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? $\longrightarrow$ 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

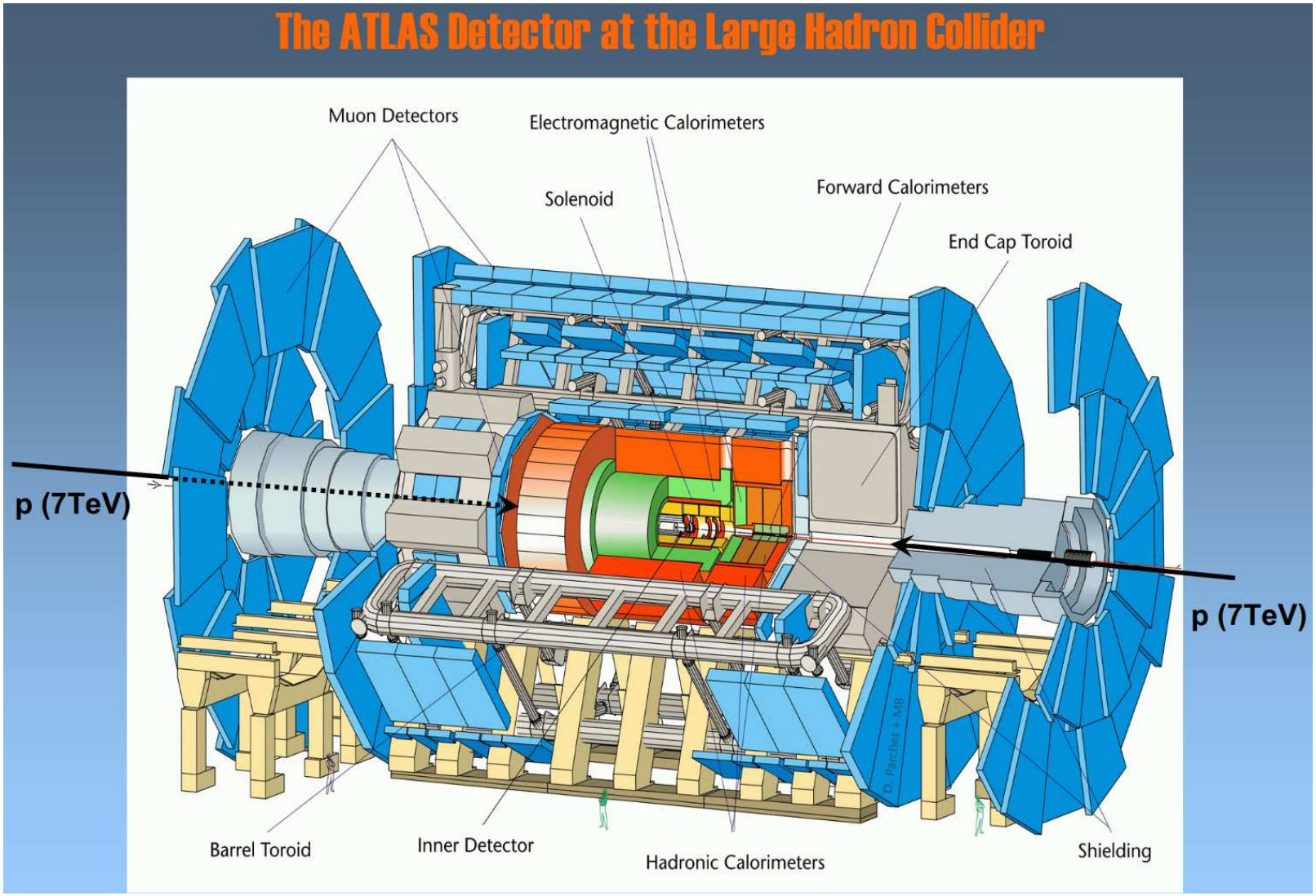
Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

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

Calorimetria

Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

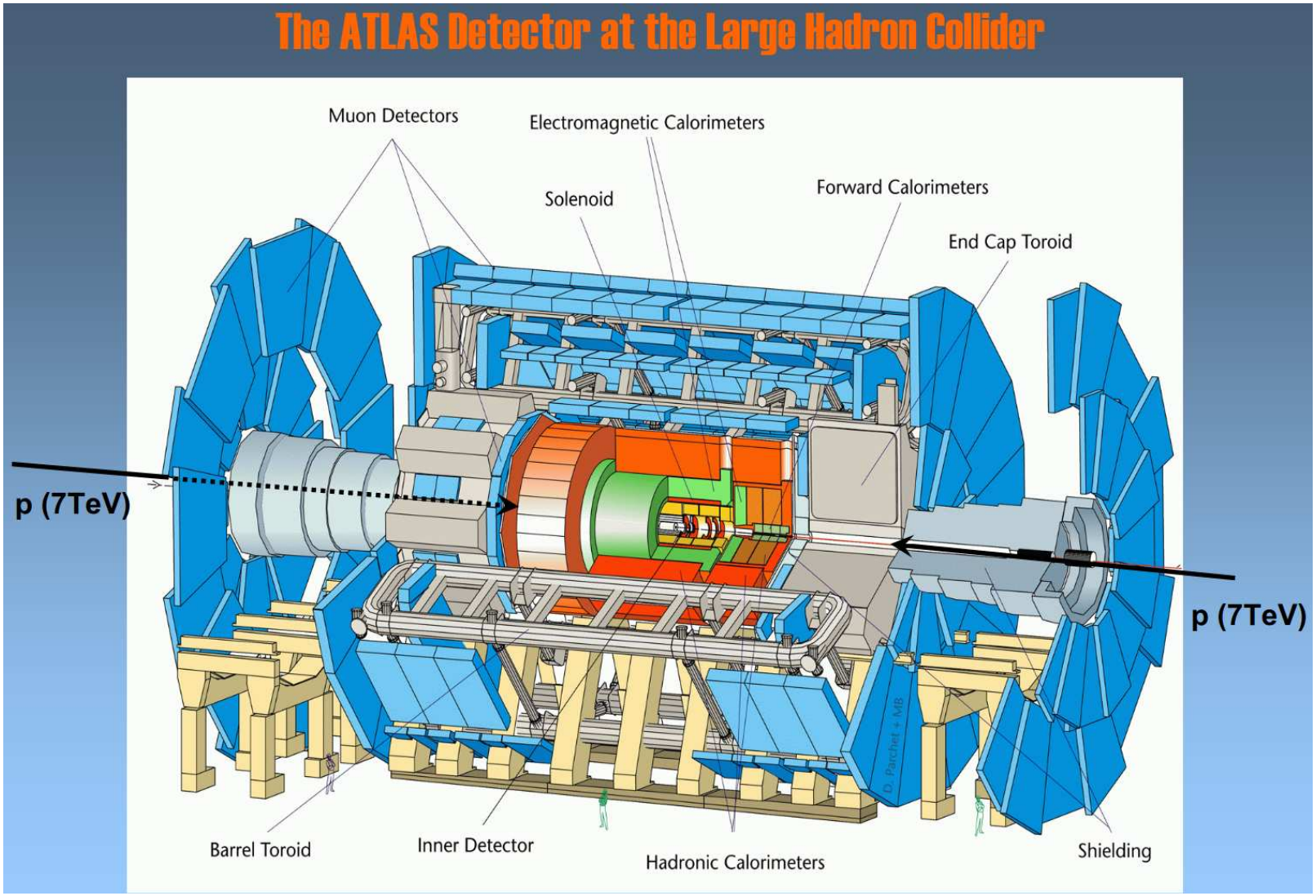
Importante il **concetto**, anche se sono mutate le tecniche



Calorimetria

Non è roba antica accantonata in qualche scantinato.

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



→ Output proporzionale a energia totale rilasciata

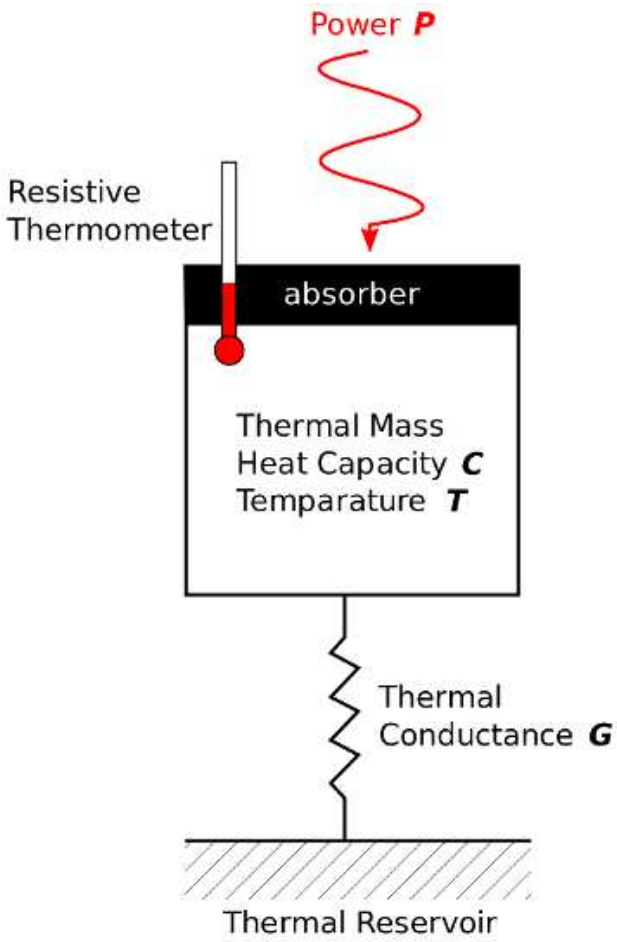
Misurare energia radiante ($\rightarrow$ 'radiometria')

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

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

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

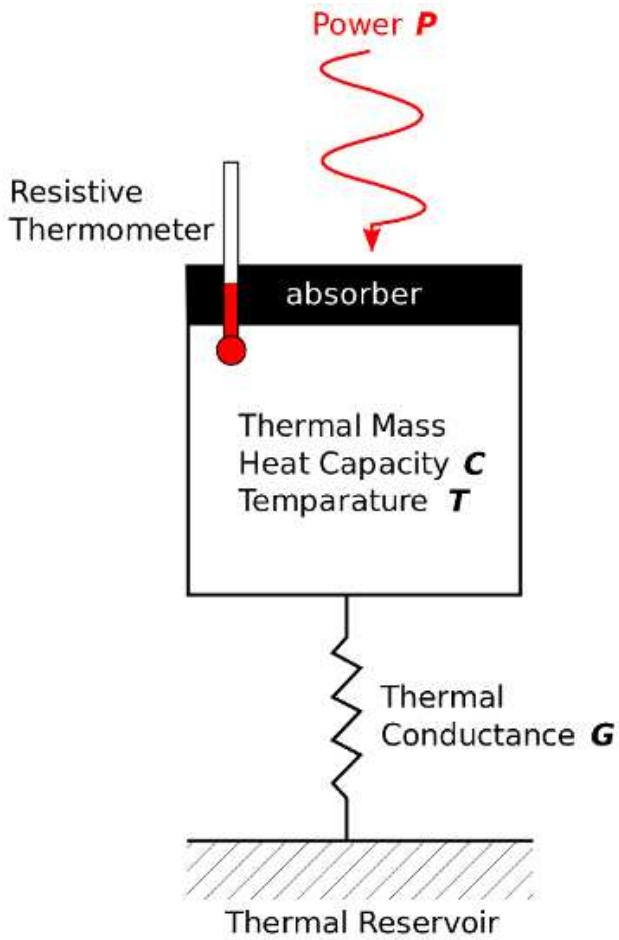
$\rightarrow$ Bolometro



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

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

$\rightarrow$ Bolometro



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

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2}$$

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2}$$

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

(pannello ortogonale ai raggi del sole)

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

(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):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

(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):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

(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 $\mathrm{m^2}$ di superficie?

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

(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 m^2 di superficie?
4. Ricordando la famosa $\boldsymbol{E = m\,c^2}$,
   $\rightarrow$ massa è 'bruciata' al secondo

Quanto ci scalda il Sole?

Costante solare (fuori dell'atmosfera):

$$\approx 1.36\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.4\,\mathrm{kW/m^2}$$

Al suolo (in condizioni ottimali):

$$\approx 1.00\,\mathrm{kW/m^2} \quad \rightarrow \quad \approx 1.0\,\mathrm{kW/m^2}$$

(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 m^2 di superficie?
4. Ricordando la famosa $\boldsymbol{E = m\,c^2}$,
   $\rightarrow$ massa è 'bruciata' al secondo
5. Quanta potenza arriva su un pannello di $10\,\mathrm{m}^2$ 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 $\longrightarrow$ **fotometria**

E quanto ci illumina?

radiometria $\longrightarrow$ **fotometria**

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

E quanto ci illumina?

radiometria $\longrightarrow$ **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 $\longrightarrow$ **fotometria**

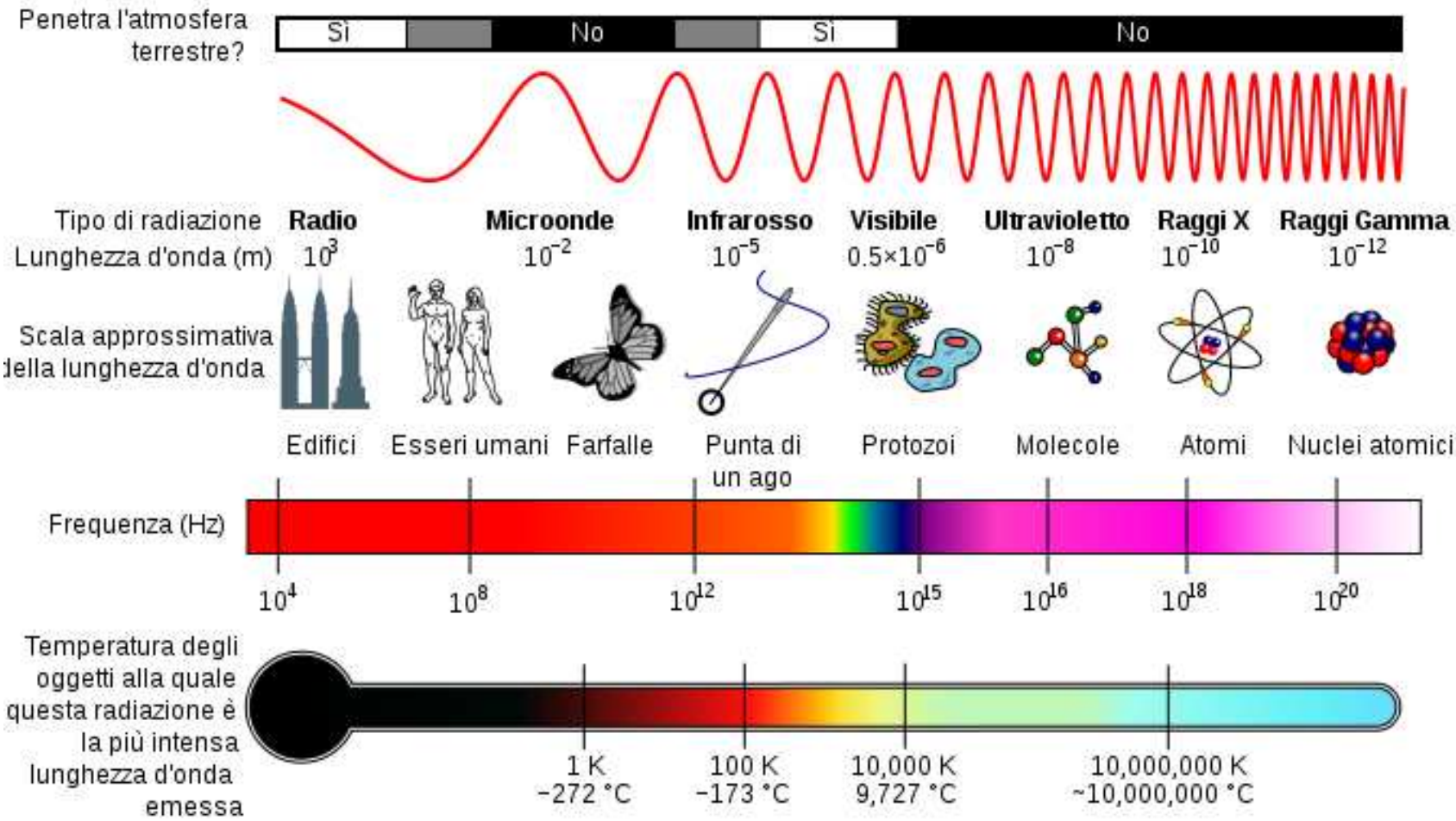
- Il sole emette radiazione elettromagnetica su un ampio spettro di frequenze.
- Ma l'occhio umano è sensibile
  solo a un intervallo limitato di frequenze
  $\Rightarrow$ **luce visibile**

E quanto ci illumina?

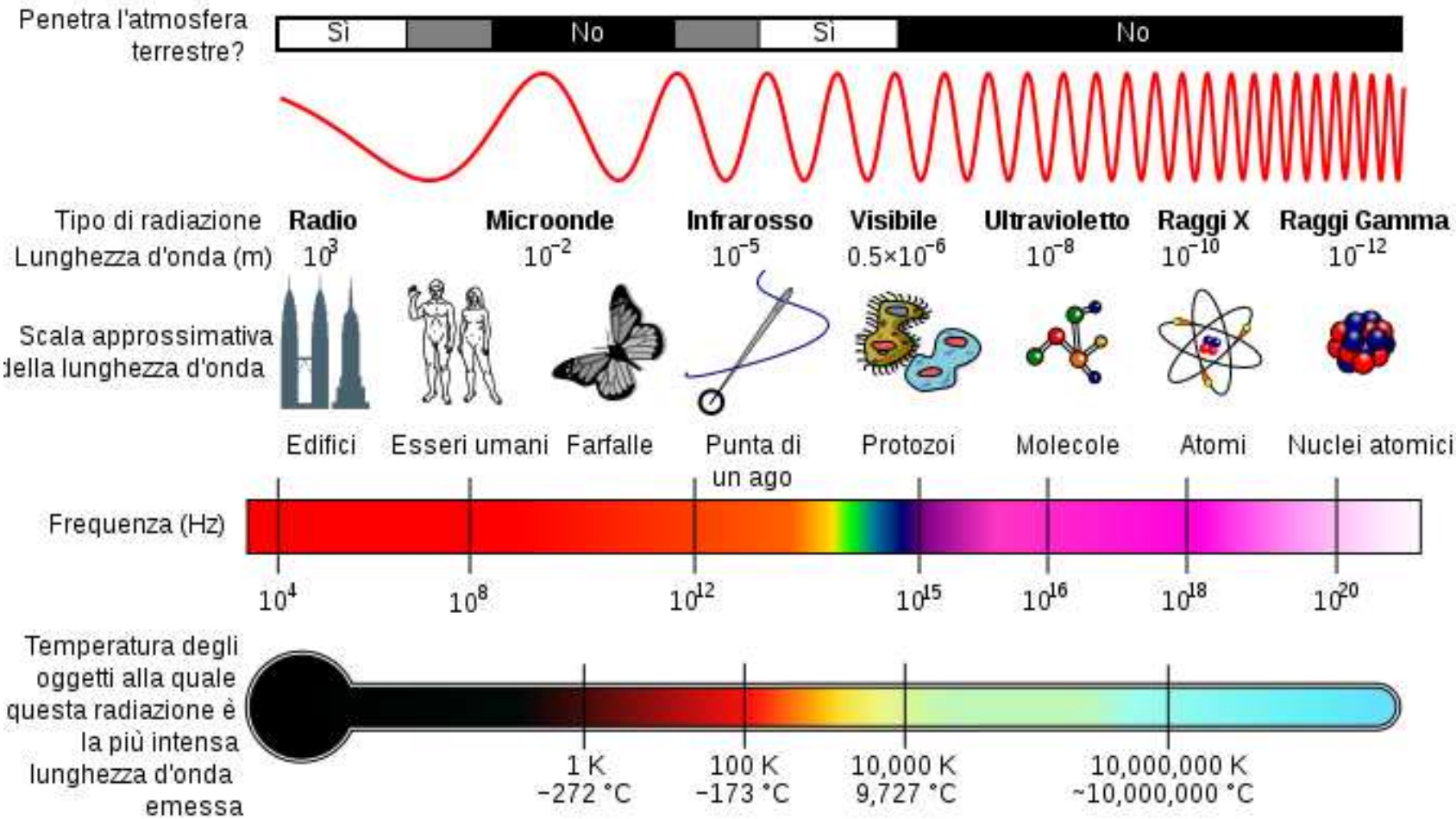
radiometria $\longrightarrow$ **fotometria**

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

Radiazione elettromagnetica

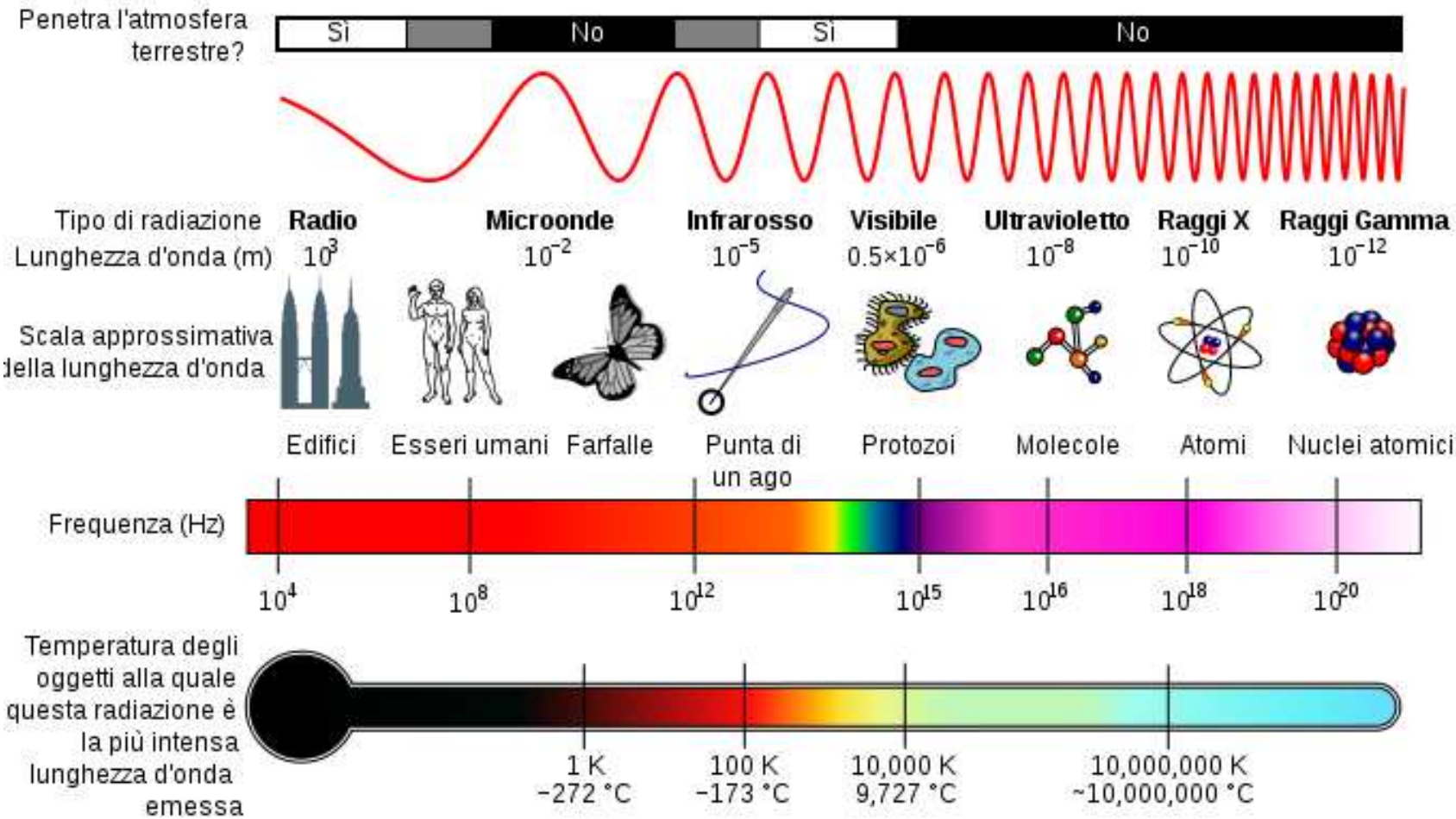


Radiazione elettromagnetica



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

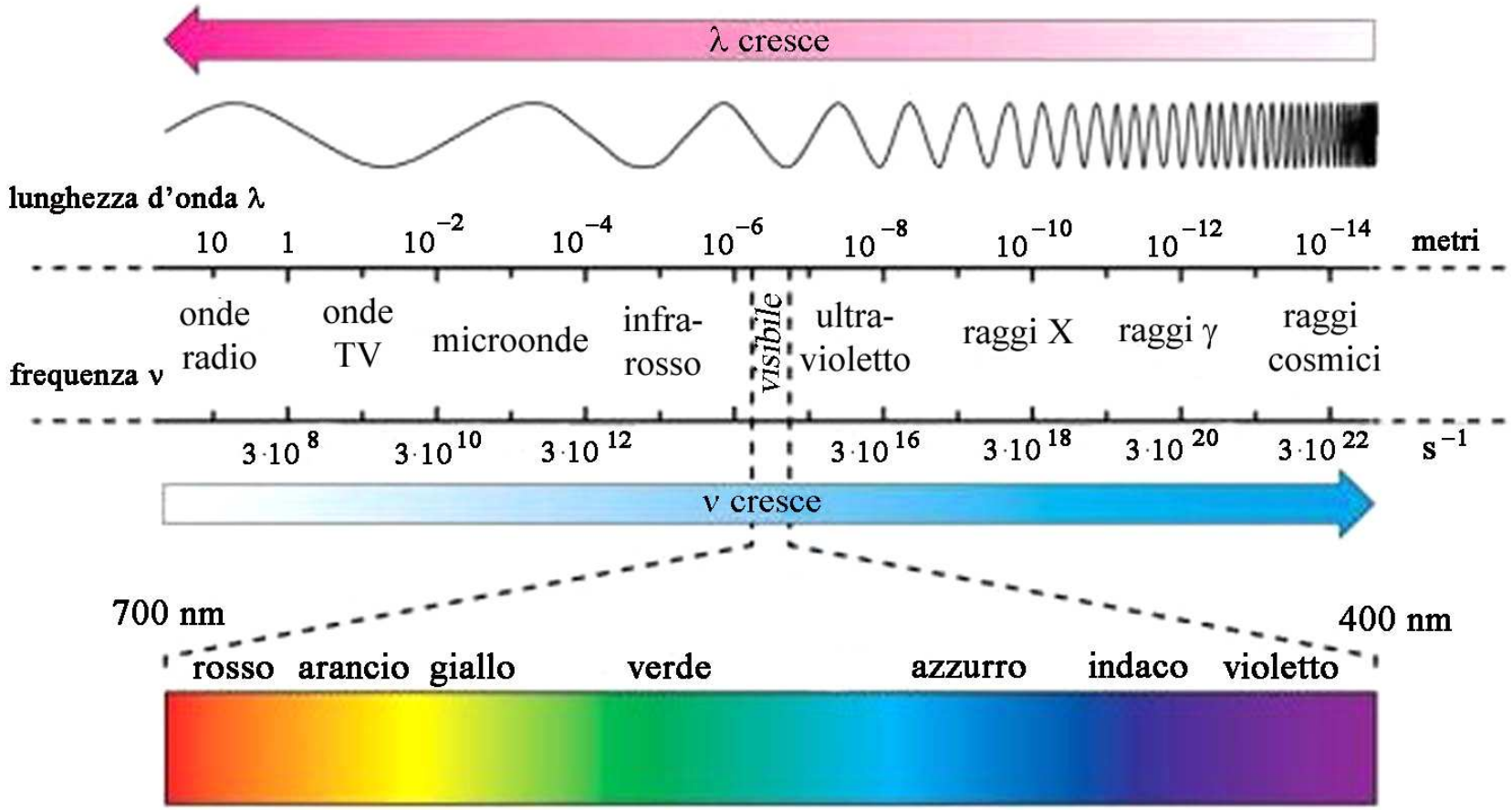
Radiazione elettromagnetica



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

Radiazione elettromagnetica

Zoom nel visibile:

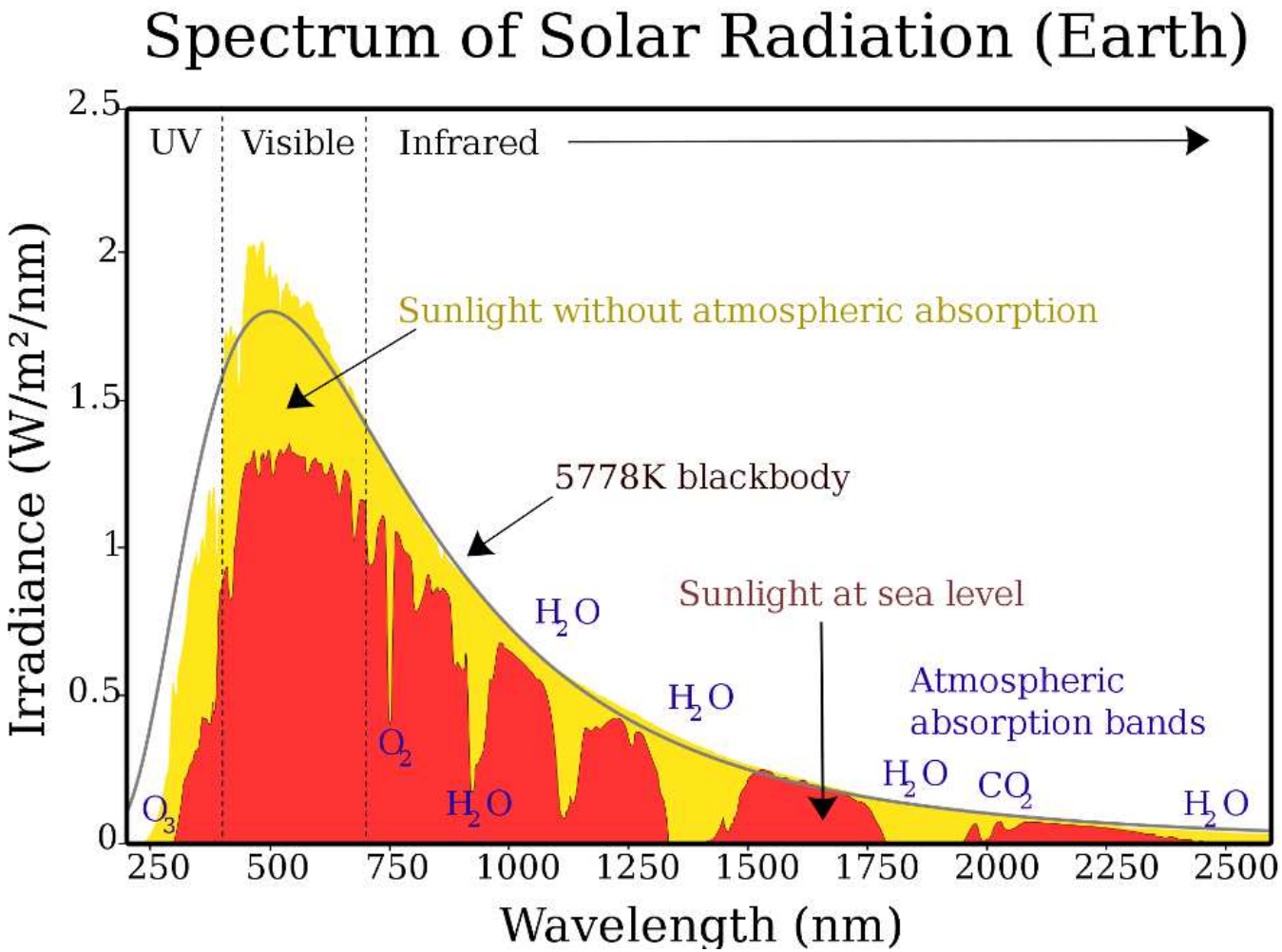


⇐ Infrarosso

Ultravioletto ⇒

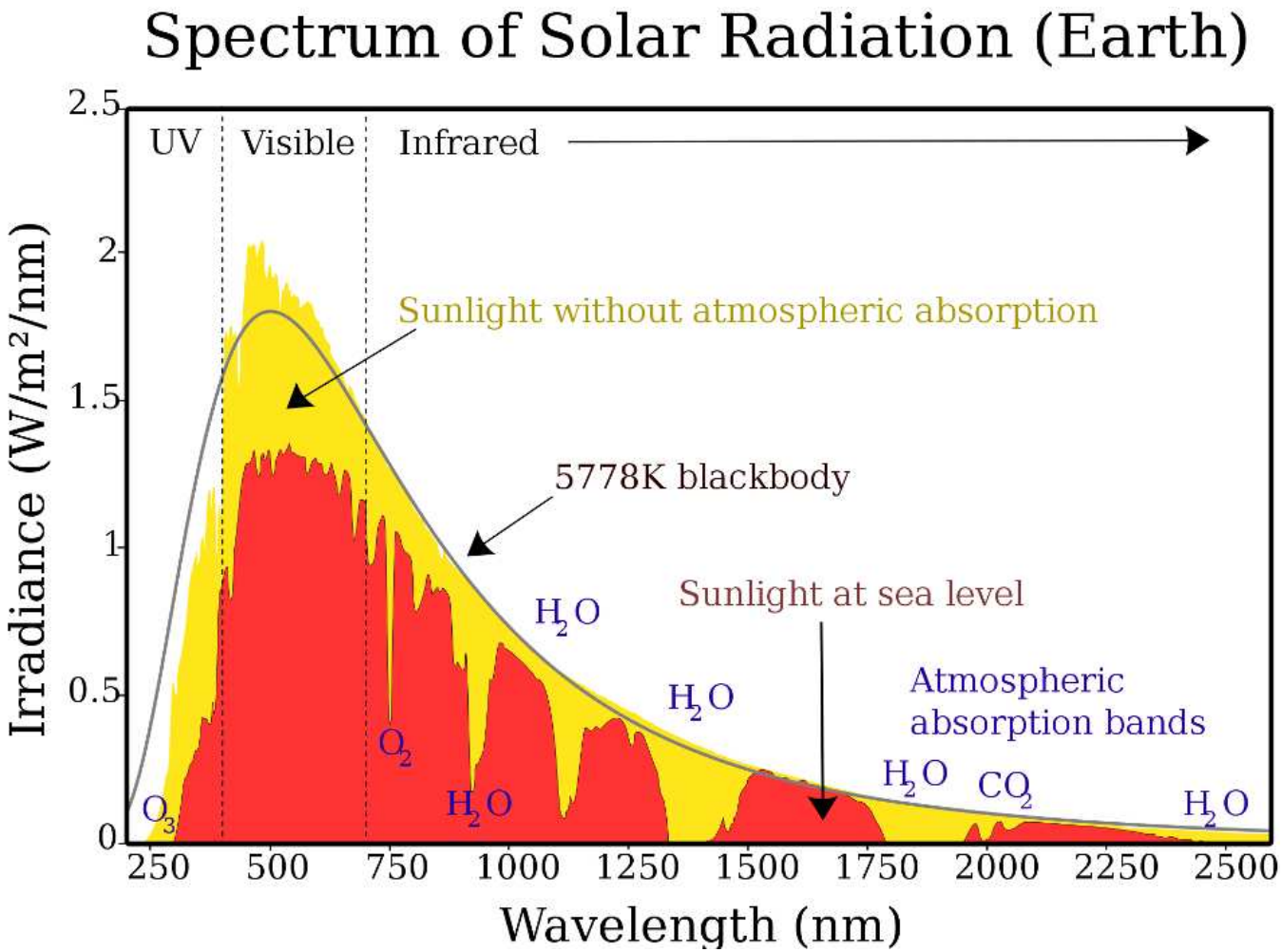
Spettro di emissione del Sole

Potenza al m^2 per unità di lunghezza d'onda (**wiki/Sunlight**)



Spettro di emissione del Sole

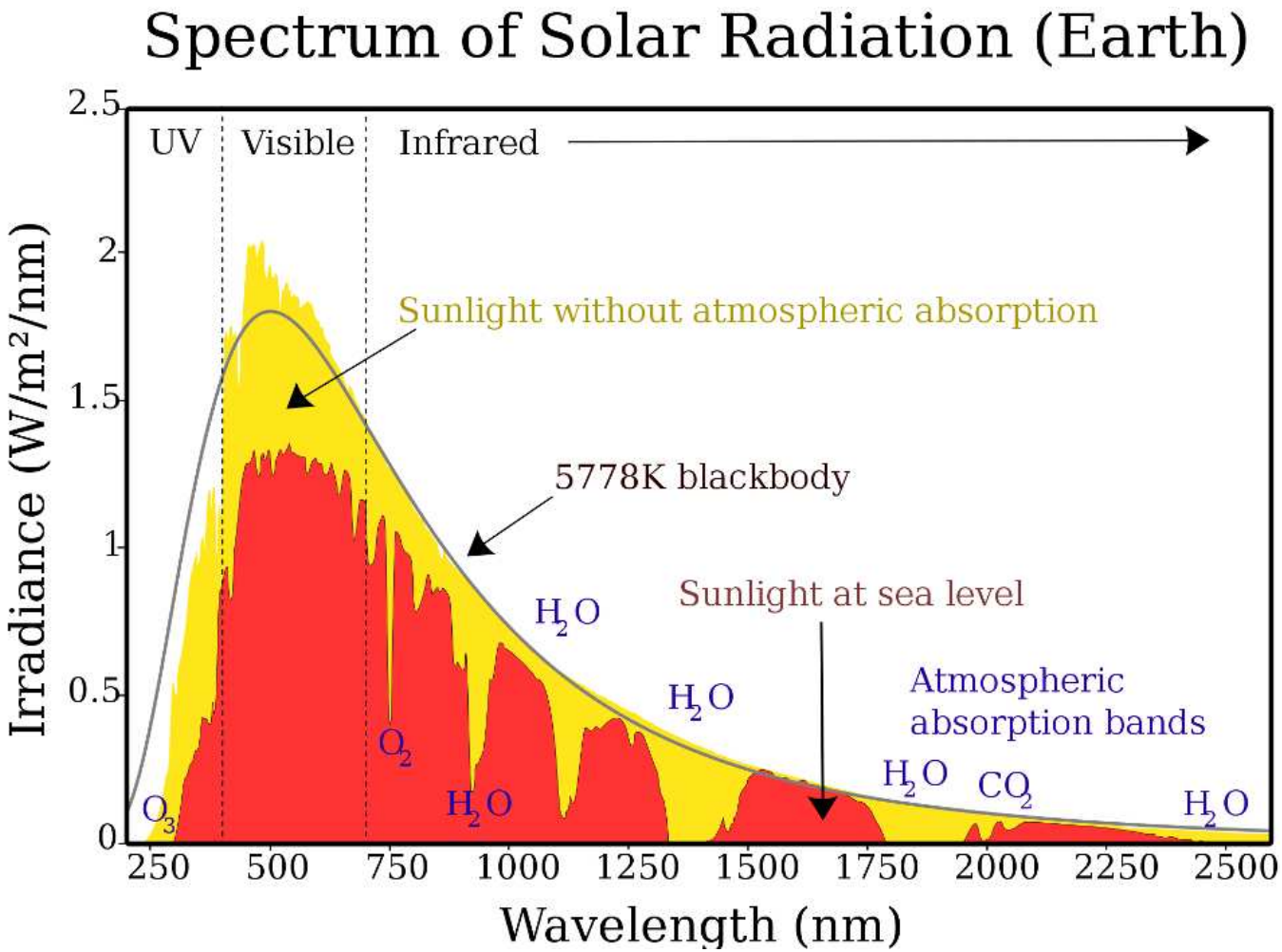
Potenza al m^2 per unità di lunghezza d'onda (**wiki/Sunlight**)



- L'area degli spettri ci dà i W/m^2.

Spettro di emissione del Sole

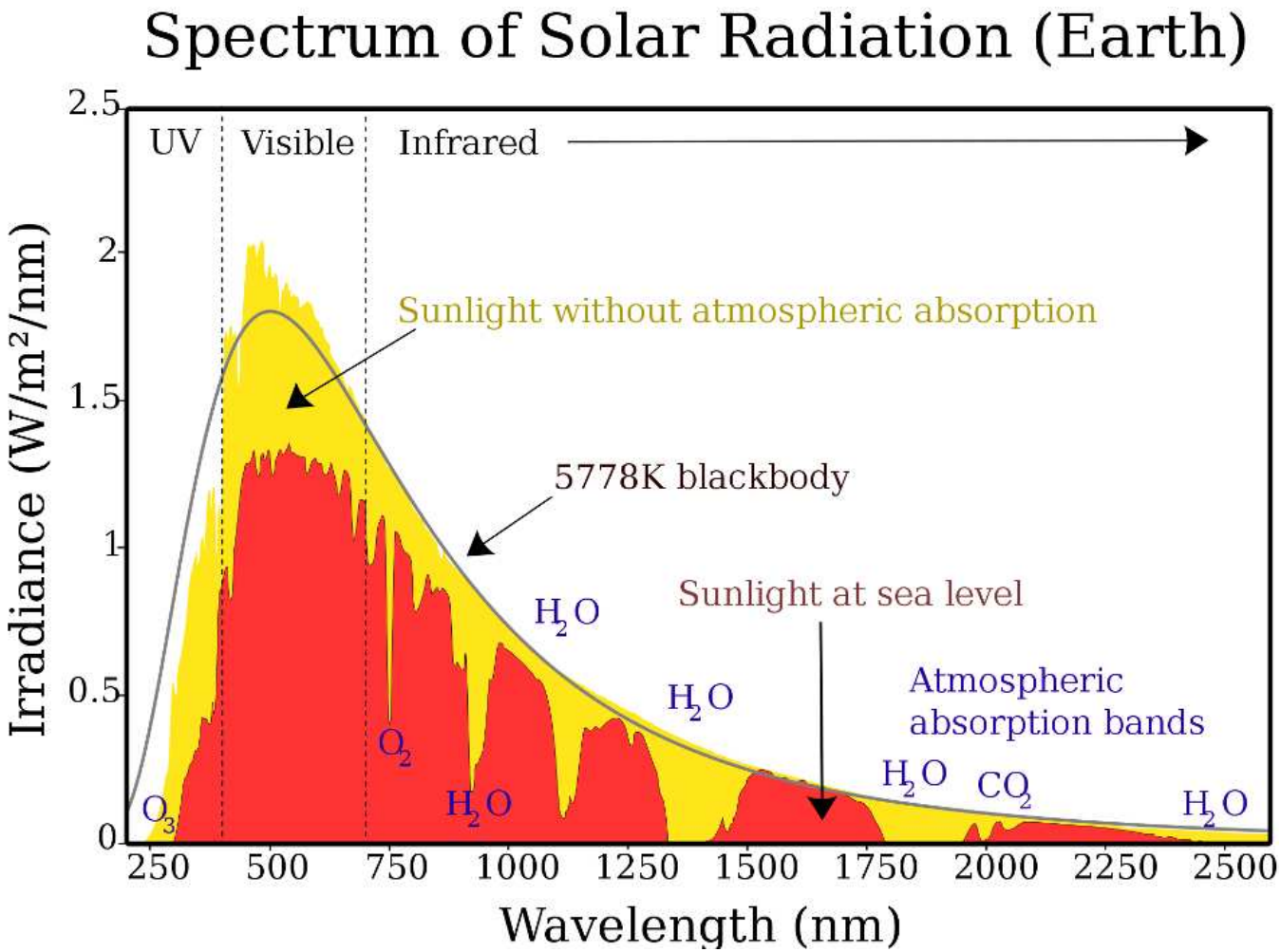
Potenza al m^2 per unità di lunghezza d'onda (**wiki/Sunlight**)



- L'area degli spettri ci dà i W/m^2.
- Della curva continua parleremo dopo.

Spettro di emissione del Sole

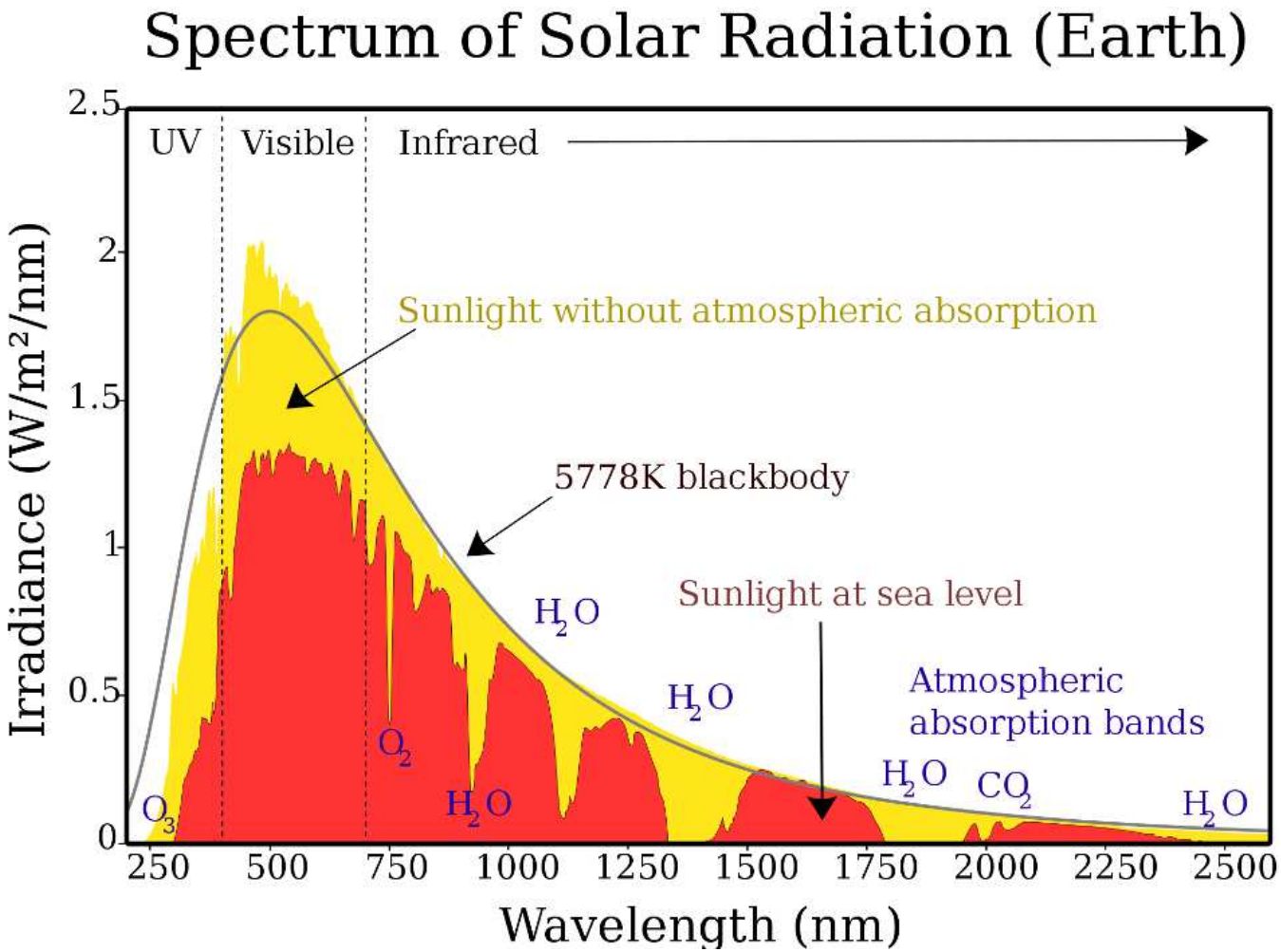
Potenza al m^2 per unità di lunghezza d'onda (**wiki/Sunlight**)



- Solo una frazione della potenza emessa è nel visibile

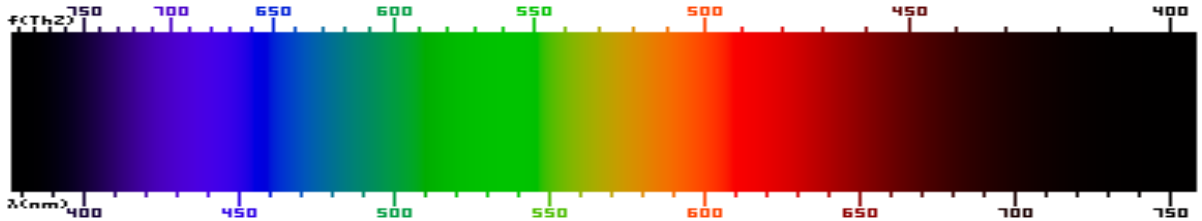
Spettro di emissione del Sole

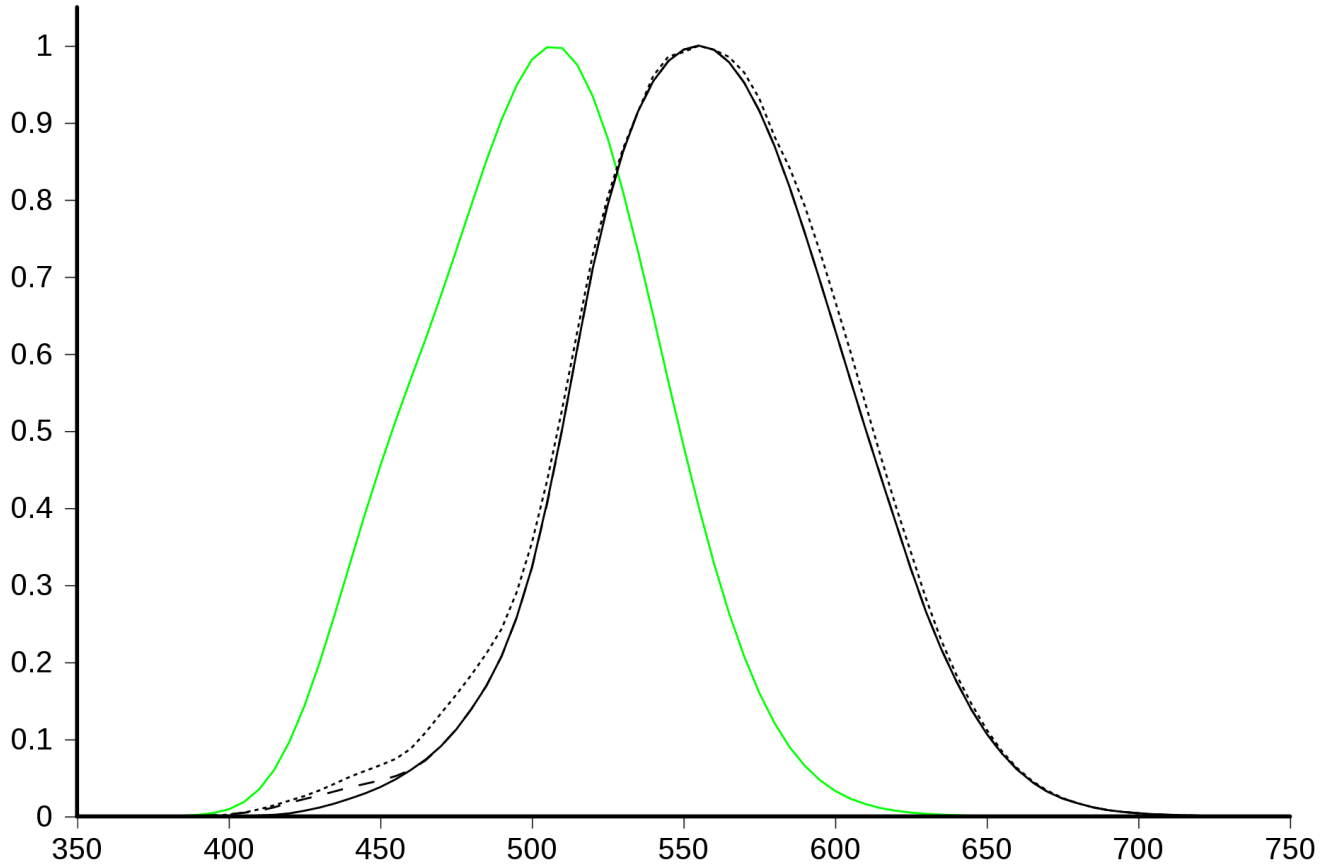
Potenza al m^2 per unità di lunghezza d'onda (**wiki/Sunlight**)



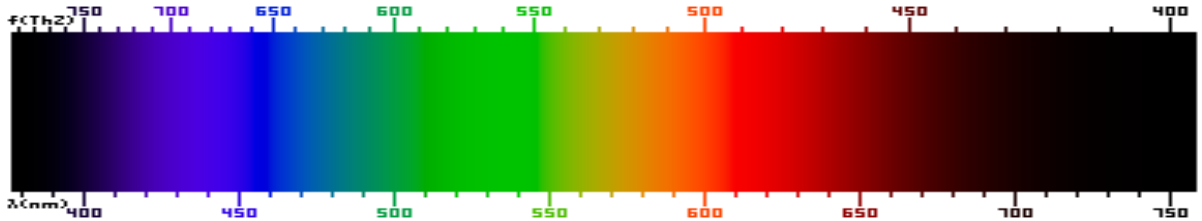
- Solo una frazione della potenza emessa è nel visibile e i nostri occhi non la vedono tutta nello stesso modo!

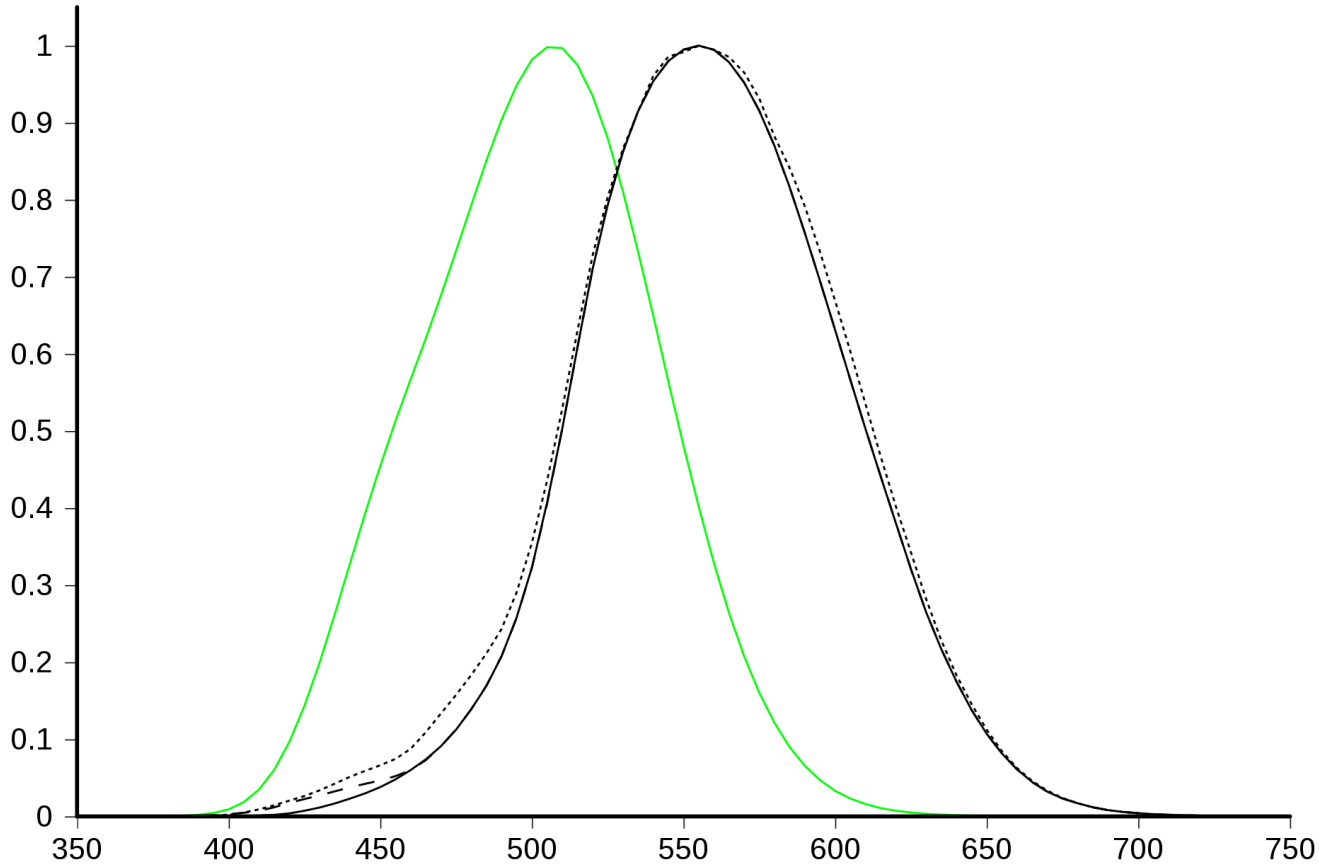
Sensibilità dei nostri occhi alla 'luce visibile'





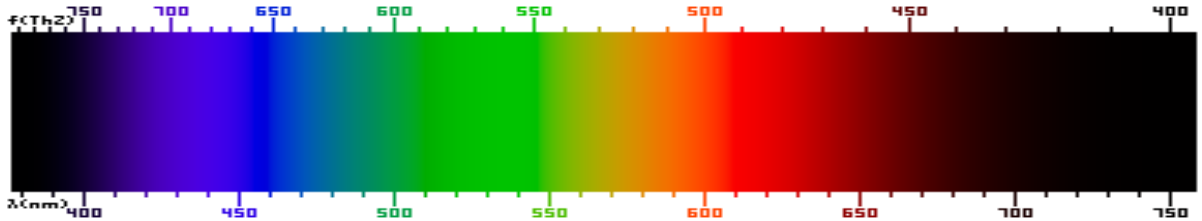
Sensibilità dei nostri occhi alla 'luce visibile'

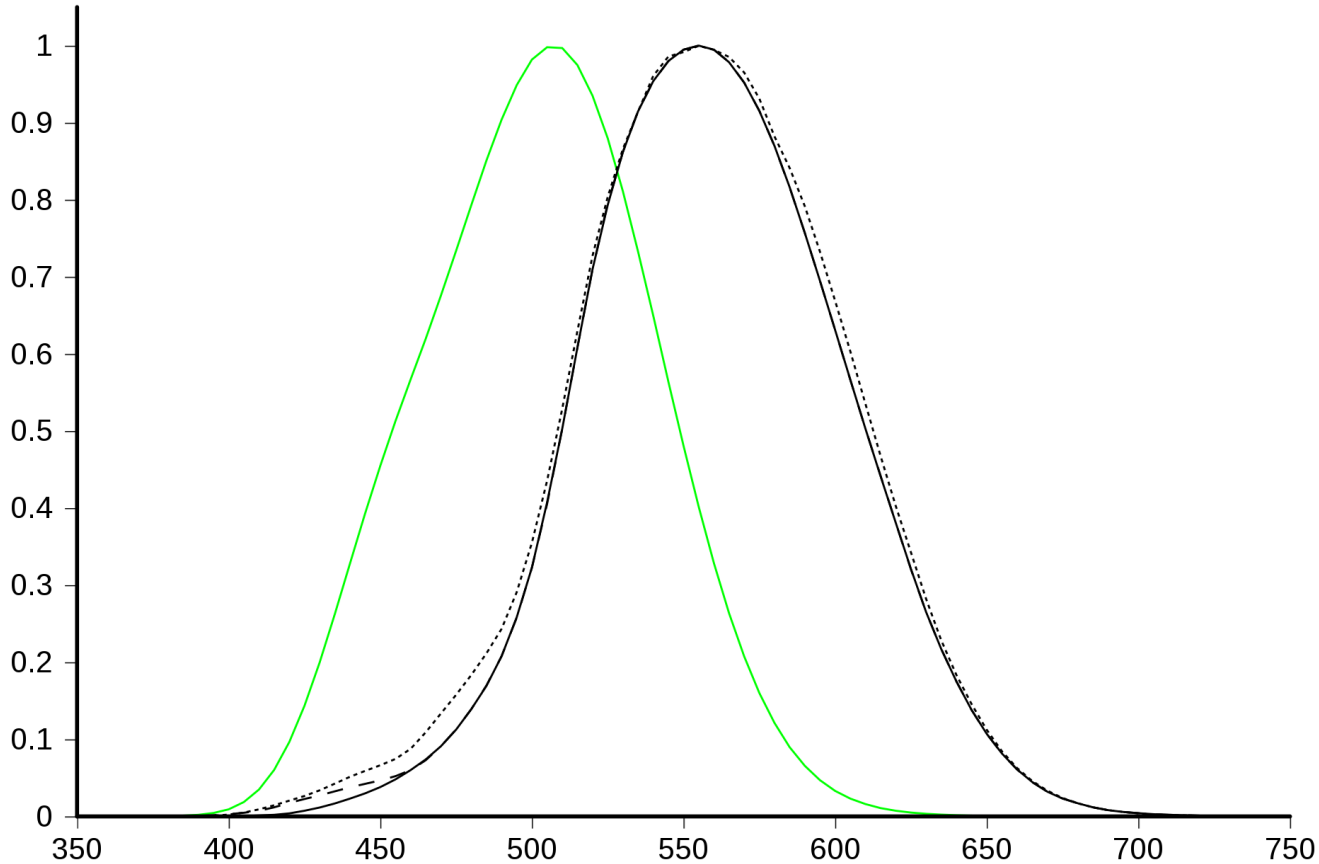




– Normalmente: max $\approx 550\,\text{nm}$

Sensibilità dei nostri occhi alla 'luce visibile'





– Normalmente: max $\approx 550\,\text{nm}$ (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 introdurle 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".
  $\Rightarrow$ 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".
  $\Rightarrow$ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'
  $\rightarrow$ 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".
  $\Rightarrow$ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'
  $\rightarrow$ 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".

  $\Rightarrow$ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'

  $\rightarrow$ 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".

  $\Rightarrow$ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'

  $\rightarrow$ 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.

  Analoga ai 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 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".

  $\Rightarrow$ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'

  $\rightarrow$ 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.

  Analoga ai m^3 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 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".

  $\Rightarrow$ in realtà non necessariamente luce 'emessa da una sorgente'

  $\rightarrow$ 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.

  Analoga ai m^3 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.*

$\Rightarrow \quad \Phi_V \propto P$

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.*

$\Rightarrow \quad \Phi_V \propto P$

- Sorgente che emette solo nel visibile (es. LED) $\rightarrow$ 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.*

$\Rightarrow \quad \Phi_V \propto P$

- Sorgente che emette solo nel visibile (es. LED)
  $\rightarrow$ alta efficienza luminosa.
- Sorgente con emissione marginale nel visibile (stufetta)
  $\rightarrow$ 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.*

$\Rightarrow \quad \Phi_V \propto P$

- Sorgente che emette solo nel visibile (es. LED)
  $\rightarrow$ alta efficienza luminosa.
- Sorgente con emissione marginale nel visibile (stufetta)
  $\rightarrow$ bassissima efficienza luminosa

$\rightarrow$ **lm/W**.

Storia dell'efficienza luminosa

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

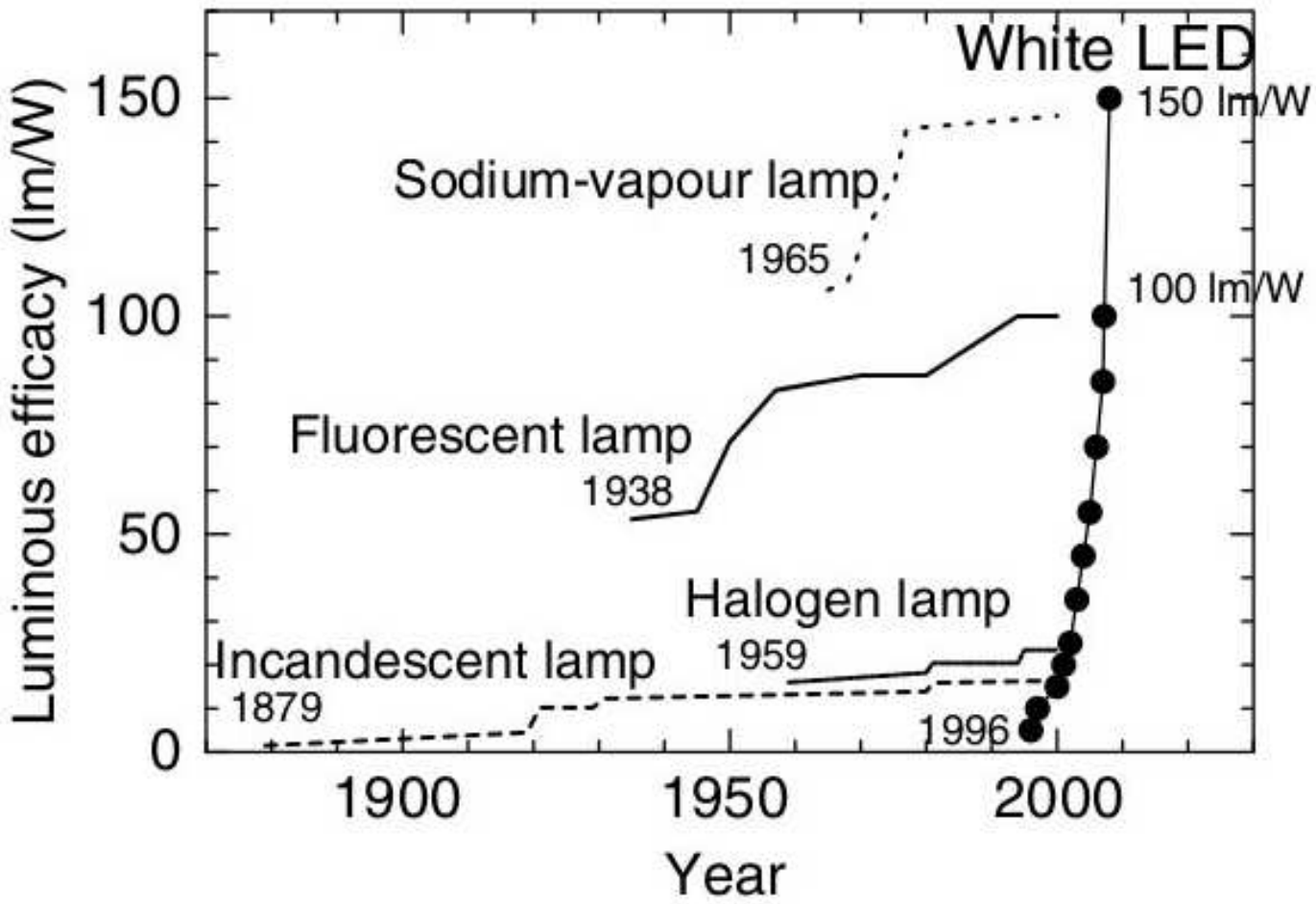


Figure 4. The history of η_L in incandescent lamps, halogen lamps, fluorescent lamps, sodium-vapour lamps and commercial white LEDs. The development years of white light sources are also shown.

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

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.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 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.
- Lampade a LED bianche: $\approx$ 100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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.
- Lampade a LED bianche: $\approx$ 100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

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.
- Lampade a LED bianche: $\approx$ 100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ 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 lm/W.
- Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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 lm/W.
- Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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 lm/W.
- Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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 lm/W.
- Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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'):

$\Rightarrow$ **683 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.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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'):

$\Rightarrow$ **683 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 lm/W.
- Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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'):

$\Rightarrow$ **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 lm/W.
- Lampadina incandescente da 100 W: 14 lm/W.
- Lampade a LED bianche: $\approx$100-200 lm/W (e oltre!).
- Candela (tipica di cera): ≈ 0.3 lm/W

  $\Rightarrow$ Non molto ecologica!!

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

- Qualità della luce.

$\rightarrow$ 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'):

$\Rightarrow$ **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)
		('*talbot*')

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) ('*talbot*')
irradiance (*flux density*)	$\longleftrightarrow$	*illuminance*
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) ('*talbot*')
irradiance (*flux density*)	$\longleftrightarrow$	*illuminance*
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
W/m^2	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2 \rightarrow$ **lux (lx)**

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) ('*talbot*')
irradiance (*flux density*)	$\longleftrightarrow$	*illuminance*
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
W/m^2	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2 \rightarrow$ **lux (lx)**

I lux sono quelli che si misurano in pratica!

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) ('*talbot*')
irradiance (*flux density*)	$\longleftrightarrow$	*illuminance*
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
W/m^2	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2 \rightarrow$ **lux (lx)**

I lux sono quelli che si misurano in pratica!

$\rightarrow$ Strumenti professionali (luxmetri)

Flusso luminoso e quantità di luce

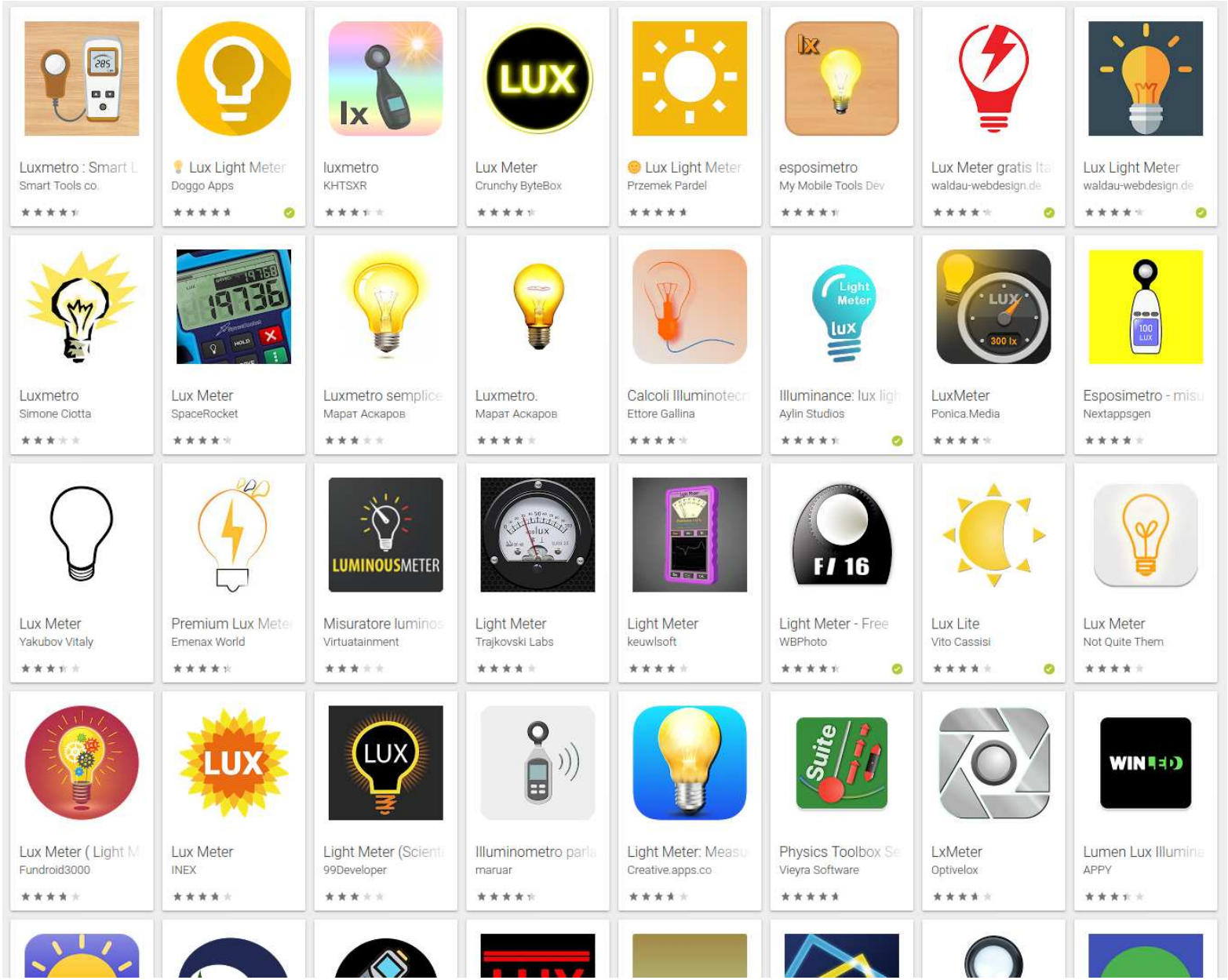
Un'ultima precisazione sul concetto di flusso luminoso:

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) ('*talbot*')
irradiance (*flux density*)	$\longleftrightarrow$	*illuminance*
Potenza / unità di superficie	$\longleftrightarrow$	Flusso luminoso / unità di sup.
W/m^2	$\longleftrightarrow$	$lm/m^2 \rightarrow$ **lux (lx)**

I lux sono quelli che si misurano in pratica!

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

Luxmetri Android (solo alcuni!)

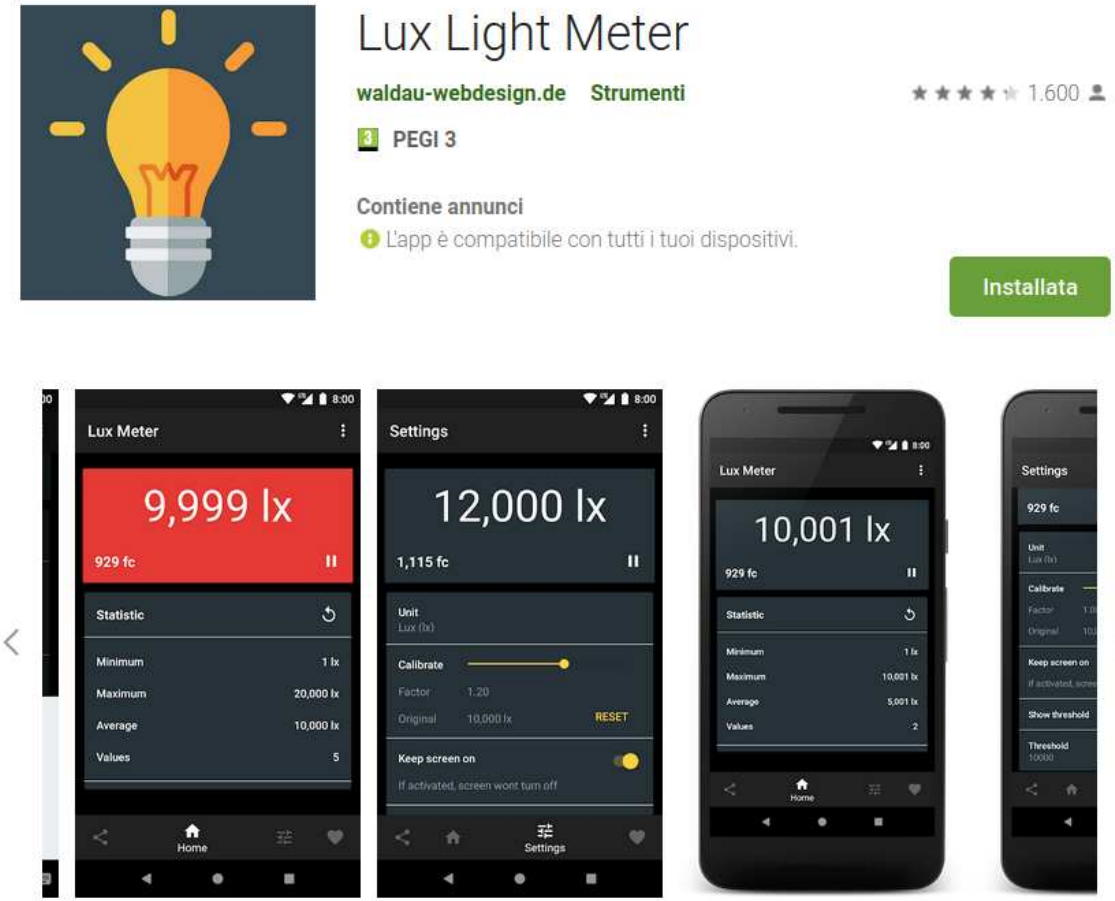


Confronto con strumento dedicato

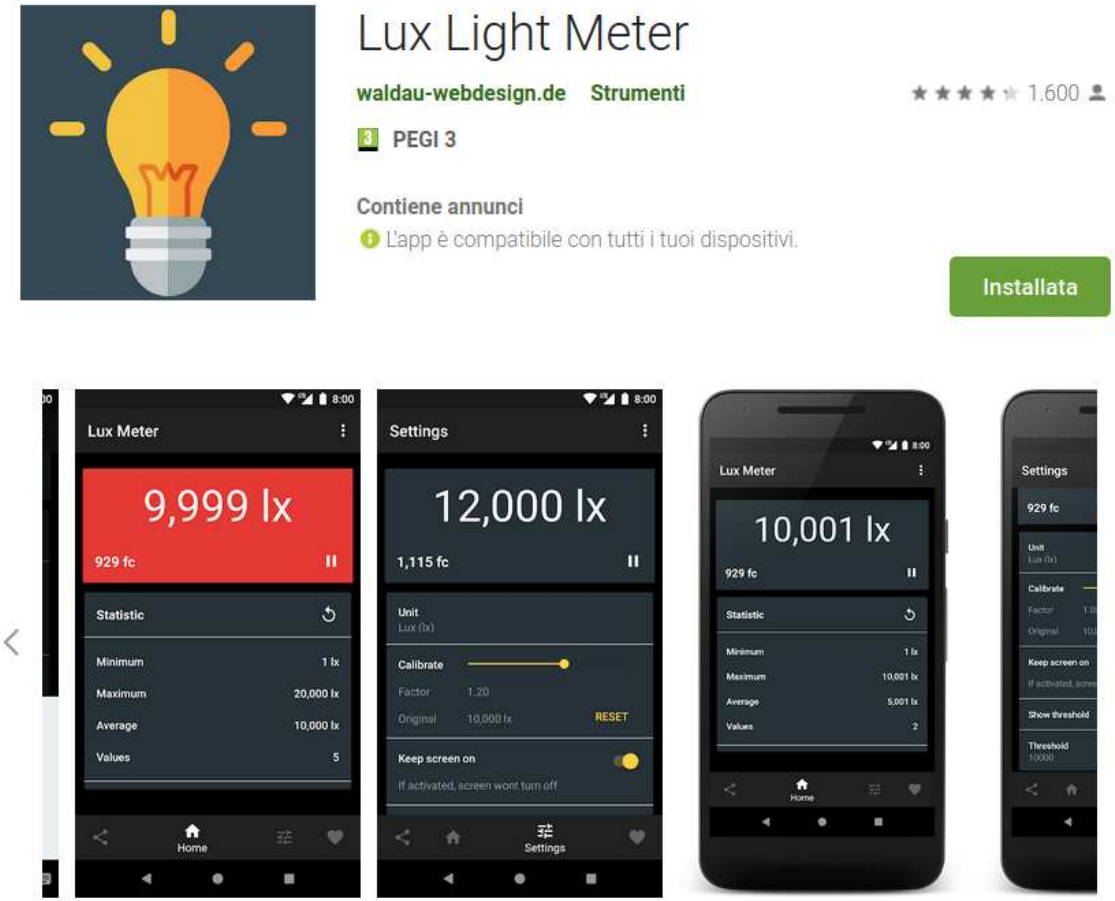
Confronto con strumento dedicato

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

App Android usata

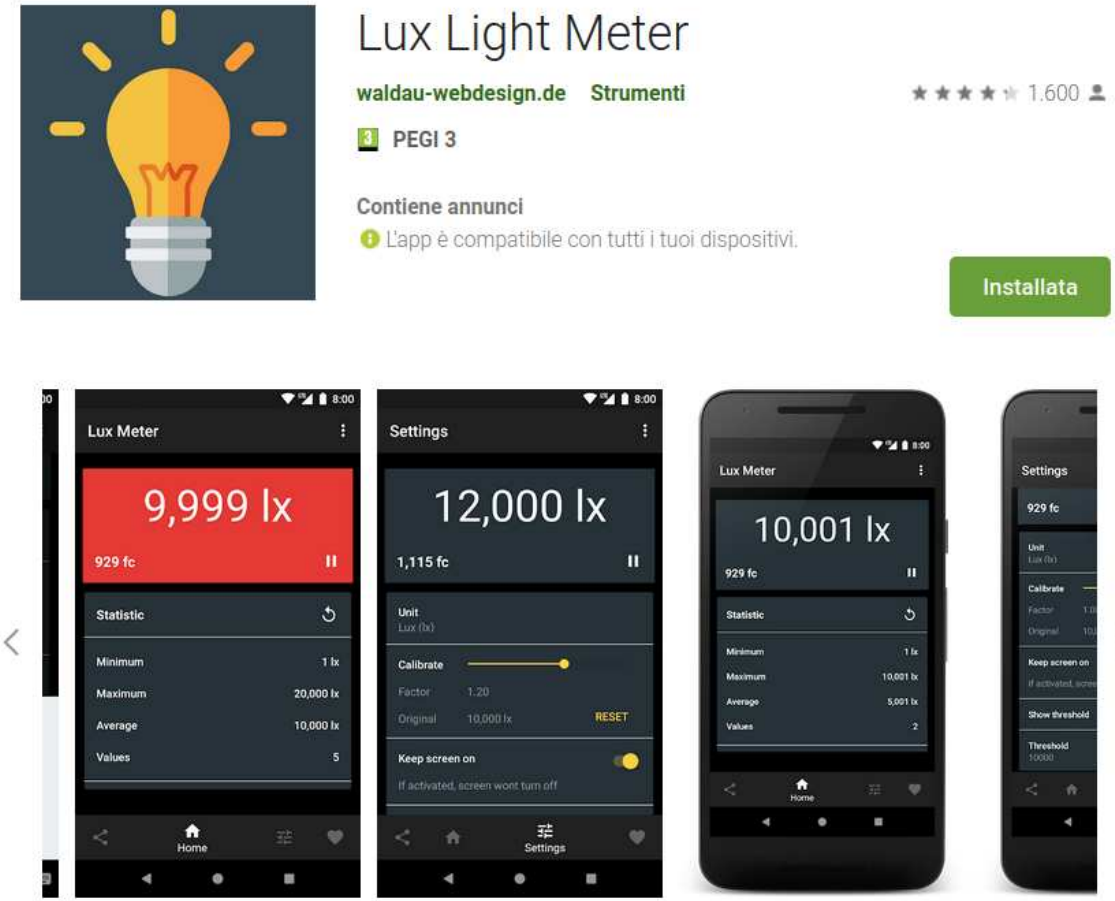


App Android usata



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

App Android usata



(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: $50\,\mathrm{cm}$;
- emissione isotropa;
- solo luce direttamente dalla lampada.

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

Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- distanza lampada-sensore: $50\,\mathrm{cm}$;
- emissione isotropa;
- solo luce direttamente dalla lampada.

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

Ma...

Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

- distanza lampada-sensore: $50\,\mathrm{cm}$;
- emissione isotropa;
- solo luce direttamente dalla lampada.

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

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.

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

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: $50\,\mathrm{cm}$;
- emissione isotropa;
- solo luce direttamente dalla lampada.

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

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 $\rightarrow$ soffitto e pareti)

Luce emessa dalla lampada

Dati ('ipotesi'):

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

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

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 $\rightarrow$ 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.

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

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 $\rightarrow$ 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.

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

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 $\rightarrow$ 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.

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

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 $\rightarrow$ 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):

  $\Rightarrow$ volutamente condizioni non ideali (visto che comunque non potevo eliminare le riflessioni...)