



UNIVERSITÀ
DI PAVIA



DIPARTIMENTO
DI FISICA

Luce e semiconduttori: dalla fisica alle tecnologie optoelettroniche

Lucio Andreani e Franco Marabelli

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia

<http://fisica.unipv.it>

<http://fisica.unipv.it/nanophotonics>

Corso AIF, Pavia, 14-11-2018

Luce e tecnologie

Il 2015 è stato proclamato dalle Nazioni Unite l'Anno Internazionale della Luce e delle tecnologie basate sulla luce

Dal 2018, il 16 maggio è la giornata internazionale della Luce: vedi il sito <https://www.lightday.org/>

Le tecnologie basate sulla luce hanno un enorme impatto sulla società e sulla vita quotidiana.



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

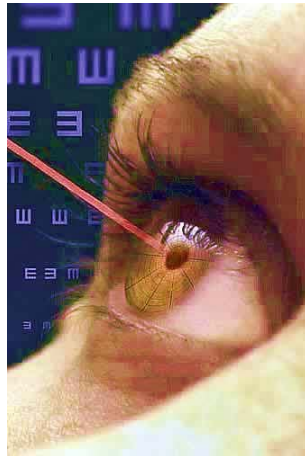
Illuminazione

Medicina

Industria

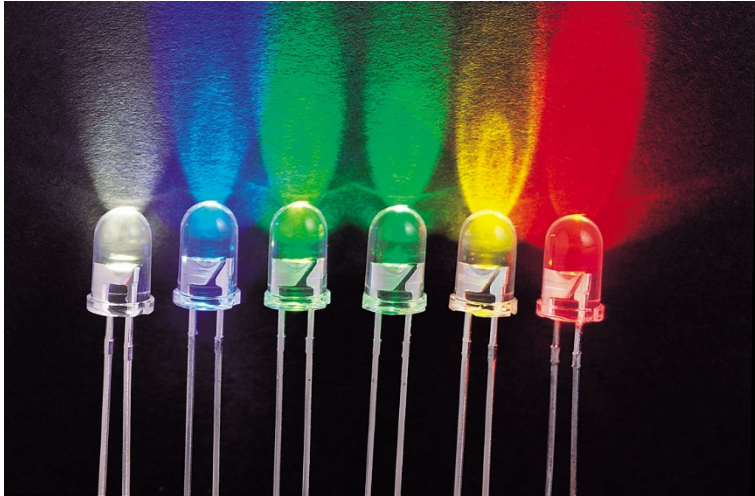
Telecomunicazioni

Energia



Luce ed energia

LED (Light Emitting Diode)



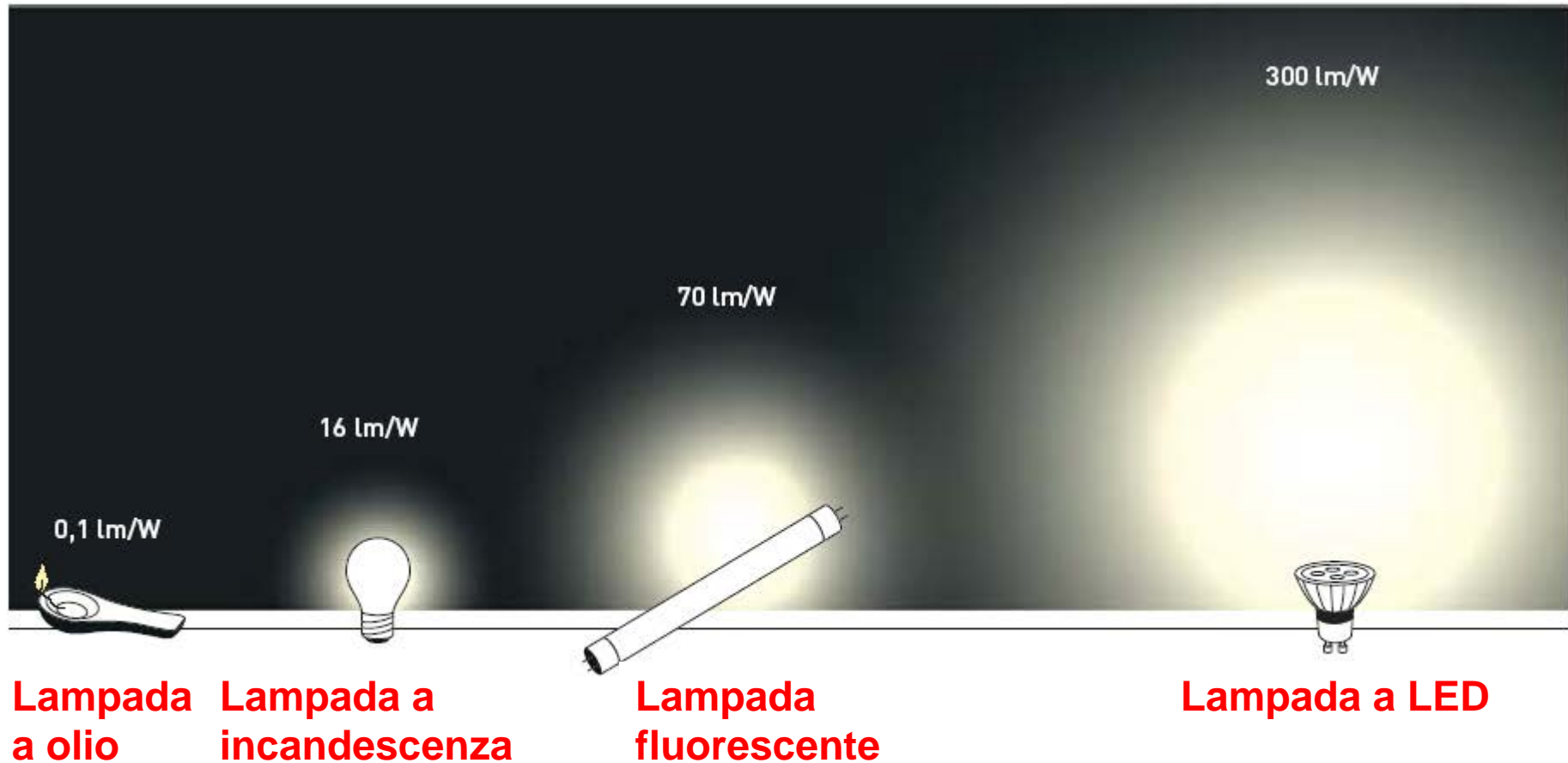
⇒ *illuminazione e risparmio energetico*

Celle fotovoltaiche



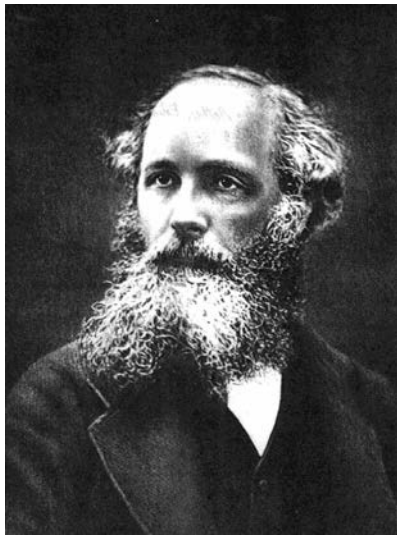
⇒ *energia elettrica da fonte rinnovabile*

Efficienza luminosa

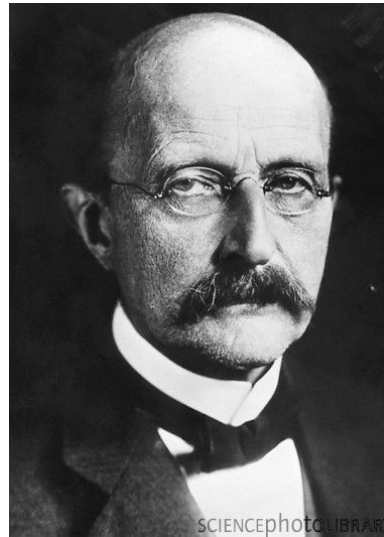


Indice

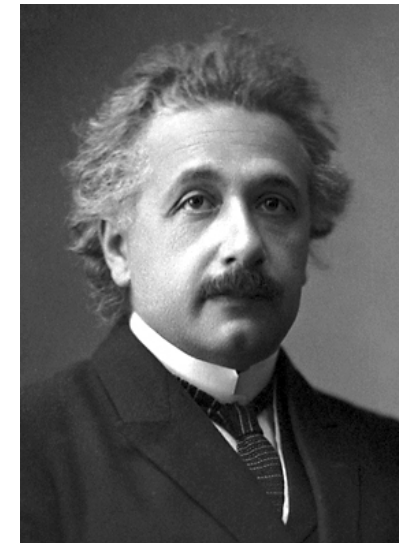
- **Luce: onde elettromagnetiche e fotoni**
- Isolanti, semiconduttori, metalli. Resistenza elettrica
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- LED in luce blu e in luce bianca, laser
- Celle fotovoltaiche, fotorivelatori



J.C. Maxwell



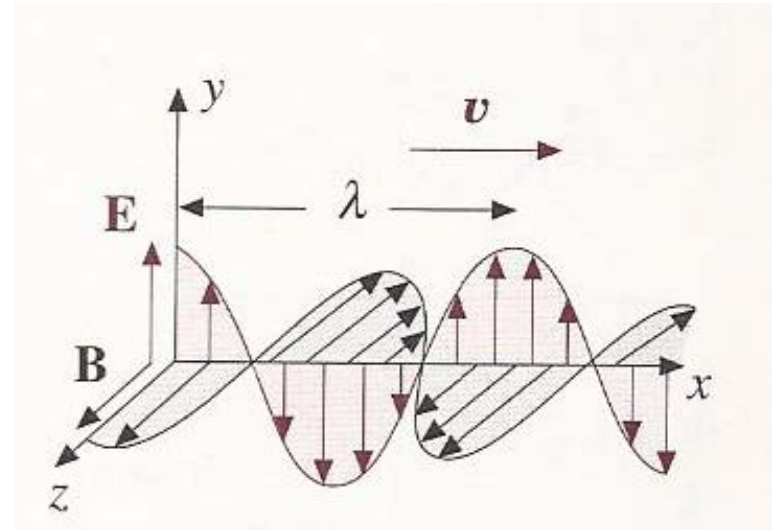
M. Planck



A. Einstein

Onde elettromagnetiche

L'energia luminosa si propaga sotto forma di **onde elettromagnetiche**, ossia oscillazioni del campo elettrico **E** e magnetico **B**. Le oscillazioni sono perpendicolari alla direzione di propagazione: l'onda elettromagnetica è **trasversale**.



La radiazione elettromagnetica è caratterizzata da:

- lunghezza d'onda λ
- frequenza $\nu = c/\lambda$, dove $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ è la velocità della luce nel vuoto
- frequenza angolare $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$
- energia $E = h\nu = hc/\lambda$, dove $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ è la costante di Planck

Per **luce visibile** si intende la radiazione elettromagnetica con

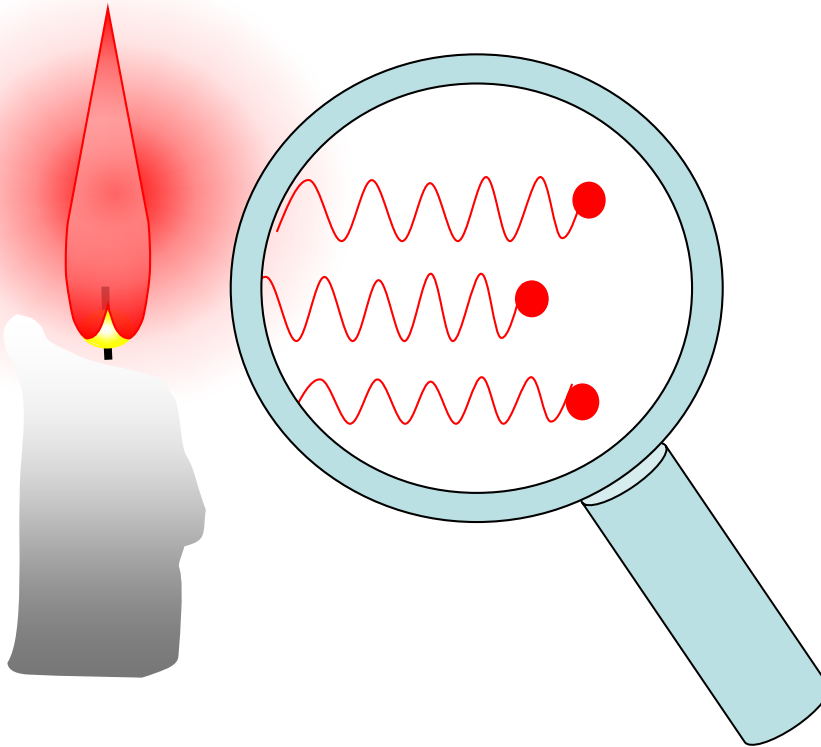
ν : 400-790 THz λ : 380-750 nm E: 1.65-3.3 eV

N.b. 1 elettron-Volt (eV) = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ Volt} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$E \text{ (eV)} = 1240/\lambda \text{ (nm)}$

Quantizzazione dell'energia

L'energia viene emessa, trasportata ed assorbita in “pacchetti” detti **quanti**



quanto di energia
elettromagnetica (fotone):

$$E = h\nu = hc/\lambda$$



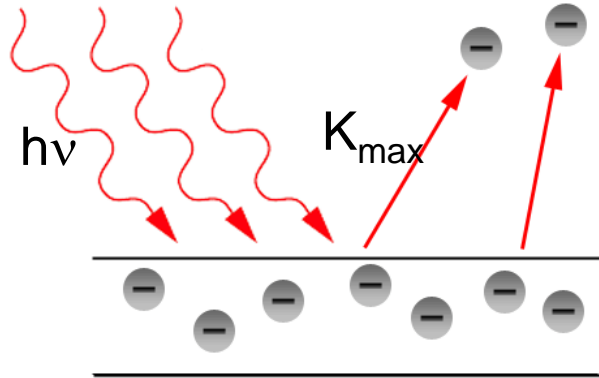
anche la luce (così come la
materia) è onda/particella!

La **radiazione elettromagnetica** ha simultaneamente natura

- ondulatoria: *onde elettromagnetiche* (interferenza, diffrazione, ...)
- corpuscolare: *fotoni* (effetto fotoelettrico, gap di energia, ...)

Effetto fotoelettrico

L' **effetto fotoelettrico**, scoperto da Heinrich Hertz nel 1887, consiste nell'estrazione di elettroni dalla materia a seguito dell'assorbimento di radiazione elettromagnetica.



È caratterizzato dall'esistenza di una **frequenza di soglia** ν_{th} : solo la radiazione di frequenza $\nu > \nu_{th}$, viene assorbita e produce fotoelettroni.

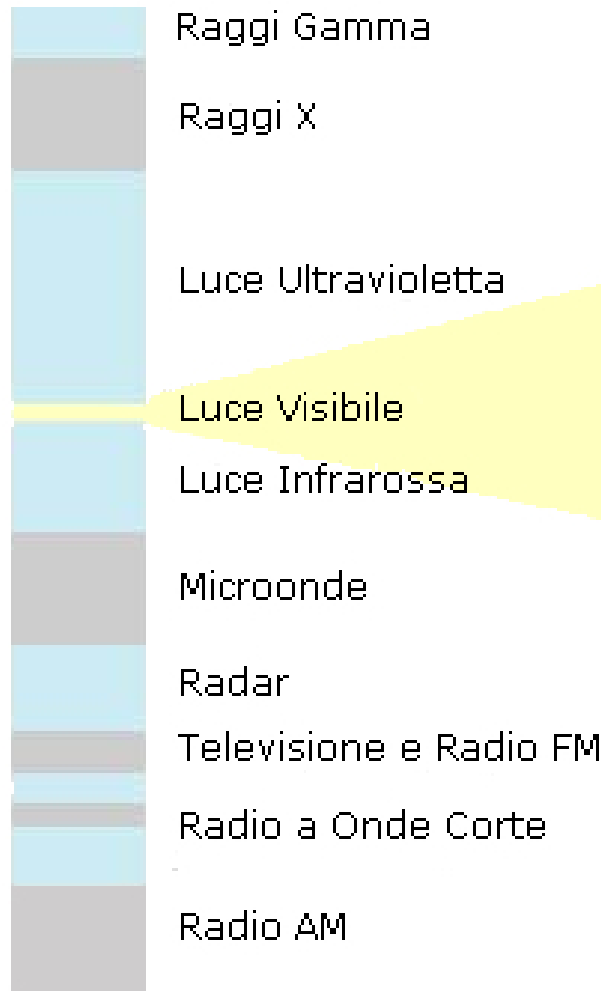
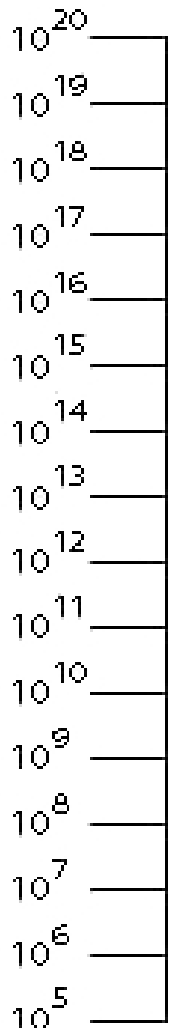


Nella teoria formulata da Albert Einstein (1905), si assume che la radiazione elettromagnetica consista di **quanti di luce**, o **fotoni**, di energia $E=h\nu$ dove h è la costante di Planck. Solo i fotoni con energia $h\nu > h\nu_{th} = W$ possono estrarre elettroni, dove W è la **funzione lavoro**, ossia la minima energia necessaria per estrarre un elettrone, indipendentemente dall'intensità.

L'effetto fotoelettrico è quindi evidenza della **natura quantistica** della luce.

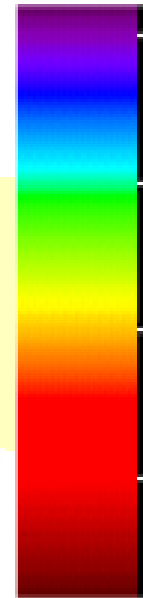
Lo spettro delle onde elettromagnetiche

Frequenza, HZ



Lunghezza
d'onda

Energia



400 nm

3.1 eV

500 nm

2.48 eV

600 nm

2.07 eV

700 nm

1.77 eV

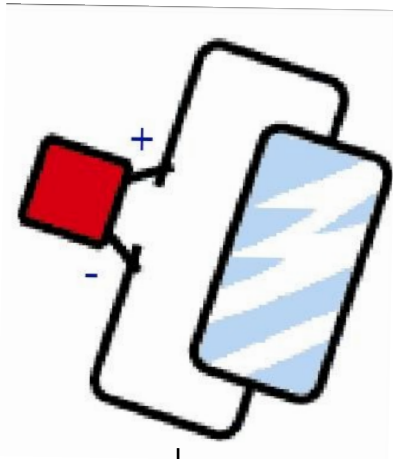
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

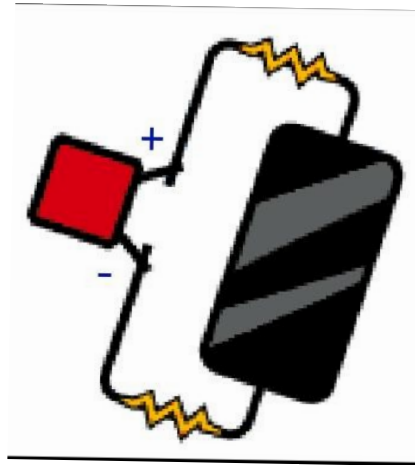
Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- **Isolanti, semiconduttori, metalli. Resistenza elettrica**
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- LED in luce blu e in luce bianca, laser
- Celle fotovoltaiche, fotorivelatori

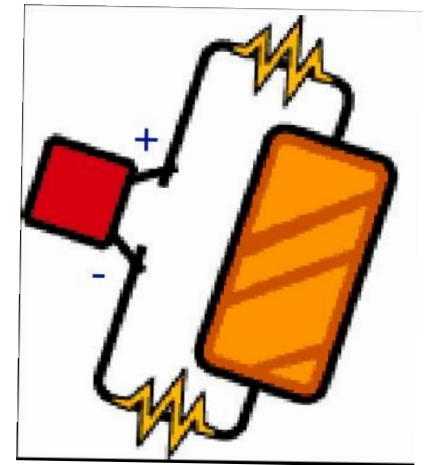
Isolanti, semiconduttori e metalli



Vetro: Non conduce corrente

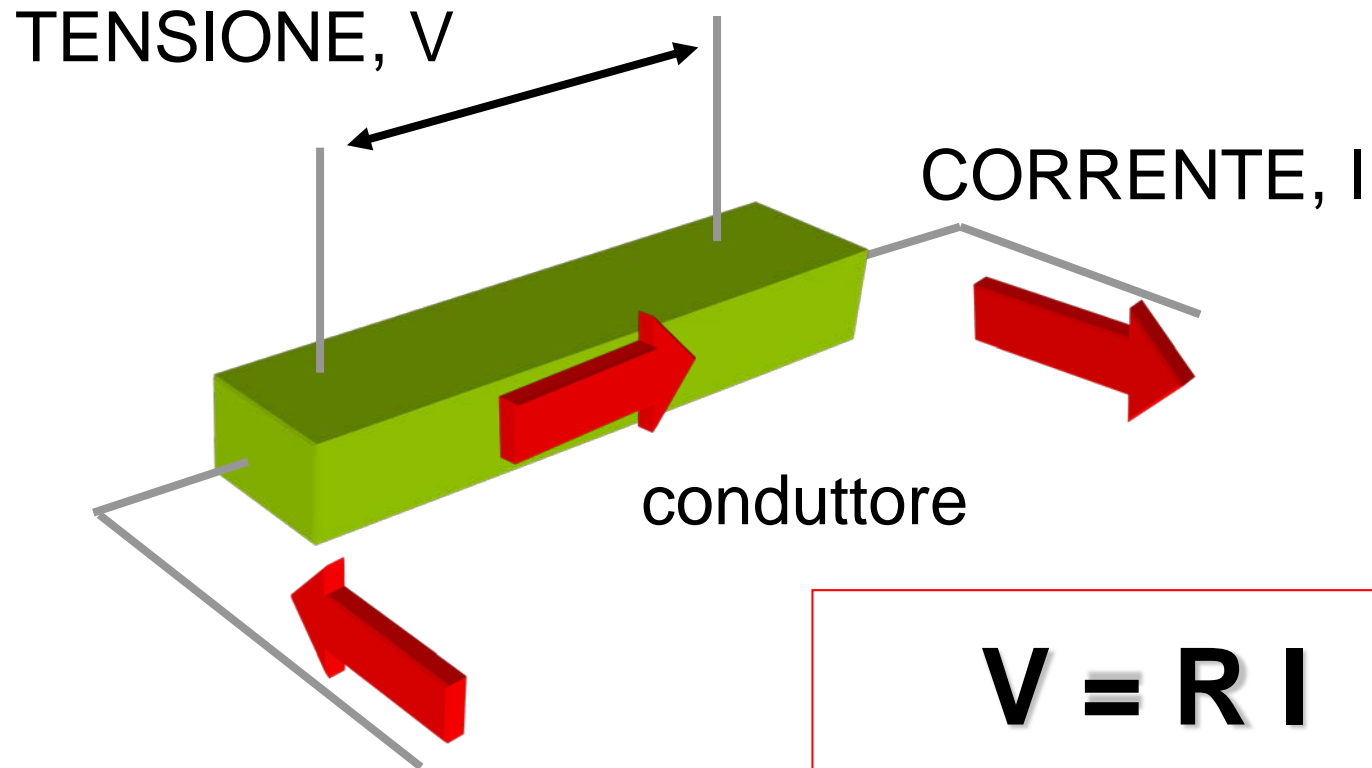


Silicio: moderata conducibilità elettrica



Rame: buona conducibilità elettrica

Conduzione elettrica e resistenza



$$V = R I$$

Legge di Ohm

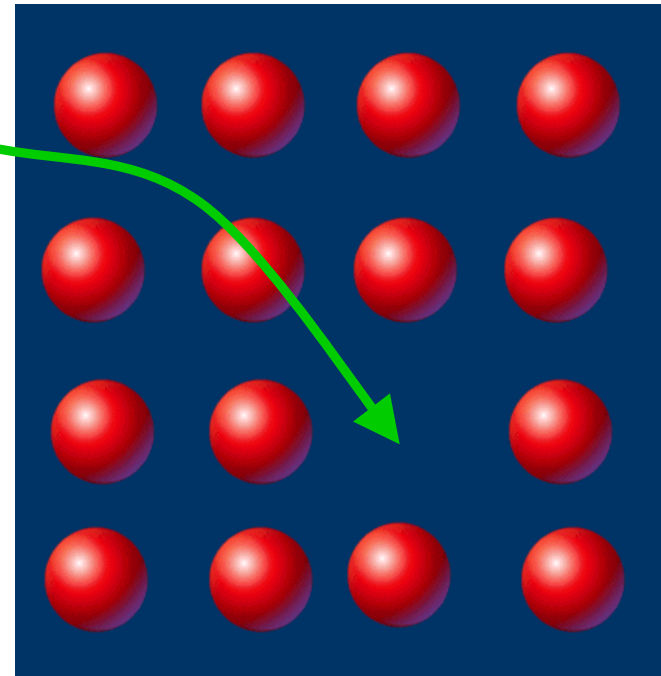
Qual è l'origine della resistenza elettrica?

La meccanica quantistica ci dice che gli elettroni urtano SOLO contro ioni “fuori posto” a causa di:

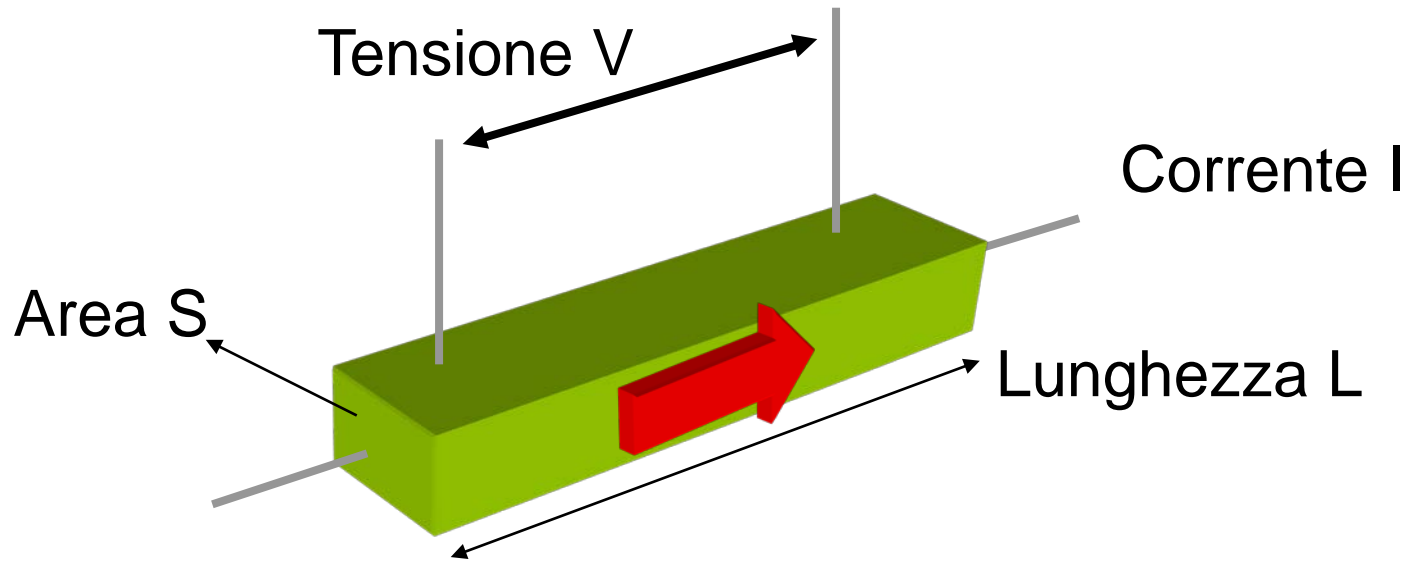
Difetti del reticolo
(vacanze, dislocazioni)

Vibrazioni degli ioni
(agitazione termica)

**questi urti sono la
causa fisica della
resistenza elettrica**



Resistenza e resistività



$$V = RI$$

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$$\sigma = \rho^{-1}$$

R = resistenza: si misura in Ω (Ohm)

ρ = resistività: si misura in $\Omega \cdot m$

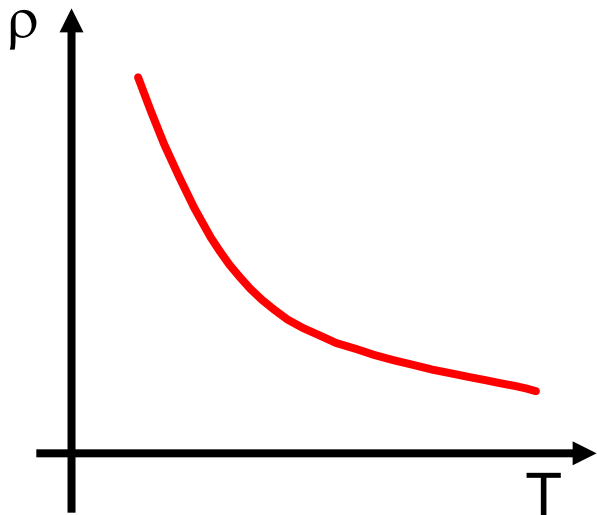
È una proprietà specifica del materiale
(non dipende dalla geometria)

σ = conducibilità

Semiconduttori e metalli: resistività

Semiconduttori:

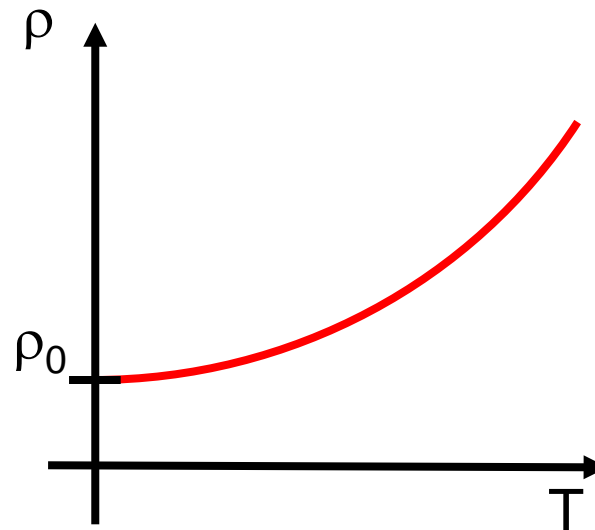
Resistività elevata
(Si: $3 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$)
che diminuisce con T



⇒ Molto sensibile a:
illuminazione
Impurezze (pochi atomi)

Metalli:

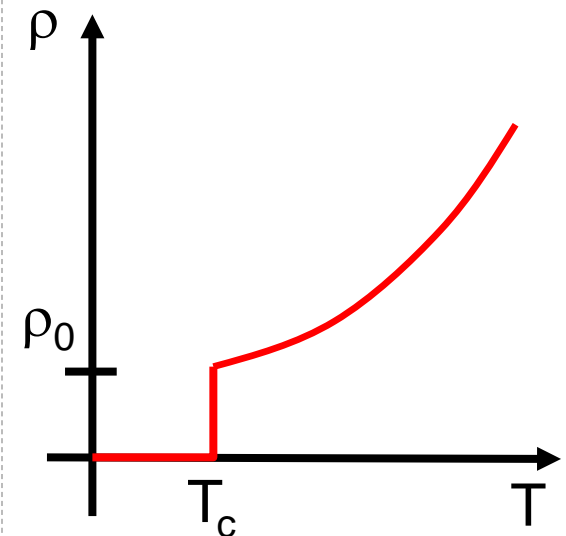
Resistività bassa
(Cu: $2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$)
che aumenta con T



⇒ Poco sensibile a:
illuminazione
impurezze

Superconduttori:

Resistività nulla
al di sotto della
temperatura critica T_c



⇒ Molto sensibile al
campo magnetico
⇒ espulsione

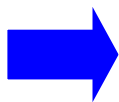
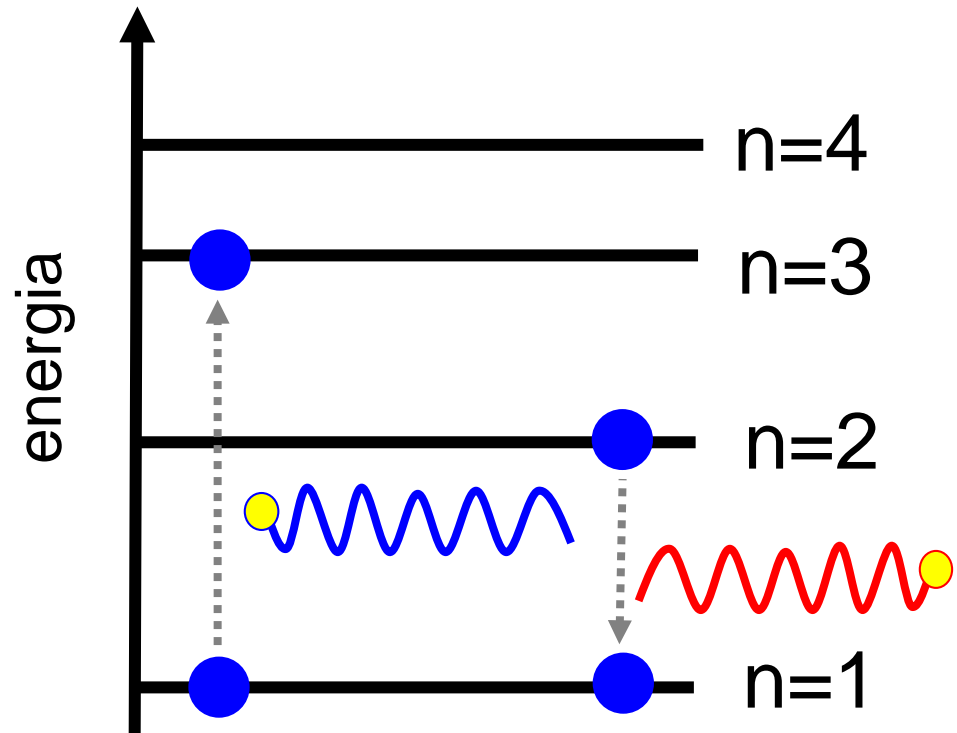
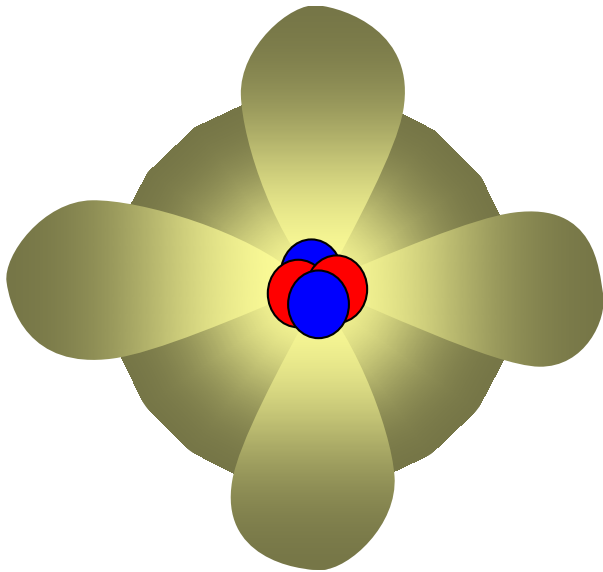
Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Isolanti, semiconduttori, metalli. Resistenza elettrica
- **Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune**
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- LED in luce blu e in luce bianca, laser
- Celle fotovoltaiche, fotorivelatori

Livelli di energia negli atomi

Secondo i principi della meccanica quantistica, in sistemi legati, l'energia può assumere solo valori discreti detti *livelli*.

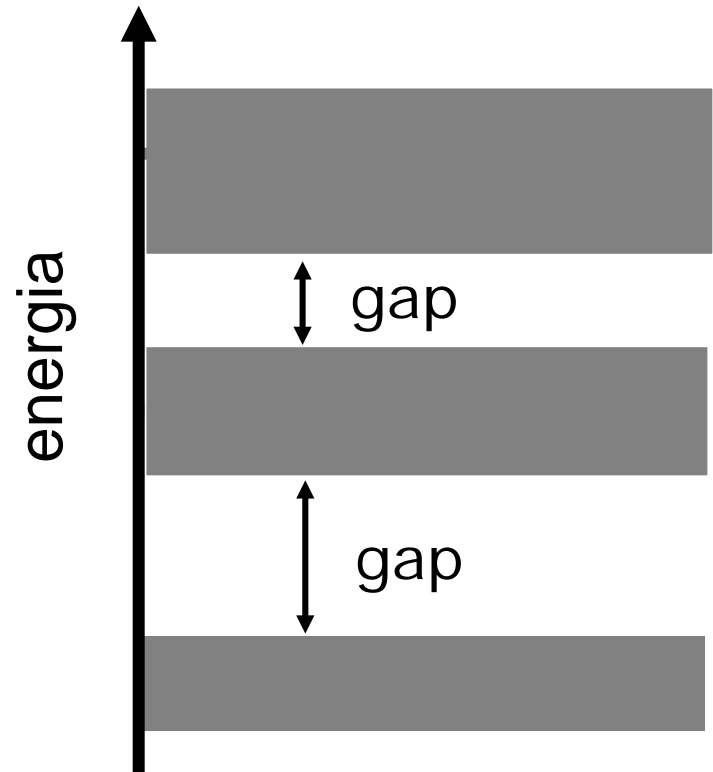
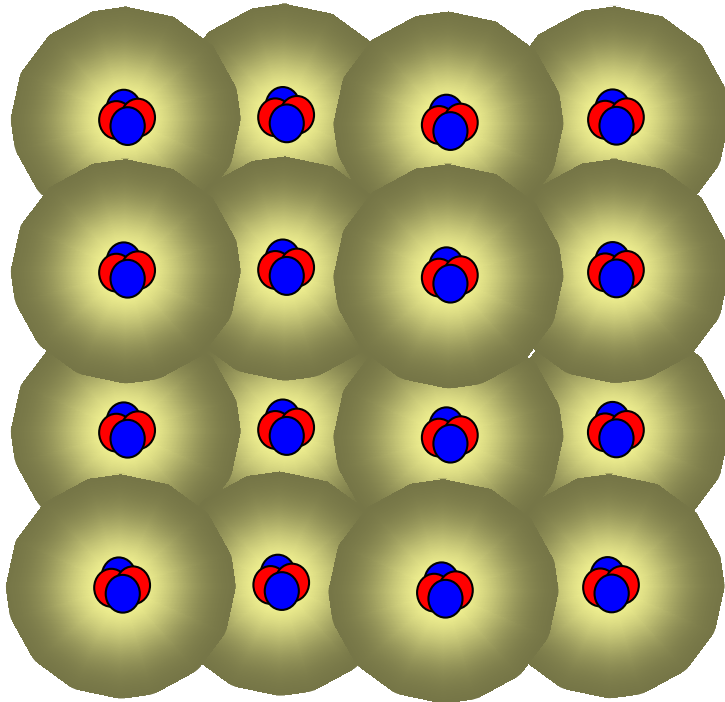
Es. elettroni in un atomo



Un elettrone può saltare da un livello all'altro assorbendo o emettendo un fotone di frequenza proporzionale alla differenza di energia, secondo la relazione $\Delta E = h\nu$.

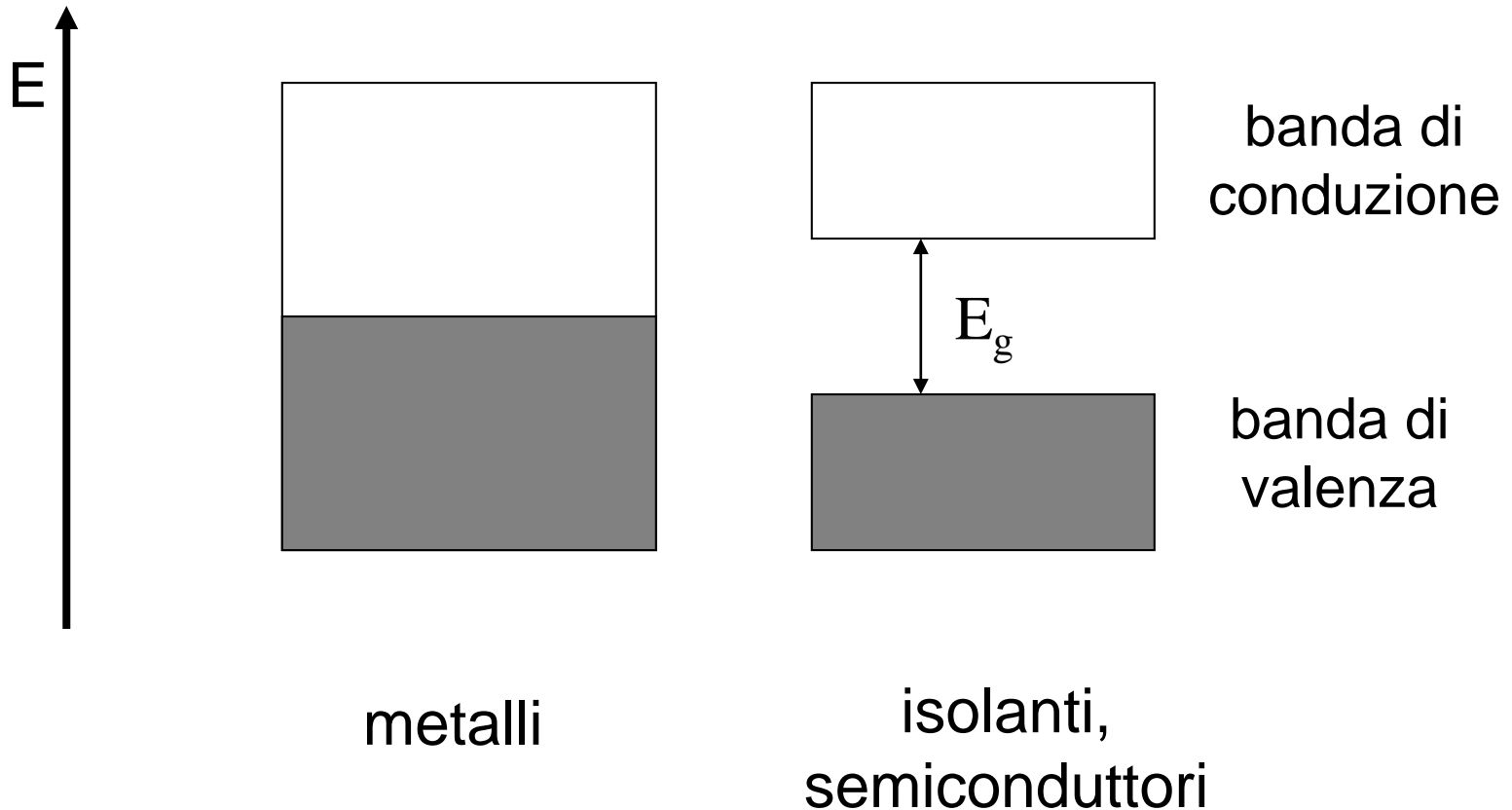
Bande di energia nei solidi

Se molti atomi si legano a formare un solido, i livelli discreti si allargano a formare **bande di energia**.

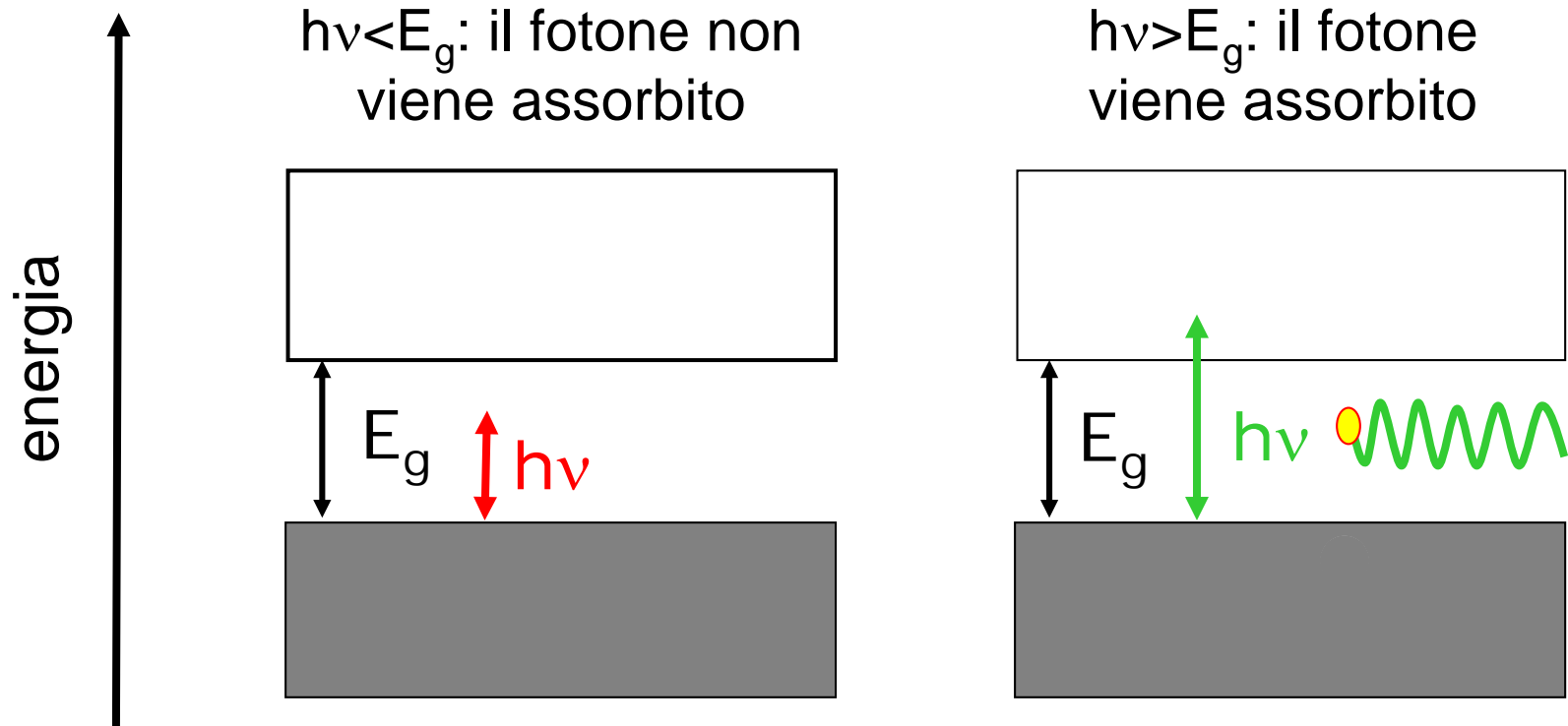


La separazione di energia fra due bande consecutive si dice ***gap di energia***.

Riempimento dei livelli elettronici: il principio di Pauli



Gap di energia e assorbimento ottico



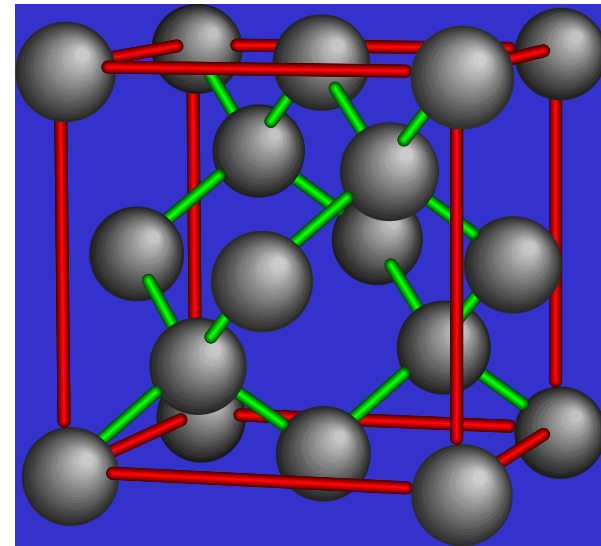
Il gap di energia determina la soglia di assorbimento secondo la relazione $E_g = h\nu = hc/\lambda$. L'esistenza di una soglia di assorbimento indipendente dall'intensità della luce è un fenomeno di natura quantistica, analogo all'effetto fotoelettrico.

Semiconduttori: struttura cristallina

Tavola periodica

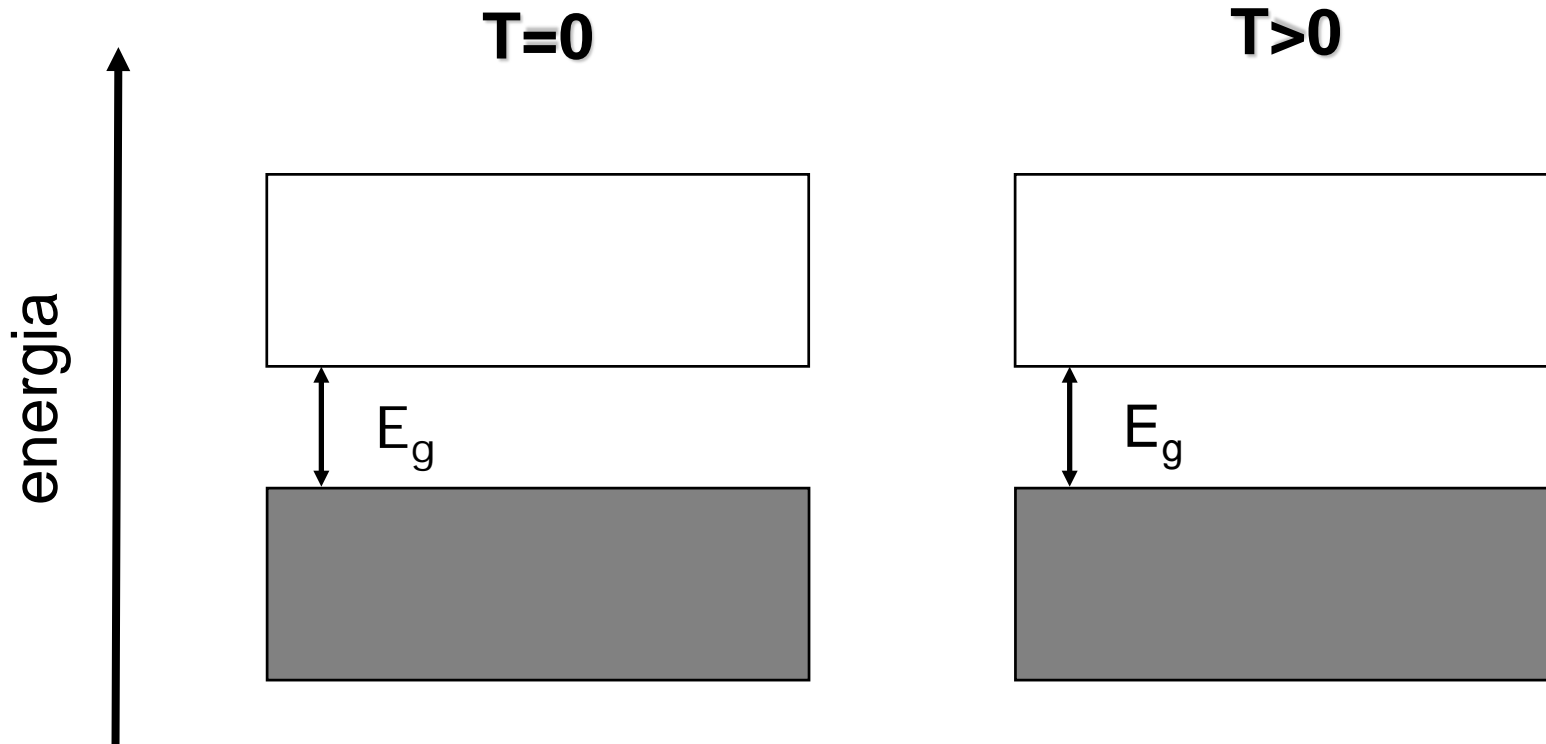
		III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
IB	IIB	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

Cella elementare (Si)



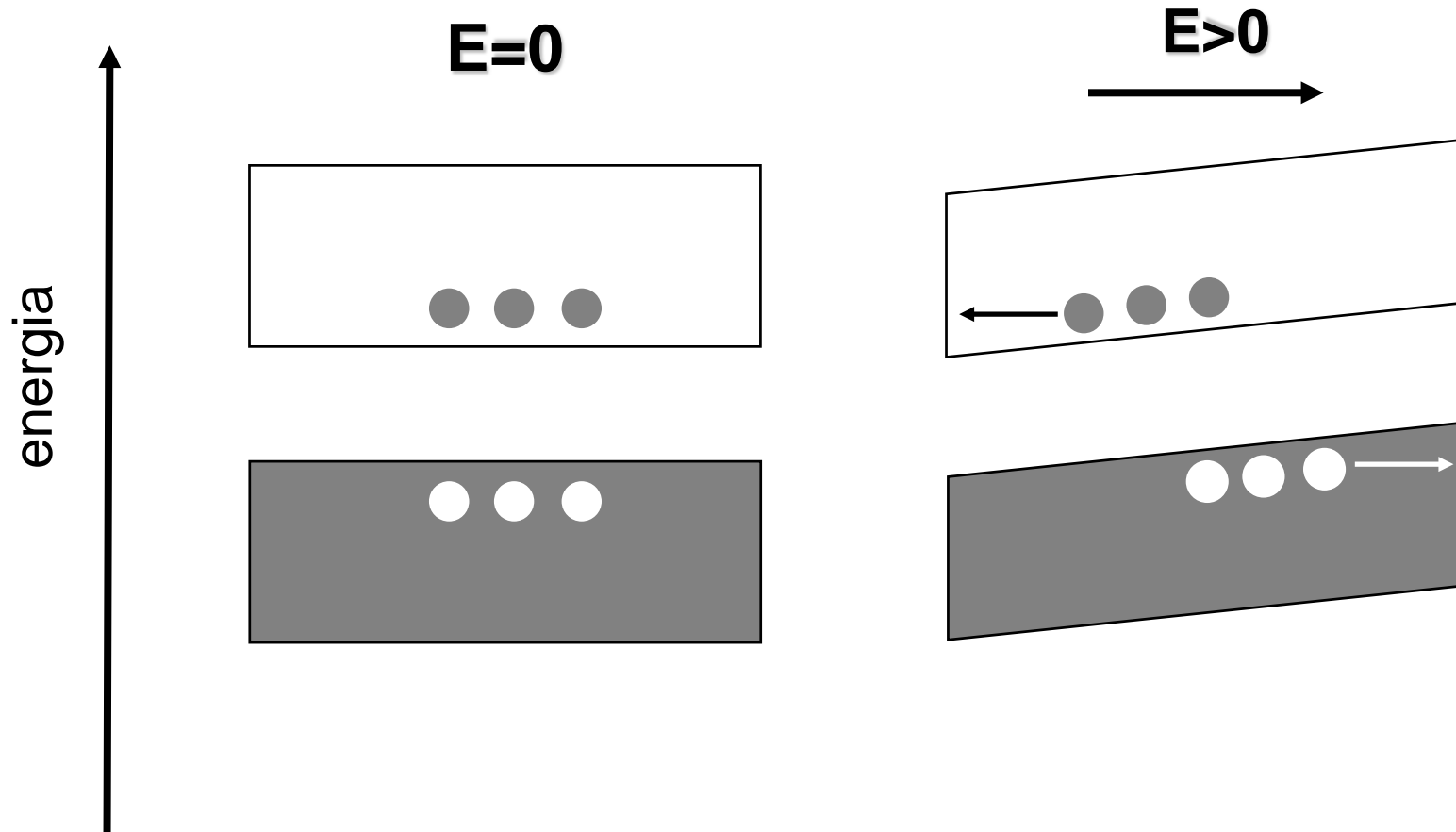
I semiconduttori (monoatomici gruppo IV, binari III-V e II-VI) sono caratterizzati da un gap di energia piccolo, generalmente < 4 eV.

Il ruolo della temperatura



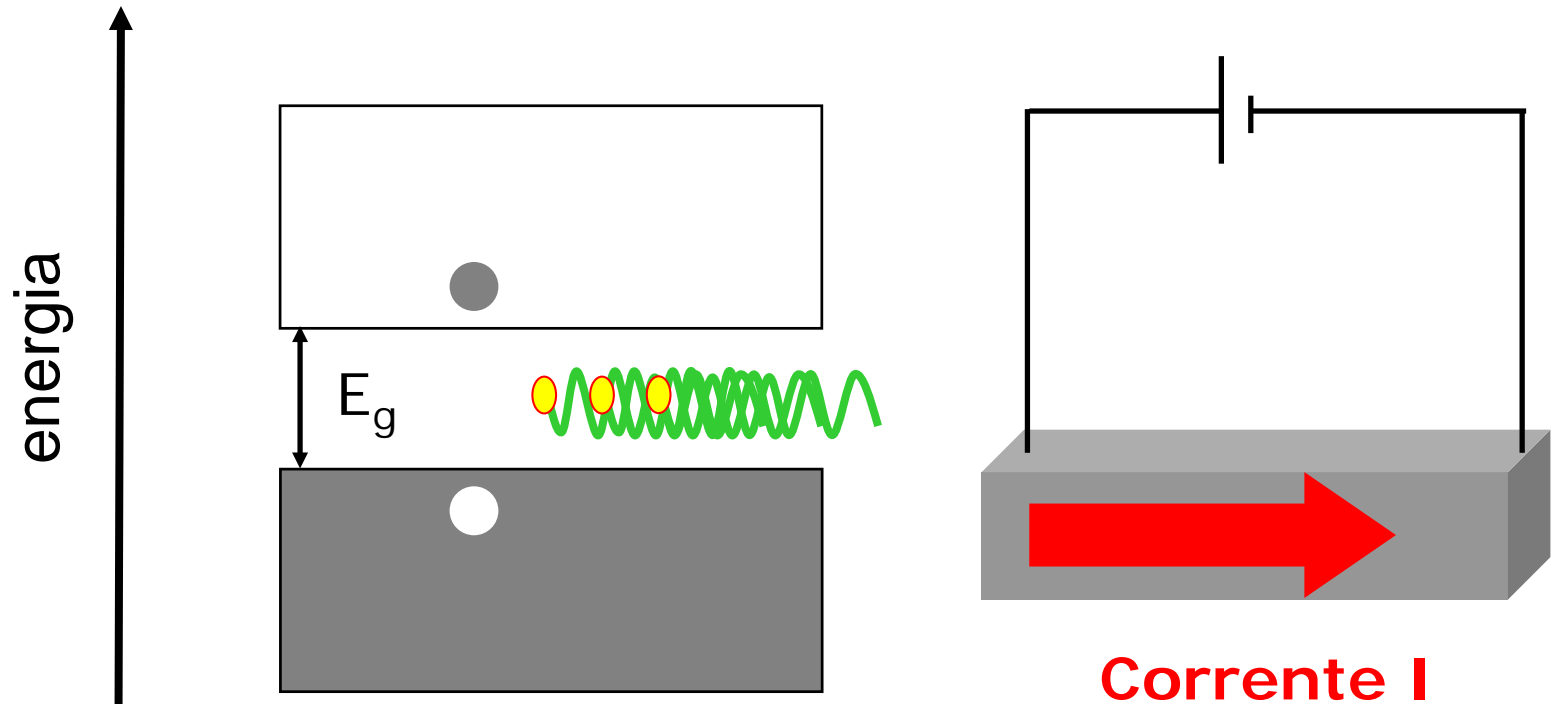
Aumentando la temperatura, a causa dell'agitazione termica, si creano elettroni in banda di conduzione e lacune in banda di valenza: per questo motivo la resistenza elettrica diminuisce.

Elettroni e lacune: effetto di un campo elettrico



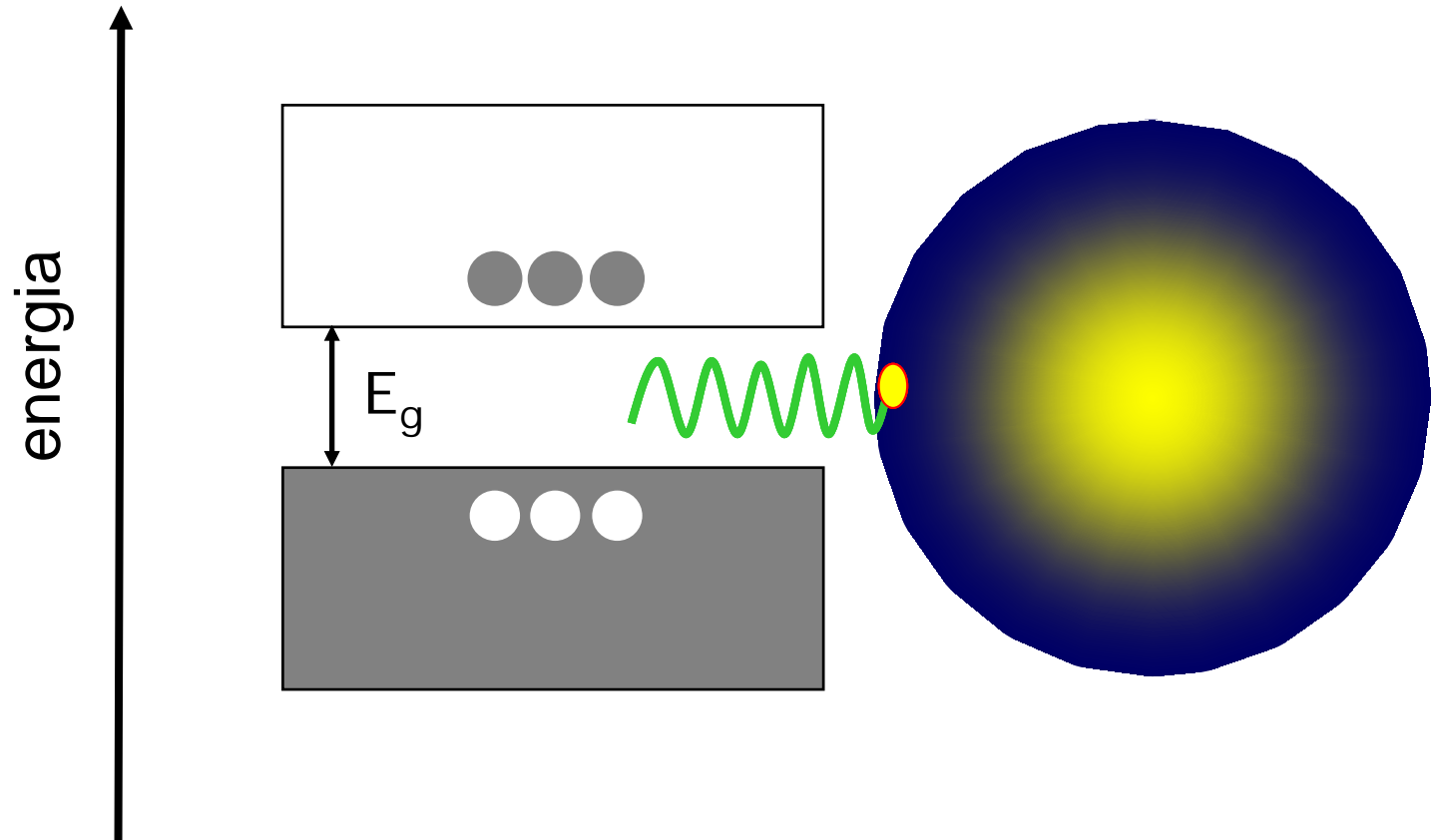
Gli stati vuoti in banda di valenza, o *lacune*, si comportano come particelle cariche positivamente

Fotoeccitazione e fotoconducibilità



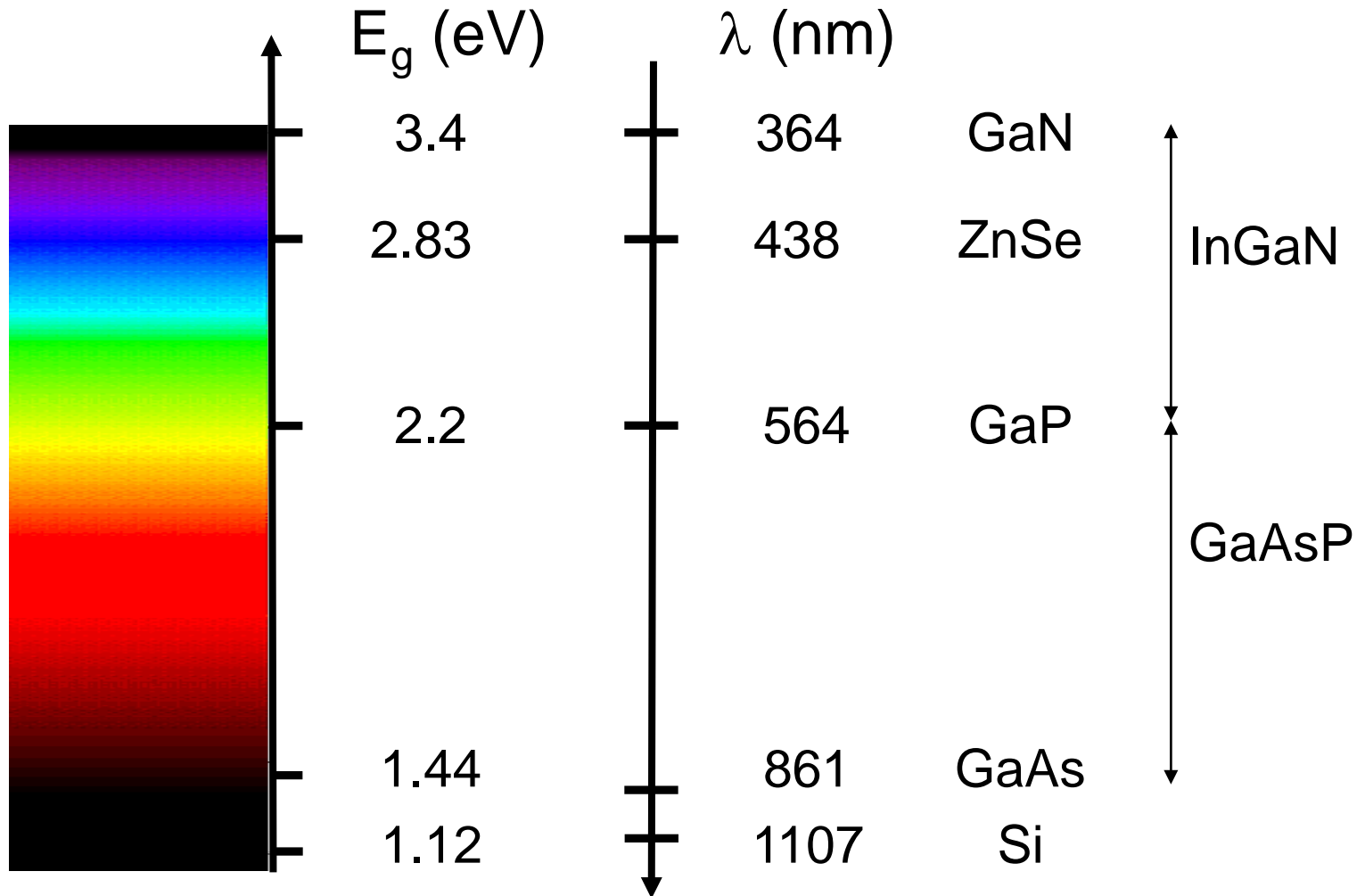
Se il semiconduttore viene illuminato con luce di energia $h\nu > E_g$, la corrente elettrica aumenta. Questo fenomeno è detto **fotoconducibilità**

Emissione di luce



Elettroni e lacune possono ricombinare radiativamente emettendo fotoni con energia $h\nu = E_g \rightarrow$ **luminescenza**

Gap di energia e luce visibile



Utilizzando semiconduttori binari e le loro leghe è possibile ottenere emissione/assorbimento di luce in tutto lo spettro visibile

Fisica e tecnologia dei semiconduttori...

1824: Berzelius isola e identifica il silicio

1873: fotoconducibilità nel selenio

1901- proprietà raddrizzatrici dei cristalli (Si, PbS, SiC) e radiotelegrafia

1907: elettroluminescenza (carburo di silicio)

1927: LED (carburo di silicio)

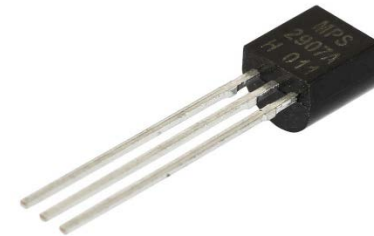
1925- meccanica quantistica, teoria della conduzione elettrica nei solidi

1930- teoria giunzione semiconduttore-metallo e giunzione p-n

1940: radar a onde corte basato su giunzione Si-tungsteno

1947: transistor (AT&T Bell Laboratories)

1954: celle fotovoltaiche al silicio (AT&T Bell Labs)



... sviluppo della micro- e optoelettronica

1958: circuito integrato

1961: LED infrarosso basato su giunzione p-n di GaAs

1969: laser rosso a eterogiunzione in AlGaAs

1970: primo microprocessore a 4 bit

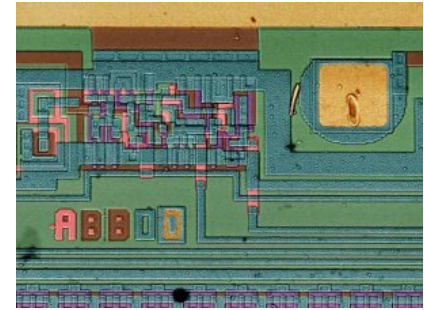
1979: compact disc (laser rosso, $\lambda=720$ nm)

1993: LED blu in InGaN/AlGaIn/GaN

1995: laser blu in InGaN/AlGaIn/GaN

2002: blu-ray disc (laser blu, $\lambda=405$ nm)

2006: lampada a LED in luce bianca



Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Isolanti, semiconduttori, metalli. Resistenza elettrica
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune
- **Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n**
- LED in luce blu e in luce bianca, laser
- Celle fotovoltaiche, fotorivelatori

Il drogaggio

una tecnica per controllare il numero dei portatori di carica

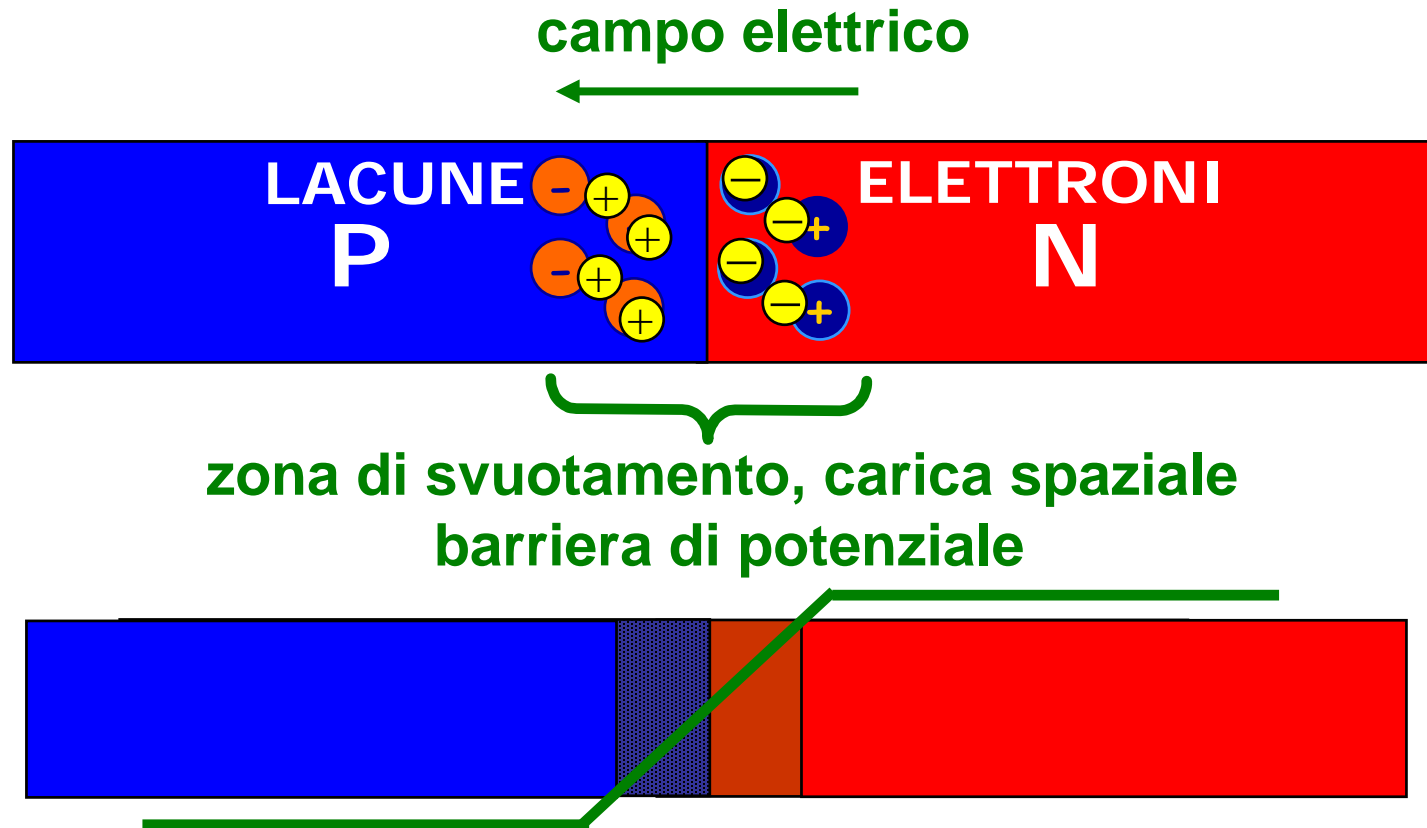
Come funziona? Prendiamo il **Silicio**:

atomi con un elettrone in più \Rightarrow **donori**,
forniscono elettroni in banda di
conduzione: *drogaggio di tipo n*

atomi con un el. in meno \Rightarrow **accettori**,
forniscono lacune in banda di valenza:
drogaggio di tipo p

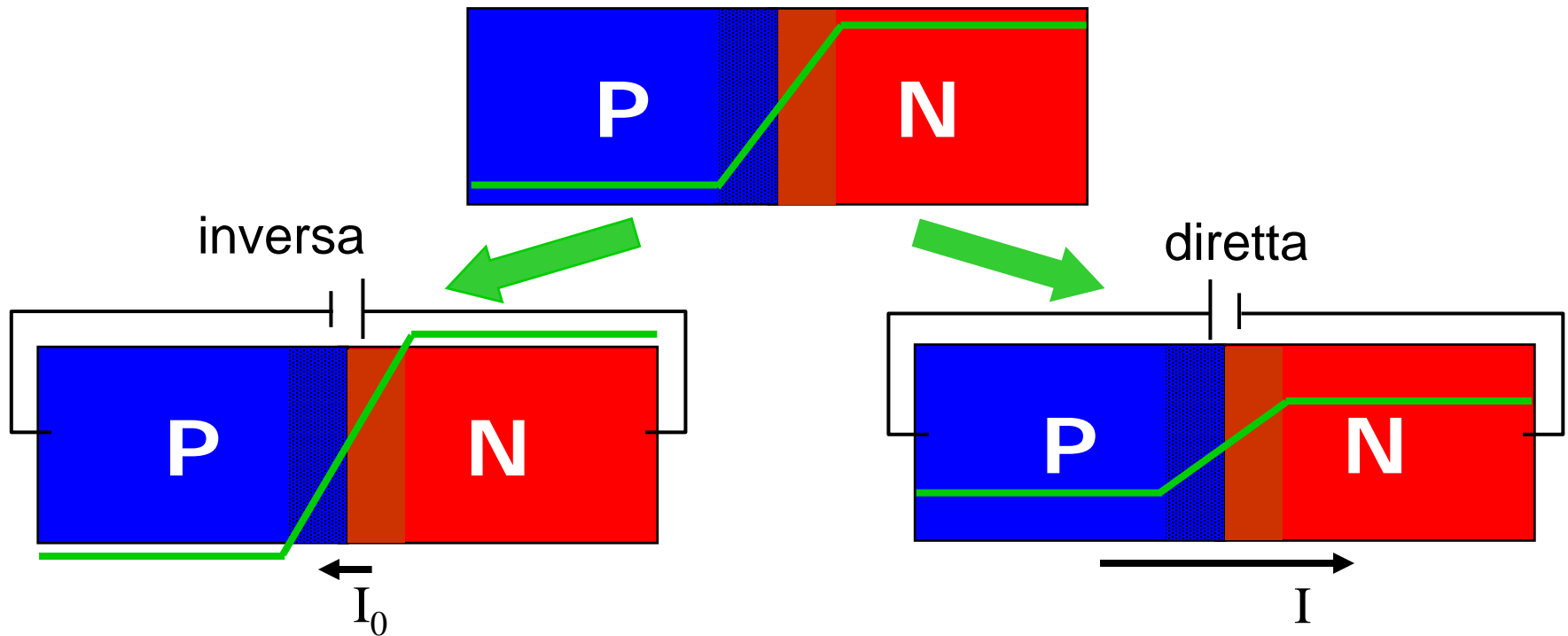
		III	IV	V
		5 B 10.811	6 C 12.0112	7 N 14.0067
		13 Al 26.9815	14 Si 28.0855	15 P 30.9738
29 Cu 63.54	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980

La giunzione p-n: il “cuore” dei dispositivi a semiconduttore



Il campo elettrico nella zona di svuotamento si oppone alla diffusione dei portatori maggioritari (lacune dal lato p, elettroni dal lato n)

Polarizzazione della giunzione p-n



Aumento della barriera

**Minimo passaggio
di corrente**

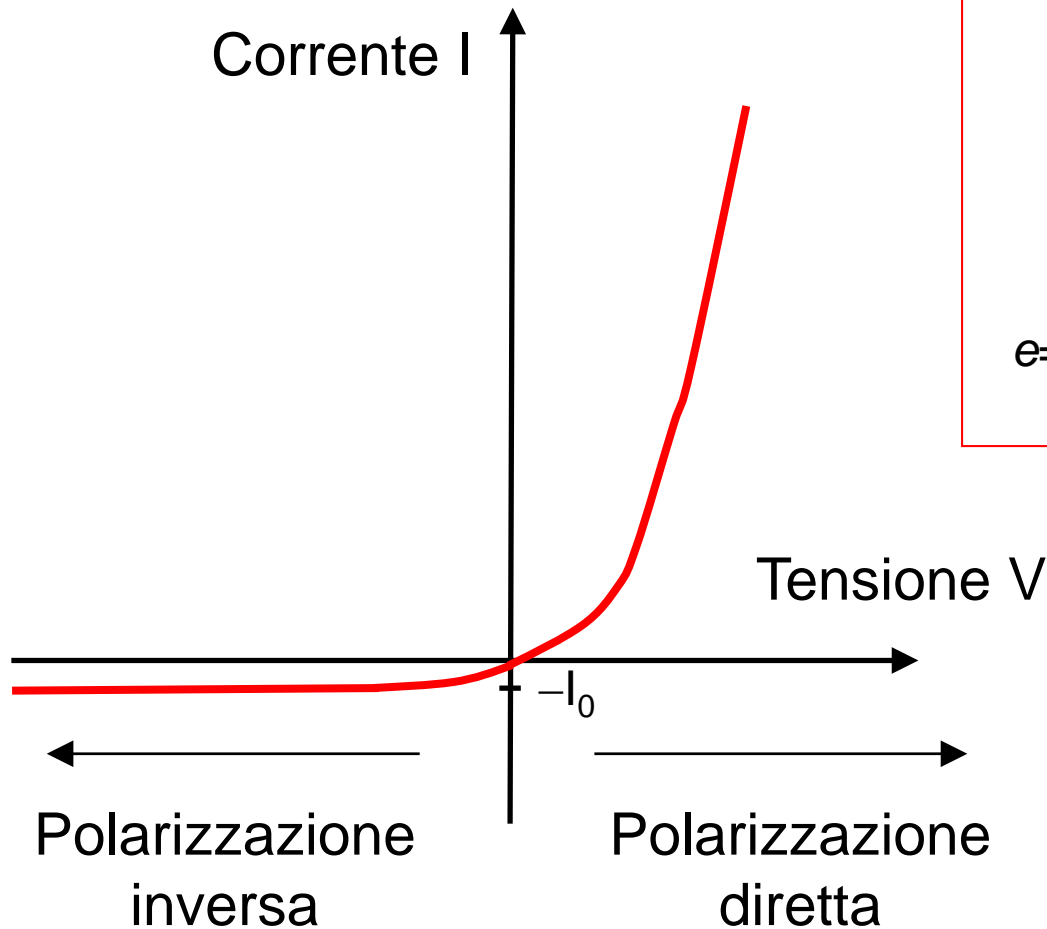


Riduzione della barriera

**Forte passaggio
di corrente**



Caratteristica I-V del diodo a giunzione



$$I = I_0 \left(e^{eV / k_B T} - 1 \right)$$

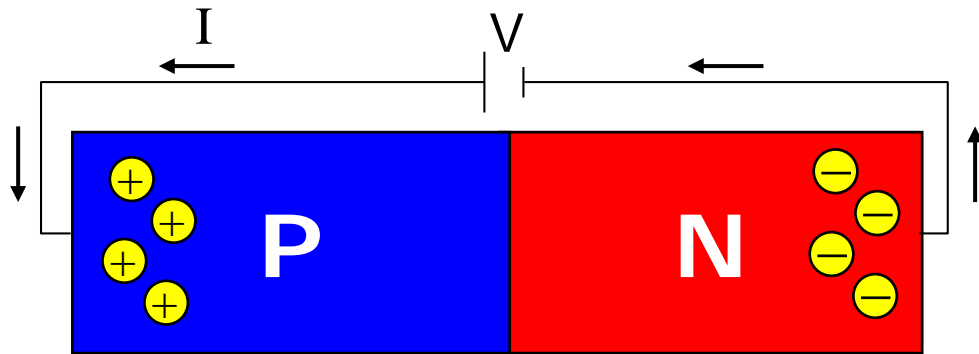
Legge del diodo

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

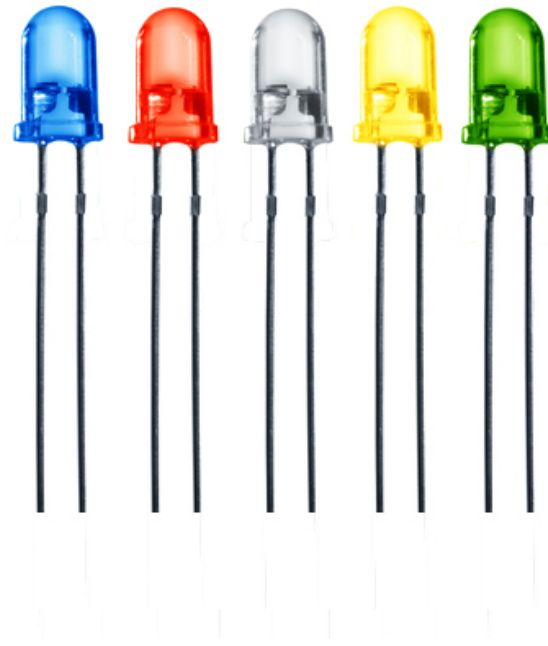
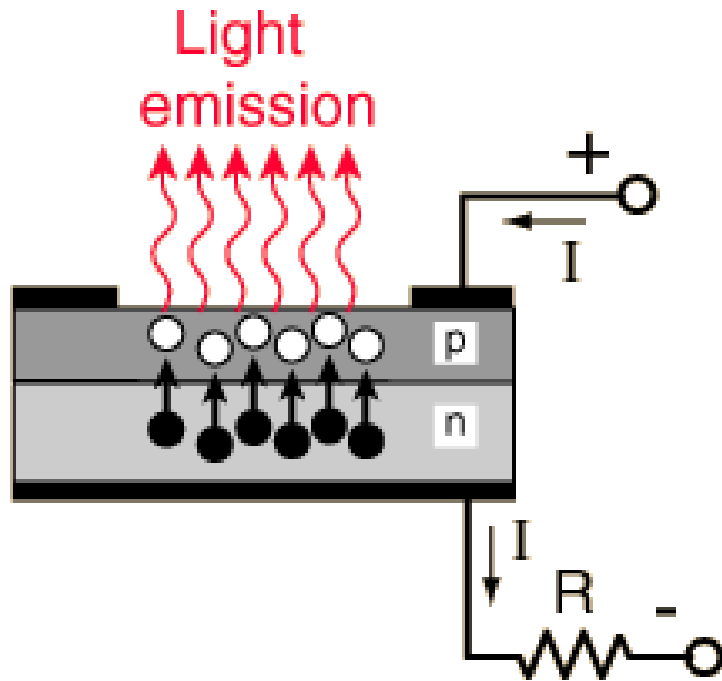
Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Isolanti, semiconduttori, metalli. Resistenza elettrica
- Semiconduttori: bande e gap di energia, elettroni e lacune
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- **LED in luce blu e in luce bianca, laser**
- Celle fotovoltaiche, fotorivelatori

Applicazioni della giunzione p-n: LED e laser a semiconduttore (con composti III-V: GaAsP, InGaN, ...)



LED (Light Emitting Device)



Il colore, ossia la lunghezza d'onda della luce emessa, dipende dal gap di energia del materiale semiconduttore secondo la relazione

$$E_g = h\nu = hc/\lambda$$

Il premio Nobel per la Fisica 2014

è stato attribuito per l'invenzione del **LED a luce blu** a

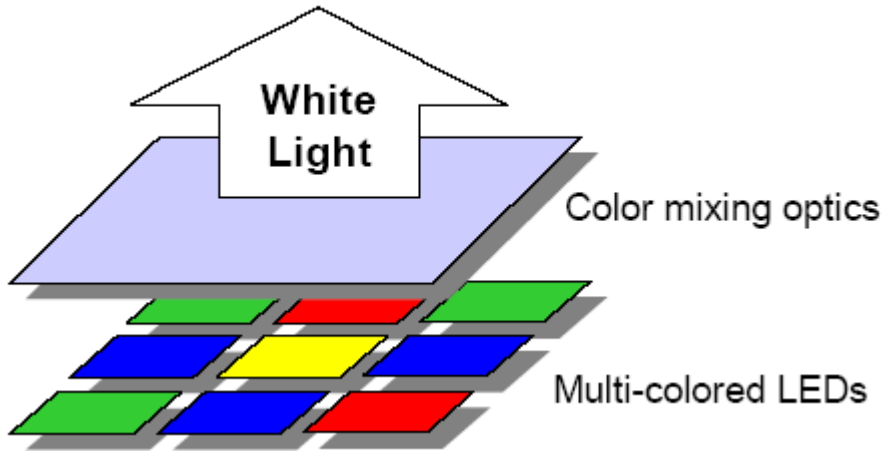
Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura



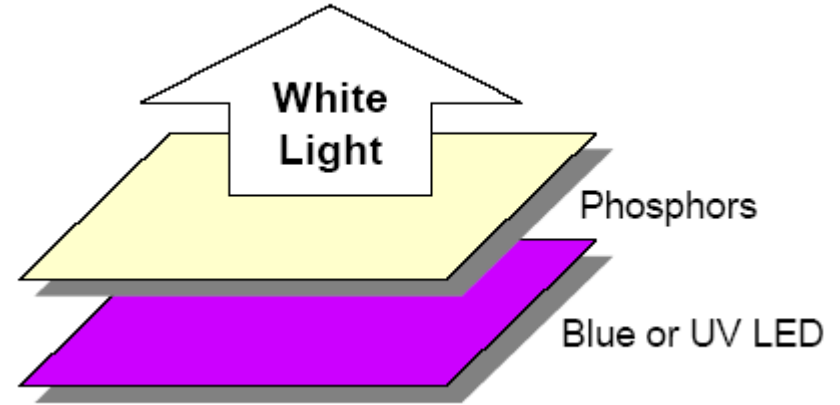
*“for the invention of **efficient blue light-emitting diodes (LEDs)** which has enabled **bright and energy saving white light sources**”*

<http://www.nobelprize.org>

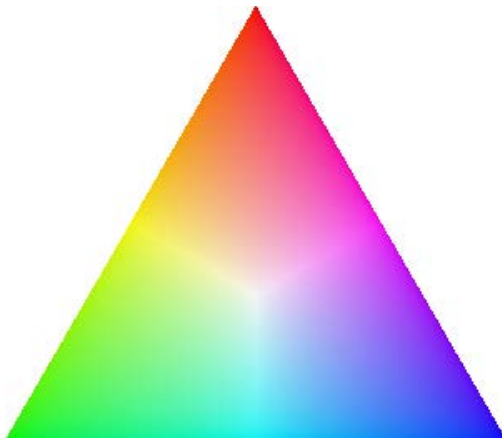
LED a luce bianca



LED RGB (Red-Green-Blue)



LED a fosfori



il "triangolo dei colori"



Illuminazione a LED: risparmio energetico

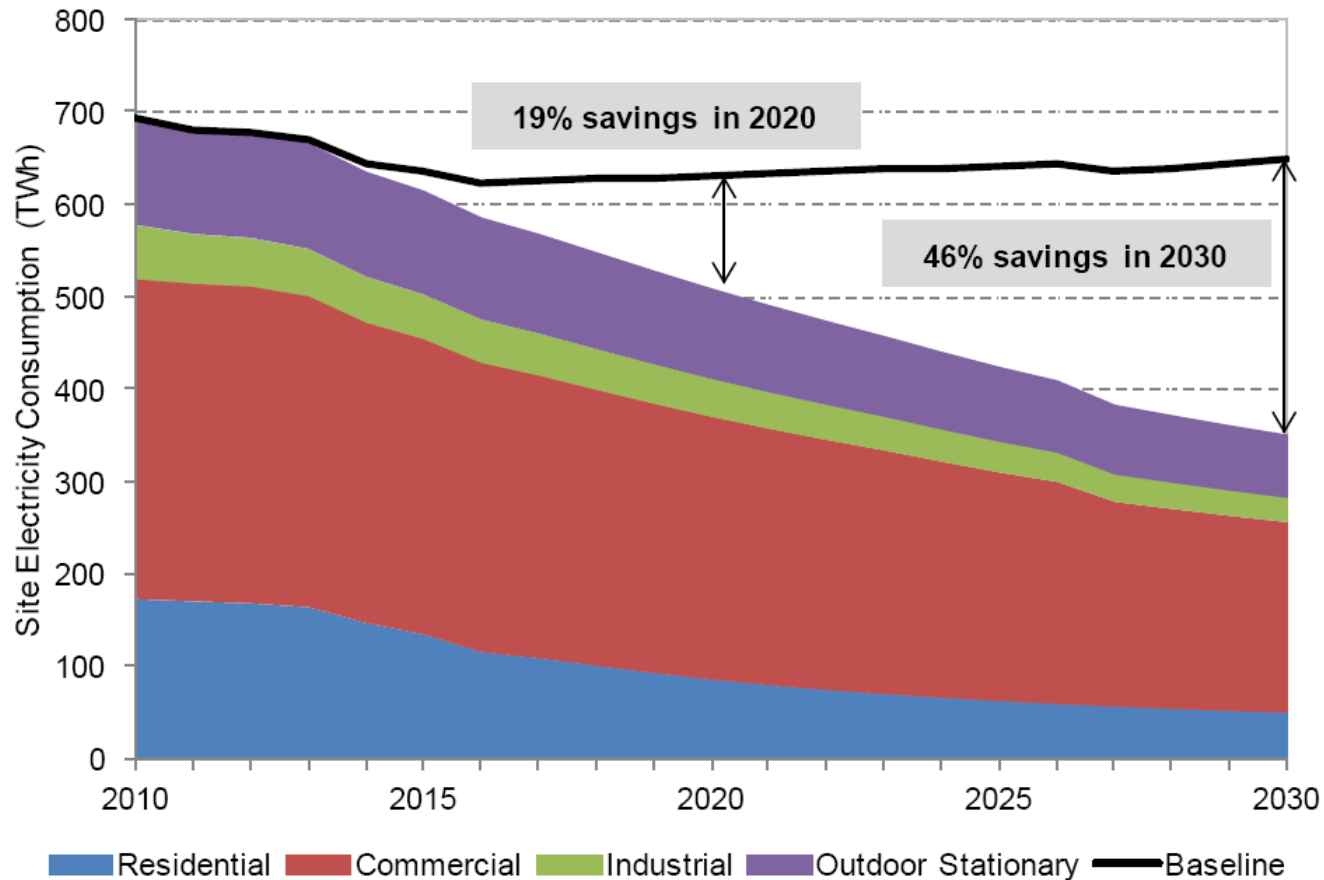


Figure 2.5: Forecasted U.S. Lighting Energy Consumption and Savings, 2010 to 2030

Fonte: US DoE, Solid State Lighting: Multi-year Program Plan, 2012

LED in sala operatoria

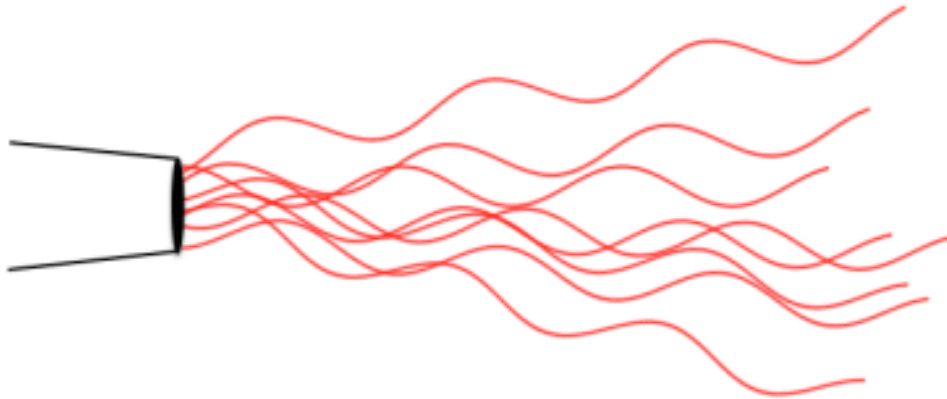


- Controllo del contrasto dei tessuti
 - Controllo del colore a seconda della durata dell'intervento
 - No emissione infrarossa → no emissione termica, fino a 6 °C in meno
→ comfort per il chirurgo e per il paziente
- ... e per la sala di recupero post-operatorio: luce "calda" per conciliare il riposo e il recupero!

Fase coerente: la luce laser



La luce emessa da un laser è **coerente**:
tutti i fotoni hanno *la stessa fase*
⇒ direzionalità, brillantezza...



Invece la luce di un LED è **incoerente**:
i fotoni emessi hanno fasi casuali

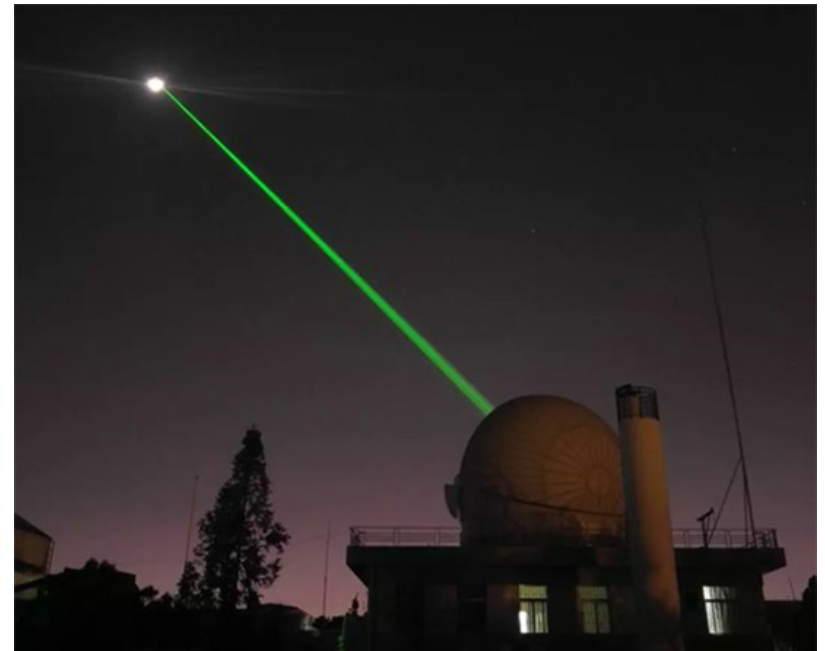


Lunar laser ranging experiment... misurare la distanza della Luna con il laser

Retroriflettore sulla Luna
(Apollo 11, 1969)

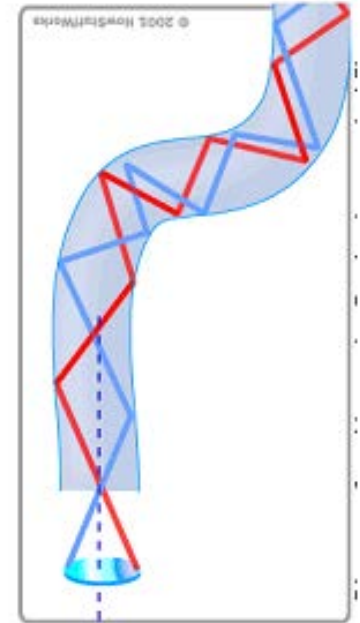
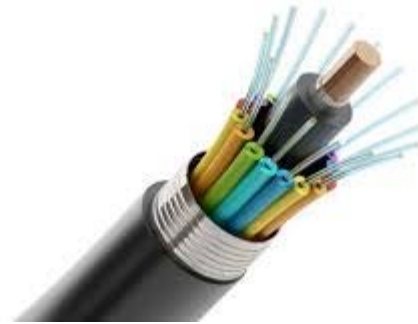


Misura della distanza tramite il
tempo di ritorno del segnale (≈ 2.5 s)



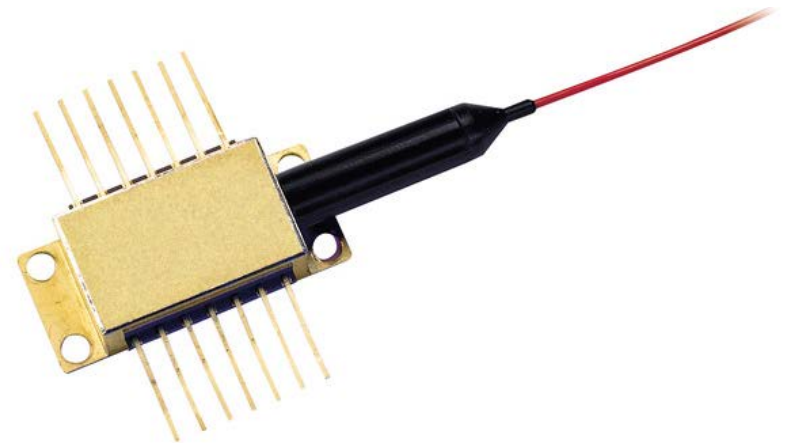
La distanza media Terra-Luna è di 384'467 chilometri; la distanza istantanea può essere misurata con la precisione di 1 mm!

Telecomunicazioni a lunga distanza su fibra ottica



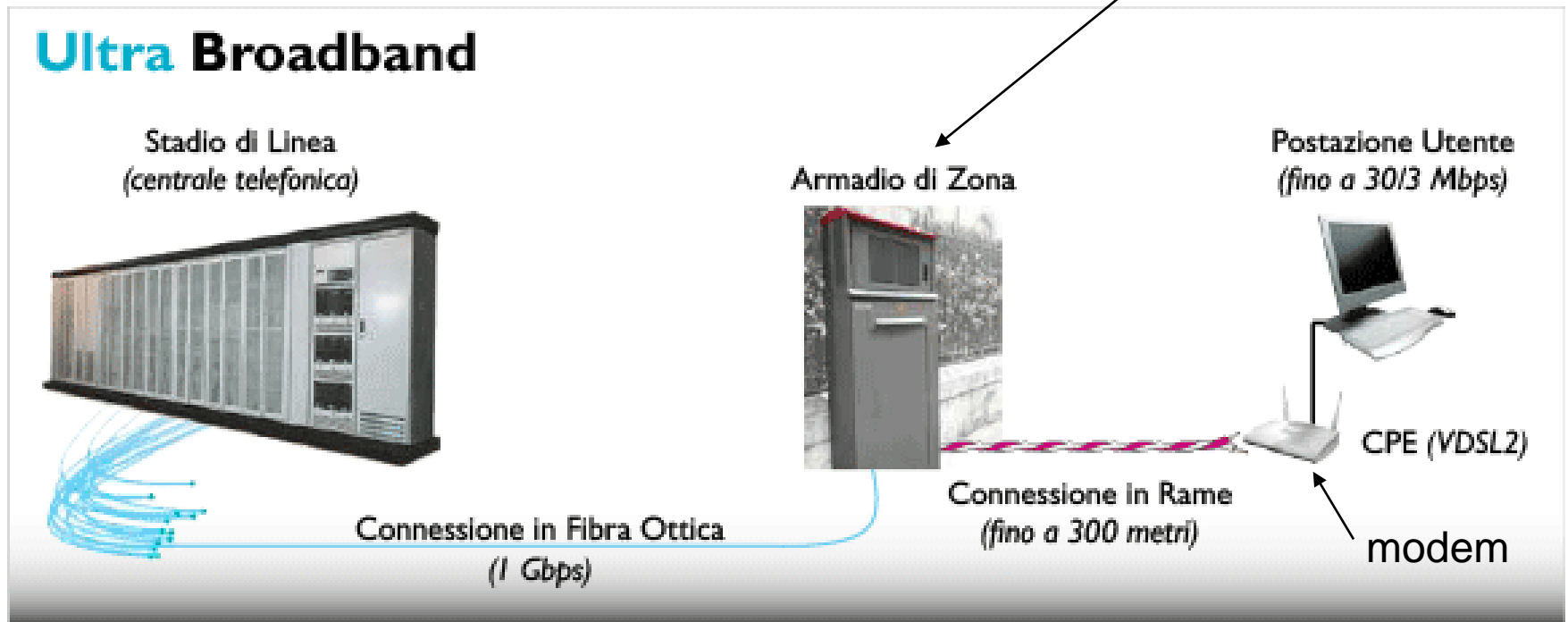
La propagazione in fibra ottica avviene tramite la riflessione totale interna, grazie alla differenza di indice di rifrazione fra core di silice pura e cladding di silice drogata.

La lunghezza d'onda è $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$ ed è generata da un diodo laser.



Fin dove arriva la fibra ottica?

Il sistema più diffuso è il Fiber-To-The-Cabinet (armadio di zona)

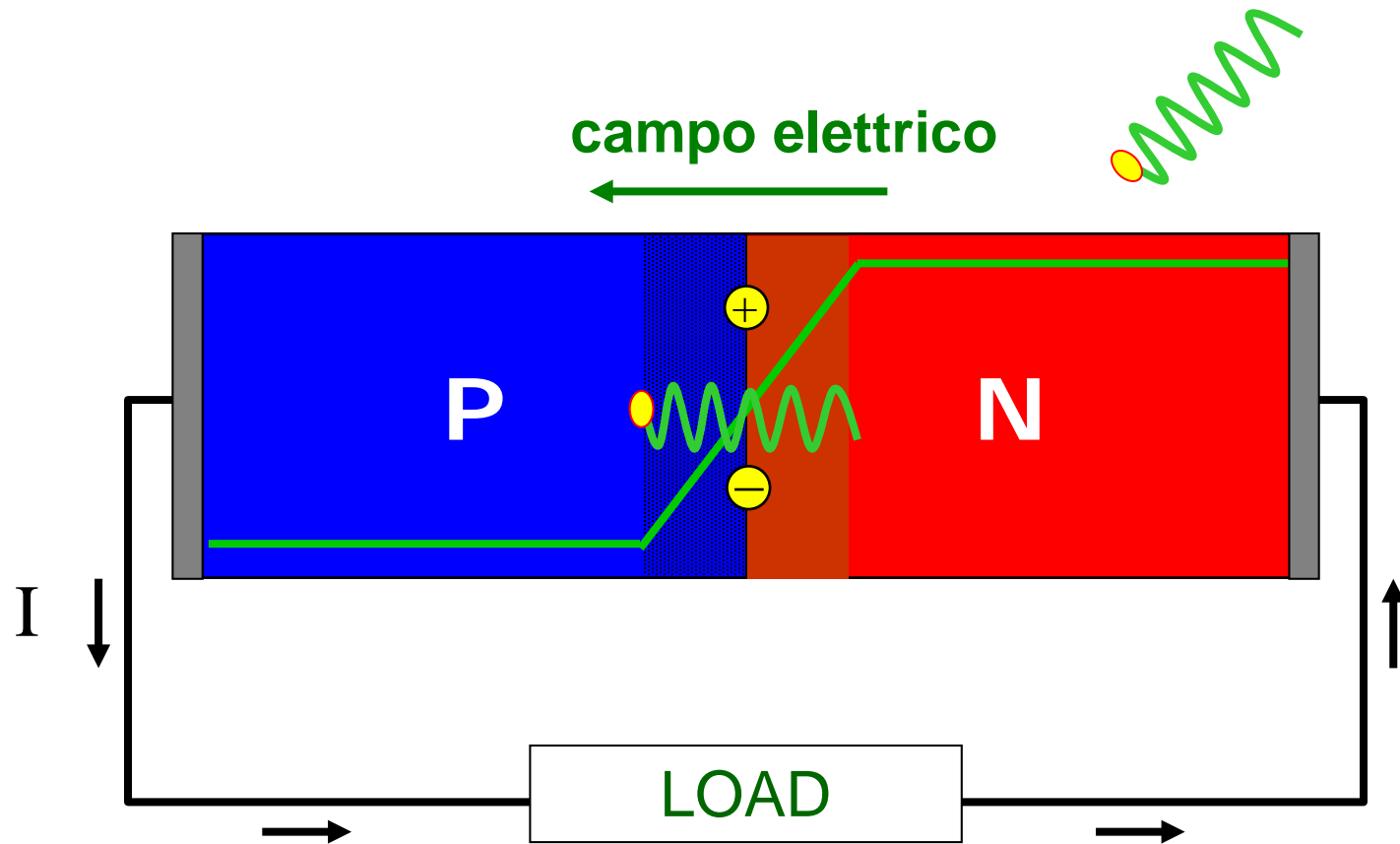


Il segnale ottico viene convertito in un segnale elettrico e ricevuto tramite il MODEM (modulation/demodulation)

Indice

- Luce: onde elettromagnetiche e fotoni
- Isolanti, semiconduttori, metalli. Resistenza elettrica
- Semiconduttori: bande e gap di energia, fotorivelatori
- Semiconduttori: drogaggio, giunzione p-n
- LED in luce blu e in luce bianca, laser
- **Celle fotovoltaiche, fotorivelatori**

Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata

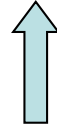


Una cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED o a un laser a semiconduttore: quando viene illuminata, la corrente prodotta ha il verso della corrente inversa del diodo

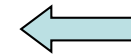
Il silicio: dalla sabbia ai micro-processori



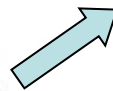
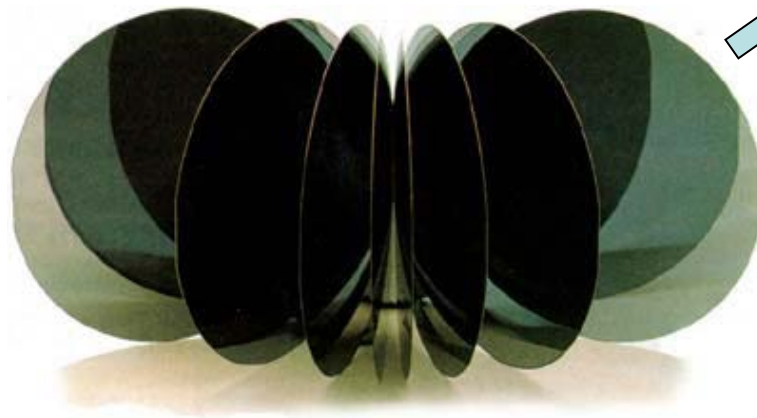
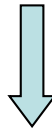
Lingotto



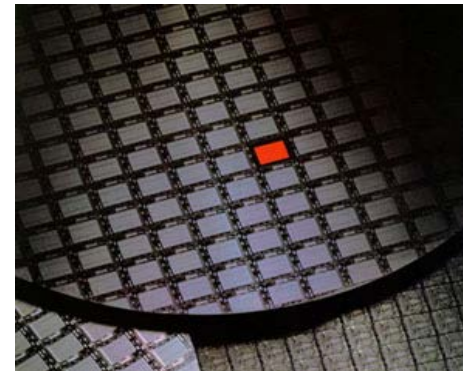
Silicio ultra-puro



Wafer



Chip



oppure



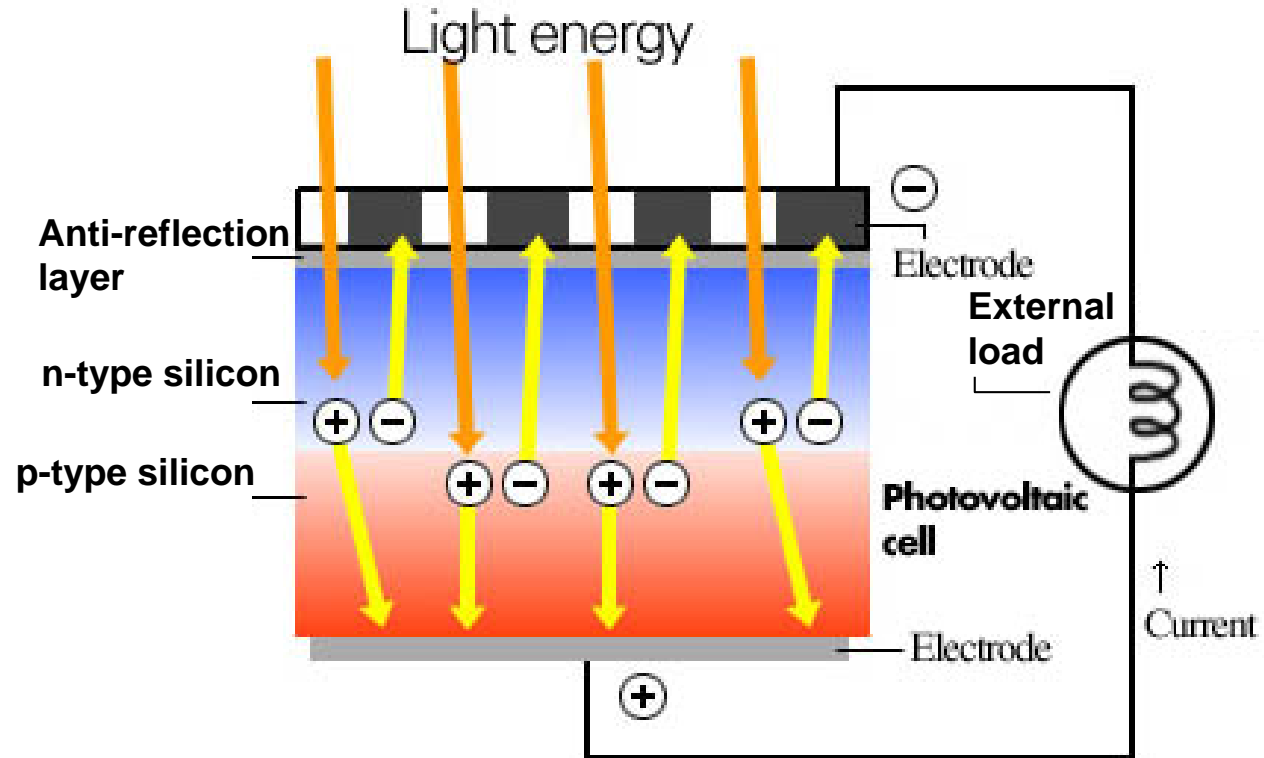
Cella solare



La tecnologia delle celle fotovoltaiche di semiconduttori è molto vicina alle tecnologie della microelettronica

Struttura di una cella fotovoltaica

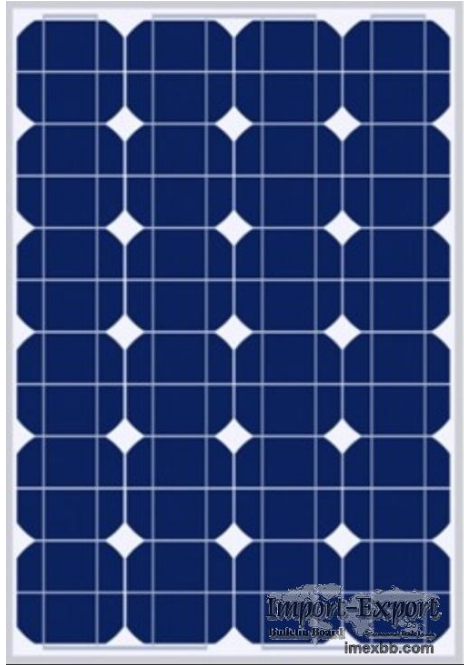
La conversione fotovoltaica dell'energia solare è basata sull'assorbimento di luce e sulla separazione delle cariche in una giunzione p-n



L'**efficienza di conversione di energia** di una cella solare è il rapporto fra la potenza prodotta nel carico esterno e la potenza incidente dal sole

Main photovoltaic technologies

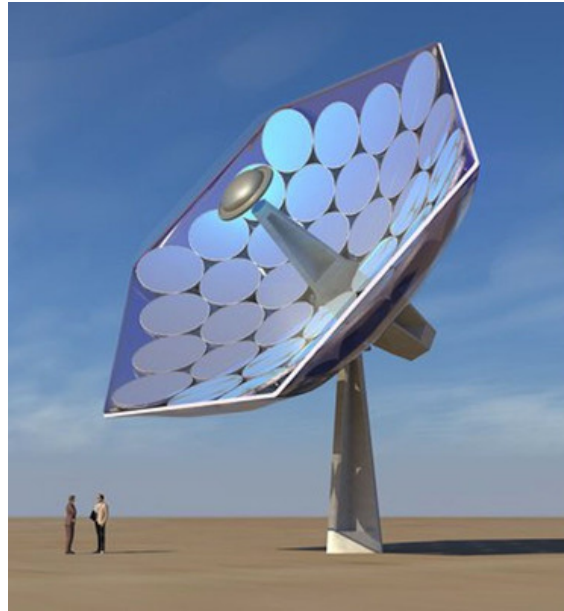
Silicon (wafer-based) photovoltaics



Mono- and poly c-Si:
~94% of global
photovoltaic market

Efficiency record:
26.7%

Concentration photovoltaics



Multijunctions of III-V
semiconductors:
satellites, solar fields

Efficiency record:
46% (4J, ~500 suns)

Organic photovoltaics



Dye-sensitized solar cells,
polymeric (BHJ),
fluorescent concentrators

Low efficiencies (<10%)
→ *building-integrated PV*

Solar PV energy on the Earth...

and above...

Copper Mountain Solar Facility, Nevada



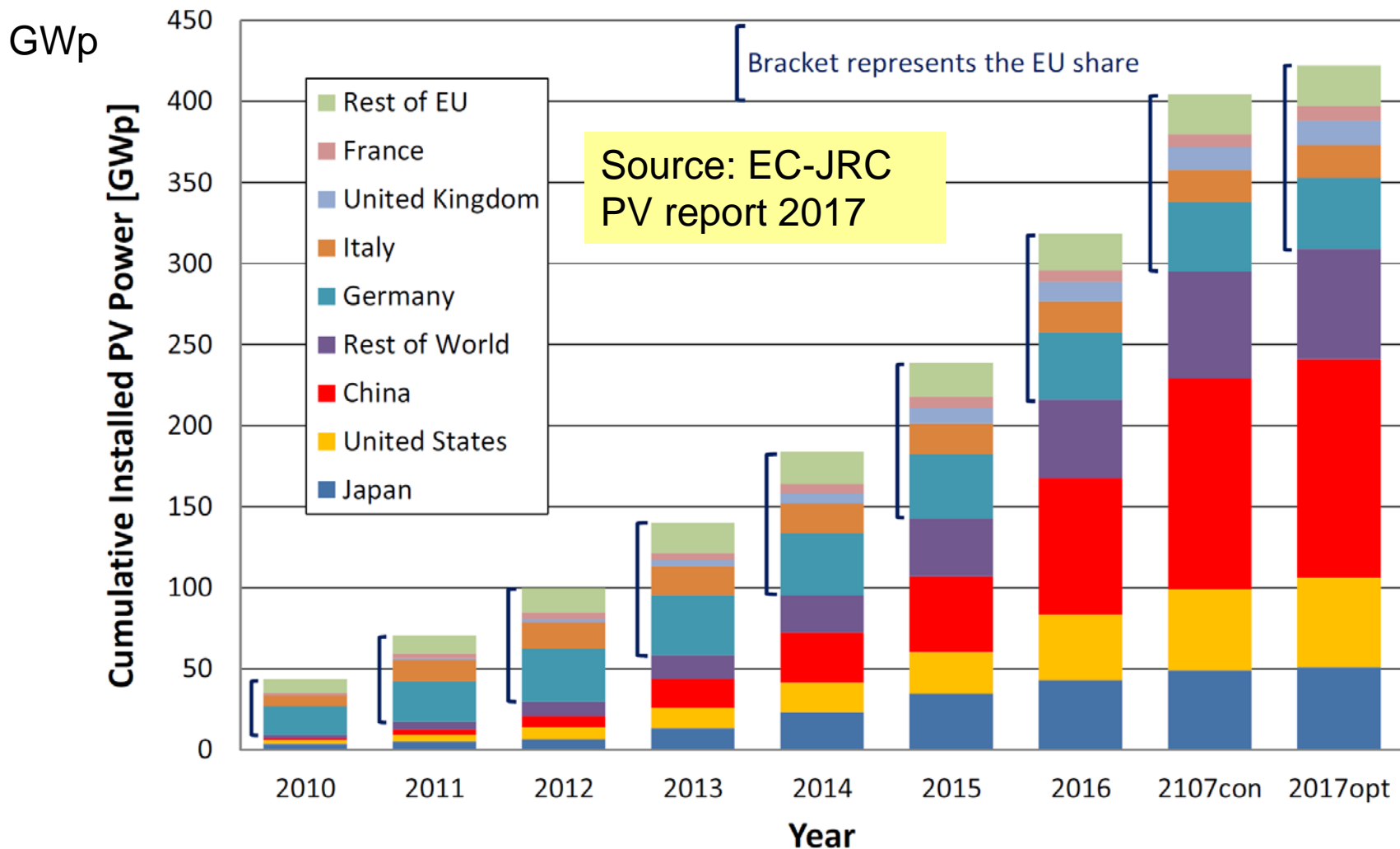
Solar impulse: the solar airplane



Satellites

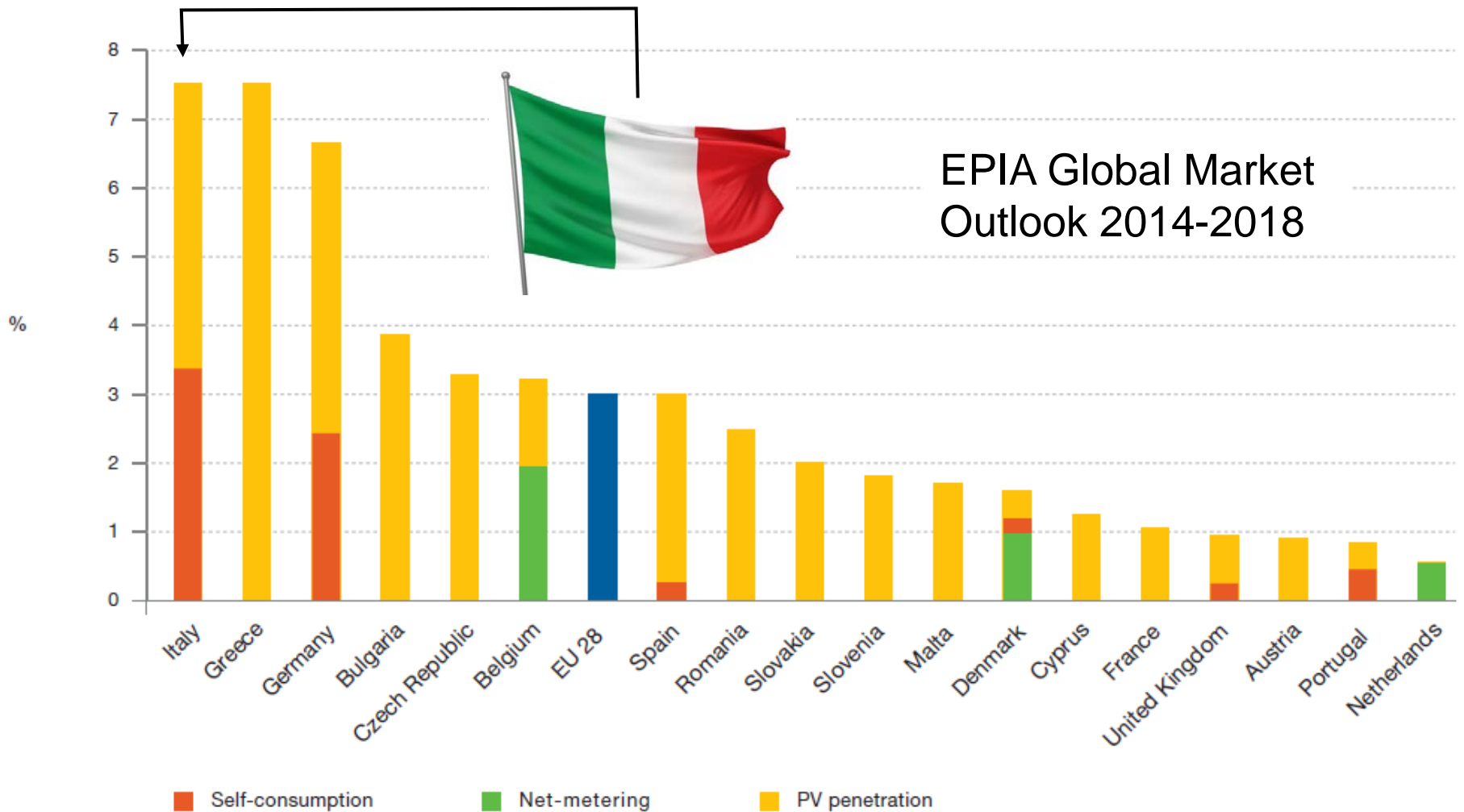


Potenza fotovoltaica cumulativa installata



Tasso di crescita annuo ~24%, tempo di raddoppio ~3 anni e continua riduzione dei costi grazie all'economia di scala

Contributo del fotovoltaico al consumo di energia in EU 28 nel 2013



Fotovoltaico in Italia



L'Italia fra i primi paesi al mondo per potenza fotovoltaica installata (circa 18.2 GW: vedi www.gse.it).

Con questi numeri, il fotovoltaico in Italia contribuisce fino al 30% della potenza di picco (~56 GW) e circa il 7% dell'energia elettrica prodotta in un anno (~300 TWh).

Fotorivelatori



Il **fotorivelatore** è basato su una giunzione p-n di semiconduttore e ha la stessa struttura di un LED o di una cella solare. È progettato per assorbire luce generando un segnale in **corrente**.



È alla base di numerose applicazioni, fra queste l'ossimetro (o saturimetro) che misura la saturazione dell'ossigeno nel sangue, ossia la percentuale di ossigeno legato all'emoglobina.

Ricerca pura o ricerca applicata?

- **LED, laser, celle fotovoltaiche, fotorivelatori** sono dispositivi basati sui semiconduttori. Il loro comportamento dipende in maniera cruciale dalle proprietà quantistiche della materia e della radiazione elettromagnetica.
- La comprensione profonda di queste proprietà è alla base dello sviluppo della conoscenza in fisica della materia, così come di tutte le applicazioni.
- Fisica dei semiconduttori, microelettronica, optoelettronica, fotonica, fotovoltaico sono campi di ricerca strettamente collegati.
- L'illuminazione a stato solido (LED) e l'utilizzo dell'energia solare (fotovoltaico) sono una parte importante del mix energetico del futuro, in vista di una soluzione sostenibile del problema energetico.
- **Ricerca pura e ricerca applicata formano un binomio inscindibile**