



**UNIVERSITÀ  
DI PAVIA**

A. Volta



# **Luce ed Energia** ***fotovoltaico, comunicazione ottica***

**Lucio Andreani**

Università di Pavia, Dipartimento di Fisica

<http://fisica.unipv.it>

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

**Incontri del Martedì, Pavia, 22 Ottobre 2019**

# La luce: ricerca fondamentale o applicazioni e tecnologie?

Natura ondulatoria/corpuscolare della luce: Newton, Fresnel, Maxwell...

Quantizzazione e fotoni: corpo nero (Planck), effetto fotoelettrico (Einstein)

Relatività generale: la luce nello spazio-tempo curvo

Emissione spontanea e stimolata

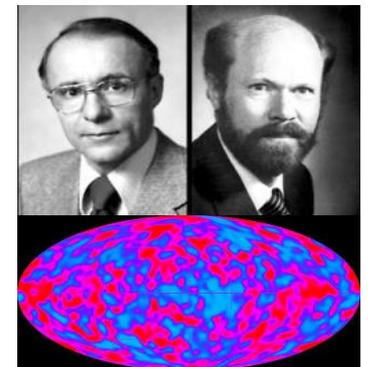
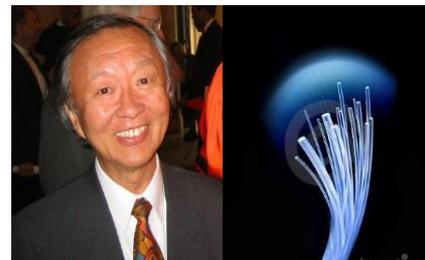
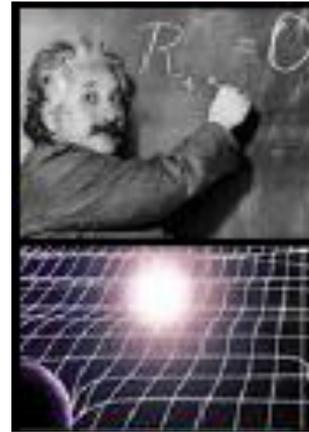
Radiazione cosmica di fondo e il big bang

*LED e illuminazione*

*Laser e applicazioni: medicina, industria...*

*Fotovoltaico*

*Fibre ottiche e telecomunicazioni*



# Il problema energetico... come ci può aiutare la luce?

LED (Light Emitting Diode)



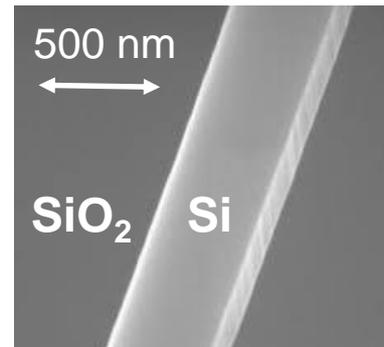
⇒ *illuminazione e risparmio energetico*

Celle fotovoltaiche



⇒ *energia elettrica da fonte rinnovabile*

Si-photonics per interconnessioni ottiche

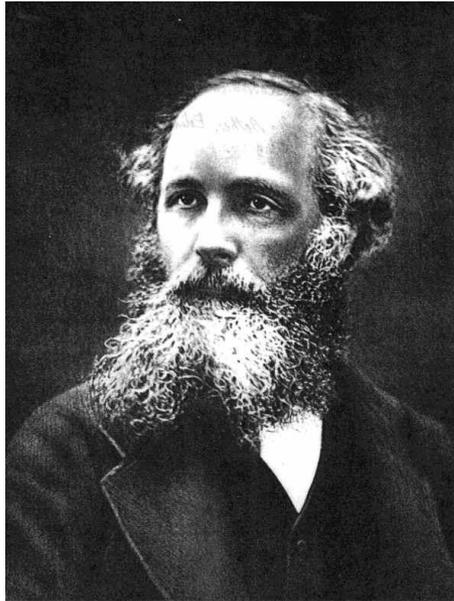


⇒ *risparmio di energia nei data centers*

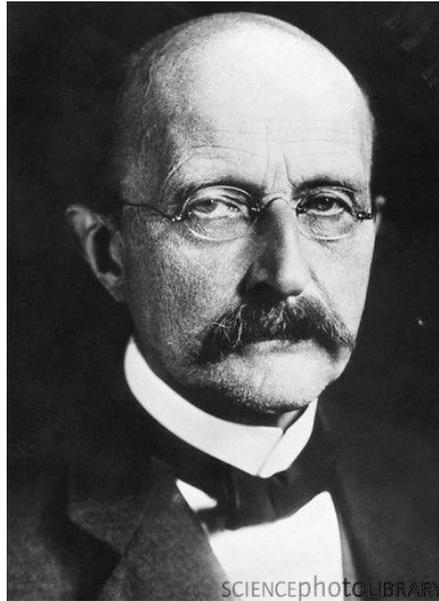
# Indice

- Gli ingredienti:
  - onde elettromagnetiche e fotoni
  - semiconduttori, giunzione p-n
  - riflessione totale interna e guide d'onda
- La ricerca e le applicazioni:
  - (LED e laser)
  - celle fotovoltaiche
  - comunicazione ottica, silicon photonics
- Conclusioni

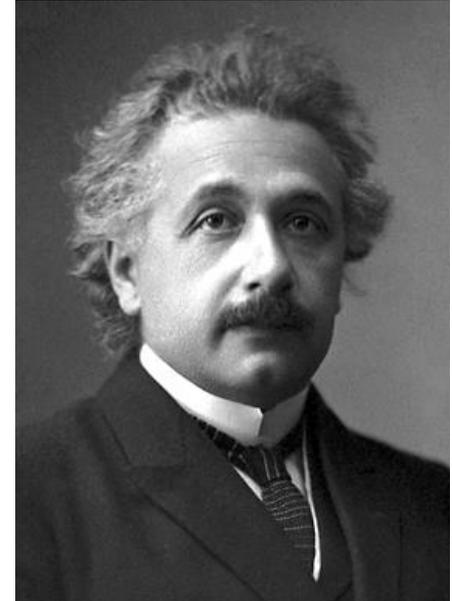
# *La luce: onde elettromagnetiche e fotoni*



J.C. Maxwell



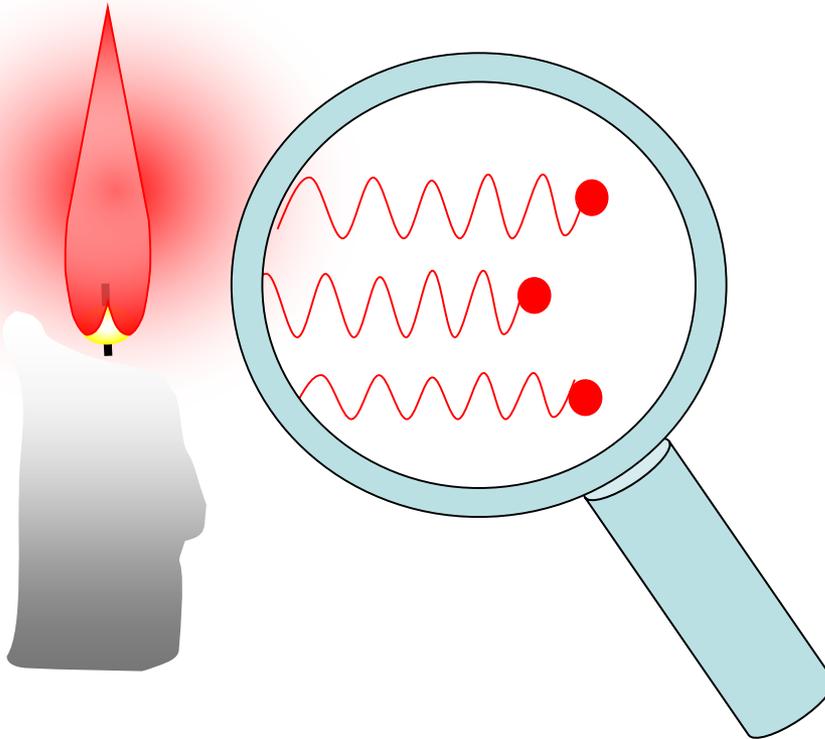
M. Planck



A. Einstein

# Quantizzazione dell'energia

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



quanto di energia  
elettromagnetica (fotone):

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

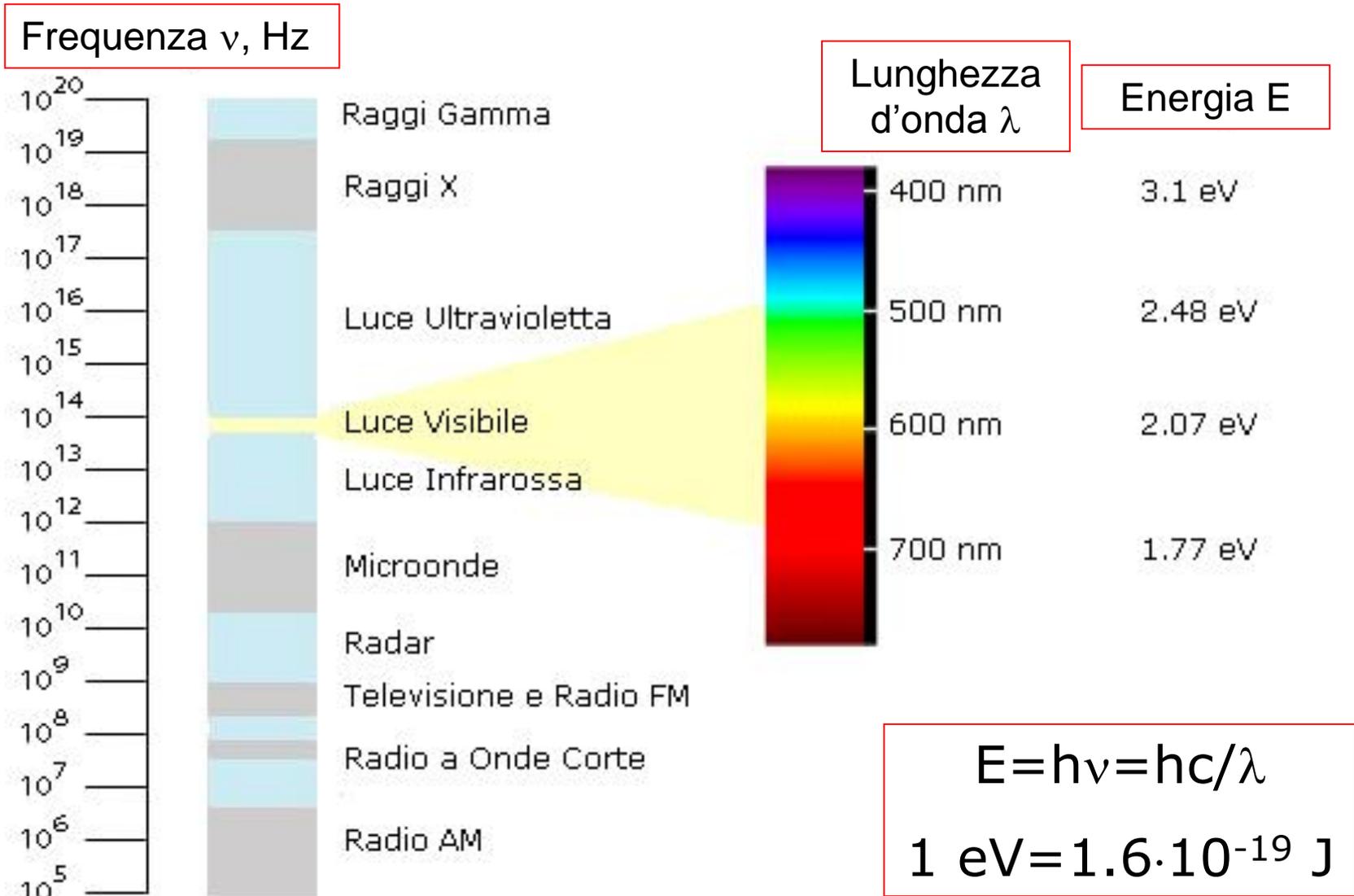


anche la luce (così come la  
materia) è onda/particella!

La **radiazione elettromagnetica** ha simultaneamente natura

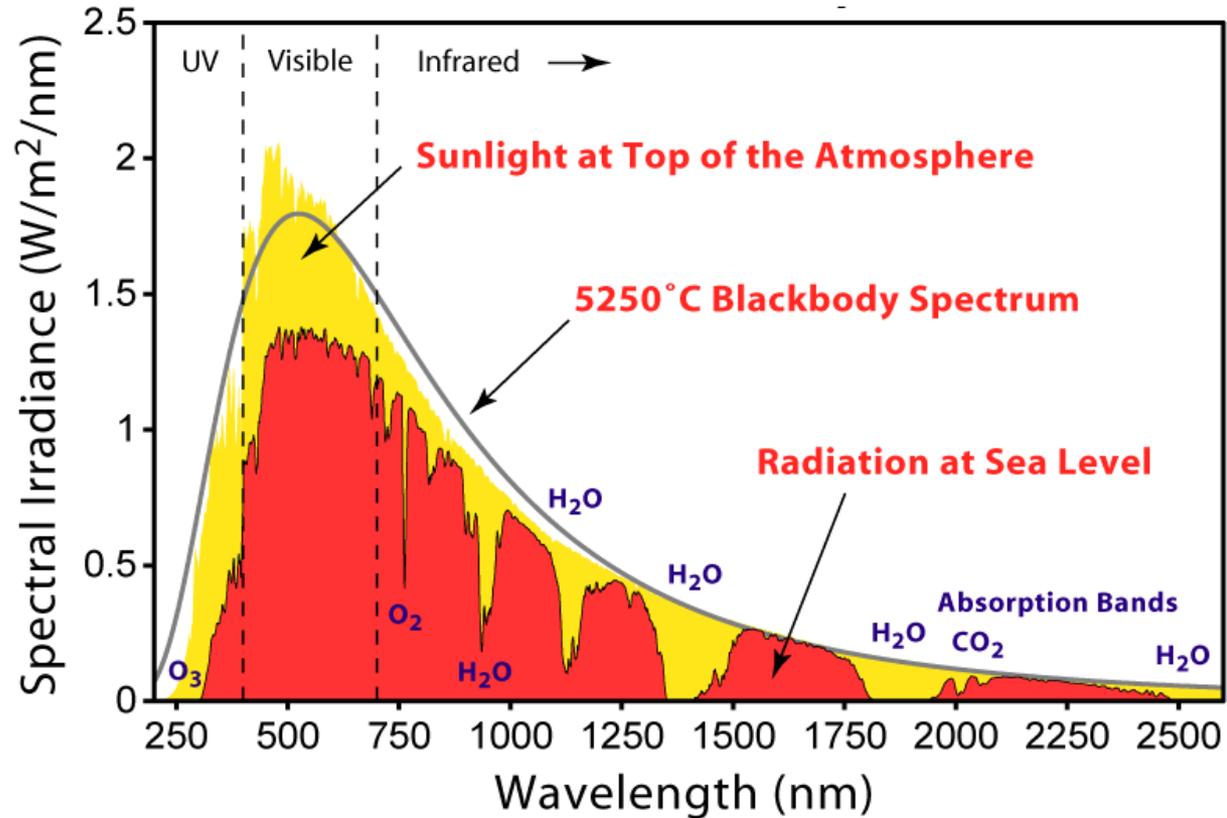
- ondulatoria: *onde elettromagnetiche* (interferenza, diffrazione, ...)
- corpuscolare: *fotoni* (effetto fotoelettrico, gap di energia, ...)

# Lo spettro delle onde elettromagnetiche



# Lo spettro solare

La radiazione elettromagnetica emessa dal Sole ha lo spettro simile a quello di un *corpo nero* alla temperatura  $T=5800$  K

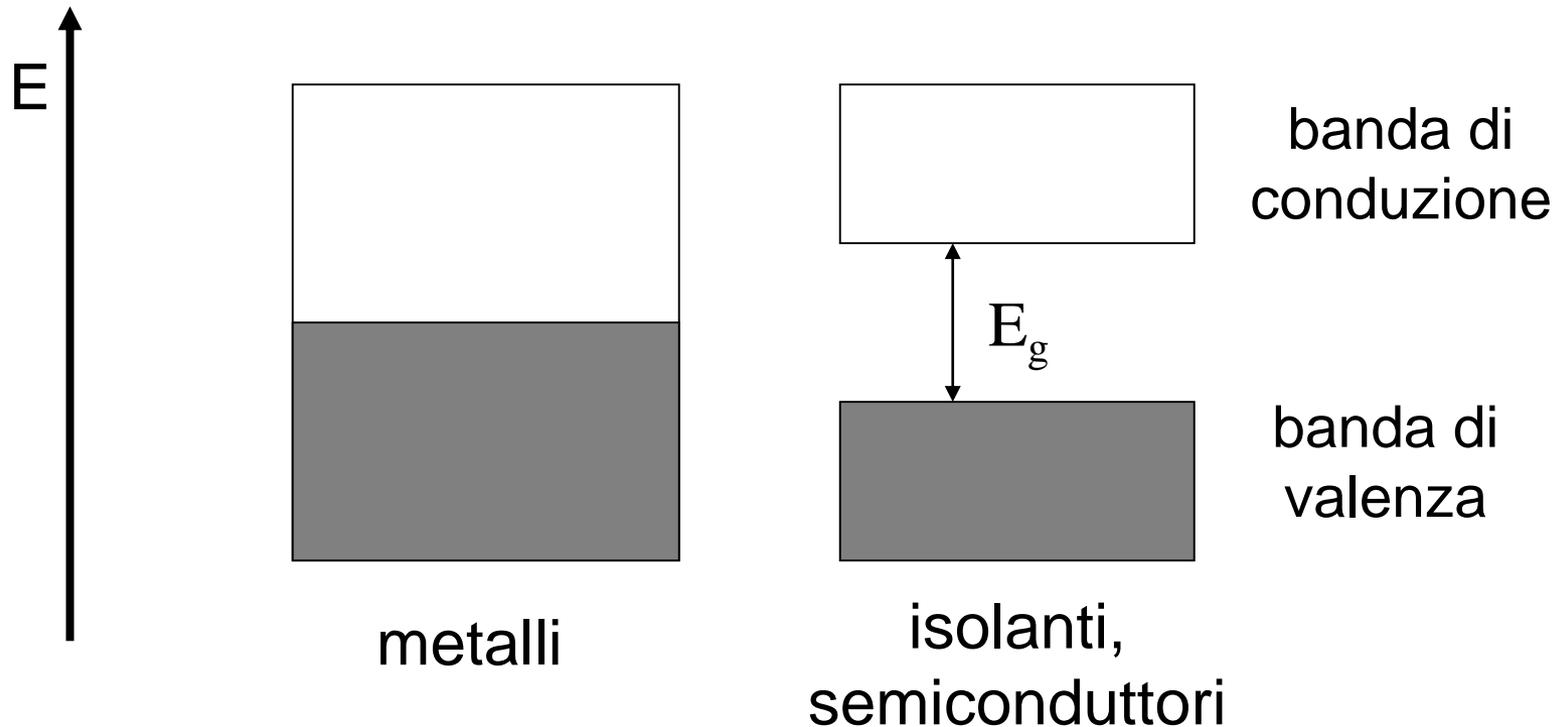


N.b. diverse stelle hanno temperature diverse (e colore...)



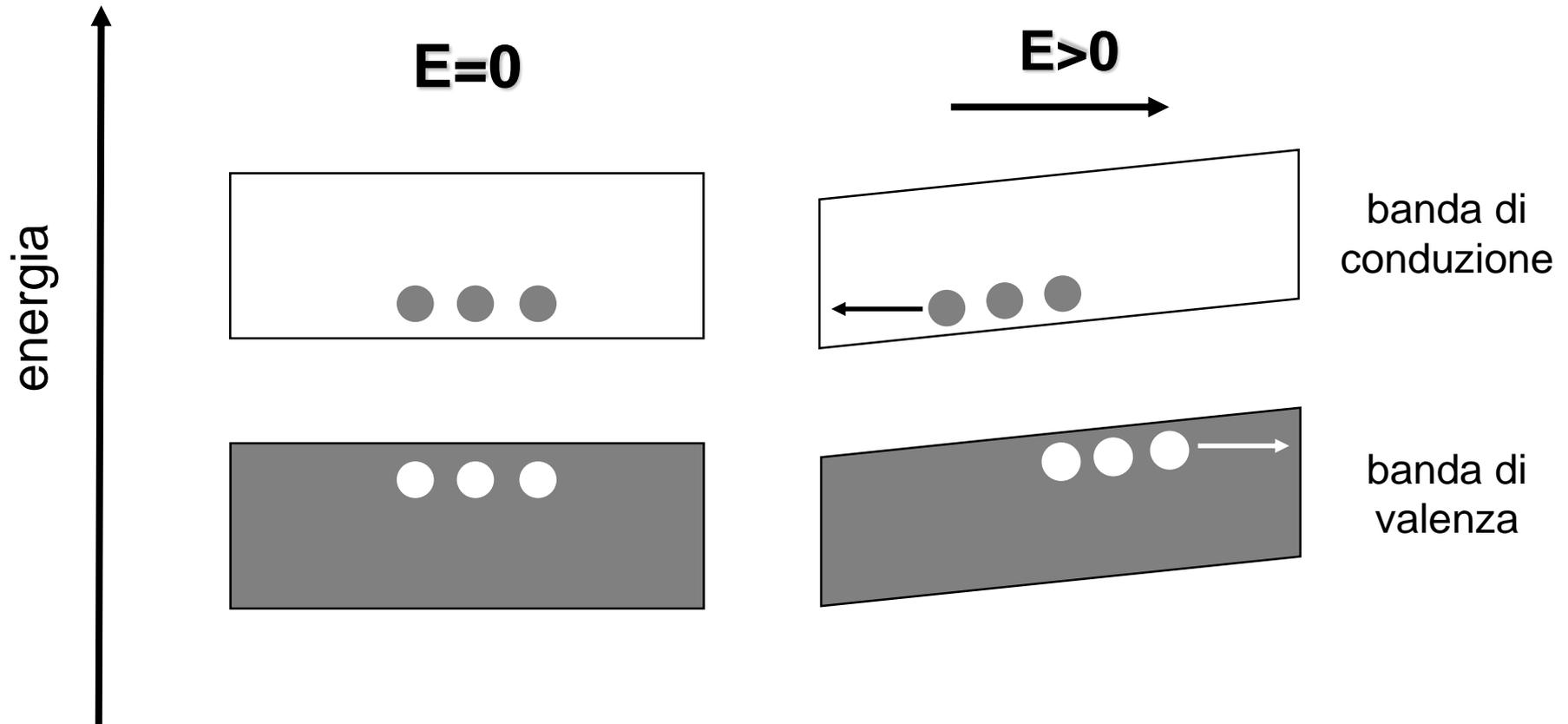
# ***Semiconduttori, giunzione p-n***

# Riempimento dei livelli elettronici nei solidi: il principio di Pauli



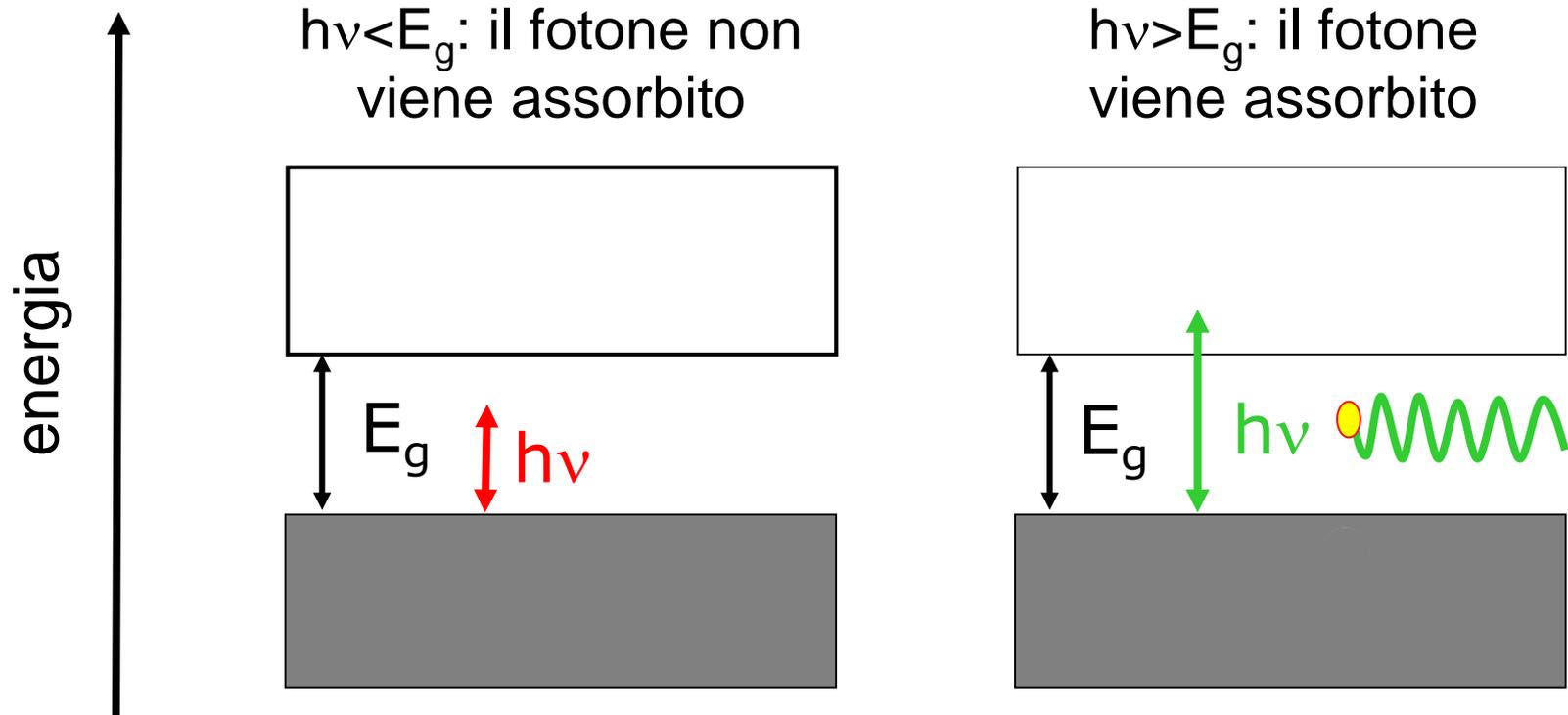
Semiconduttori: gap di energia piccolo,  $E_g < 3-4$  eV  
[luce visibile:  $h\nu = 1.6-3.1$  eV]

# Portatori di carica: elettroni e lacune. Effetto di un campo elettrico



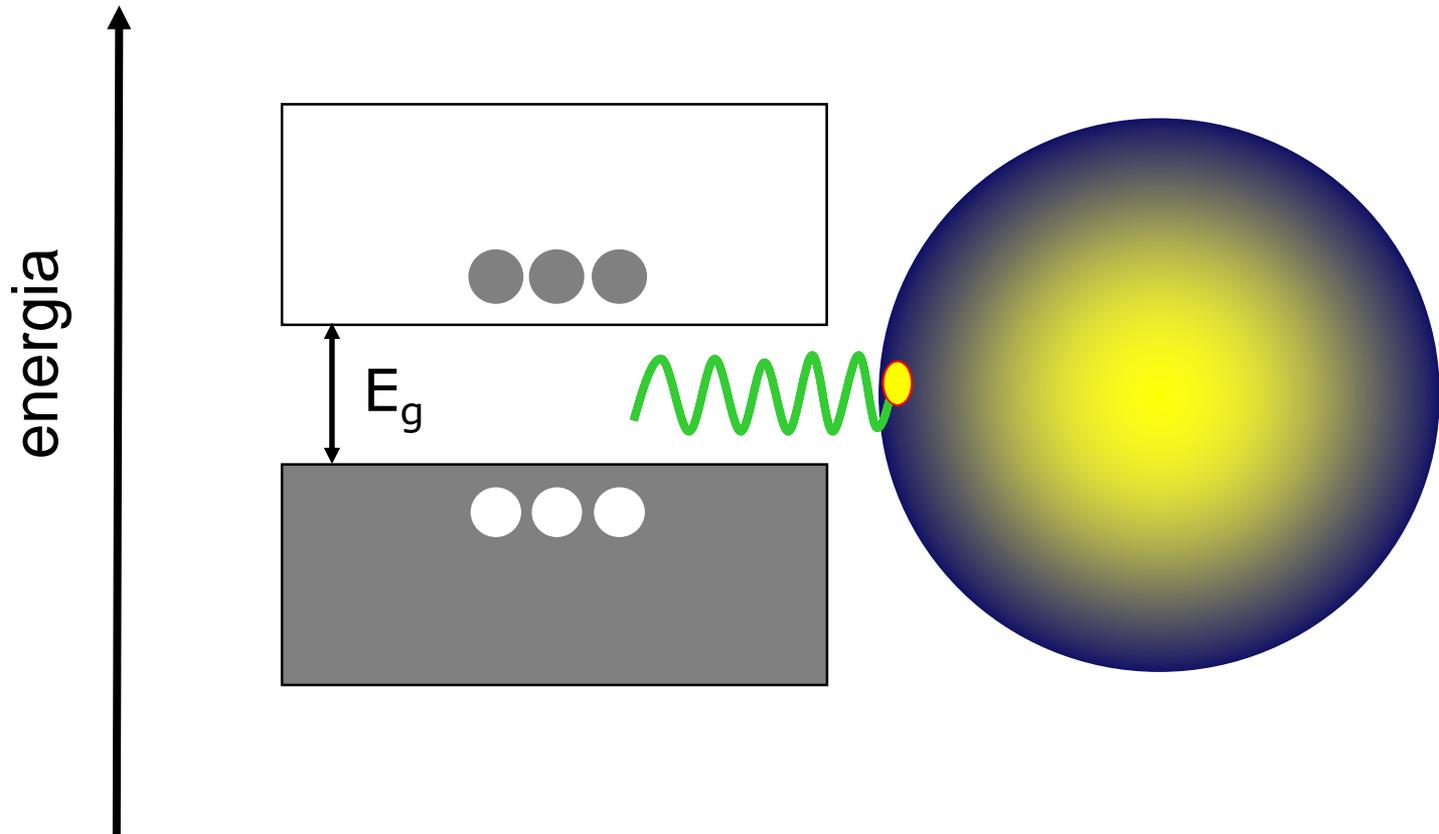
I portatori di carica nei semiconduttori sono di due tipi: **elettroni** in banda di conduzione, con carica negativa, e stati vuoti o **lacune** in banda di valenza, che si comportano come particelle con carica positiva.

# 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.

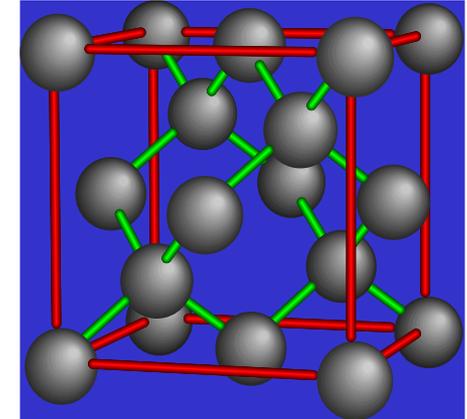
# Emissione di luce



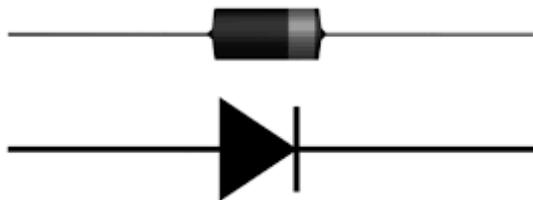
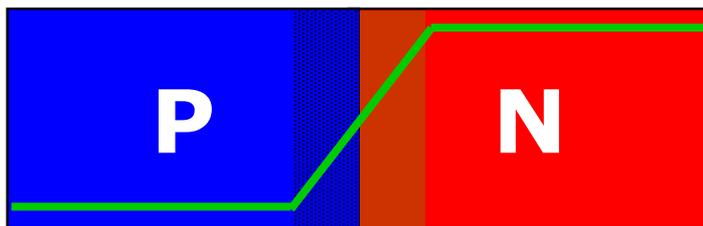
Elettroni e lacune possono ricombinare radiativamente emettendo fotoni con energia pari al gap:  $h\nu = E_g$ .

# Dal fenomeno al dispositivo: semiconduttori e giunzione p-n

Le tecnologie della microelettronica e della optoelettronica si basano su materiali **semiconduttori**, con una struttura cristallina regolare, che possono essere prodotti con un altissimo grado di purezza e le cui proprietà elettriche sono controllate tramite il **drogaggio**.

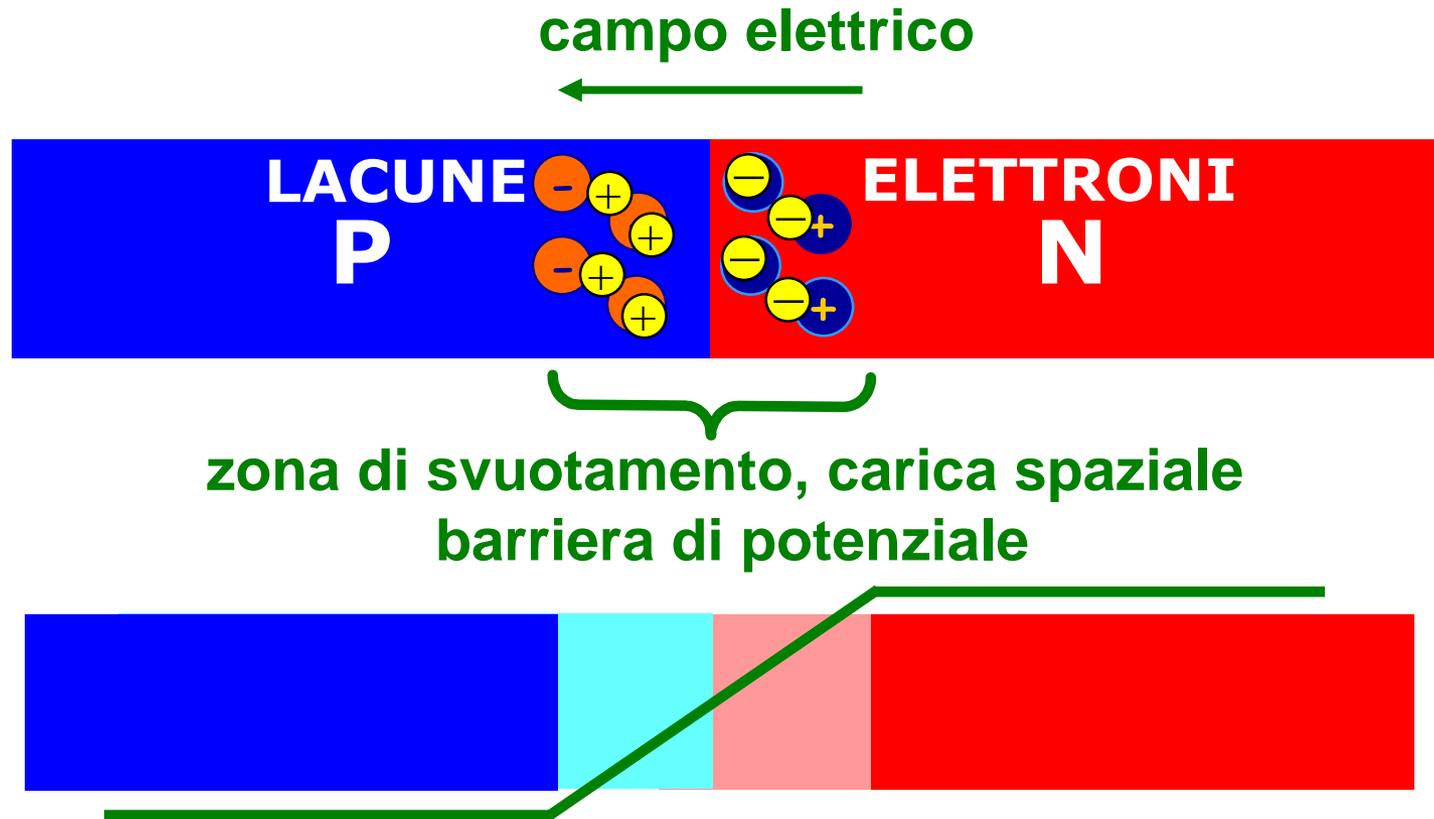


**campo elettrico**



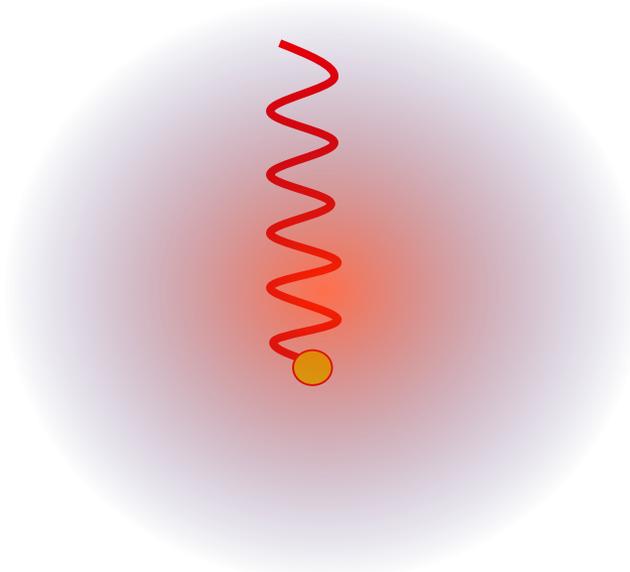
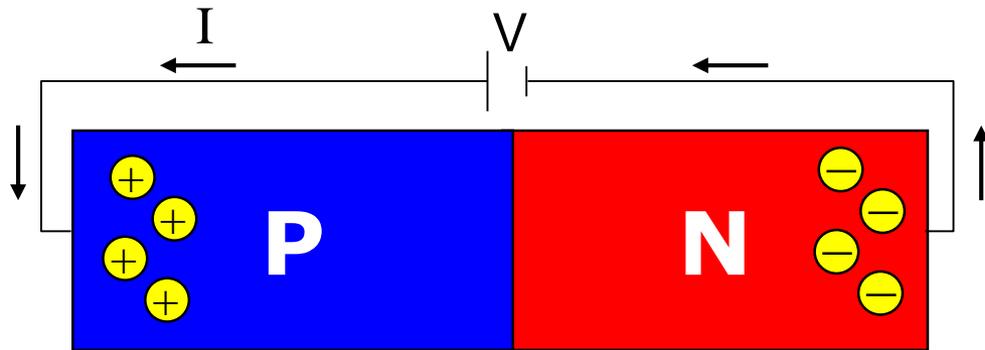
In una **giunzione p-n**, o **diodo**, si usa un semiconduttore (ad es. il silicio) drogato con atomi donori/accettori che forniscono elettroni nel lato n e lacune nel lato p. In questo modo si crea una barriera di potenziale e un campo elettrico che è in grado di separare le cariche libere.

# La giunzione p-n (*diodo*): il “cuore” dei dispositivi a semiconduttore

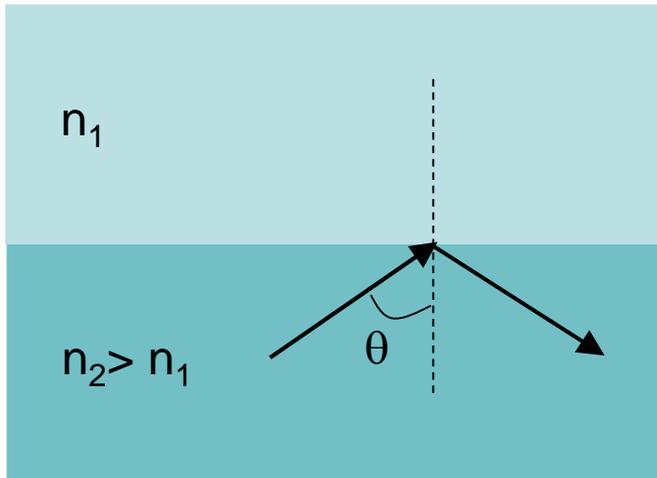


Il campo elettrico nella zona di svuotamento si oppone alla diffusione dei portatori maggioritari (lacune dal lato p, elettroni dal lato n)

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

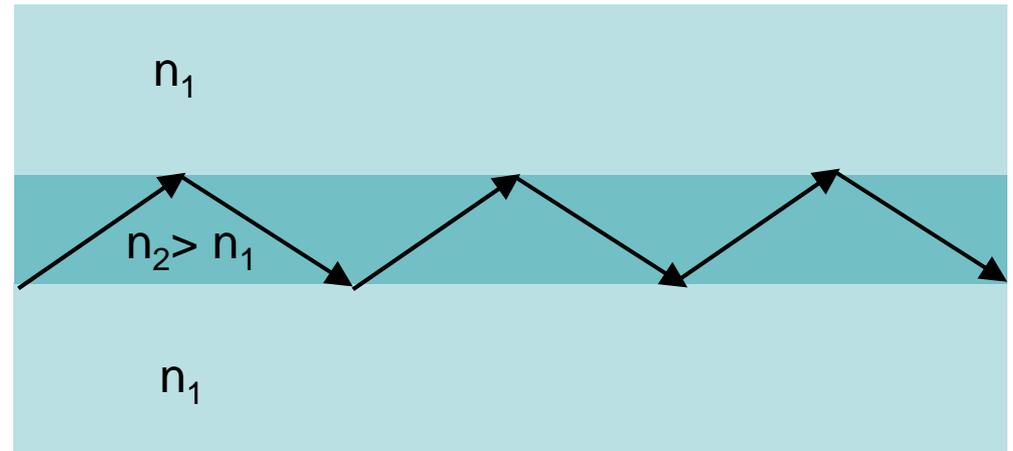


# Riflessione totale interna e guide d'onda



La riflessione totale interna nel mezzo più rifrangente avviene quando

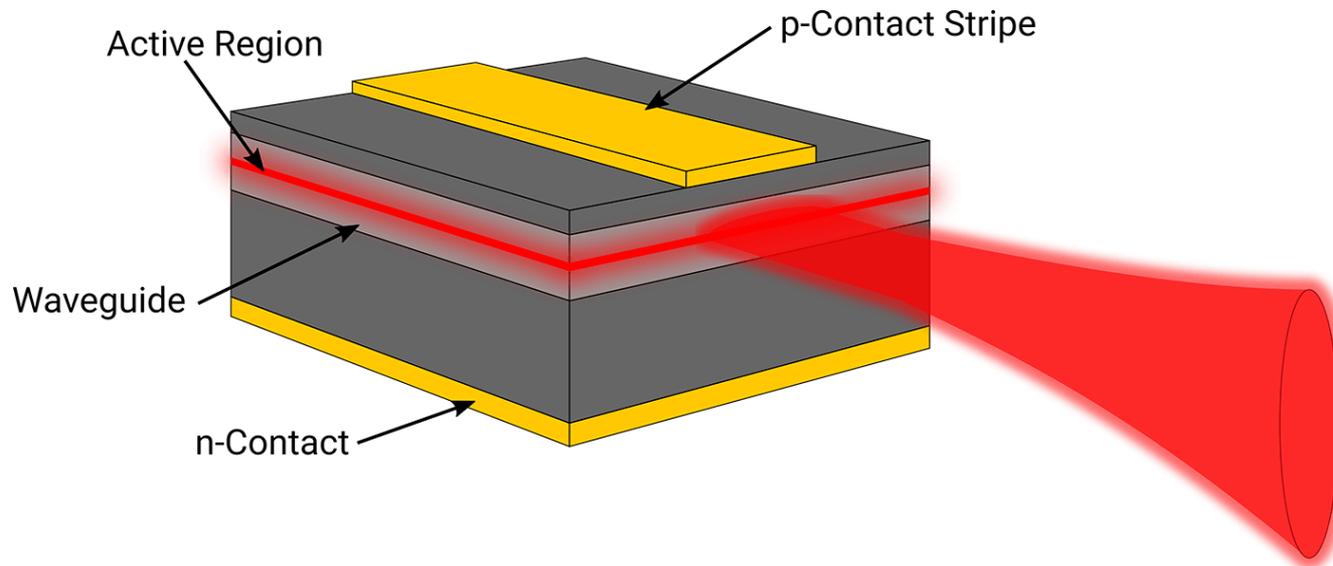
$$\theta > \theta_{\text{lim}} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$



In una guida d'onda planare (*slab waveguide*), il modo guidato si propaga nel materiale ad indice di rifrazione maggiore (*core material*) grazie alla riflessione totale interna

⇒ ***propagazione guidata***

# Laser a semiconduttore



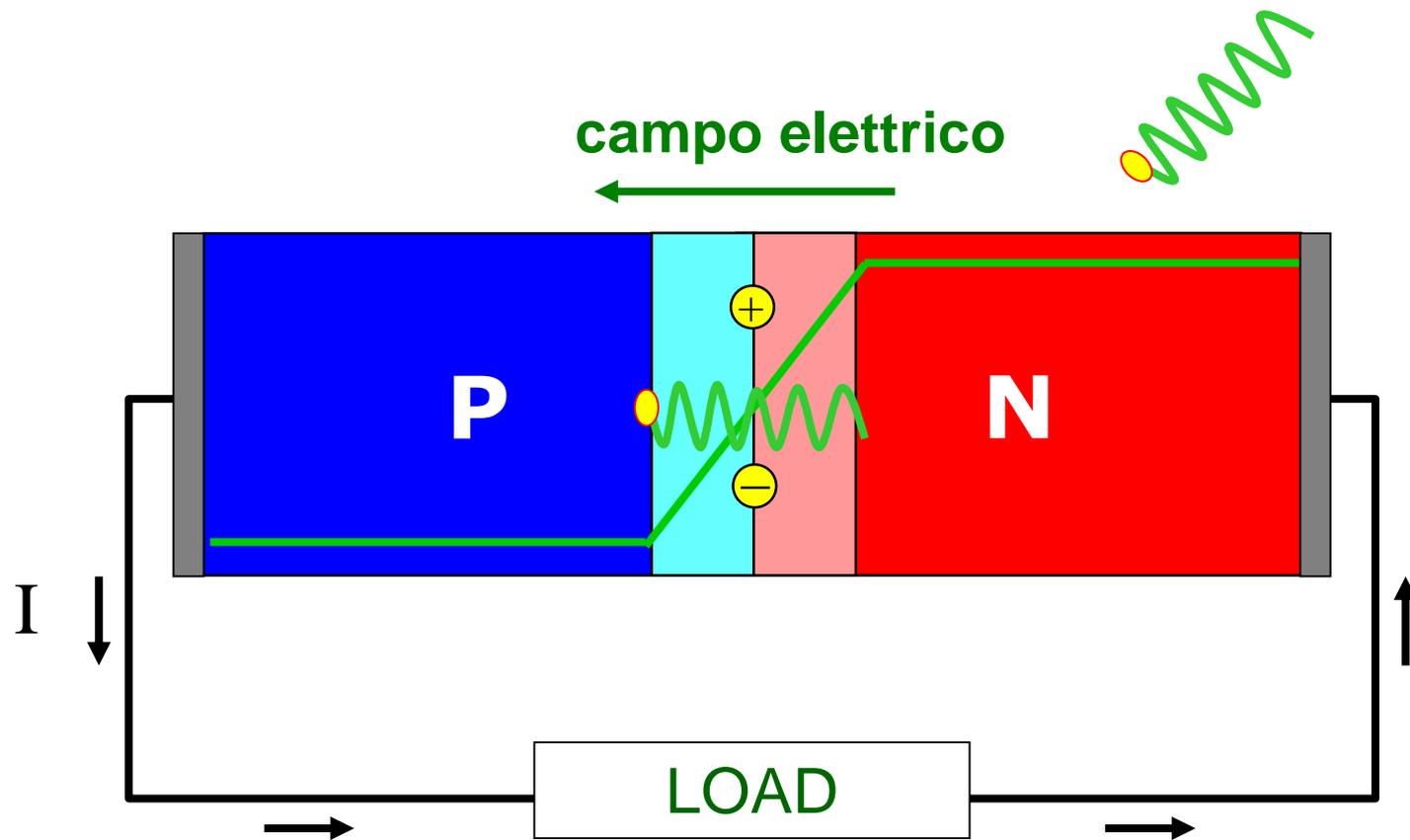
Laser a semiconduttore (diodo laser) a emissione laterale: il modo guidato viene riflesso varie volte, aumentando l'interazione della luce con il semiconduttore e producendo ***emissione di luce coerente (luce laser)***



# Indice

- Gli ingredienti:
  - onde elettromagnetiche e fotoni
  - semiconduttori, giunzione p-n
  - riflessione totale interna e guide d'onda
- **La ricerca e le applicazioni:**
  - (LED e laser)
  - **celle fotovoltaiche**
  - comunicazione ottica, silicon photonics
- Conclusioni

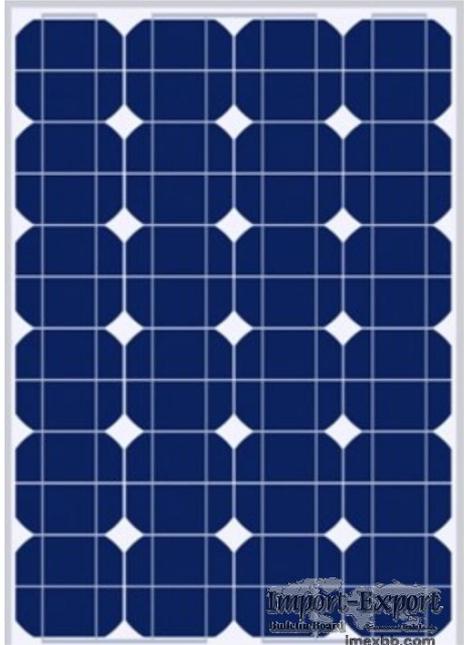
# Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata



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

# Tecnologie fotovoltaiche

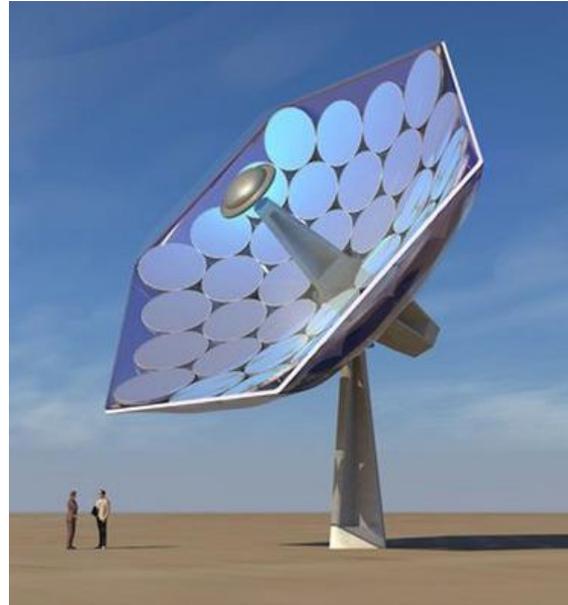
## Fotovoltaico basato sul silicio



Silicio mono- e policristallino: ~94% del mercato globale

*Record di efficienza:*  
26.7%

## Fotovoltaico a concentrazione



Multigiunzioni di semiconduttori III-V: satelliti, campi solari

*Record di efficienza:*  
46% (~500 soli)

## Fotovoltaico emergente

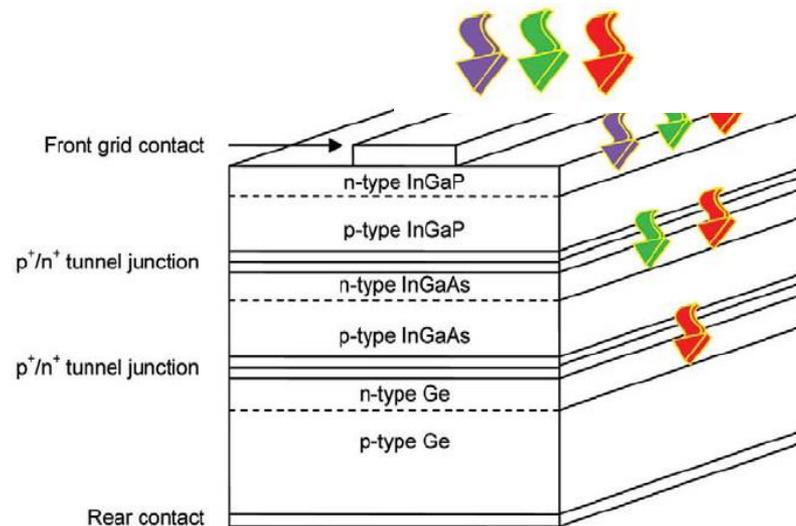
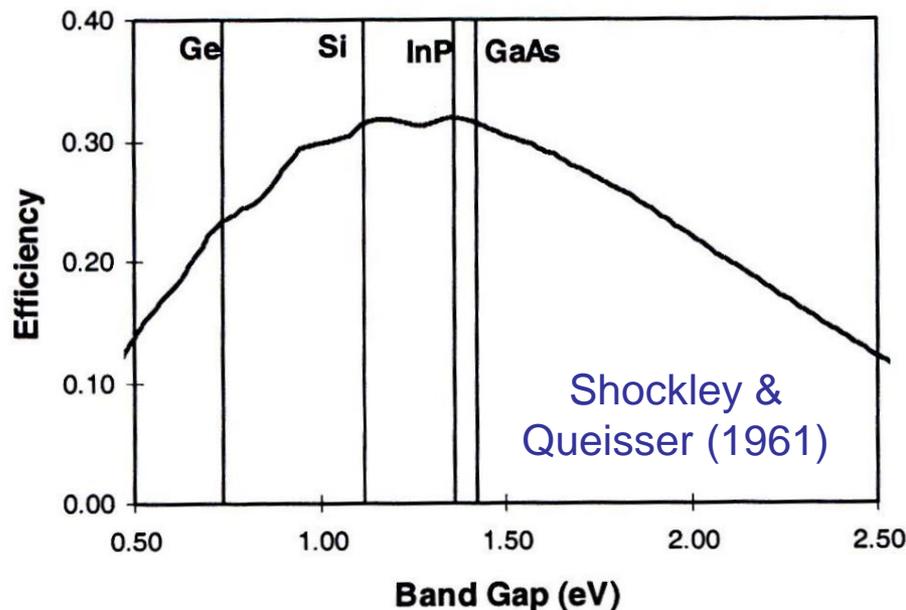


Film sottili, celle dye-sensitized, materiali organici, perovskiti...

*Efficienze e stabilità varie, oggetto di intensa ricerca*

# Fotovoltaico: la ricerca

**Obiettivo:** aumentare l'efficienza delle celle solari esistenti verso i limiti termodinamici per singola giunzione (c-Si) e per multipla giunzione



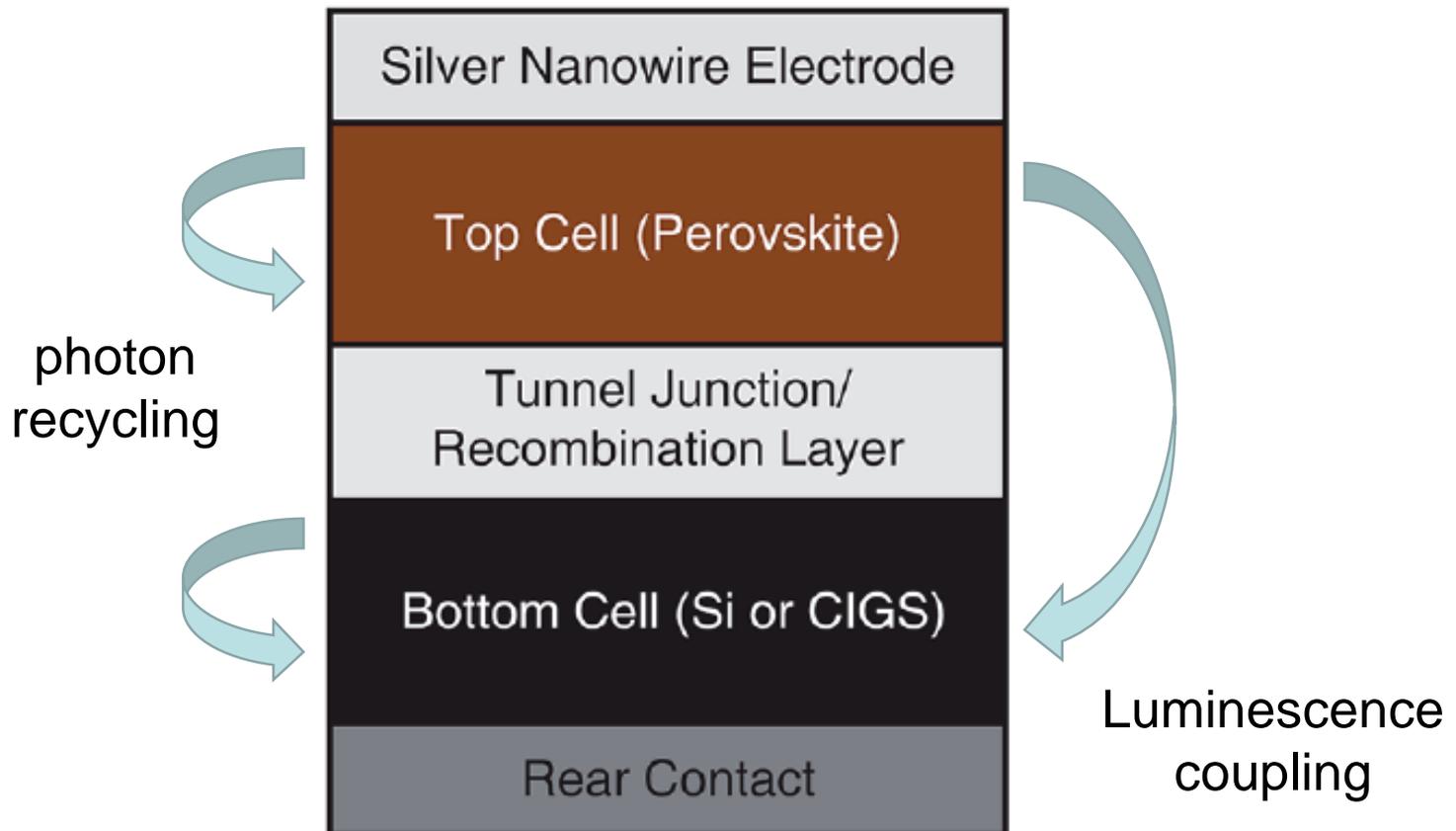
- Limite termodinamico di efficienza per celle solari a singola giunzione: ~33%
- Limite di efficienza per il silicio: ~29%
- Record attuale per celle di c-Si: 26.7% (Kaneka, 2017)

- Limite termodinamico di efficienza per celle a tripla giunzione con concentrazione: ~63.8%
- Record attuale: 44.4% @ 302x (Sharp, 2013). 46% @ 508x with 4J

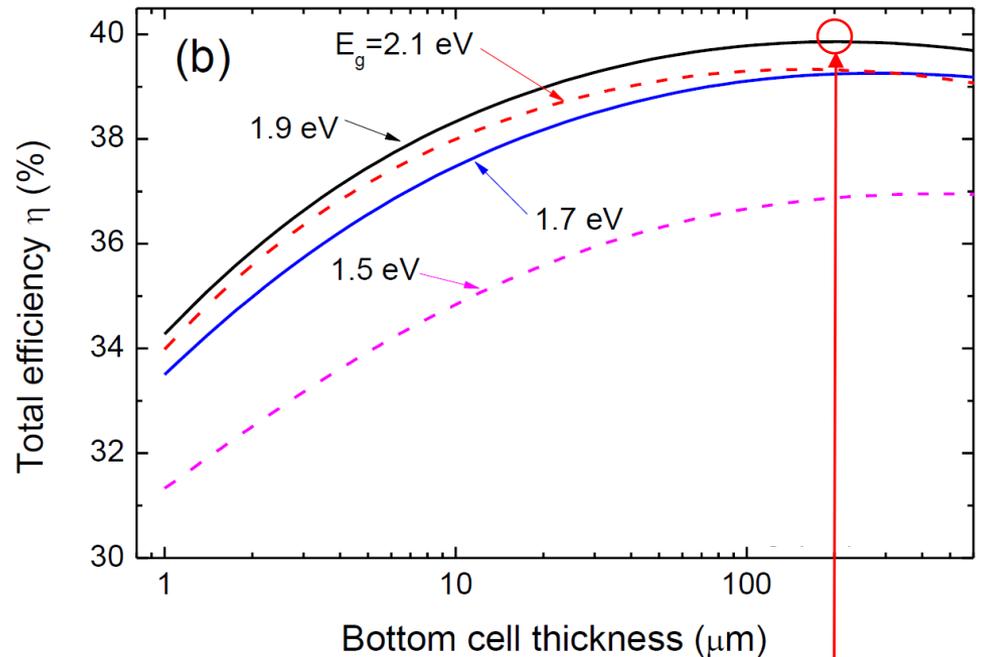
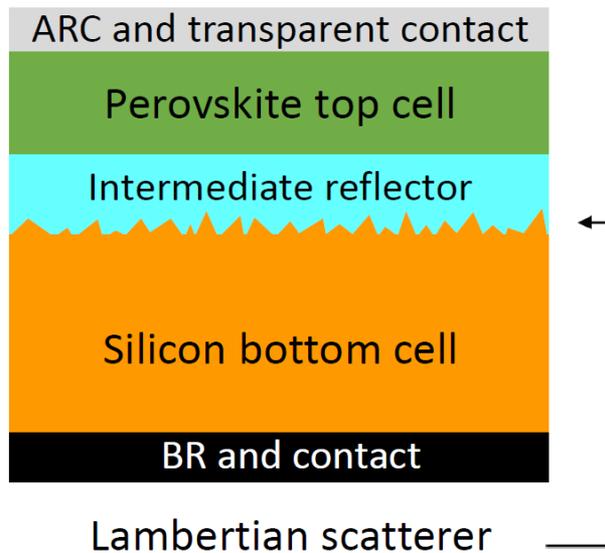
# Luminescence coupling

(photon recycling in multijunction solar cells: III-V, ...)

A promising system to exceed the efficiency of silicon solar cells:  
*perovskite-silicon tandems*



# Oltre il limite di Shockley-Queisser: perovskite/Si tandem



Massima efficienza di conversione: ~40%

P. Kowalczewski et al., J. Opt. 18, 054001 (2016); Adv. Phys. X 4, 1548305 (2018)

*Le celle tandem perovskite/silicio sono molto promettenti al fine di superare il limite teorico (29%) per le celle solari a singola giunzione*

# Indice

- Gli ingredienti:
  - onde elettromagnetiche e fotoni
  - semiconduttori, giunzione p-n
  - riflessione totale interna e guide d'onda
- **La ricerca e le applicazioni:**
  - (LED e laser)
  - celle fotovoltaiche
  - **comunicazione ottica, silicon photonics**
- Conclusioni

# Information & Communication Technologies (ICT)

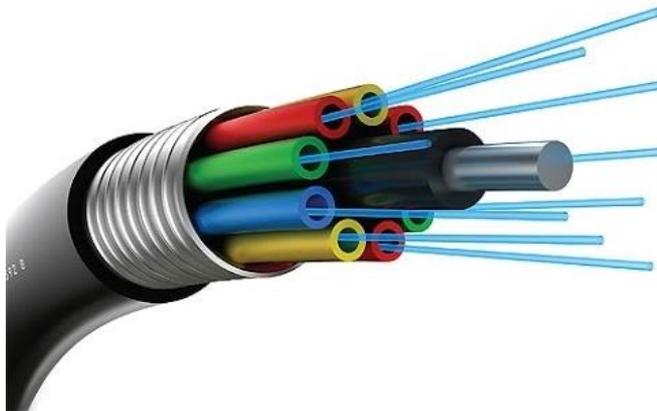
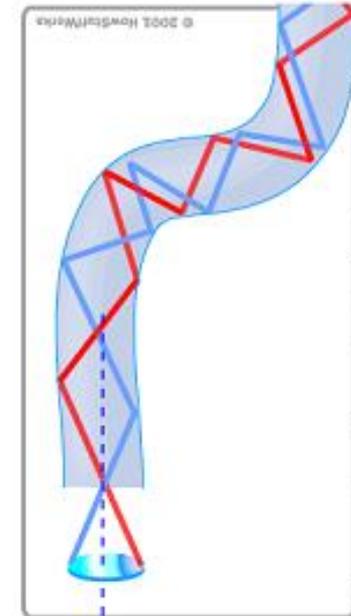
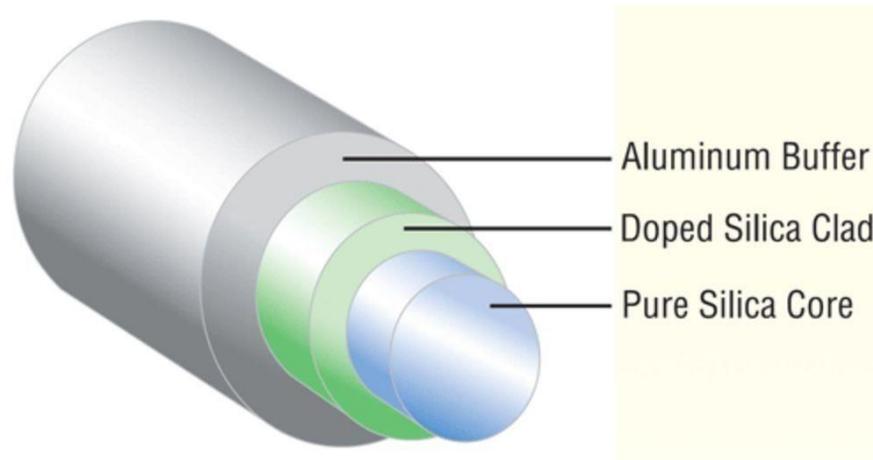


Short distance: treatment of information by **electrical signals** on a silicon chip  
→ integrated circuit



Long distance: transmission of information by **optical signals** propagating in silica fibers  
→ optical fiber

# Propagazione guidata in fibra ottica

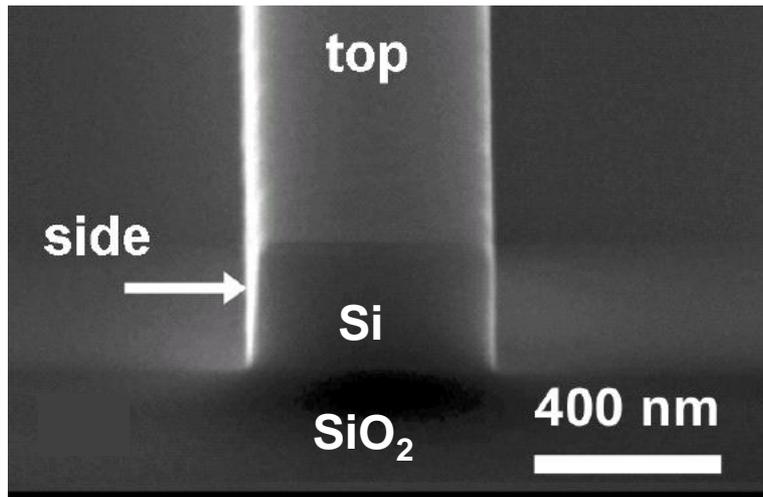


La propagazione in fibra ottica avviene tramite la riflessione totale interna, grazie alla differenza di indice di rifrazione fra il core e il cladding.

La lunghezza d'onda è  $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$  (*long distance*) o  $\lambda \sim 1.3 \mu\text{m}$  (*data centers*)

# Integrating electrical with optical functions on a Si chip → Silicon photonics

Main component: Si strip waveguide on  $\text{SiO}_2$



Light propagation by total internal reflection



Compatible with CMOS technology  
→ electrical and optical integration on the same chip

Si photonics chip

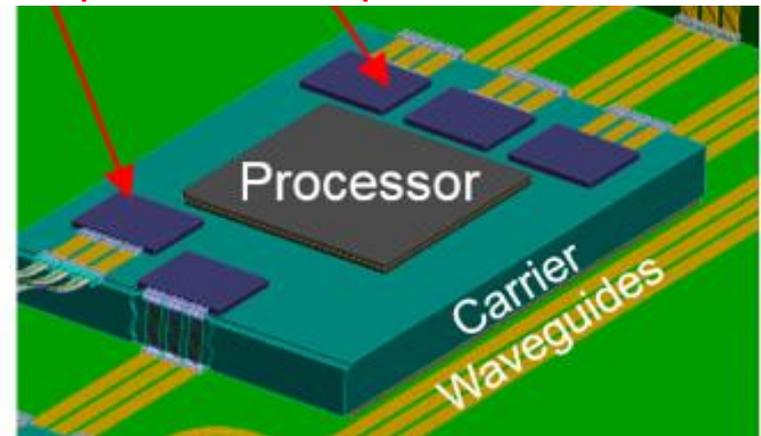
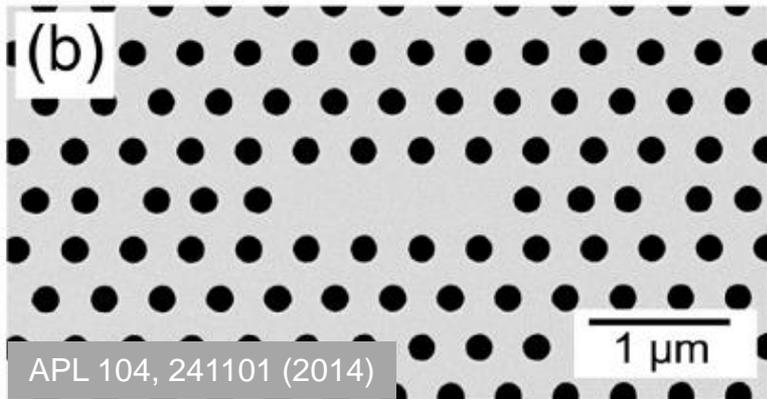


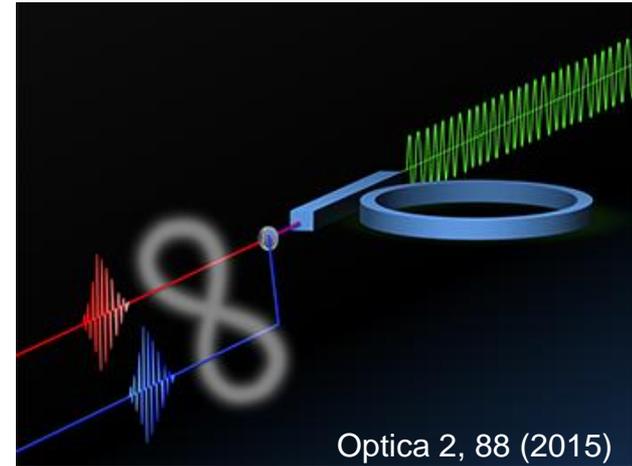
Image from IBM Zürich

# Silicon photonics: ricerca fondamentale e applicata...

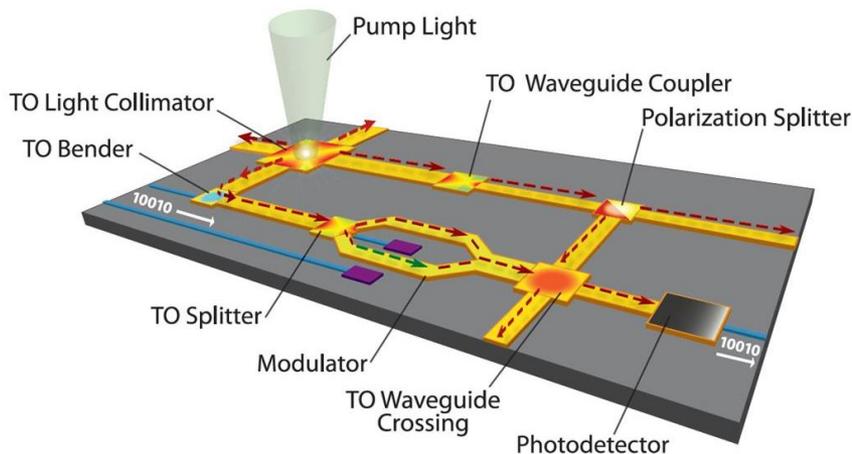
Ultra-high Q photonic crystal cavity



Generation of entangled photons



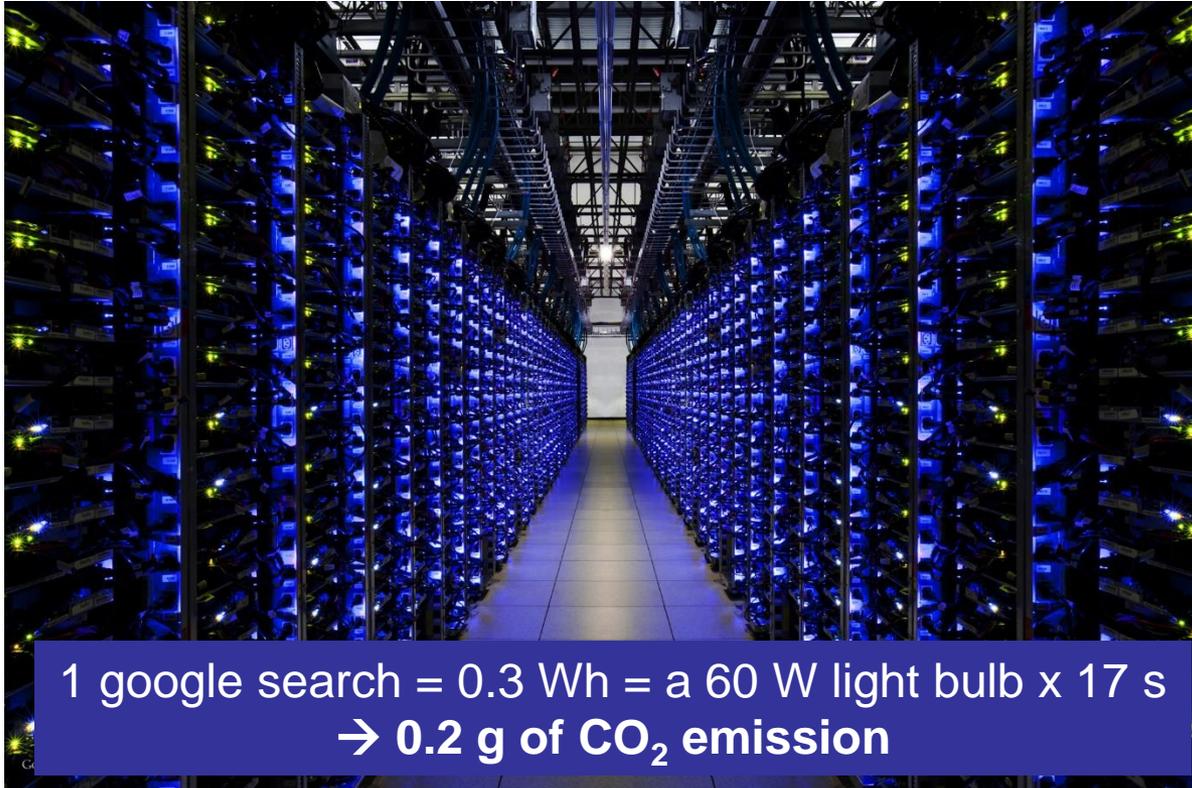
Photonic integrated circuit



Intel's 50 Gbit transmitter/receiver



# A major application of silicon photonics: energy consumption in data centers



More than 3% of electrical energy consumption in the world (and 2% of CO<sub>2</sub> emission) is due to data centers. Silicon photonics is very promising for replacing short-range optical interconnections, but *electro-optical conversion requires silicon modulators with low energy dissipation*



# The COSMICC project



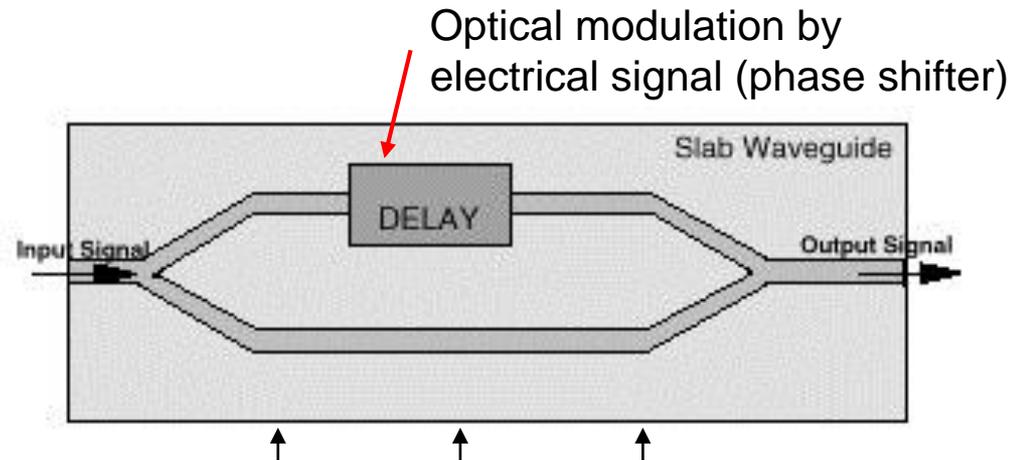
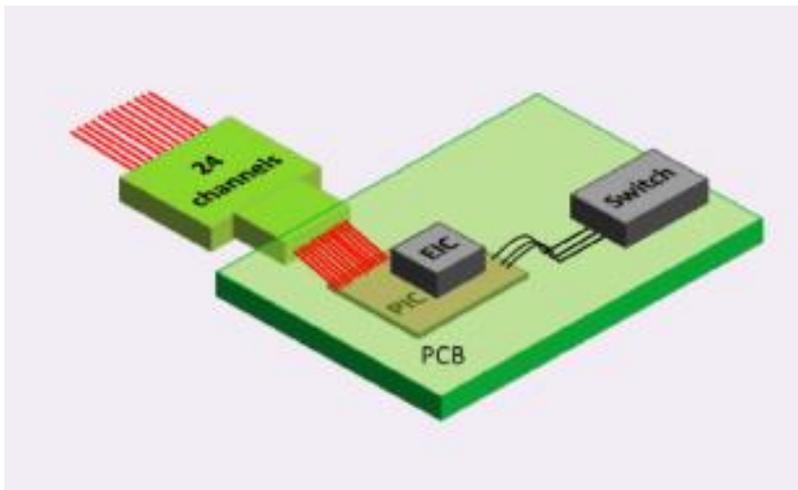
Horizon 2020

<http://www.h2020-cosmicc.com/>

UNIPV: Physics + DIII (Electrical Engineering)

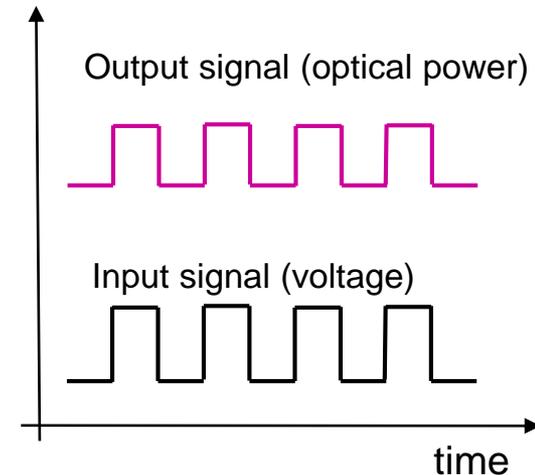
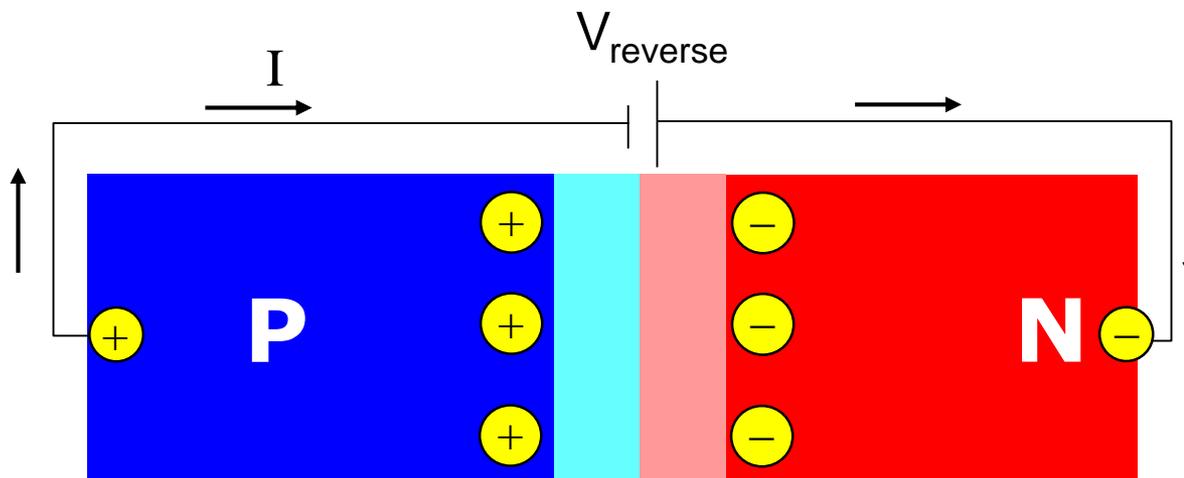
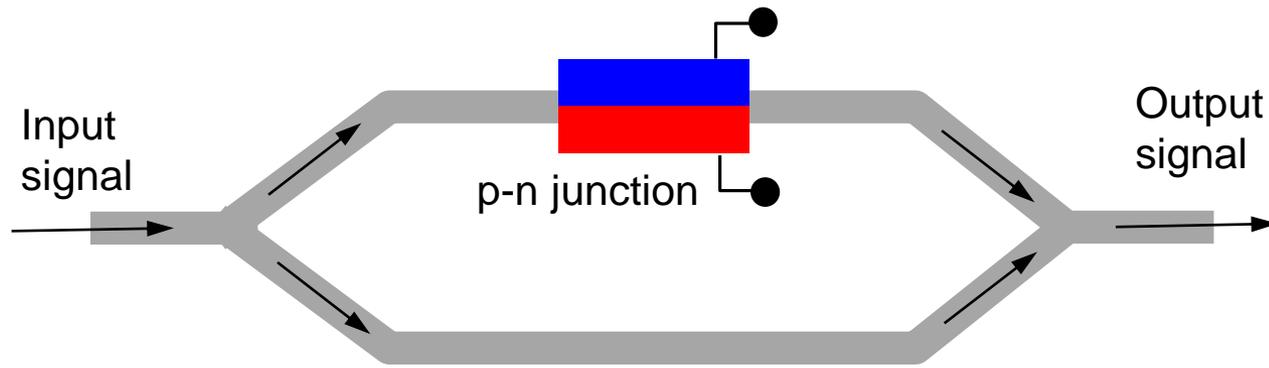
**Project goal:** to realize an optical transceiver integrated on a silicon chip

**Our goal:** to develop a silicon waveguide with slow light in order to reduce energy dissipation in the Mach-Zehnder modulator



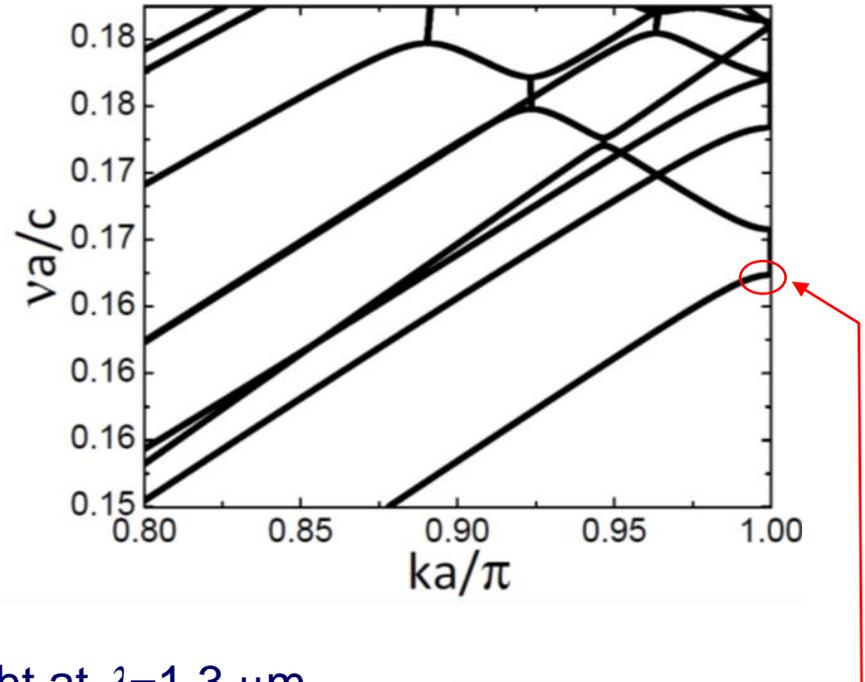
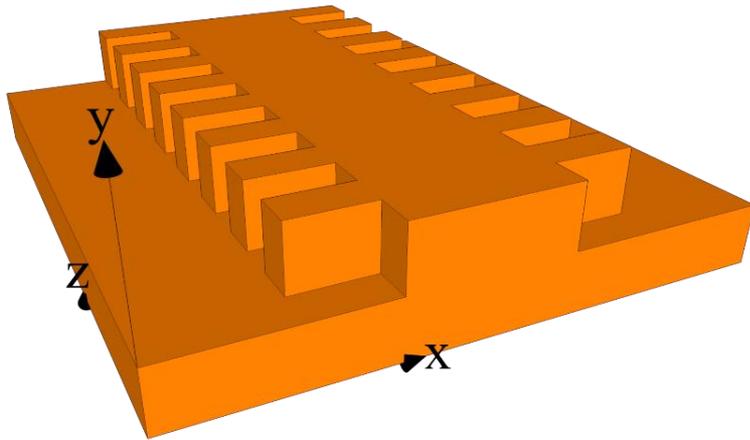
Interferometro di Mach-Zehnder

# Come funziona un modulatore in silicio?



Polarizzazione inversa della giunzione  $\rightarrow$  aumento della zona di svuotamento  
 $\rightarrow$  modifica dell'indice di rifrazione (*plasma effect*)  $\rightarrow$  variazione di fase  
nell'interferometro di Mach-Zehnder  $\rightarrow$  modulazione dell'intensità ottica  
 $\Rightarrow$  **conversione elettro-ottica del segnale**

# Band-edge slow light in 1D silicon photonic crystal

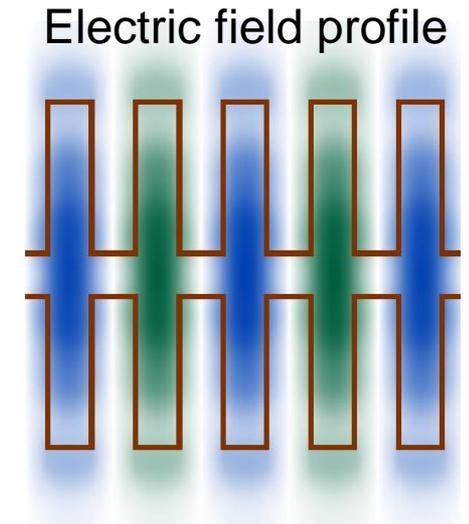
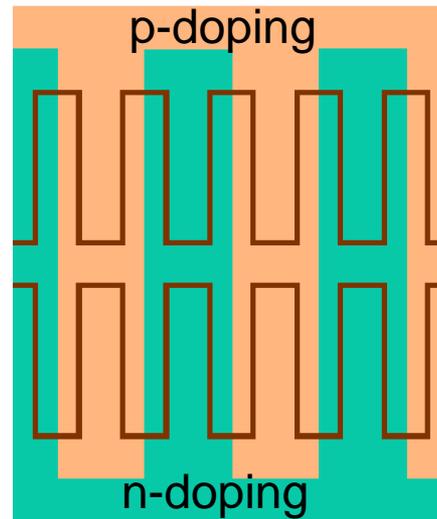
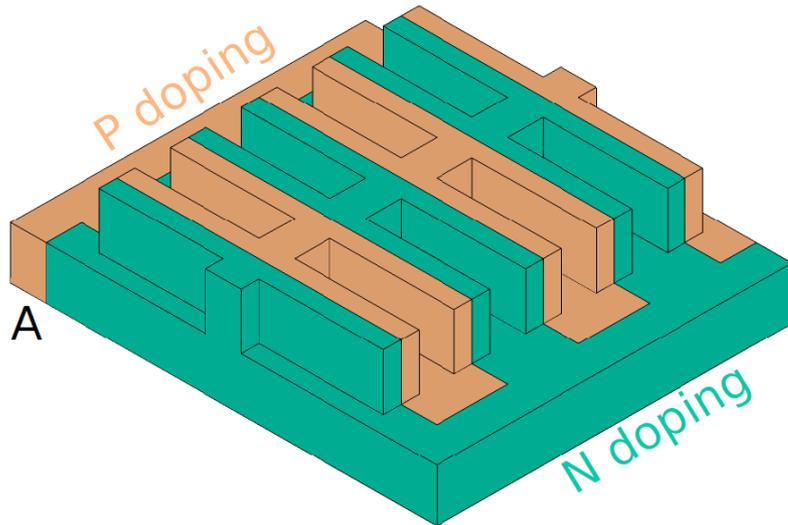
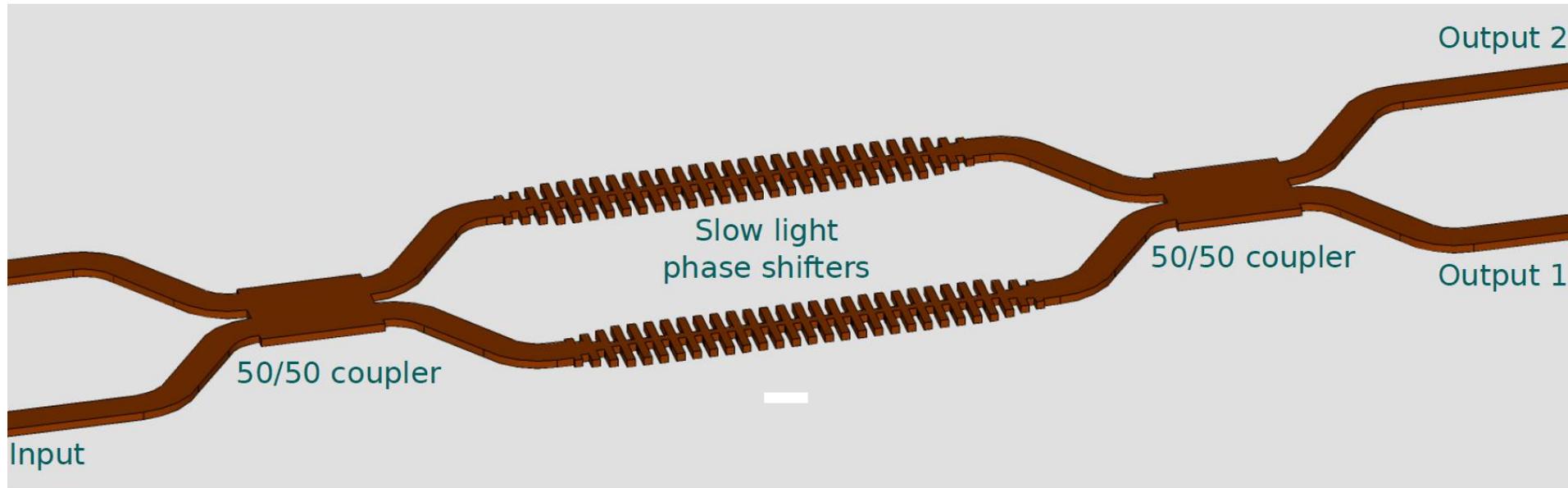


$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \equiv \frac{c}{n_g} \Rightarrow \text{band-edge slow light at } \lambda=1.3 \mu\text{m}$$

Rallentamento della luce → aumento dell'interazione radiazione-materia  
→ riduzione dell'energia dissipata nel modulatore elettro-ottico (da ~4 a ~0.4 pJ/bit)

M. Passoni et al., *Optics Express* 26, 8470 (2018); *Nanophotonics* 8, 1485 (2019)  
Domanda brevetto IT no. 102019000006998 del 20/05/2019

# Struttura ottica ed elettrica con la stessa periodicità...



# Conclusioni: alcune parole chiave...



Aleksej Grigor'evič  
Stachanov (1906-1977)

Pioniere dell'innovazione  
e del teamwork

# Conclusioni: alcune parole chiave...

- Ottica e fotonica, fisica dei semiconduttori, nanostrutture, fotovoltaico, comunicazione ottica...
- Fotonica integrata in guida d'onda, silicon photonics: i vantaggi dell'integrazione... e delle nanotecnologie
- Il problema energetico è una grande sfida
- Ricerca fondamentale/applicata: due facce della stessa medaglia