all electromagnetic waves emitted,*

*while luminous flux is **weighted** according to a model (a 'luminosity function') of the human eye's sensitivity to various wavelengths.*

$$\Rightarrow \Phi_V \propto P$$

- ▶ Sorgente che emette solo nel visibile (es. LED)  
→ alta **efficienza luminosa**.
- ▶ Sorgente con **emissione marginale** nel visibile (**stufetta**)  
→ **bassissima** **efficienza luminosa**

# Lumen

## Wiki inglese:

*The **lumen** (symbol: **lm**) is the SI derived unit of **luminous flux**, a measure of the total quantity of visible light emitted by a source per unit of time.*

*Luminous flux differs from power (**radiant flux**) in that radiant flux includes all electromagnetic waves emitted,*

*while luminous flux is **weighted** according to a model (a 'luminosity function') of the human eye's sensitivity to various wavelengths.*

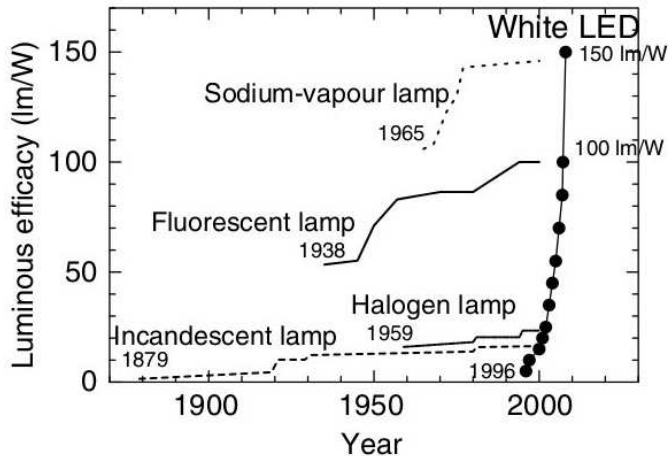
$$\Rightarrow \Phi_V \propto P$$

- ▶ Sorgente che emette solo nel visibile (es. LED)  
→ alta **efficienza luminosa**.
- ▶ Sorgente con **emissione marginale** nel visibile (**stufetta**)  
→ **bassissima** efficienza luminosa

→ **lm/W**.

# Storia dell'efficienza luminosa

J. Phys. D: Appl. Phys. **43** (2010) 354002



**Figure 4.** The history of  $\eta_L$  in incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, sodium-vapour lamps and commercial white LEDs. The development years of white light sources are also shown.

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole: 93 lm/W.

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole: 93 lm/W.
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.



## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interesse

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interessa:

- ▶ **Qualità** della luce.

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interessa:

- ▶ **Qualità** della luce.
- Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interessa:

- ▶ **Qualità** della luce.
- Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.  
(I nostri occhi si sono adattati alla luce solare!)

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interesse:

- ▶ **Qualità** della luce.

→ Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.  
(I nostri occhi si sono adattati alla luce solare!)

Ad esempio, il **massimo teorico** corrisponde a una sorgente di **luce monocromatica in corrispondenza del massimo** della **funzione di efficienza luminosa** ('*luminosity function*');



## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interesse:

- ▶ **Qualità** della luce.
- Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.  
(I nostri occhi si sono adattati alla luce solare!)

Ad esempio, il **massimo teorico** corrisponde a una sorgente di **luce monocromatica in corrispondenza del massimo** della **funzione di efficienza luminosa** ('luminosity function'):

⇒ **683 lm/W**

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interesse:

- ▶ **Qualità** della luce.
- Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.  
(I nostri occhi si sono adattati alla luce solare!)

Ad esempio, il **massimo teorico** corrisponde a una sorgente di **luce monocromatica in corrispondenza del massimo** della **funzione di efficienza luminosa** ('luminosity function'):

⇒  **$683 \text{ lm/W}$** , ma non è la lampada che ci piacerebbe avere. . .

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interesse:

- ▶ **Qualità** della luce.
- Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.  
(I nostri occhi si sono adattati alla luce solare!)

Ad esempio, il **massimo teorico** corrisponde a una sorgente di **luce monocromatica in corrispondenza del massimo** della **funzione di efficienza luminosa** ('luminosity function'):

⇒ **683 lm/W**, ma non è la lampada che ci piacerebbe avere...  
683?

## Efficienza luminosa (Luminous efficacy)

Alcuni valori, per avere un'idea (da [wiki/Efficienza\\_luminosa](#) )

- ▶ Sole:  $93 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampadina incandescente da 100 W:  $14 \text{ lm/W}$ .
- ▶ Lampade a LED bianche:  $\approx 100\text{-}200 \text{ lm/W}$  (e oltre!).
- ▶ Candela (tipica di cera):  $\approx 0.3 \text{ lm/W}$   
⇒ Non molto ecologica!!

Ma l'efficienza luminosa non è il solo parametro di interesse:

- ▶ **Qualità** della luce.
- Idealmente una sorgente che nel visibile abbia lo stesso spettro di emissione della luce solare.  
(I nostri occhi si sono adattati alla luce solare!)

Ad esempio, il **massimo teorico** corrisponde a una sorgente di **luce monocromatica in corrispondenza del massimo** della **funzione di efficienza luminosa** ('luminosity function'):

- ⇒ **683 lm/W**, ma non è la lampada che ci piacerebbe avere. . .  
**683?** 'Tautologico' (questione metrologica, che per ora non ci interessa)

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)
Energia	$\longleftrightarrow$	Quantità di luce



# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)

Energia	$\longleftrightarrow$	Quantità di luce
Potenza $\times \Delta t$	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso $\times \Delta t$
joule (J)	$\longleftrightarrow$	lumen second (lm·s) ( <i>'talbot'</i> )

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)
Energia	$\longleftrightarrow$	Quantità di luce
Potenza $\times \Delta t$	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso $\times \Delta t$
joule (J)	$\longleftrightarrow$	lumen second (lm·s) ( <i>'talbot'</i> )
<i>irradiance (flux density)</i>	$\longleftrightarrow$	<i>illuminance</i>
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
$W/m^2$	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2$

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)
Energia	$\longleftrightarrow$	Quantità di luce
Potenza $\times \Delta t$	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso $\times \Delta t$
joule (J)	$\longleftrightarrow$	lumen second (lm·s) ( <i>'talbot'</i> )
<i>irradiance (flux density)</i>	$\longleftrightarrow$	<i>illuminance</i>
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
$W/m^2$	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2 \rightarrow$ <b>lux (lx)</b>

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)
Energia	$\longleftrightarrow$	Quantità di luce
Potenza $\times \Delta t$	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso $\times \Delta t$
joule (J)	$\longleftrightarrow$	lumen second (lm·s) ( <i>'talbot'</i> )
<i>irradiance (flux density)</i>	$\longleftrightarrow$	<i>illuminance</i>
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
$W/m^2$	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2 \rightarrow$ <b>lux (lx)</b>

I lux sono quelli che si misurano in pratica!

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	↔	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	↔	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	↔	lumen (lm)

Energia	↔	Quantità di luce
Potenza $\times \Delta t$	↔	Flusso luminoso $\times \Delta t$
joule (J)	↔	lumen second (lm·s) ( <i>'talbot'</i> )

<i>irradiance (flux density)</i>	↔	<i>illuminance</i>
Potenza / unità di superficie	↔	Flusso luminoso / unità di sup.
$W/m^2$	↔	$lm/m^2 \rightarrow$ <b>lux (lx)</b>

I lux sono quelli che si misurano in pratica!

→ Strumenti professionali (**luxmetri**)

# Flusso luminoso e quantità di luce

Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

Potenza	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso
Energia nell'unità di tempo	$\longleftrightarrow$	quant. di luce nell'unità di tempo
watt (W)	$\longleftrightarrow$	lumen (lm)









































Energia	$\longleftrightarrow$	Quantità di luce
Potenza $\times \Delta t$	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso $\times \Delta t$
joule (J)	$\longleftrightarrow$	lumen second (lm·s) ( <i>'talbot'</i> )

<i>irradiance (flux density)</i>	$\longleftrightarrow$	<i>illuminance</i>
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
W/m <sup>2</sup>	$\longleftrightarrow$	lm/m <sup>2</sup> $\rightarrow$ <b>lux (lx)</b>

I lux sono quelli che si misurano in pratica!

$\rightarrow$  Strumenti professionali (**luxmetri**) ... e **app!**

# Luxmetri Android (solo alcuni!)

							
Luxmetro - Smart Light Meter Smart Tools co. ★★★★☆	Lux Light Meter Doggio Apps ★★★★★	luxmetro KHTSR ★★★★☆	Lux Meter Crunchy ByteBox ★★★★☆	Lux Light Meter Przemek Pardiel ★★★★★	esposimetro My Mobile Tools Dev ★★★★☆	Lux Meter gratis waldau.webdesign.de ★★★★★	Lux Light Meter waldau.webdesign.de ★★★★☆
							
Luxmetro Simone Clotta ★★★★☆	Lux Meter SpaceRocket ★★★★★	Luxmetro semplice Mapat Acekpos ★★★★☆	Luxmetro. Mapat Acekpos ★★★★★	Calcoli Illuminotec Ettore Galina ★★★★☆	Illuminance: lux light Aylin Studios ★★★★★	LuxMeter Ponica Media ★★★★★	Esposimetro - misuratore Nextappgen ★★★★☆
							
Lux Meter Yakubov Vitaly ★★★★☆	Premium Lux Meter Emanax World ★★★★★	Misuratore Luminoso Virtuainment ★★★★☆	Light Meter Trajkovski Labs ★★★★★	Light Meter kuuivsoft ★★★★☆	Light Meter - Free WBPhoto ★★★★★	Lux Lite Vito Casali ★★★★★	Lux Meter Not Oute Them ★★★★★
							
Lux Meter ( Light Meter) Fundroid3000 ★★★★★	Lux Meter INEX ★★★★★	Light Meter (Scientific) 99Developer ★★★★☆	Illuminometro parlatore maruar ★★★★★	Light Meter: Measurement Creative apps.co ★★★★☆	Physics Toolbox Scientific Vieyra Software ★★★★★	LxMeter Optivoxel ★★★★★	Lumen Lux Illuminometer APPY ★★★★☆
							

# Confronto con strumento dedicato





## Confronto con strumento dedicato



Flusso di luce incidente sul foglio A4:  $\approx 300 \text{ lx} \times 0.062 \text{ m}^2 \approx 19 \text{ lm}$ .

# App Android usata



## Lux Light Meter

waldau-webdesign.de Strumenti

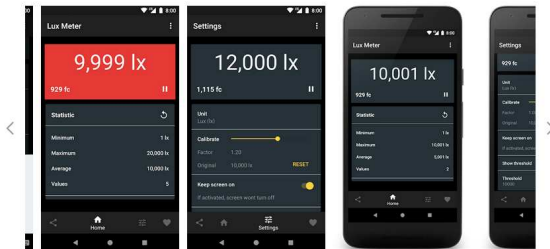
1 PEGI 3

★★★★★ 1.600

Contiene annunci

L'app è compatibile con tutti i tuoi dispositivi.

Installata



# App Android usata



## Lux Light Meter

waldau-webdesign.de Strumenti

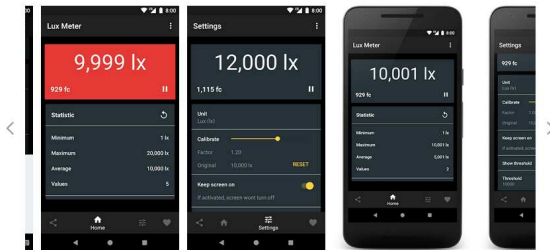
1 PEGI 3

Contiene annunci

L'app è compatibile con tutti i tuoi dispositivi.

★★★★☆ 1.600

Installata



(Ma ce ne saranno sicuramente di migliori,  
specialmente per uso fotografico)

# App Android usata



## Lux Light Meter

waldau-webdesign.de Strumenti

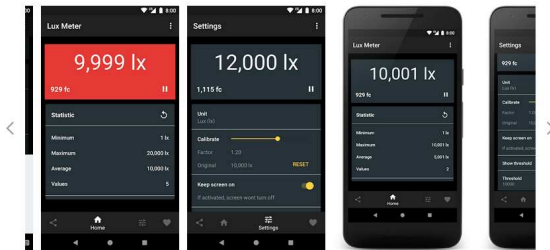
1 PEGI 3

Contiene annunci

L'app è compatibile con tutti i tuoi dispositivi.

★★★★☆ 1.600

Installata



(Ma ce ne saranno sicuramente di migliori,  
specialmente per uso fotografico)

Non è stato necessario calibrarla (ma può dipendere dallo smart)

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ **distanza** lampada-sensore: **50 cm**;

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.



# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;
- ▶ inevitabili riflessioni multiple

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;
- ▶ inevitabili riflessioni multiple (foglio, oggetti sul tavolo e tavolo stesso → soffitto e pareti)

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;
- ▶ inevitabili riflessioni multiple (foglio, oggetti sul tavolo e tavolo stesso → soffitto e pareti)
  - ▶ È abbastanza noto l'influenza di soffitto e pareti nell'illuminazione di una stanza;

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;
- ▶ inevitabili riflessioni multiple (foglio, oggetti sul tavolo e tavolo stesso → soffitto e pareti)
  - ▶ È abbastanza noto l'influenza di soffitto e pareti nell'illuminazione di una stanza;
  - ▶ Misure di fotometria *andrebbero* effettuate evitando questi effetti 'secondari'.

# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;
- ▶ inevitabili riflessioni multiple (foglio, oggetti sul tavolo e tavolo stesso → soffitto e pareti)
  - ▶ È abbastanza noto l'influenza di soffitto e pareti nell'illuminazione di una stanza;
  - ▶ Misure di fotometria *andrebbero* effettuate evitando questi effetti 'secondari'.
- ▶ E inoltre c'erano altre sorgenti di luce (monitor PC, luce lontana dal tavolo)



# Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- ▶ distanza lampada-sensore: 50 cm;
- ▶ emissione isotropa;
- ▶ solo luce direttamente dalla lampada.

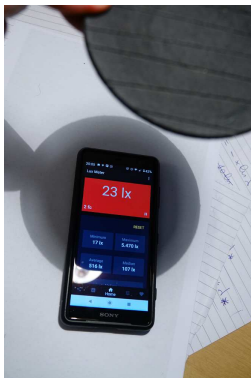
$$\approx 300 \text{ lx} \times 4 \pi \times (0.50 \text{ m})^2 \approx 940 \text{ lm}$$

Ma...

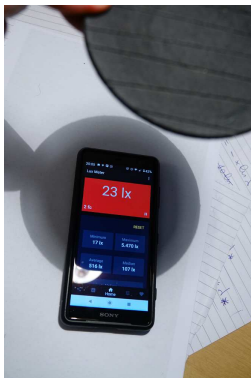
- ▶ si trattava di una lampada da tavolo e quindi *avremmo dovuto* considerare solo una porzione di angolo solido;
- ▶ inevitabili riflessioni multiple (foglio, oggetti sul tavolo e tavolo stesso → soffitto e pareti)
  - ▶ È abbastanza noto l'influenza di soffitto e pareti nell'illuminazione di una stanza;
  - ▶ Misure di fotometria *andrebbero* effettuate evitando questi effetti 'secondari'.
- ▶ E inoltre c'erano altre sorgenti di luce (monitor PC, luce lontana dal tavolo):
  - ⇒ volutamente condizioni non ideali (visto che comunque non potevo eliminare le riflessioni. . .)

# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)

# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)

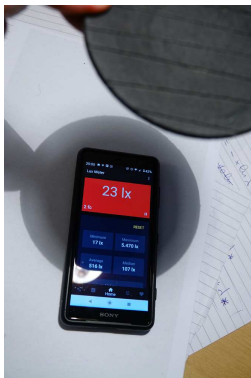


# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



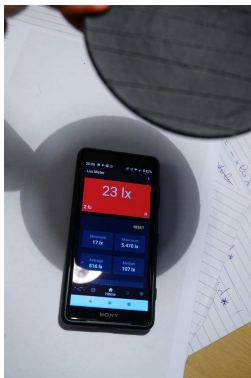
Immagino possibili obiezioni

## Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



Immagino possibili **obiezioni**, che *condivido a priori*...

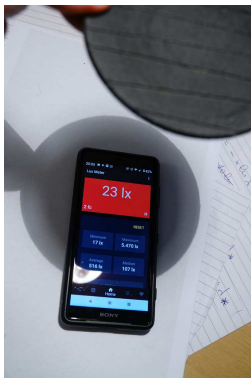
# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



Immagino possibili **obiezioni**, che *condivido a priori*...

**Intento:**

# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)

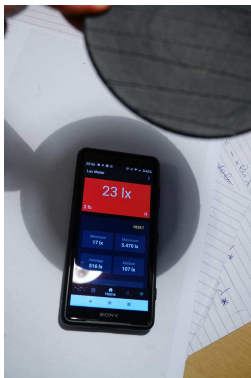


Immagino possibili **obiezioni**, che *condivido a priori*...

## **Intento:**

- ▶ stimare l'**ordine di grandezza**;

# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



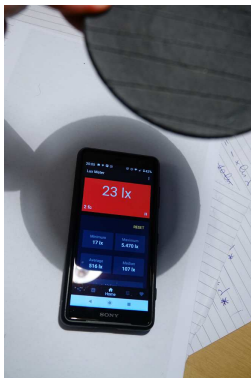
Immagino possibili **obiezioni**, che *condivido a priori*...

## **Intento:**

- ▶ stimare l'**ordine di grandezza**;
- ▶ capire **se gli effetti sono critici** per ulteriori misure.



# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



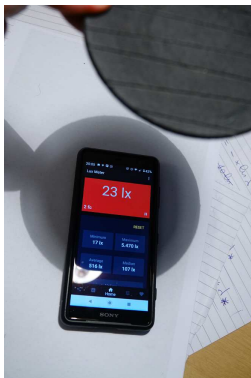
Immagino possibili obiezioni, che *condivido a priori*...

## **Intento:**

- ▶ stimare l'**ordine di grandezza**;
- ▶ capire **se gli effetti sono critici** per ulteriori misure.

Ovviamente, cercare di organizzarsi per fare le cose al meglio

# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



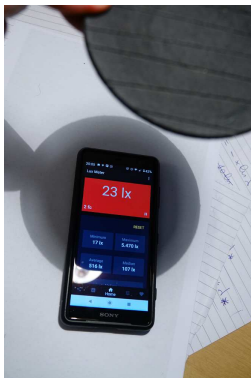
Immagino possibili **obiezioni**, che *condivido a priori*...

## **Intento:**

- ▶ stimare l'**ordine di grandezza**;
- ▶ capire **se gli effetti sono critici** per ulteriori misure.

Ovviamente, cercare di organizzarsi per fare le cose al meglio... ma in un tempo finito

# Stima grossolana della luce non diretta (e di fondo)



Immagino possibili **obiezioni**, che *condivido a priori*...

## **Intento:**

- ▶ stimare l'**ordine di grandezza**;
- ▶ capire **se gli effetti sono critici** per ulteriori misure.

Ovviamente, cercare di organizzarsi per fare le cose al meglio... ma in un tempo finito

⇒ "In the long run we are all dead."

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(**300 lx erano tanti** perché sotto una lampada da tavolo!)

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione,



## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
  - ▶ Analoga alla percezione del suono:

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
  - ▶ Analoga alla percezione del suono:  
⇒ i **decibel** sono logaritmi della pressione sonora.

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
  - ▶ Analoga alla percezione del suono:  
⇒ i **decibel** sono logaritmi della pressione sonora.
  - ▶ **Grande adattabilità all'ambiente!**

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
  - ▶ Analoga alla percezione del suono:  
⇒ i **decibel** sono logaritmi della pressione sonora.
  - ▶ **Grande adattabilità all'ambiente!**
- ▶ **Dipendenza dalla distanza della sorgente**

# Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
  - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!**  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
  - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
  - ▶ Analoga alla percezione del suono:  
⇒ i **decibel** sono logaritmi della pressione sonora.
  - ▶ **Grande adattabilità all'ambiente!**
- ▶ **Dipendenza dalla distanza della sorgente**:  
→ organizzarsi a fare le misure!

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
    - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!** (\*)  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
    - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
    - ▶ Analoga alla percezione del suono:  
⇒ i **decibel** sono logaritmi della pressione sonora.
    - ▶ **Grande adattabilità all'ambiente!**
  - ▶ **Dipendenza dalla distanza della sorgente**:  
→ organizzarsi a fare le misure!
- (\*) A proposito, **quanti lux** si misurano **alla luce diretta del sole?**

## Qualche attività

- ▶ Provare a fare *misure in diversi ambienti*:
    - ▶ si scoprirà che **l'occhio umano si adatta** a condizioni di illuminamento che possono differire di **vari ordini di grandezza!** (\*)  
(300 lx erano tanti perché sotto una lampada da tavolo!)
    - ▶ **Dipendenza logaritmica** della percezione della luce!  
(Chi si intende un po' di fotografia sa che un **raddoppio/dimezzamento** dell'illuminazione, ovvero  **$\pm 1$  diaframma**, è **difficilmente percepibile** dall'occhio umano, il quale si adatta rapidamente)
    - ▶ Analoga alla percezione del suono:  
⇒ i **decibel** sono logaritmi della pressione sonora.
    - ▶ **Grande adattabilità all'ambiente!**
  - ▶ **Dipendenza dalla distanza della sorgente**:  
→ organizzarsi a fare le misure!
- (\*) A proposito, **quanti lux** si misurano **alla luce diretta del sole**?  
→ Avete tutte le informazioni: provare a fare l'**esercizio!**



## Intensità luminosa

- ▶ Non tutte le sorgenti sono **isotrope** (*‘emettono la luce nello stesso modo in tutte le direzioni’*)

## Intensità luminosa

- ▶ Non tutte le sorgenti sono **isotrope** (*'emettono la luce nello stesso modo in tutte le direzioni'*)

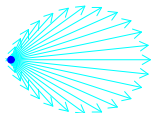
Spostiamoci un momento su **Flatland** (*'sezione equatoriale'*):

## Intensità luminosa

- ▶ Non tutte le sorgenti sono **isotrope** (*'emettono la luce nello stesso modo in tutte le direzioni'*)

Spostiamoci un momento su **Flatland** (*'sezione equatoriale'*):

**Sorgente**

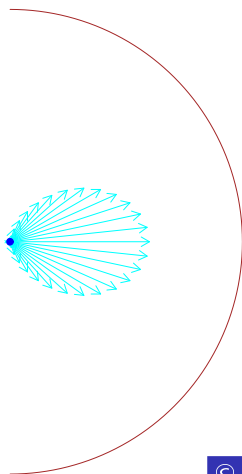


## Intensità luminosa

- ▶ Non tutte le sorgenti sono **isotrope** (*'emettono la luce nello stesso modo in tutte le direzioni'*)

Spostiamoci un momento su **Flatland** (*'sezione equatoriale'*):

**Sorgente** + **'schermo'**

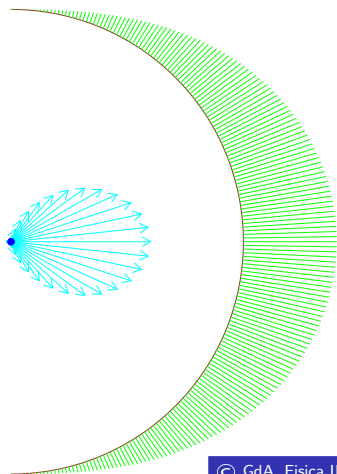


## Intensità luminosa

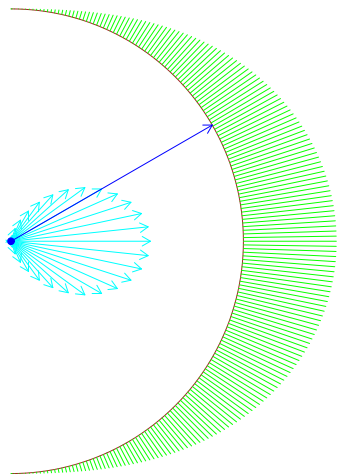
- ▶ Non tutte le sorgenti sono **isotrope** ('emettono la luce nello stesso modo in tutte le direzioni')

Spostiamoci un momento su **Flatland** ('sezione equatoriale'):

**Sorgente** + 'schermo' e **lux misurati**

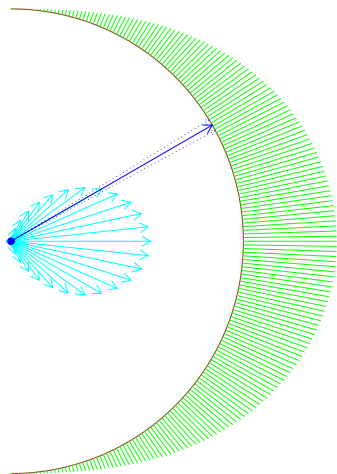


## Intensità luminosa in una certa direzione



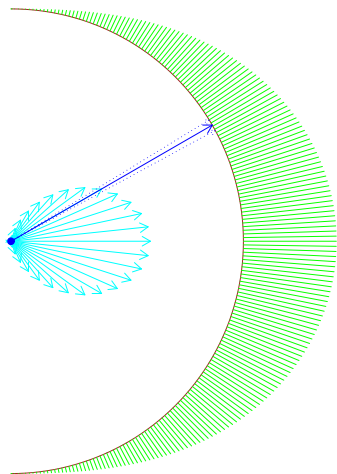
' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo (siamo a Flatland!)

## Intensità luminosa in una certa direzione



' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo (siamo a Flatland!)  
→ '*flumen*' su angolo

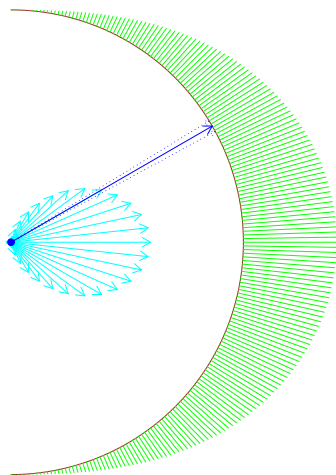
## Intensità luminosa in una certa direzione



' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo (siamo a Flatland!)  
→ '*flumen*' su angolo ('lumen' di Flatland!)



## Intensità luminosa in una certa direzione

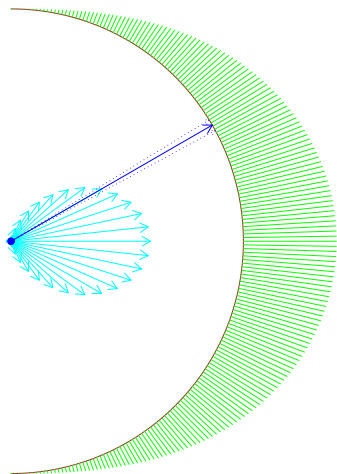


' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo (siamo a Flatland!)

→ '*flumen*' su angolo ('lumen' di Flatland!)

Angolo: lunghezza dell'arco diviso il raggio

## Intensità luminosa in una certa direzione



' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo (siamo a Flatland!)

→ '*flumen*' su angolo ('lumen' di Flatland!)

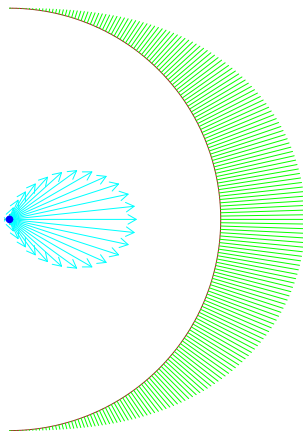
Angolo: lunghezza dell'arco diviso il raggio (radiante)

## Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):

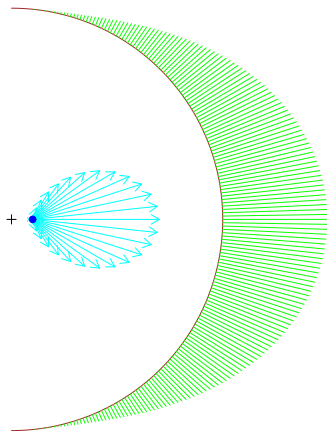
## Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



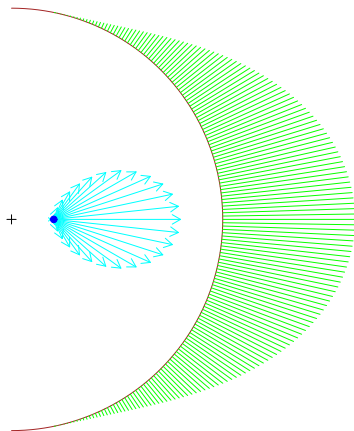
## Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



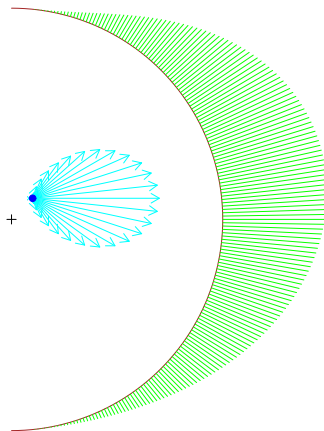
## Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



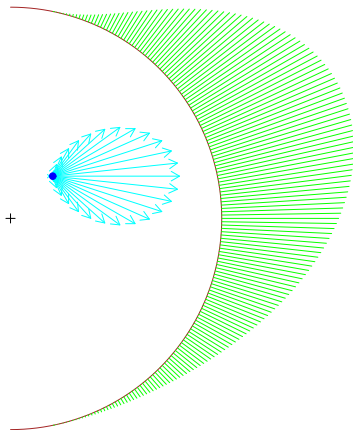
# Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



## Intensità luminosa e illuminamento

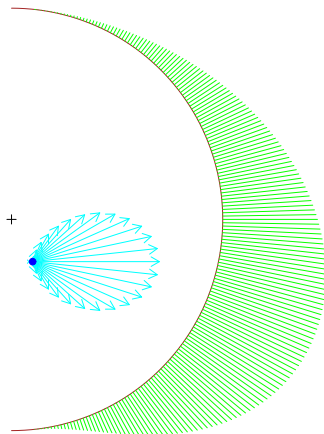
Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):





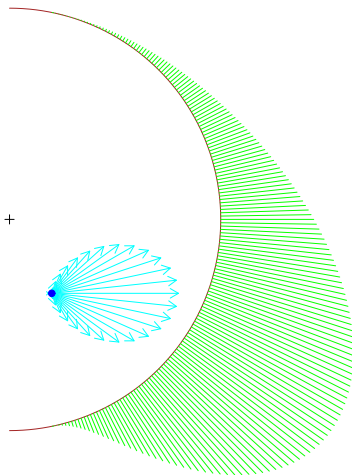
# Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



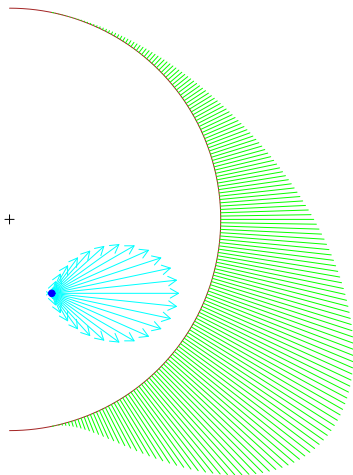
# Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



## Intensità luminosa e illuminamento

Per capire meglio il diverso significato, spostiamo la sorgente (sempre nel 'piano equatoriale'):



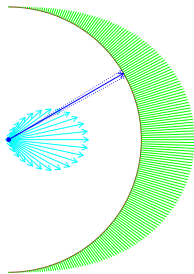
E, chiaramente, se abbiamo più sorgenti, si sommano i contributi.  
(Stiamo trascurando riflessioni/diffusioni)

# Intensità luminosa **in una certa direzione**

Torniamo sulla Terra

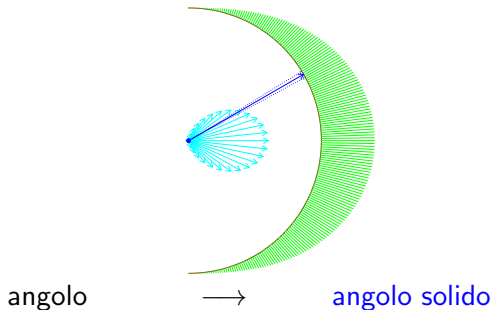
# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



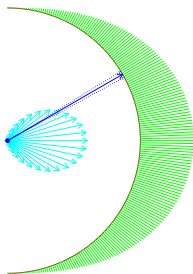
# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



angolo  
'arco diviso  $R$ '



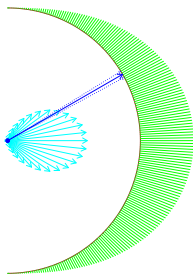
angolo solido



area calotta diviso  $R^2$

# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



angolo  
'arco diviso  $R$ '  
(adimensionale)

→

→

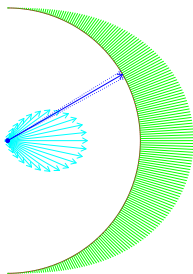
→

angolo solido  
area calotta diviso  $R^2$   
(adimensionale)



# Intensità luminosa in una certa direzione

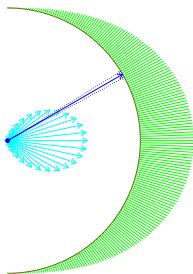
Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante:</b> $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradiano (sr):</b> $\Omega$

# Intensità luminosa in una certa direzione

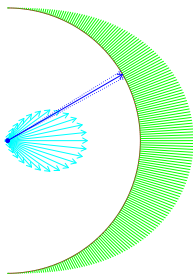
Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R'$	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta, \alpha$ , etc.	→	<b>steradiano (sr)</b> : $\Omega$
angolo giro: $2\pi$		

# Intensità luminosa in una certa direzione

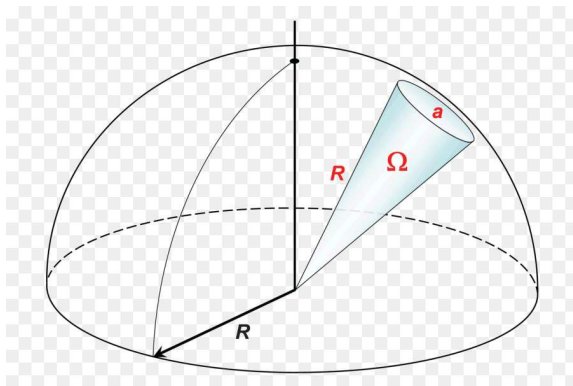
Torniamo sulla Terra (che non è piatta... ma non lo dite in giro!)



angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R'$	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta, \alpha$ , etc.	→	<b>steradianne (sr)</b> : $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

# Angolo solido

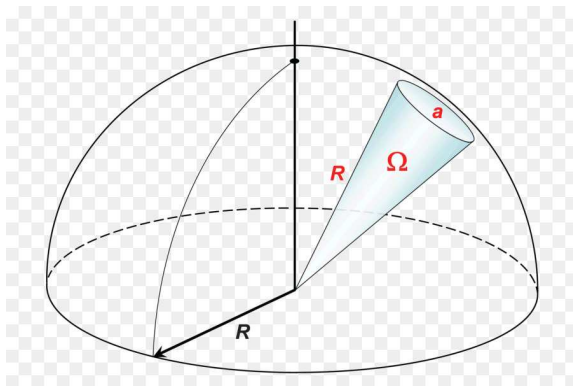
Una figura 3D



(Area della calotta!

# Angolo solido

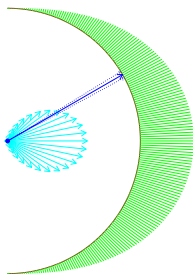
Una figura 3D



(Area della calotta! Se  $\Omega$  è 'piccolo' si può approssimare con la base del cono.)

# Intensità luminosa in una certa direzione

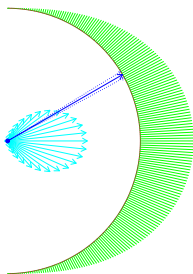
Torniamo sulla Terra (che non è piatta... non lo dite in giro!)



angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradiano</b> (sr): $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... non lo dite in giro!)

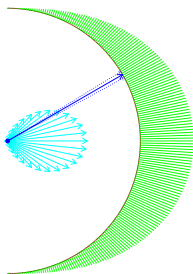


angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante:</b> $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradianne (sr):</b> $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo solido

# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... non lo dite in giro!)



angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradiano</b> (sr): $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

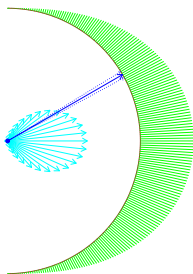
' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo solido

$$I_V(\text{dir}) = \frac{\Delta\Phi(\text{dir})}{\Delta\Omega}$$



# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... non lo dite in giro!)



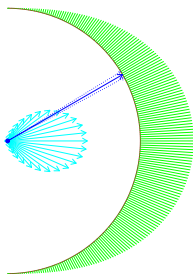
angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradiano</b> (sr): $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo solido

$$I_V(\text{dir}) = \frac{\Delta\Phi(\text{dir})}{\Delta\Omega} \rightarrow \frac{d\Phi(\text{dir})}{d\Omega}$$

# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... non lo dite in giro!)



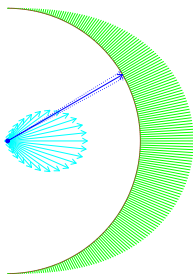
angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradianne</b> (sr): $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo solido

$$I_V(\text{dir}) = \frac{\Delta\Phi(\text{dir})}{\Delta\Omega} \rightarrow \frac{d\Phi(\text{dir})}{d\Omega} \rightarrow \text{candela}$$

# Intensità luminosa in una certa direzione

Torniamo sulla Terra (che non è piatta... non lo dite in giro!)



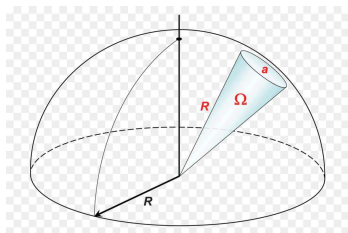
angolo	→	angolo solido
'arco diviso $R$ '	→	area calotta diviso $R^2$
(adimensionale)	→	(adimensionale)
<b>radiante</b> : $\theta$ , $\alpha$ , etc.	→	<b>steradiano</b> (sr): $\Omega$
angolo giro: $2\pi$	→	$4\pi$

' $I_V(\text{dir})$ ': flusso di luce per unità di angolo solido

$$I_V(\text{dir}) = \frac{\Delta\Phi(\text{dir})}{\Delta\Omega} \rightarrow \frac{d\Phi(\text{dir})}{d\Omega} \rightarrow \text{candela}(\text{dir})$$

# Angolo solido

Calcolo dell'angolo solido entro un 'cono' (anche degenera!):

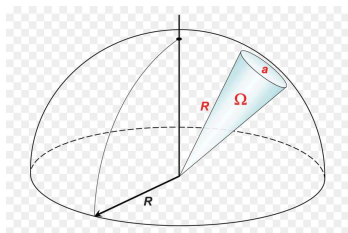


Indicando con  $\theta$  la 'semiapertura' del cono:

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos\theta)$$

# Angolo solido

Calcolo dell'angolo solido entro un 'cono' (anche degenera!):



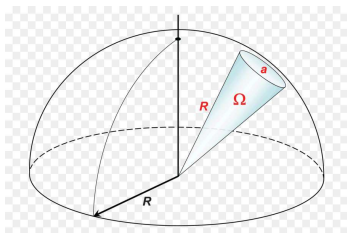
Indicando con  $\theta$  la 'semiapertura' del cono:

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta)$$

→ La formula vale anche per  $\theta \geq \pi/2$

# Angolo solido

Calcolo dell'angolo solido entro un 'cono' (anche degenerare!):



Indicando con  $\theta$  la 'semiapertura' del cono:

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta)$$

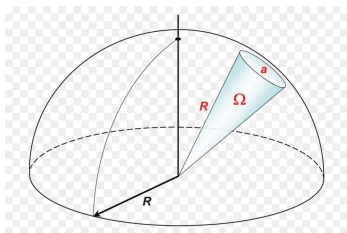
→ La formula vale anche per  $\theta \geq \pi/2$ . In particolare

- ▶ per  $\theta = \pi/2$  (superficie del cono che degenera in un piano, ovvero metà dell'angolo solido totale):

$$\Omega(\theta = \pi/2) = 2\pi \times (1 - 0)$$

# Angolo solido

Calcolo dell'angolo solido entro un 'cono' (anche degenerare!):



Indicando con  $\theta$  la 'semiapertura' del cono:

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta)$$

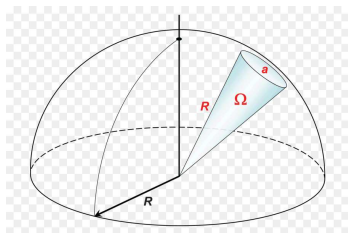
→ La formula vale anche per  $\theta \geq \pi/2$ . In particolare

- ▶ per  $\theta = \pi/2$  (superficie del cono che degenera in un piano, ovvero metà dell'angolo solido totale):

$$\Omega(\theta = \pi/2) = 2\pi \times (1 - 0) = 2\pi;$$

# Angolo solido

Calcolo dell'angolo solido entro un 'cono' (anche degenerare!):



Indicando con  $\theta$  la 'semiapertura' del cono:

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta)$$

→ La formula vale anche per  $\theta \geq \pi/2$ . In particolare

- ▶ per  $\theta = \pi/2$  (superficie del cono che degenera in un piano, ovvero metà dell'angolo solido totale):

$$\Omega(\theta = \pi/2) = 2\pi \times (1 - 0) = 2\pi;$$

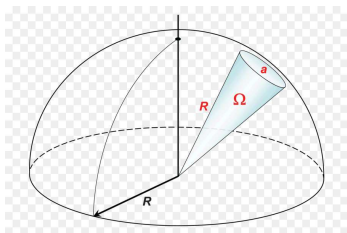
- ▶ per  $\theta = \pi$  (intero angolo solido):

$$\Omega(\theta = \pi) = 2\pi \times (1 - (-1))$$



# Angolo solido

Calcolo dell'angolo solido entro un 'cono' (anche degenerare!):



Indicando con  $\theta$  la 'semiapertura' del cono:

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta)$$

→ La formula vale anche per  $\theta \geq \pi/2$ . In particolare

- ▶ per  $\theta = \pi/2$  (superficie del cono che degenera in un piano, ovvero metà dell'angolo solido totale):

$$\Omega(\theta = \pi/2) = 2\pi \times (1 - 0) = 2\pi;$$

- ▶ per  $\theta = \pi$  (intero angolo solido):

$$\Omega(\theta = \pi) = 2\pi \times (1 - (-1)) = 4\pi.$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ ,  
da cui  $\cos \theta$ ?

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

**Aprossimazione per piccoli angoli:**

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **A**pprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ),

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **A**pprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **A**pprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Aprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]



## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Aprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ ,

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Aprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Aprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Aprossimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$  ove  $\tan \theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Approssimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ ,

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **Approssimazione per piccoli angoli:**

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2}$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **Approssimazione per piccoli angoli:**

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **Approssimazione per piccoli angoli:**

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2\theta)/2$$



## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **Approssimazione per piccoli angoli:**

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2\theta)/2 \approx 1 - (r_c/R)^2/2.$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Approssimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$  ove  $\tan \theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos \theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2 \theta)/2 \approx 1 - (r_c/R)^2/2.$$

Abbiamo quindi

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta)$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Approssimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2\theta)/2 \approx 1 - (r_c/R)^2/2.$$

Abbiamo quindi

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos\theta) \approx 2\pi \times (1 - 1 + (r_c/R)^2/2)$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos \theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### **Approssimazione per piccoli angoli:**

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$  ove  $\tan \theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos \theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2 \theta)/2 \approx 1 - (r_c/R)^2/2.$$

Abbiamo quindi

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \theta) \approx 2\pi \times (1 - 1 + (r_c/R)^2/2) = \pi \times (r_c/R)^2$$

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Approssimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per angoli piccoli, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2\theta)/2 \approx 1 - (r_c/R)^2/2.$$

Abbiamo quindi

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos\theta) \approx 2\pi \times (1 - 1 + (r_c/R)^2/2) = \pi \times (r_c/R)^2$$

(Ci si poteva arrivare più direttamente *approssimando* l'area della calotta a quella di base del cono)

## Angolo solido per 'coni stretti'

Ma veramente ci dobbiamo calcolare l'angolo di semiapertura  $\theta$ , da cui  $\cos\theta$ ? Fortunatamente nei casi pratici no!

### Approssimazione per piccoli angoli:

- ▶ innanzitutto ricordiamo che, chiamando  $\epsilon$  un numero 'molto minore' di 1 (ad es.  $\epsilon = 0.1$ ), vale

$$(1 - \epsilon)^2 = 1 - 2\epsilon + \epsilon^2 \approx 1 - 2\epsilon$$

[ad es.  $(1 - 0.1)^2 \approx 0.80$ , contro 0.81 esatto, ok?]

→ Ne segue  $\sqrt{1 - 2\epsilon} \approx 1 - \epsilon$ , e quindi anche  $\sqrt{1 - \epsilon} \approx 1 - \epsilon/2$ .

- ▶ Per **angoli piccoli**, ossia  $\theta \ll 1$  (ovviamente radianti), vale l'approssimazione  $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$  ove  $\tan\theta = r_c/R$ , con  $r_c$  il raggio della base del cono.
- ▶ Ma, essendo  $\cos\theta = \sqrt{1 - \sin^2\theta}$ , abbiamo, per piccoli angoli,  
$$\cos\theta \approx \sqrt{1 - \theta^2} \approx 1 - \theta^2/2 \approx 1 - (\tan^2\theta)/2 \approx 1 - (r_c/R)^2/2.$$

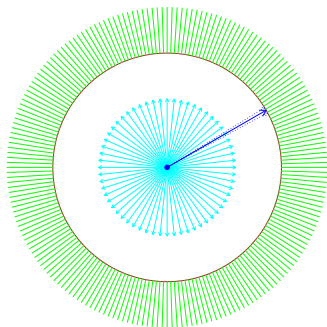
Abbiamo quindi

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos\theta) \approx 2\pi \times (1 - 1 + (r_c/R)^2/2) = \pi \times (r_c/R)^2$$

(Ci si poteva arrivare più direttamente *approssimando* l'area della calotta a quella di base del cono:  $\Rightarrow \Omega \approx \pi r_c^2/R^2$  !)

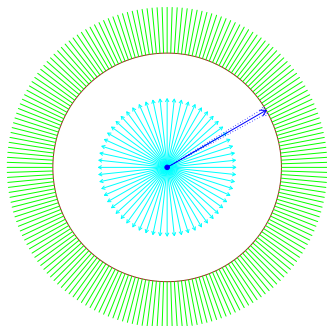
## Caso di emissione isotropa

(Figura su Flatland per praticità, ma ragioniamo nello spazio. . .)



## Caso di emissione isotropa

(Figura su Flatland per praticità, ma ragioniamo nello spazio. . .)

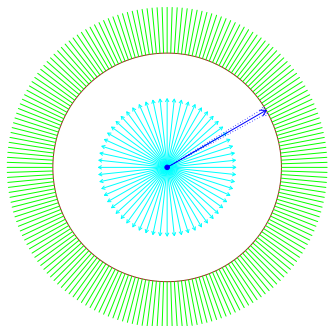


**Emissione isotropa:**  $I_V$  non dipende dalla direzione:



## Caso di emissione isotropa

(Figura su Flatland per praticità, ma ragioniamo nello spazio. . .)

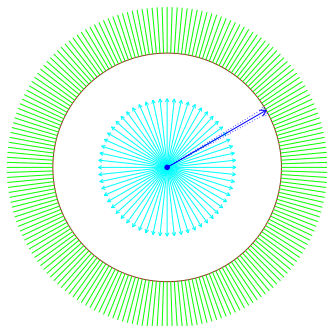


**Emissione isotropa:**  $I_V$  non dipende dalla direzione:

$$I_V = \frac{\text{flusso di luce totale}}{\text{angolo solido totale}}$$

## Caso di emissione isotropa

(Figura su Flatland per praticità, ma ragioniamo nello spazio...)

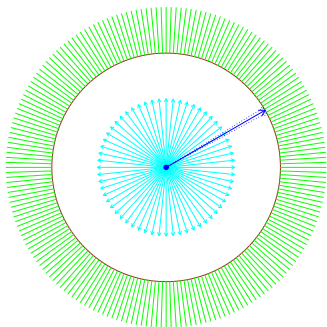


**Emissione isotropa:**  $I_V$  non dipende dalla direzione:

$$I_V = \frac{\text{flusso di luce totale}}{\text{angolo solido totale}} = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi}$$

## Caso di emissione isotropa

(Figura su Flatland per praticità, ma ragioniamo nello spazio. . .)



**Emissione isotropa:**  $I_V$  non dipende dalla direzione:

$$I_V = \frac{\text{flusso di luce totale}}{\text{angolo solido totale}} = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi}$$

in questo caso

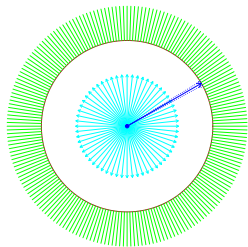
$$\text{'candele'} = \frac{\text{'lumen'}}{4\pi}$$

## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)

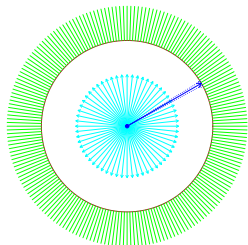
## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)



## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)

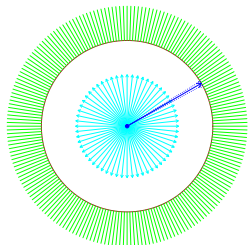


**Flusso luminoso:**

$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi$$

## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)

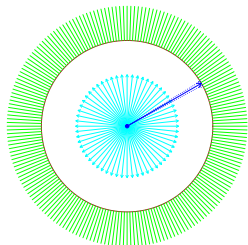


**Flusso luminoso:**

$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi = 1 \text{ cd} \times 4\pi$$

## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)



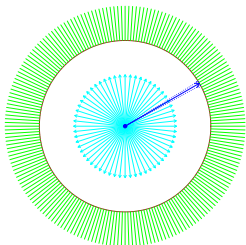
**Flusso luminoso:**

$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi = 1 \text{ cd} \times 4\pi = 4\pi \text{ lm} \approx 12.6 \text{ lm}$$



## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)



**Flusso luminoso:**

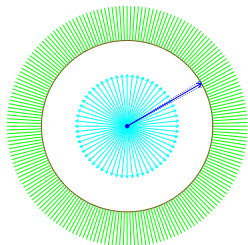
$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi = 1 \text{ cd} \times 4\pi = 4\pi \text{ lm} \approx 12.6 \text{ lm}$$

**Illuminamento** ('illuminance'):

$$E_V = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi R^2} =$$

## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)



**Flusso luminoso:**

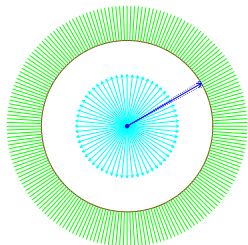
$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi = 1 \text{ cd} \times 4\pi = 4\pi \text{ lm} \approx 12.6 \text{ lm}$$

**Illuminamento** ('illuminance'):

$$E_V = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi R^2} = \frac{4\pi I_V}{4\pi R^2}$$

## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)



**Flusso luminoso:**

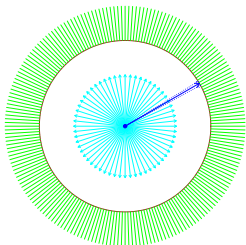
$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi = 1 \text{ cd} \times 4\pi = 4\pi \text{ lm} \approx 12.6 \text{ lm}$$

**Illuminamento** ('illuminance'):

$$E_V = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi R^2} = \frac{4\pi I_V}{4\pi R^2} = \frac{I_V}{R^2}$$

## Caso di emissione isotropa

Illuminamento prodotto da **1 cd** su una superficie a distanza  $R$   
(Trascurando riflessioni/diffusioni!)



**Flusso luminoso:**

$$\Phi_{tot} = I_V \times 4\pi = 1 \text{ cd} \times 4\pi = 4\pi \text{ lm} \approx 12.6 \text{ lm}$$

**Illuminamento** ('illuminance'):

$$E_V = \frac{\Phi_{tot}}{4\pi R^2} = \frac{4\pi I_V}{4\pi R^2} = \frac{I_V}{R^2} \xrightarrow{I_C=1 \text{ cd}, R=1 \text{ m}} 1 \text{ lx}$$

# Quante candele ha ... una candela?

## **Metodo:**

- ▶ misurare i lux (illuminamento) a una certa distanza;

# Quante candele ha ... una candela?

## Metodo:

- ▶ misurare i lux (illuminamento) a una certa distanza;
- lumen (totali)

# Quante candele ha ... una candela?

## Metodo:

- ▶ misurare i lux (illuminamento) a una certa distanza;
- lumen (totali) → candele.

# Quante candele ha ... una candela?

## Metodo:

- ▶ misurare i lux (illuminamento) a una certa distanza;
- lumen (totali) → candele.

## Problemi della misura:

- ▶ fare attenzione al background;



# Quante candele ha ... una candela?

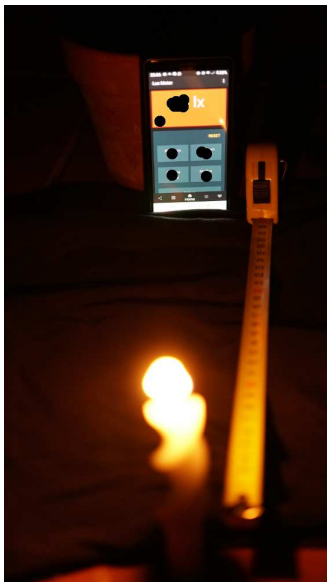
## Metodo:

- ▶ misurare i lux (illuminamento) a una certa distanza;
- lumen (totali) → candele.

## Problemi della misura:

- ▶ fare attenzione al background;
- ▶ valori intorno al minimo misurabile dalle app (!)

Quante candele ha ... una candela?



Buon divertimento!

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

“The **candela** [...] is **defined** by taking the fixed **numerical value of the luminous efficacy** of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz ... to be **683** when expressed in the unit **lm/W**...”

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

“The **candela** [...] is **defined** by taking the fixed **numerical value of the luminous efficacy** of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz ... to be **683** when expressed in the unit **lm/W**...”

La metrologia ha le sue ragioni...

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

“The **candela** [...] is **defined** by taking the fixed **numerical value of the luminous efficacy** of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz ... to be **683** when expressed in the unit **lm/W**...”

La metrologia ha le sue ragioni...

$540 \times 10^{12}$  Hz?

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

“The **candela** [...] is **defined** by taking the fixed **numerical value of the luminous efficacy** of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz ... to be **683** when expressed in the unit **lm/W**...”

La metrologia ha le sue ragioni...

$540 \times 10^{12}$  Hz?  $\lambda = c/\nu \rightarrow 555.\bar{6}$  nm



# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

“The **candela** [...] is **defined** by taking the fixed **numerical value of the luminous efficacy** of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz ... to be **683** when expressed in the unit **lm/W**...”

La metrologia ha le sue ragioni...

$540 \times 10^{12}$  Hz?  $\lambda = c/\nu \rightarrow 555.\bar{6}$  nm ma *metrologicamente* è preferibile  $\nu$ !

# Parentesi metrologica

Sistema Internazionale:

- ▶ metro;
- ▶ chilogrammo;
- ▶ secondo;
- ▶ ...
- ▶ **candela** (anche in inglese!).

“The **candela** [...] is **defined** by taking the fixed **numerical value of the luminous efficacy** of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz ... to be **683** when expressed in the unit **lm/W**...”

La metrologia ha le sue ragioni...

$540 \times 10^{12}$  Hz?  $\lambda = c/\nu \rightarrow 555.\bar{6}$  nm ma *metrologicamente* è preferibile  $\nu$ ! (Velocità e lunghezza d'onda variano nei mezzi!)

## Qualcosa sui colori

Finora abbiamo considerato la luce (visibile) 'totale'.

# Qualcosa sui colori

Finora abbiamo considerato la luce (visibile) 'totale'.

Lo studio (quantitativo) dei colori è un altro mondo!  
(Ben al di là di questo intervento)

# Qualcosa sui colori

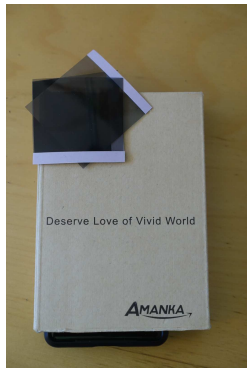
Finora abbiamo considerato la luce (visibile) 'totale'.

Lo studio (quantitativo) dei colori è un altro mondo!  
(Ben al di là di questo intervento)

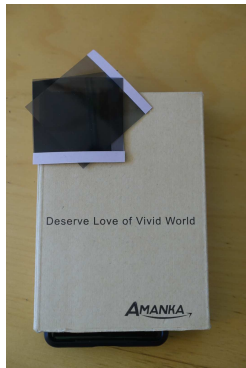
Eppure qualche piccola (grande!) cosa si può dire

Cos'è il bianco?

# Cos'è il bianco?



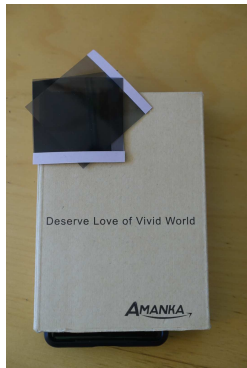
## Cos'è il bianco?



Come mai le scatoline hanno **colori** (leggermente) **diversi** nelle due foto? (e anche il tavolo e le strisce di post-it)



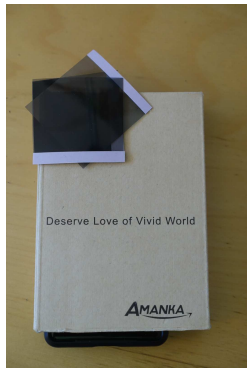
## Cos'è il bianco?



Come mai le scatoline hanno **colori** (leggermente) **diversi** nelle due foto? (e anche il tavolo e le strisce di post-it)

**Nota:** Per la fretta le due foto sono state effettuate in modalità automatica (non tutto il male vien per nuocere. . .)

## Cos'è il bianco?



Come mai le scatoline hanno **colori** (leggermente) **diversi** nelle due foto? (e anche il tavolo e le strisce di post-it)

**Nota:** Per la fretta le due foto sono state effettuate in modalità automatica (non tutto il male vien per nuocere. . .)

Come mai spesso (e malvolentieri) le cose **bianche** nelle foto ci vengono **giallognole** o **azzurrognole**?

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;

# Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

Ma cosa succede se illuminiamo un oggetto con una **luce leggermente giallognola**?

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

Ma cosa succede se illuminiamo un oggetto con una **luce leggermente giallognola**?

- ▶ un foglio bianco la riflette tutta

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

Ma cosa succede se illuminiamo un oggetto con una

**luce leggermente giallognola?**

- ▶ un foglio bianco la riflette tutta  
→ ci *dovrebbe* apparire **giallognolo**



## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

Ma cosa succede se illuminiamo un oggetto con una

**luce leggermente giallognola?**

- ▶ un foglio bianco la riflette tutta  
→ ci *dovrebbe* apparire **giallognolo**
- ... ma il **cervello si adatta e lo vede bianco**  
(per contrasto con gli altri oggetti).

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

Ma cosa succede se illuminiamo un oggetto con una **luce leggermente giallognola**?

- ▶ un foglio bianco la riflette tutta  
→ ci *dovrebbe* apparire **giallognolo**
- ... ma il **cervello si adatta e lo vede bianco**  
(per contrasto con gli altri oggetti).

Ma la **foto** rimane **giallognola** (se non 'correggiamo')

## Cos'è il bianco?

Come ci hanno insegnato alle elementari,

- ▶ i corpi bianchi sono quelli che 'riflettono' (in realtà diffondono) tutti i colori nello stesso modo;
- ▶ quelli **rossi** diffondono 'solo' il **rosso**;
- ▶ quelli **verdi** diffondono 'solo' il **verde**;
- ▶ etc.
- ▶ ... e il **nero** assorbe tutti colori (e si scalda di più).

Ma cosa succede se illuminiamo un oggetto con una **luce leggermente giallognola**?

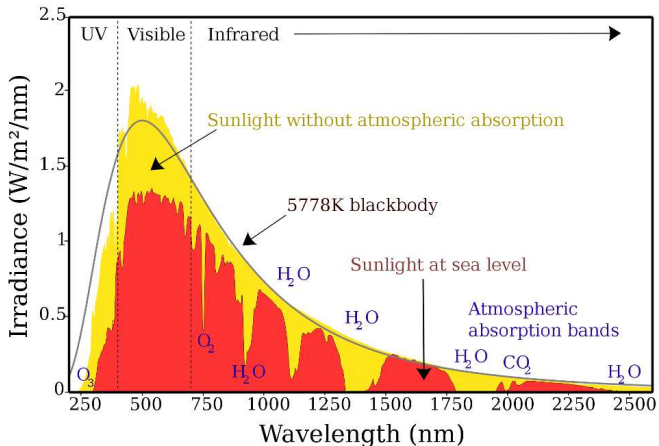
- ▶ un foglio bianco la riflette tutta  
→ ci *dovrebbe* apparire **giallognolo**
- ... ma il **cervello si adatta e lo vede bianco**  
(per contrasto con gli altri oggetti).

Ma la **foto** rimane **giallognola** (se non 'correggiamo')  
⇒ **bilanciamento del bianco**.

# Spettro di emissione del Sole

Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

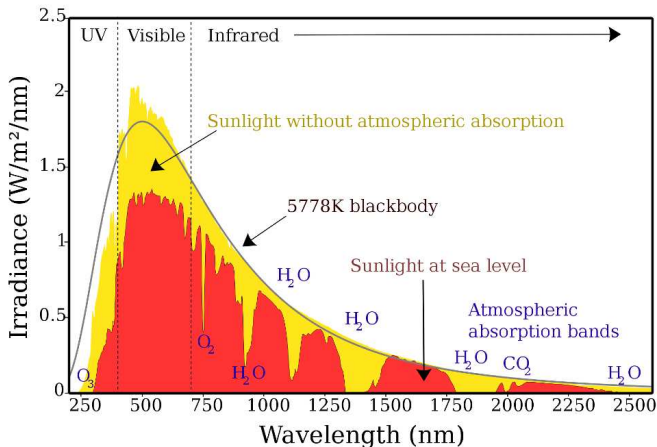


⇒ curva continua (blackbody: 'corpo nero');

# Spettro di emissione del Sole

Potenza al  $\text{m}^2$  per unità di lunghezza d'onda ([wiki/Sunlight](#))

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)



⇒ curva continua (blackbody: 'corpo nero');

⇒ 5778 K ('gradi Kelvin').

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura
  - **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura
  - **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome
  - **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .



# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura
    - **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome
    - **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .
- (Tale legge incorpora le due che seguono)

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura
  - **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome
  - **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .  
(Tale legge incorpora le due che seguono)
- ▶ **Legge di Stefan-Boltzmann**: 'emittanza' proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta:

$$q \propto T^4 \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura

→ **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome

→ **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .

(Tale legge incorpora le due che seguono)

- ▶ **Legge di Stefan-Boltzmann**: 'emittanza' proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta:

$$q \propto T^4 \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

→ termometri 'anti-Covid'

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura

→ **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome

→ **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .

(Tale legge incorpora le due che seguono)

- ▶ **Legge di Stefan-Boltzmann**: 'emittanza' proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta:

$$q \propto T^4 \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

→ termometri 'anti-Covid'

→ una volta risolto 'esercizio nr. 3 di pag. 6

siete in grado valutare la temperatura del Sole!

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura

→ **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome

→ **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .

(Tale legge incorpora le due che seguono)

- ▶ **Legge di Stefan-Boltzmann**: 'emittanza' proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta:

$$q \propto T^4 \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

→ termometri 'anti-Covid'

→ una volta risolto 'esercizio nr. 3 di pag. 6

siete in grado valutare la temperatura del Sole!

- ▶ **Legge di Wien**:

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T} \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

# Spettro di emissione del corpo nero

Leggi importanti (si invita ad approfondire...)

- ▶ Lo spettro di frequenza (e quindi lunghezza d'onda) dipende dalla temperatura

→ **Legge di Planck**, ove per la prima volta compare la famosa costante  $h$  che porta il suo nome

→ **quantizzazione dell'energia**  $E = h\nu$ .

(Tale legge incorpora le due che seguono)

- ▶ **Legge di Stefan-Boltzmann**: 'emittanza' proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta:

$$q \propto T^4 \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

→ termometri 'anti-Covid'

→ una volta risolto 'esercizio nr. 3 di pag. 6

siete in grado valutare la temperatura del Sole!

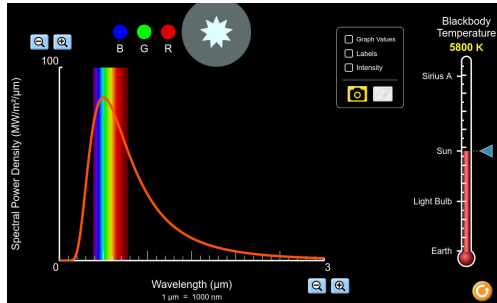
- ▶ **Legge di Wien**:

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T} \quad (\text{dettagli su Wiki/libri})$$

⇒  $T \uparrow \longrightarrow \lambda_{max} \downarrow \longrightarrow$  verso il blue.

# Spettro di emissione del corpo nero

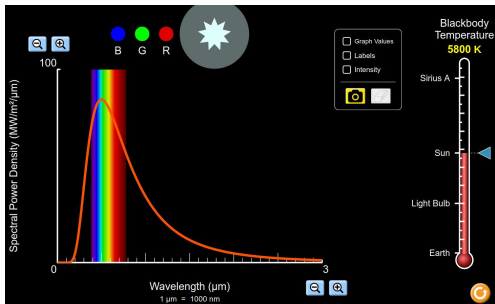
Simulazione interattiva:



[Clicca per andare al sito](#)

# Spettro di emissione del corpo nero

Simulazione interattiva:



[Clicca per andare al sito](#)

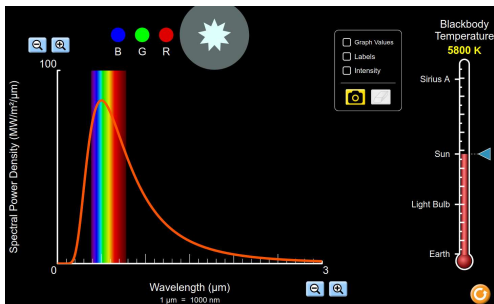
**Nota:** Nel linguaggio comune (e anche tecnico):

- ▶ **bassa temperatura colore** ( $\approx 3200$  K)  $\rightarrow$  **luce calda**;



# Spettro di emissione del corpo nero

Simulazione interattiva:



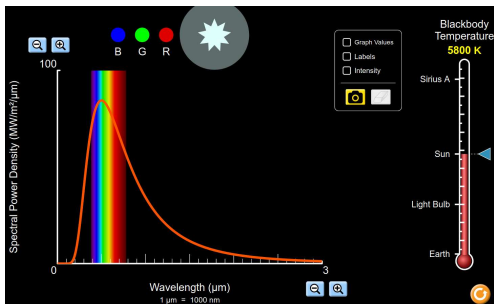
[Clicca per andare al sito](#)

**Nota:** Nel linguaggio comune (e anche tecnico):

- ▶ **bassa temperatura colore** ( $\approx 3200$  K)  $\rightarrow$  **luce calda**;
- ▶ **alta temperatura colore** ( $>\approx 5000$  K)  $\rightarrow$  **luce fredda**.

# Spettro di emissione del corpo nero

Simulazione interattiva:



[Clicca per andare al sito](#)

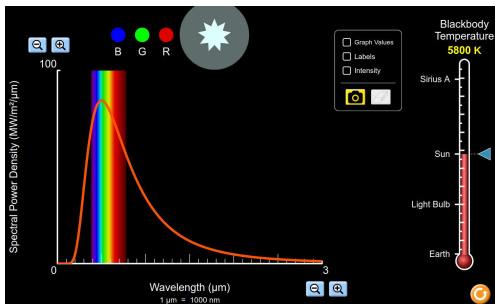
**Nota:** Nel linguaggio comune (e anche tecnico):

- ▶ **bassa temperatura colore** ( $\approx 3200$  K)  $\rightarrow$  **luce calda**;
- ▶ **alta temperatura colore** ( $>\approx 5000$  K)  $\rightarrow$  **luce fredda**.

Sic est...

# Spettro di emissione del corpo nero

Simulazione interattiva:



[Clicca per andare al sito](#)

**Nota:** Nel linguaggio comune (e anche tecnico):

- ▶ **bassa temperatura colore** ( $\approx 3200$  K)  $\rightarrow$  **luce calda**;
- ▶ **alta temperatura colore** ( $>\approx 5000$  K)  $\rightarrow$  **luce fredda**.

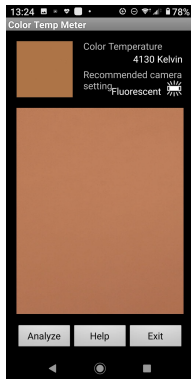
Sic est... (associamo il **rossastro** al **fuoco**, l'**azzurino** al **ghiaccio**)

Associazione bassa temperatura  $\leftrightarrow$  azzurro



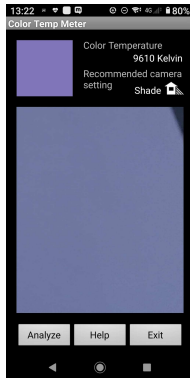
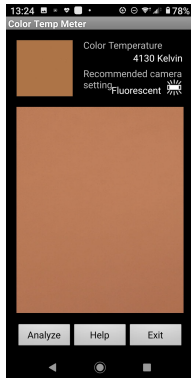
# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:



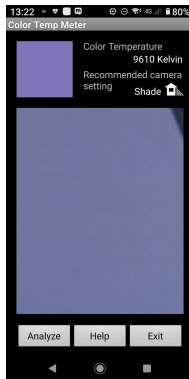
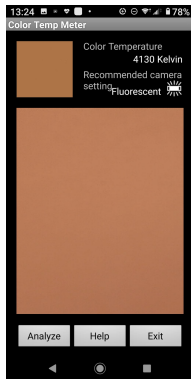
# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:



# Misuriamo la 'temperatura colore'

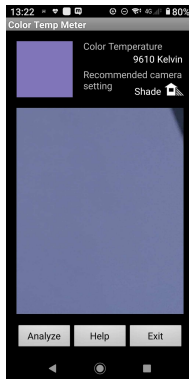
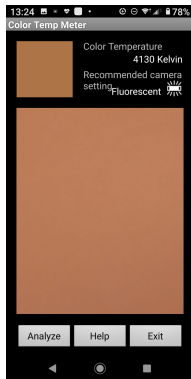
In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:



**9610 Kelvin**

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:

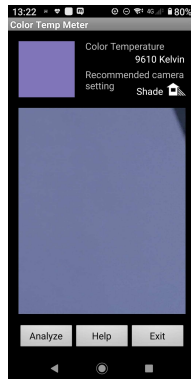
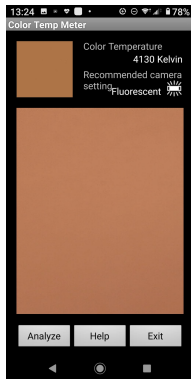


9610 Kelvin ???



# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:

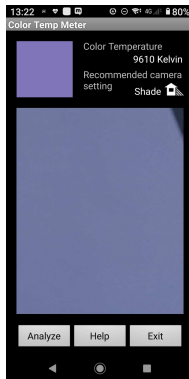
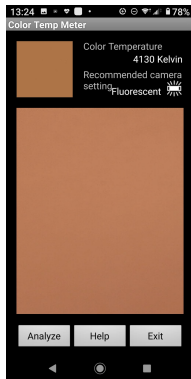


**9610 Kelvin ???**

► Il cielo è azzurro!

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:

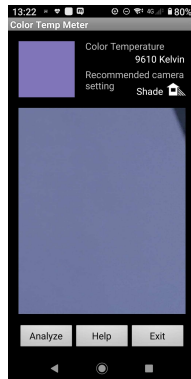
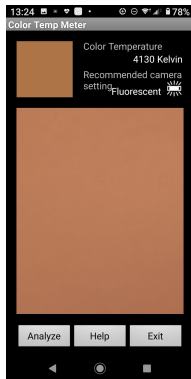


**9610 Kelvin ???**

► Il cielo è azzurro! toh! ...

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:

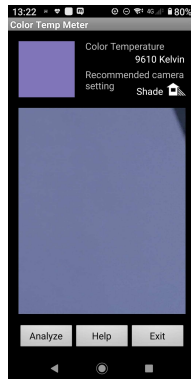
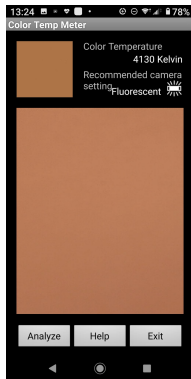


**9610 Kelvin ???**

► Il cielo è azzurro! toh! ... ma sicuramente non ha  $> 9000\text{ K}$ !

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:

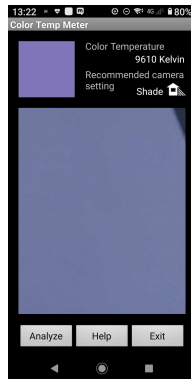
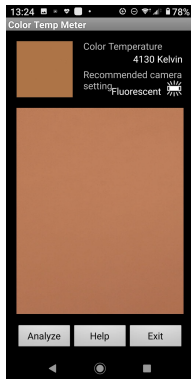


**9610 Kelvin ???**

► Il cielo è azzurro! toh! ... ma sicuramente non ha  $> 9000\text{ K}$ ! ???

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:



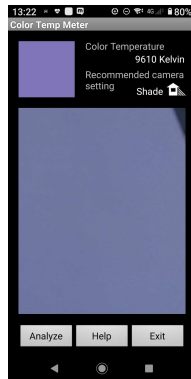
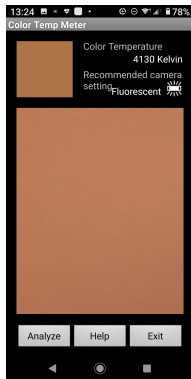
**9610 Kelvin ???**

► Il cielo è azzurro! toh! ... ma sicuramente non ha  $> 9000\text{ K}$ ! ???

⇒ Temperatura di un **'corpo nero'** equivalente che vedremmo di quel colore.

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:



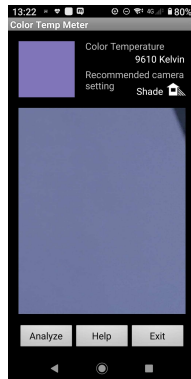
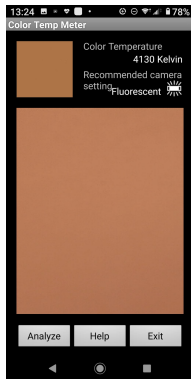
## 9610 Kelvin ???

► Il cielo è azzurro! toh! ... ma sicuramente non ha  $> 9000$  K! ???

⇒ Temperatura di un **'corpo nero' equivalente** che vedremmo di quel colore. (Insomma, una torcia a LED che emette luce chiara di  $\approx 5000$  K la possiamo toccare senza rischio di scottarci!)

# Misuriamo la 'temperatura colore'

In casa, sotto una lampada, e fuori all'ombra:



## 9610 Kelvin ???

- ▶ Il cielo è azzurro! toh! ... ma sicuramente non ha  $> 9000$  K! ???
- ⇒ Temperatura di un **'corpo nero' equivalente** che vedremmo di quel colore. (Insomma, una torcia a LED che emette luce chiara di  $\approx 5000$  K la possiamo toccare senza rischio di scottarci! E anche quella a 'luce calda',  $\approx 3200$  K!)