Energie rinnovabili:
uno sguardo privilegiato al Fotovoltaico

Lucio Andreani

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia
lucio.andreani@unipv.it
http://fisica.unipv.it

Lezione per Fondazione Calzari Trebeschi, 08-10-2021

OUTLINE

1. Il problema energetico: una introduzione

2. Energie rinnovabili

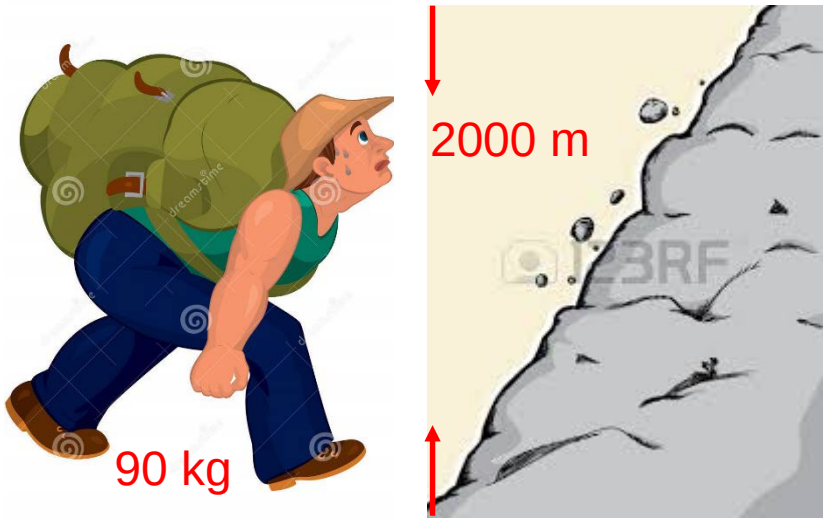
3. Fotovoltaico e LED: principi fisici

4. Il fotovoltaico: tecnologie e prospettive

5. La transizione energetica: questioni cruciali

Unità di energia: il kilo-Watt-ora (kWh)

- 1 kWh=1000 Watt · 3600 s=$3.6 \cdot 10^6$ J
- 1 kWh=Energia necessaria per sollevare 367 kg di 1000 m (=M·g·h)
- Quanto lavoro può compiere una persona in 1 giorno? Un uomo che pesa 70 kg, con uno zaino di 20 kg, che sale per 2000 m, compie un lavoro pari a 0.5 kWh



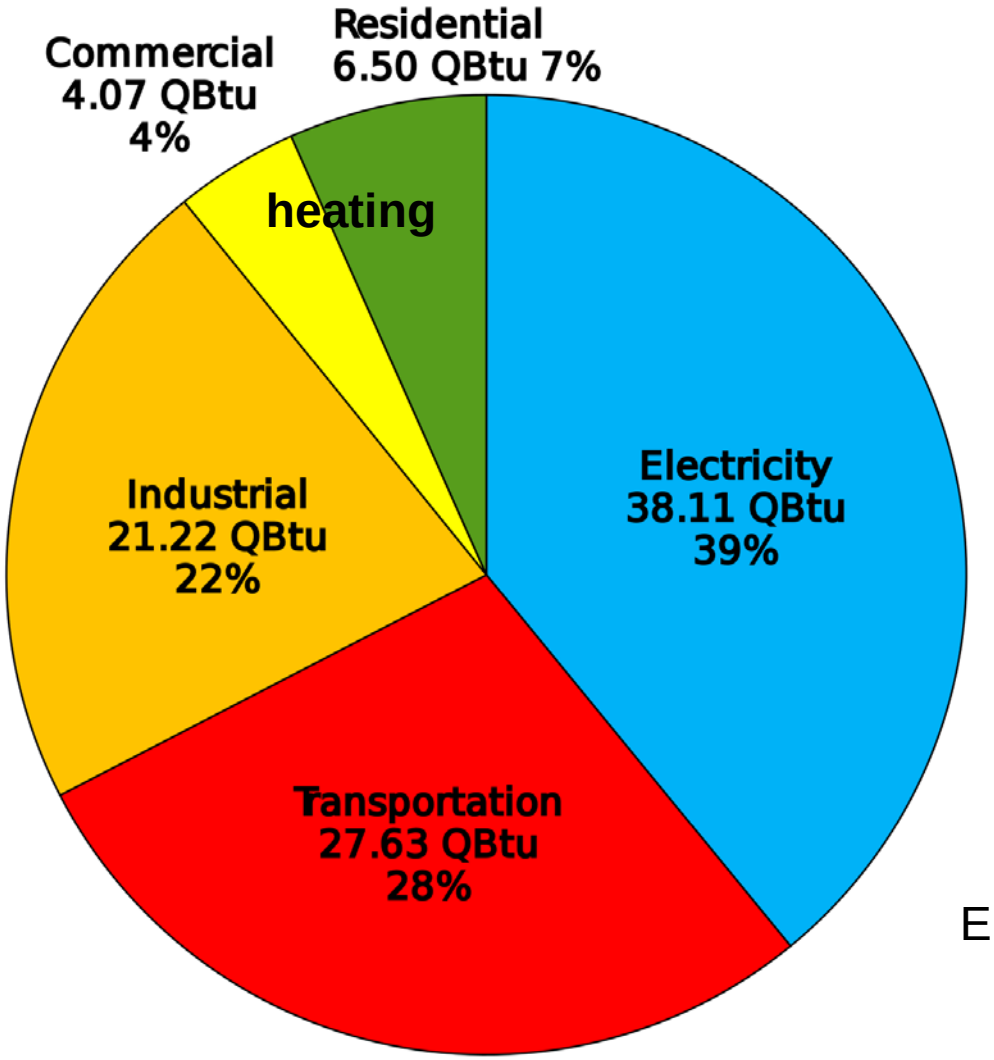
⇒ **0.5 kWh !**

- 1 kWh è il lavoro che può compiere un uomo robusto, in due giornate lavorative → **1 kWh vale tantissimo!**
- 1 kWh costa circa da 0.05 € (costo di produzione) a 0.15 € (prezzo di vendita) → **1 kWh costa pochissimo!**
- Consumo medio di energia elettrica (primaria):

Italy: ~15 (100) kWh/day, equivalenti a 30 (200) giornate di lavoro;
World: ~9 (60) kWh/day, equivalent a 18 (120) giornate di lavoro.

Energia primaria: i quattro settori

US Energy consumption by Sector (2015)



EIA - Wikimedia

Consumo di energia primaria nel mondo

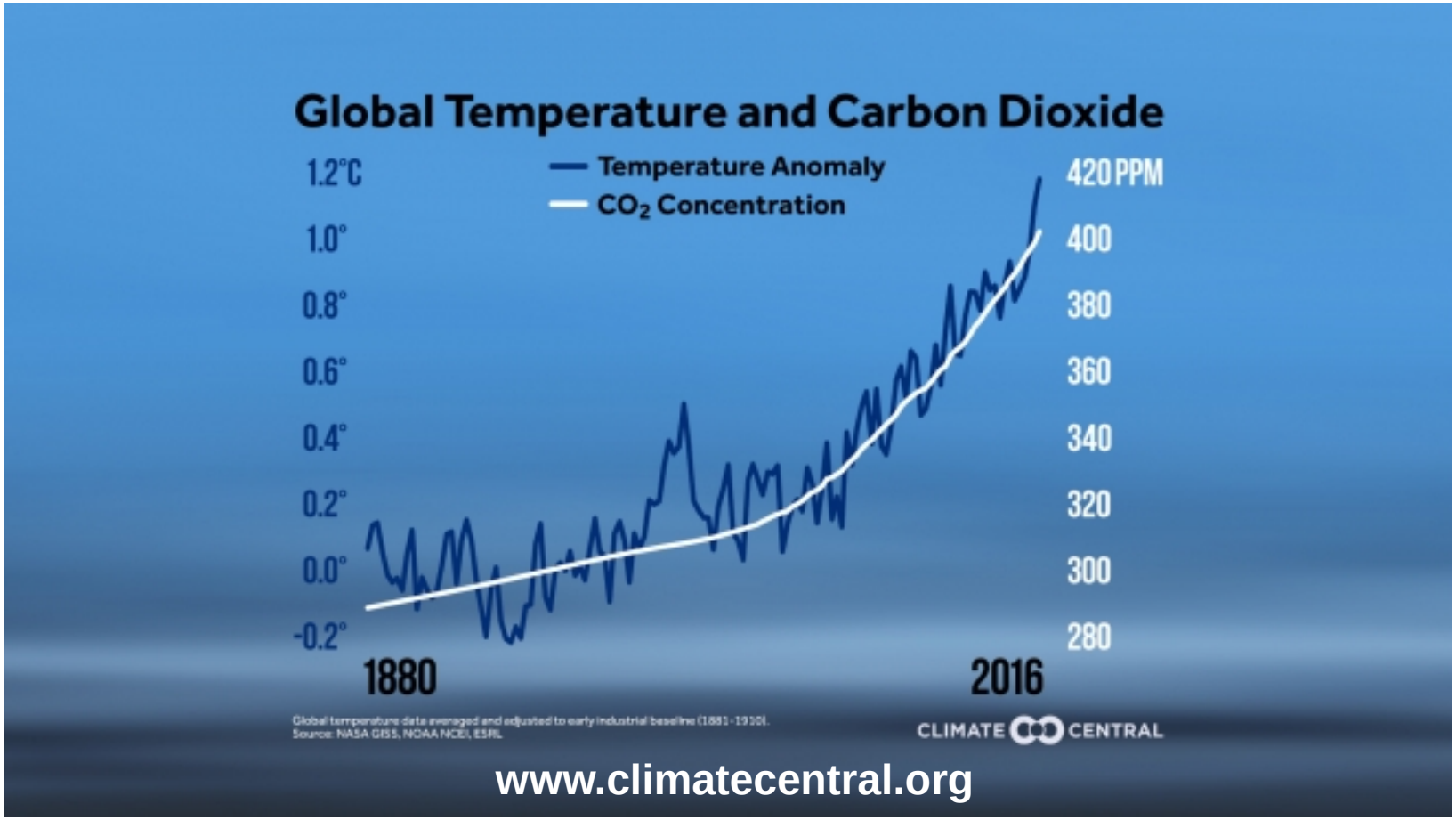
World primary energy demand in the Sustainable Development Scenario in Mtoe (1 Toe=11.63 MWh)

IEA World Energy Outlook, 2020	Sustainable Development Scenario					
	Energy demand (Mtoe)					
	2010	2018	2019	2025	2030	2040
Total primary demand	12 852	14 300	14 406	13 853	13 378	13 020
Coal	3 650	3 839	3 775	2 939	2 243	1 295
Oil	4 117	4 496	4 525	4 253	3 963	3 006
Natural gas	2 755	3 284	3 340	3 450	3 312	2 943
Nuclear	719	707	727	764	895	1 126
Hydro	296	362	370	416	475	575
Bioenergy	1 205	1 327	1 354	1 341	1 283	1 682
Other renewables	110	286	314	691	1 207	2 393

81% carbone + petrolio + gas naturale

dal 2% … al 18%

CO_2 e aumento della temperatura globale



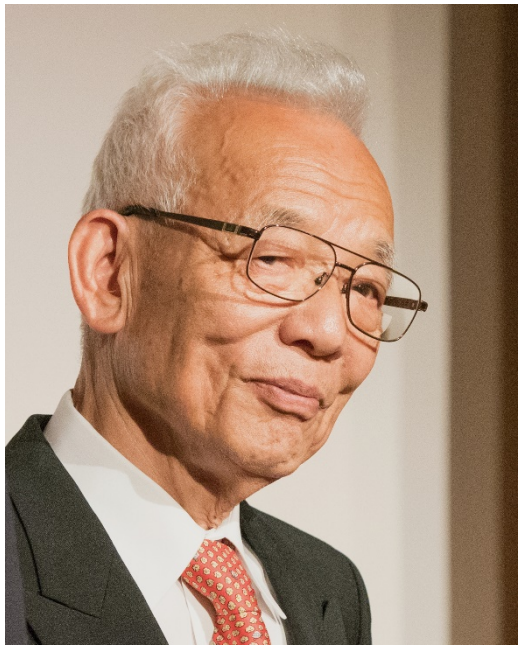
La temperatura globale è aumentata di ≈1 °C rispetto ai livelli pre-industriali. Questo è correlato alle emissioni di CO_2, dovute soprattutto all'uso dei combustibili fossili.

Conclusioni dell'Intergovernmental Panel on Climate Change, http://www.ipcc.ch/

Premio Nobel per la Fisica 2021

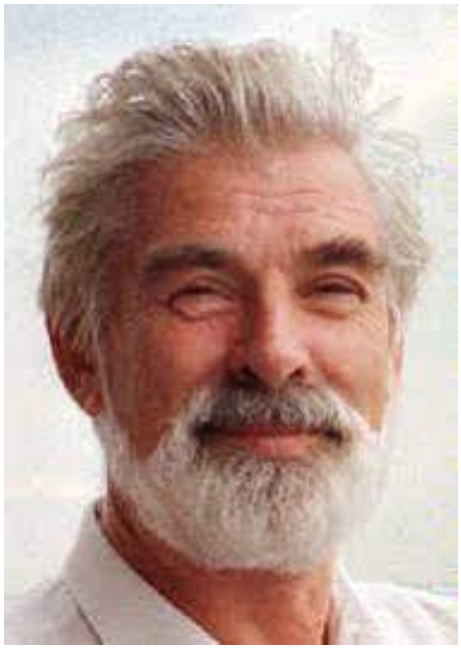
“for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems”

Syukuro Manabe



“for the physical modelling of Earth’s climate, quantifying variability and reliably predicting global warming”

Klaus Hasselmann



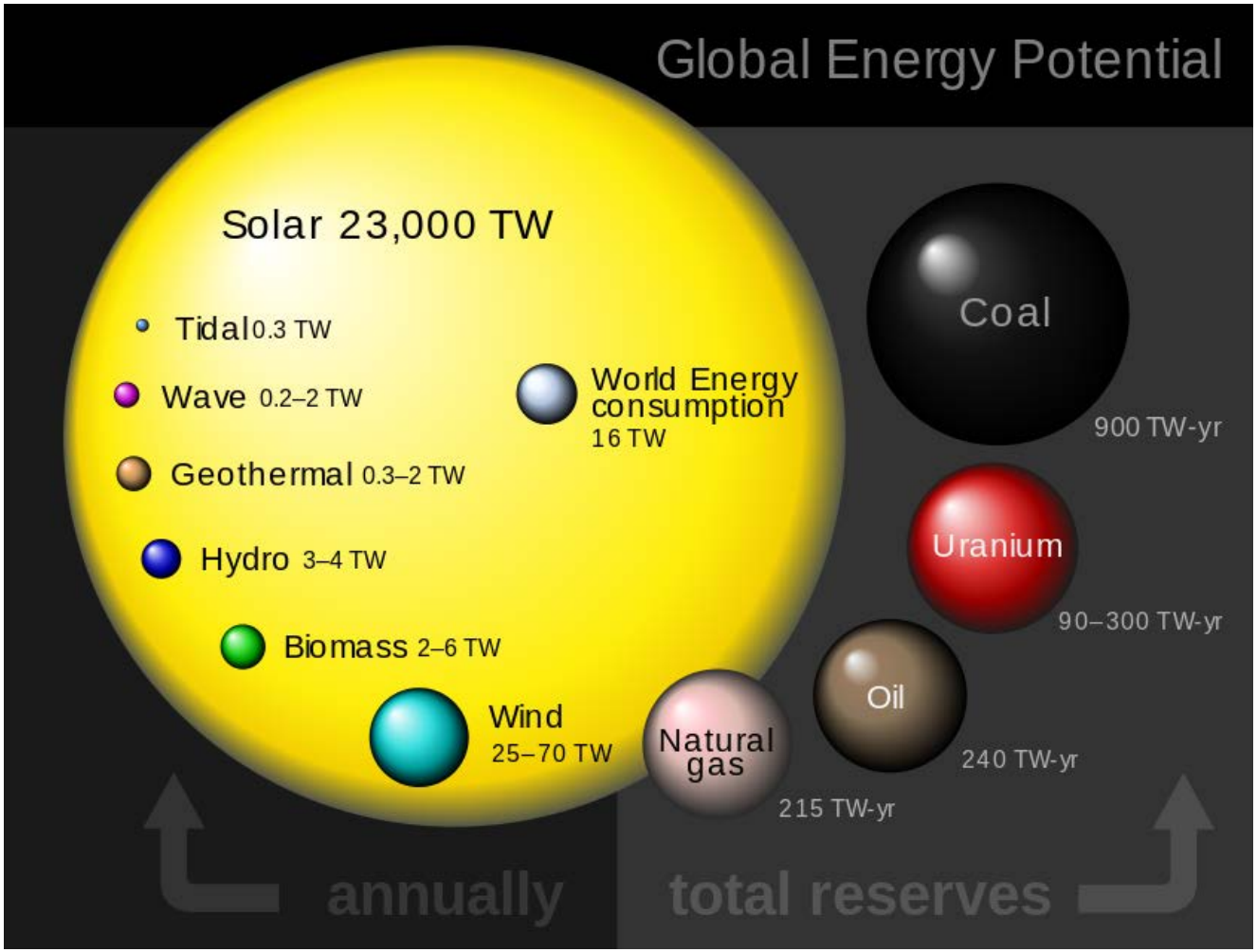
Giorgio Parisi

“for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales”

https://www.nobelprize.org/

Risorse energetiche: il potenziale

Energie rinnovabili Combustibili fossili e nucleare



https://waitbutwhy.com/2015/06/the-deal-with-solar.html

OUTLINE

1. Il problema energetico: una introduzione
2. **Energie rinnovabili**
3. Fotovoltaico e LED: principi fisici
4. Il fotovoltaico: tecnologie e prospettive
5. La transizione energetica: questioni cruciali

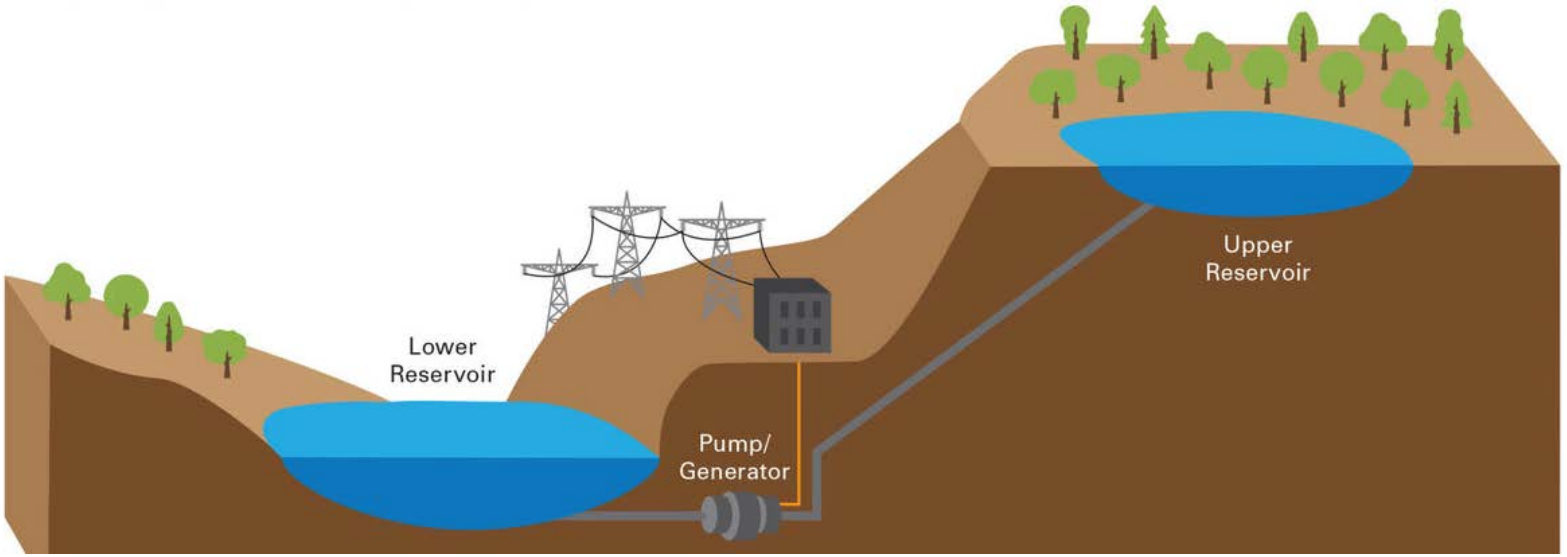
Energia idroelettrica

- Sfrutta la trasformazione dell'energia gravitazionale, posseduta da una massa d'acqua ad una certa quota, in energia cinetica; quest'ultima viene trasformata in energia elettrica grazie ad alternatori accoppiati a turbine.
- È stata la prima fonte rinnovabile utilizzata ed è tuttora la più diffusa.
- E' una fonte pulita, a basso costo (~0.05 €/kWh), con tecnologia matura.

Diga delle 3 gole (fiume Yangtze, Cina): 22.5 GW

Energia idroelettrica e stoccaggio

- Nell'Unione Europea, l'energia idroelettrica contribuisce alla produzione di energia elettrica per circa il 16% (in Italia il 20%).
- Le sue potenzialità di sviluppo in UE sono limitate: la maggior parte delle risorse grandi (*large hydro*) sono già in uso. Anzi, si potrà porre un problema di scarsità di risorse idriche a causa dei cambiamenti climatici.
- I bacini idroelettrici rivestono una grande importanza nel contesto delle fonti rinnovabili intermittenti (*vento* e *solare*), come sistemi per lo stoccaggio dell'energia (*pumped hydro*).



Energia da biomasse

- Le biomasse per la produzione di energia si dividono in tre categorie:

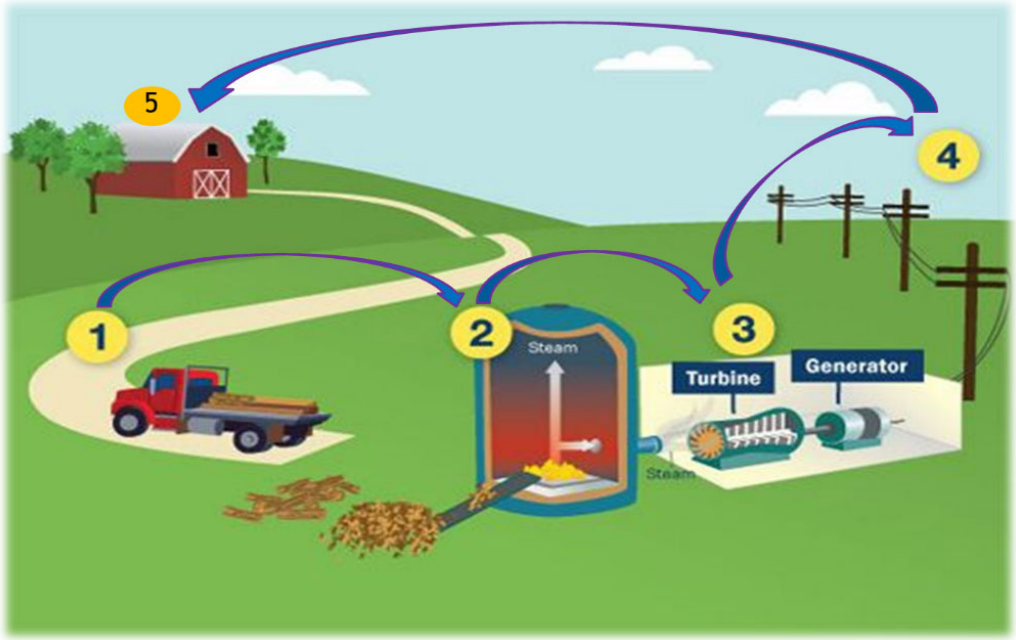
a) Legno e residui vegetali

b) Rifiuti solidi urbani

c) Biogas (metano da fermentazione batterica anaerobica)

- Le biomasse hanno varie applicazioni per la produzione di energia:

1) Bio-elettricità
2) Riscaldamento
3) Biocarburanti

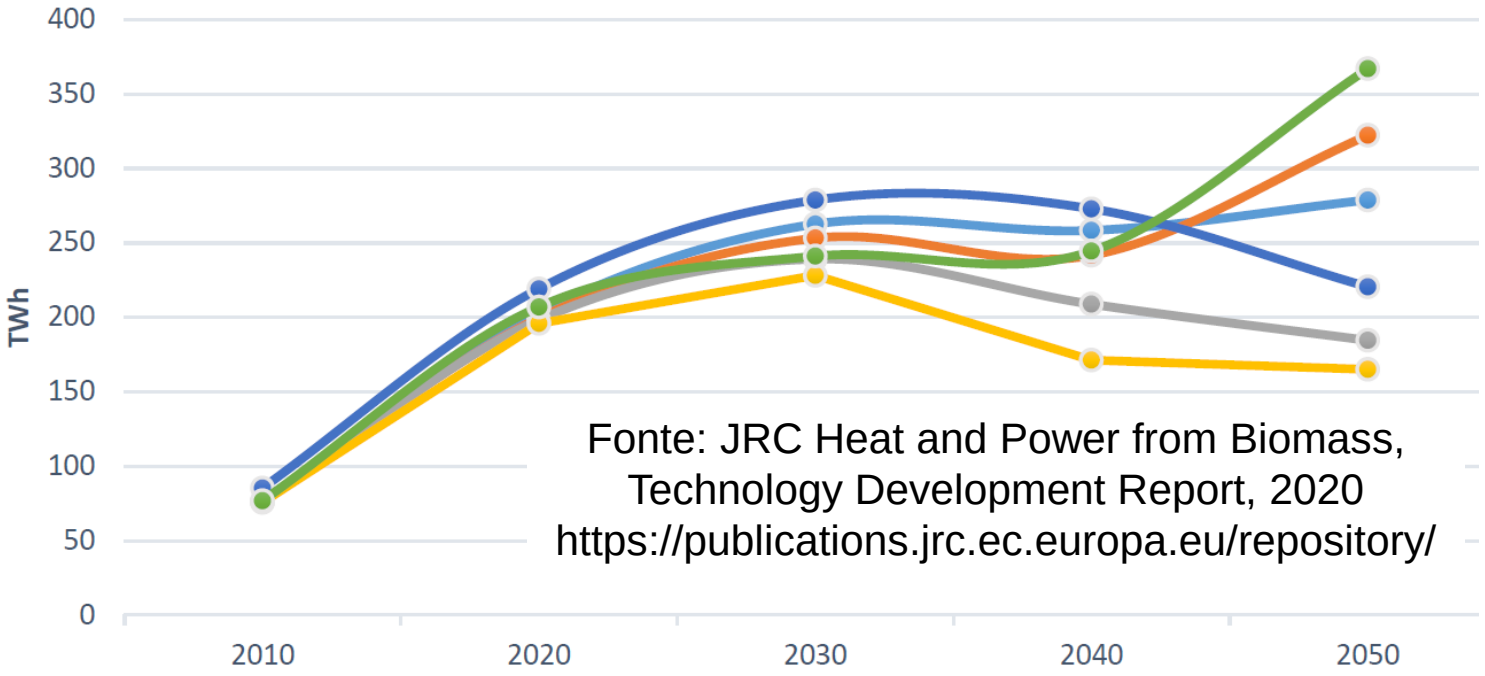


Vi sono aspetti ambientali molto positivi legati al riutilizzo degli scarti agricoli e dei rifiuti.

È discutibile invece l'uso di bio-elettricità e di biocarburanti su grande scala.

Elettricità da biomasse

- La bio-elettricità ha il vantaggio che la bio-massa può essere immagazzinata, generando l'elettricità su richiesta.
- E' possibile recuperare parte del calore prodotto nella combustione mediante impianti di co-generazione.
- Nel 2020 la generazione di bio-elettricità è di ~200 TWh (~6% della produzione di energia elettrica). Per via della competizione con altri usi delle biomasse e del territorio, è difficile ipotizzare sviluppi su scala più grande.



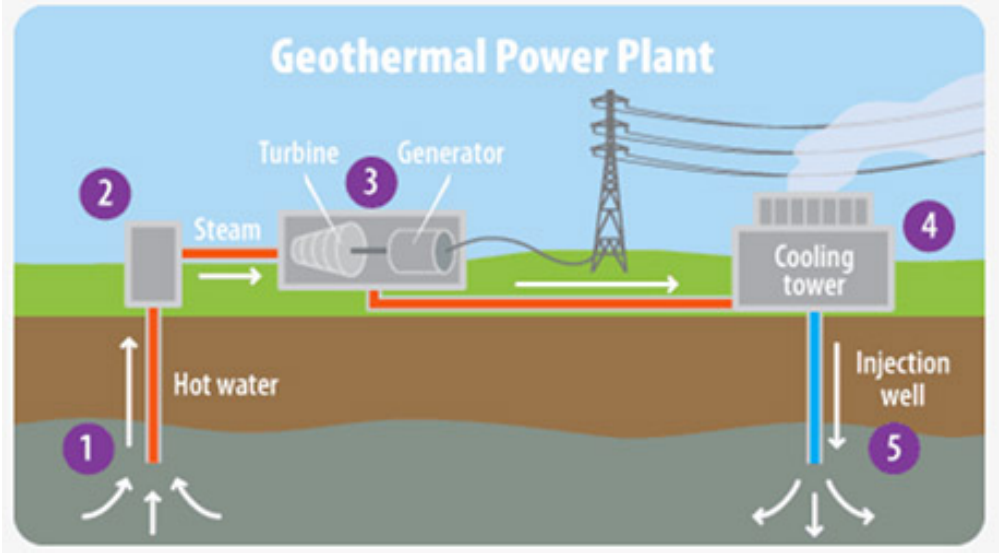
Fonte: JRC Heat and Power from Biomass, Technology Development Report, 2020
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/

Geotermia

➢Nelle centrali geotermiche si sfrutta il calore contenuto nella crosta terrestre, utilizzando il vapore nel sottosuolo per muovere una turbina accoppiata ad un generatore.

➢ In Italia vi sono 33 impianti geotermici, tutti in Toscana (Larderello).

➢ Attualmente la geotermia contribuisce attorno allo 0.2% dell'energia elettrica prodotta in Europa. Le possibilità di sviluppo sono ristrette ad alcune zone, globalmente sono molto limitate.

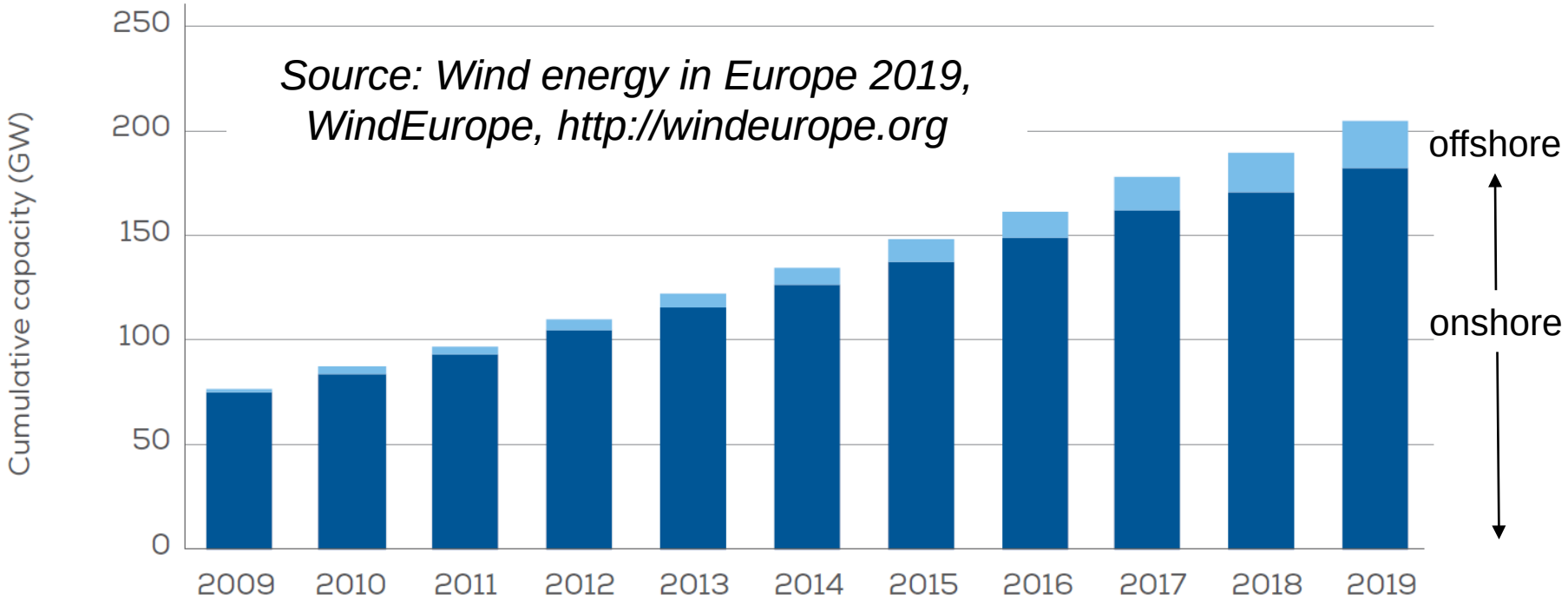


Energia dal vento

- Il vento muove eliche o pale collegate ad una turbina per la generazione di energia elettrica.
- L'energia eolica è rinnovabile, pulita, a costo competitivo (0.06-0.10 €/kWh). Può essere prodotta a terra oppure off-shore.
- Ha un impatto visivo e di occupazione dello spazio non trascurabile.

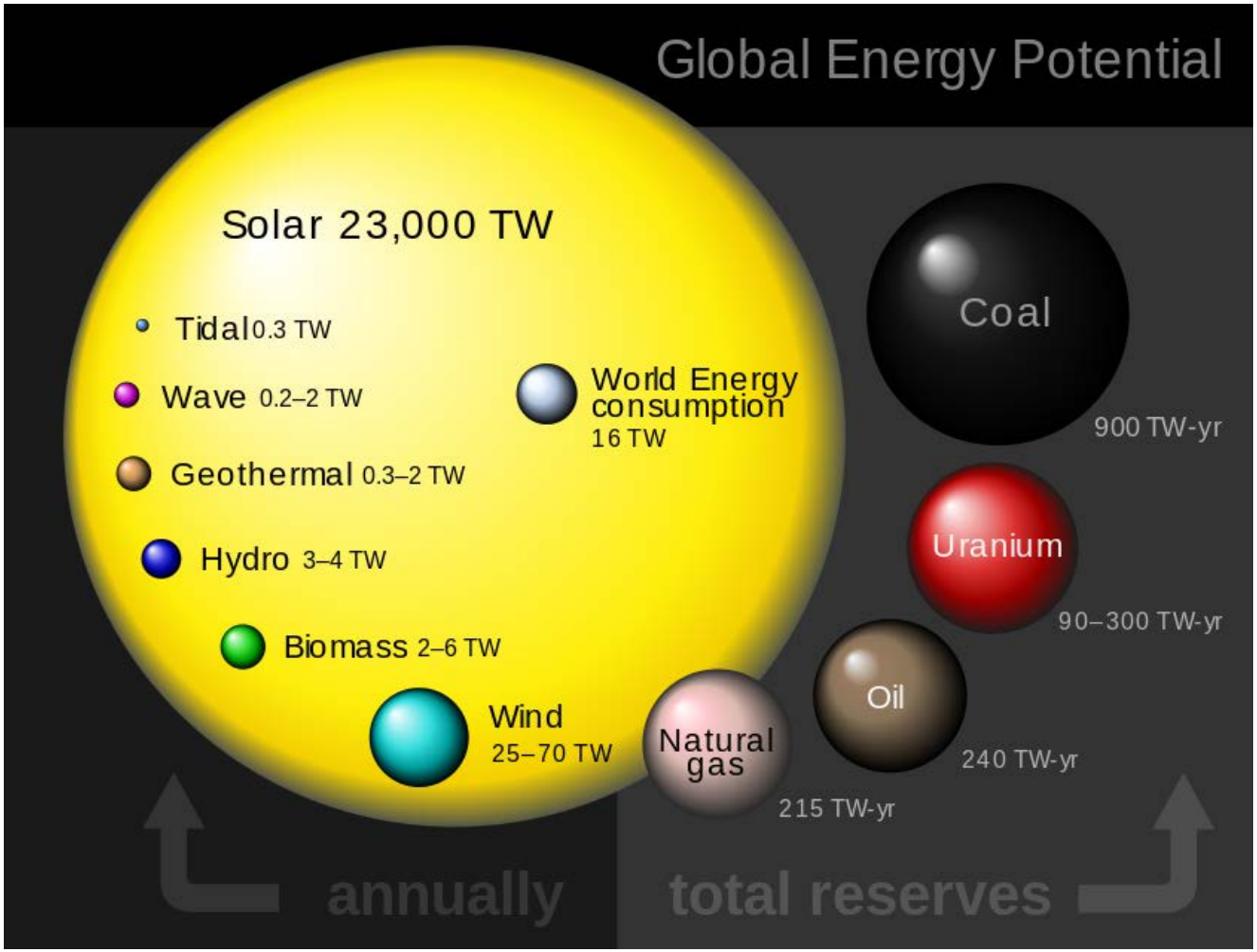
Energia dal vento

- La capacità di energia eolica installata in Europa nel 2020 è di circa 200 GW, per una produzione annua di ~440 TWh di elettricità (circa il 15% della produzione totale; 1 GW installato produce ~2.2 TWh/anno).
- Il paese leader è la Germania (30% del totale in EU). In Danimarca, il 48% dell'energia elettrica è di fonte eolica. Gran parte della produzione è onshore.



Risorse energetiche: il potenziale

Energie rinnovabili Combustibili fossili e nucleare



https://waitbutwhy.com/2015/06/the-deal-with-solar.html

Celle fotovoltaiche di silicio (wafer)

Silicio mono-cristallino

Silicio poli-cristallino

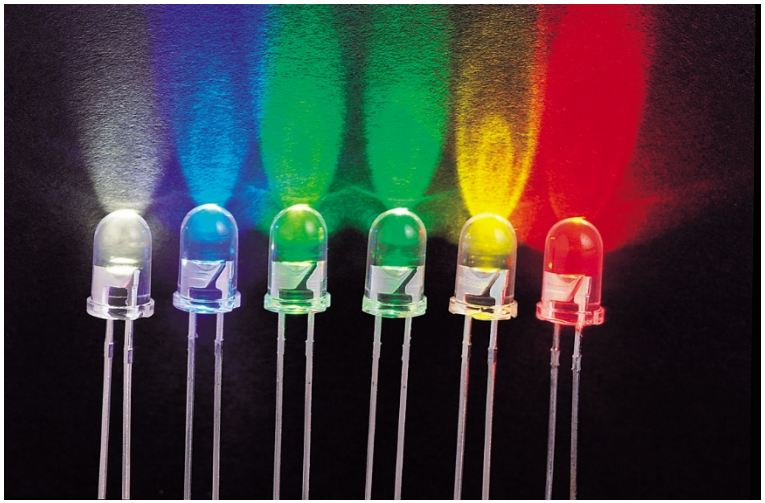
Le celle fotovoltaiche basate su fette (wafer) di silicio coprono circa il 95% del mercato mondiale del fotovoltaico

OUTLINE

1. Il problema energetico: una introduzione
2. Energie rinnovabili
3. **Fotovoltaico e LED: principi fisici**
4. Il fotovoltaico: tecnologie e prospettive
5. La transizione energetica: questioni cruciali

Luce ed energia

LED (Light Emitting Diode)

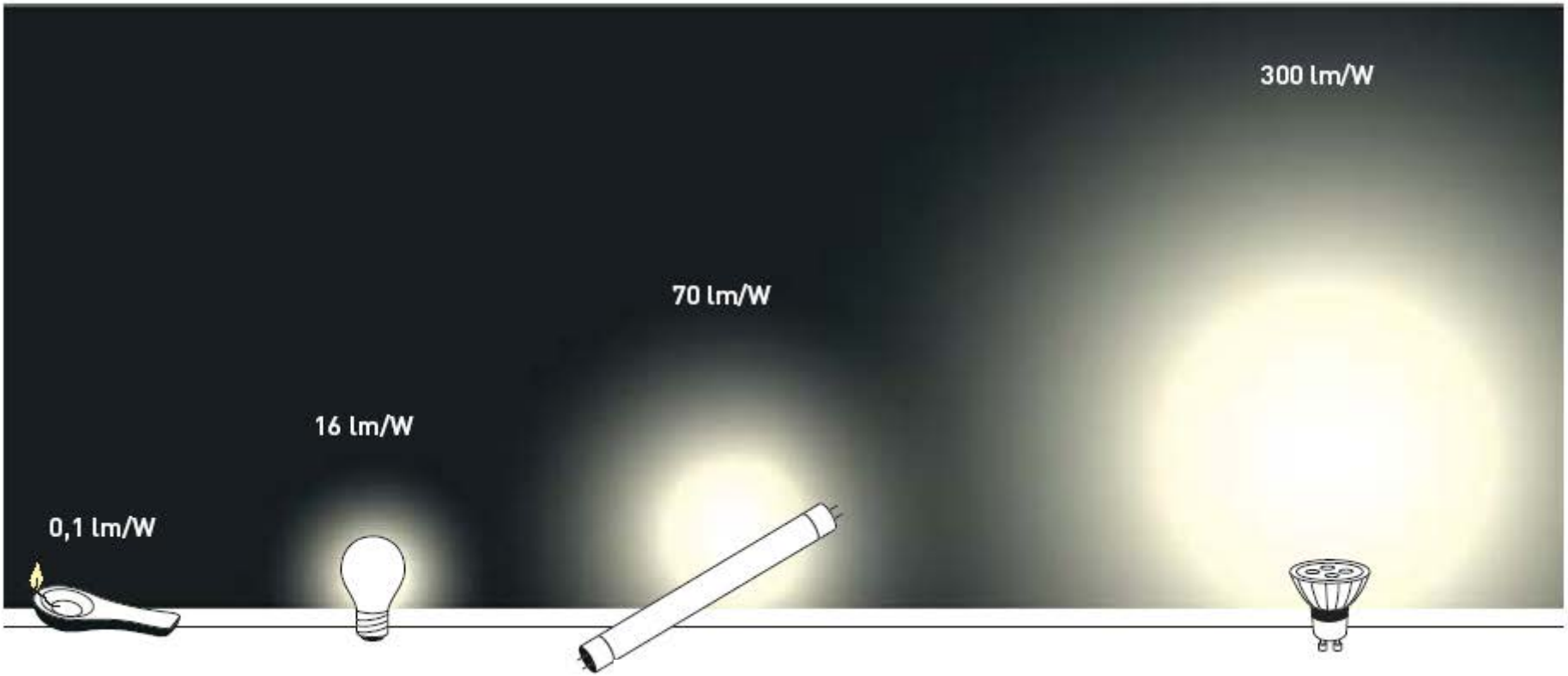


⇒ *illuminazione e risparmio energetico*

Celle fotovoltaiche

⇒ *energia elettrica da fonte rinnovabile*

Efficienza luminosa



Lampada a olio

Lampada a incandescenza

Lampada fluorescente

Lampada a LED

Luce e onde elettromagnetiche

L'energia luminosa si propaga sotto forma di ***onde elettromagnetiche***, ossia oscillazioni del campo elettrico **E** e magnetico **B**. Queste 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 $c = 3 \cdot 10^8$ m·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 $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·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) = $1.6 \cdot 10^{-19}$ C * 1 Volt = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

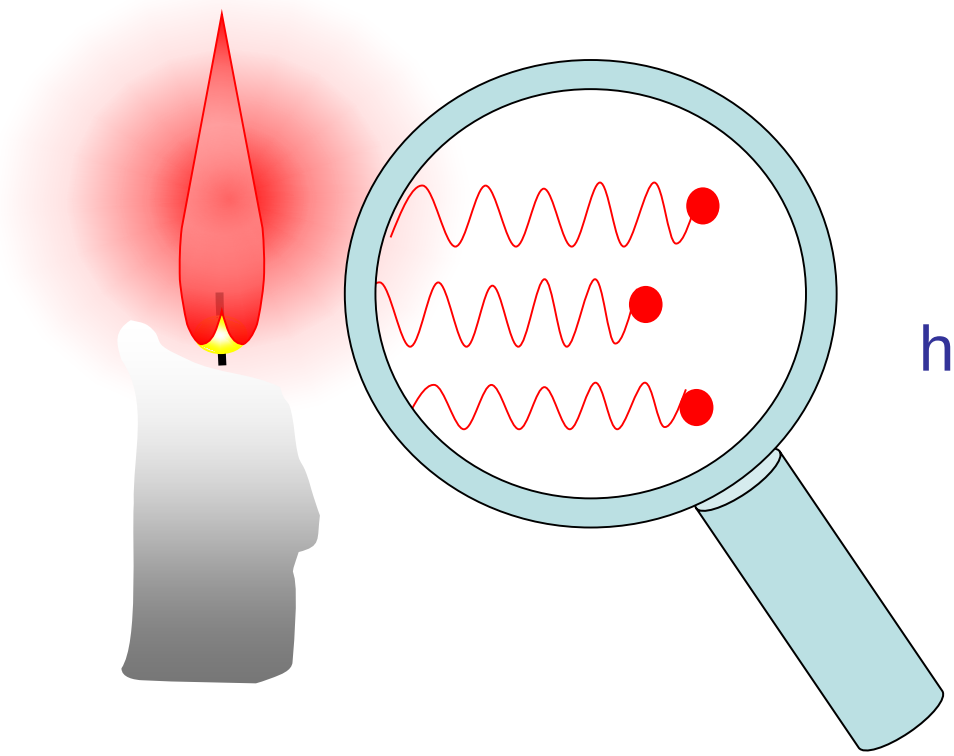
E (eV) = $1240/\lambda$ (nm)

Quantizzazione della luce: i fotoni

La ***radiazione elettromagnetica*** ha simultaneamente natura

- ondulatoria: *onde elettromagnetiche* (interferenza, diffrazione, …)
- corpuscolare: *fotoni* (effetto fotoelettrico, …)

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



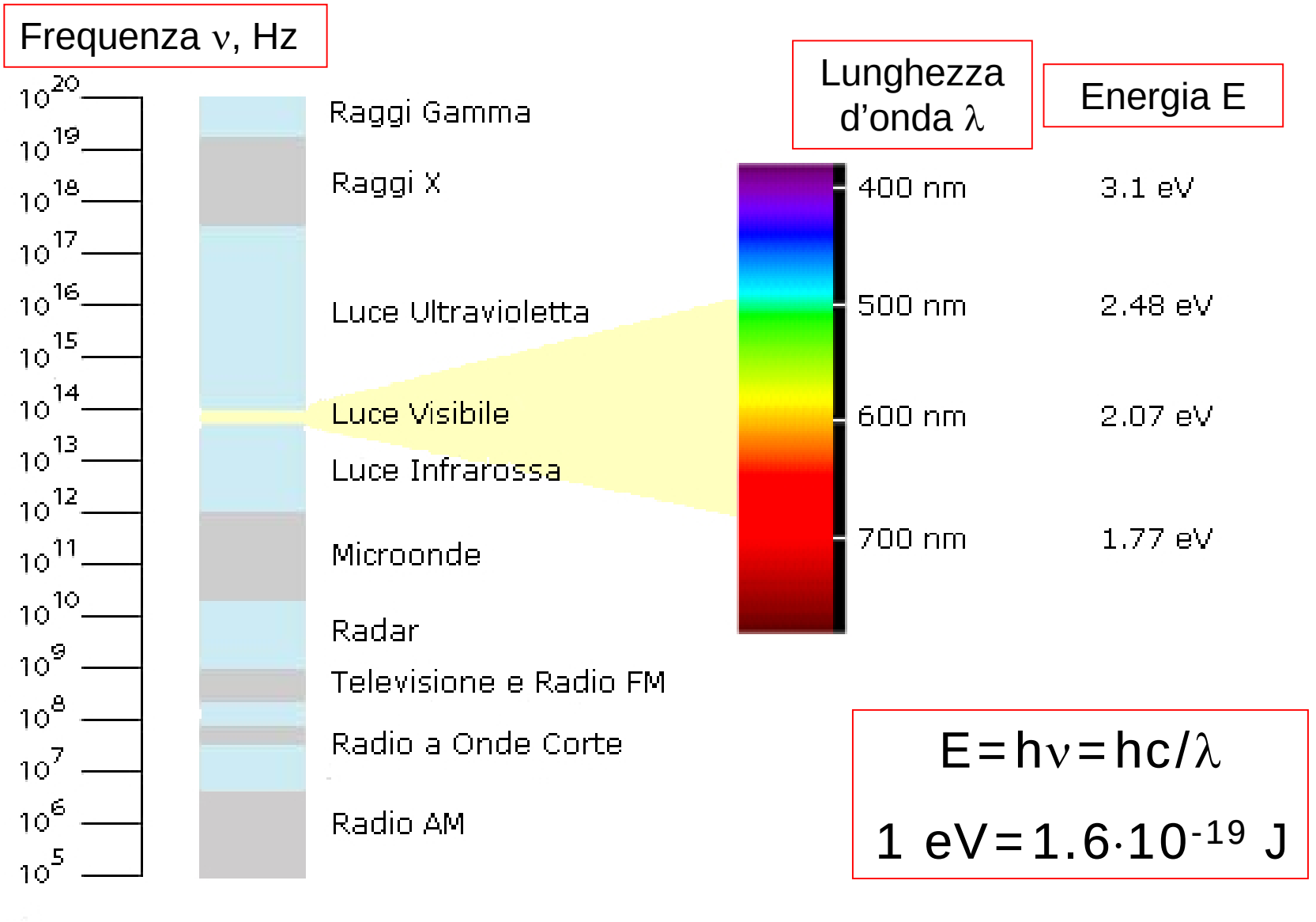
quanto di energia elettromagnetica (fotone):

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

$h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s (costante di Planck)

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

Lo spettro delle onde elettromagnetiche



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

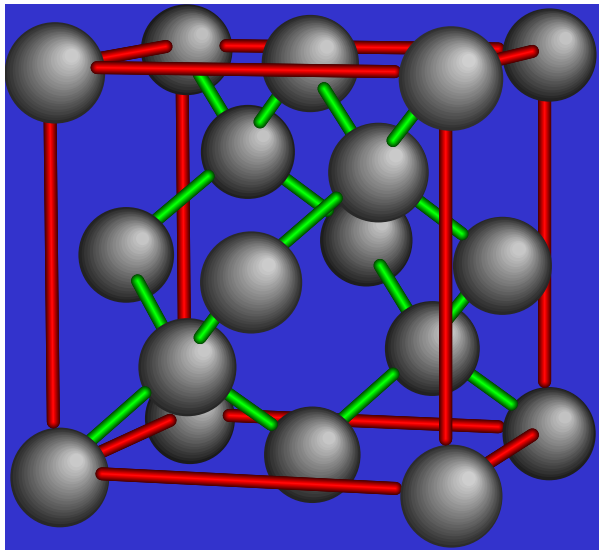
$$1\ \text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

I semiconduttori: struttura cristallina

Tavola periodica

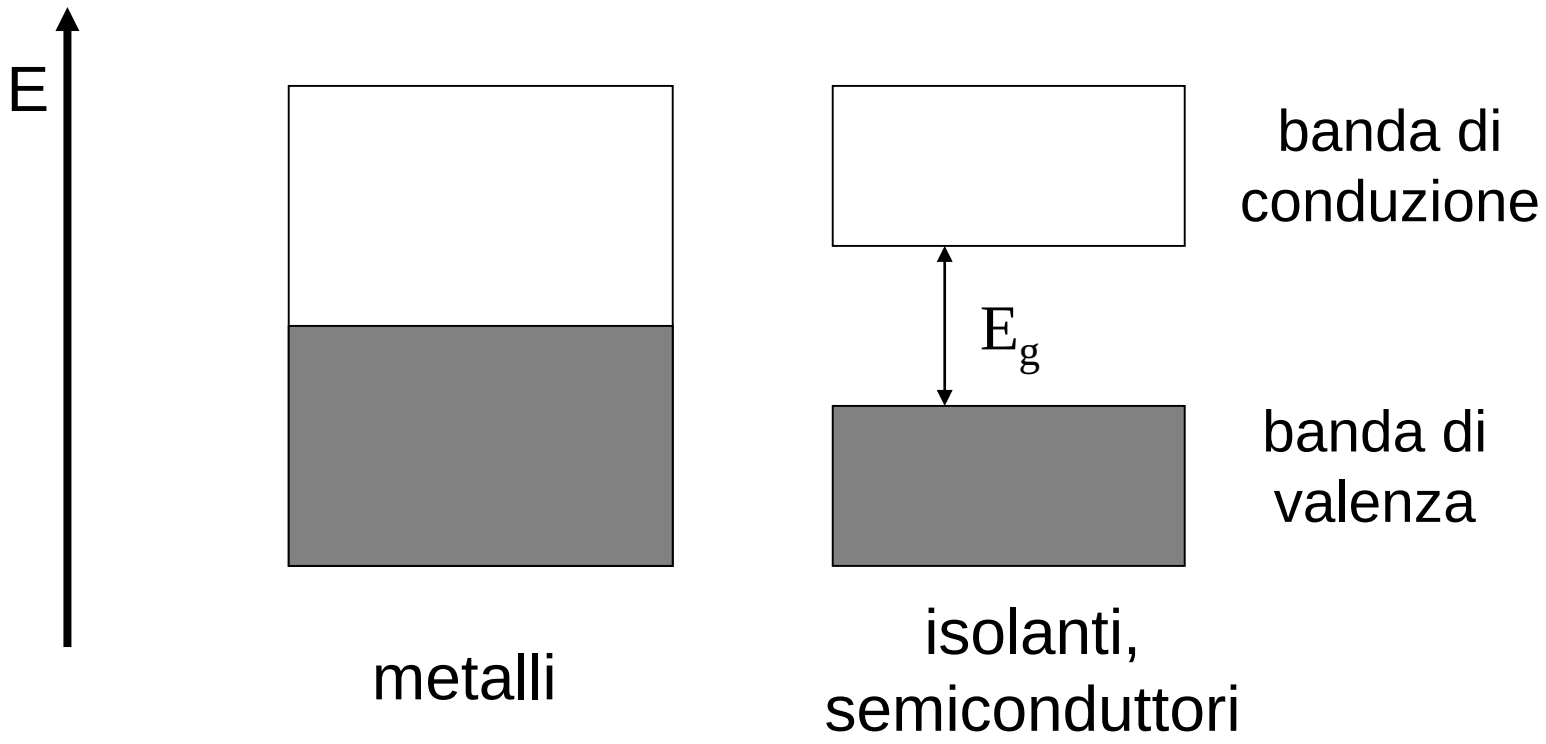
		III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
IB	IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po

Cella elementare (Si)



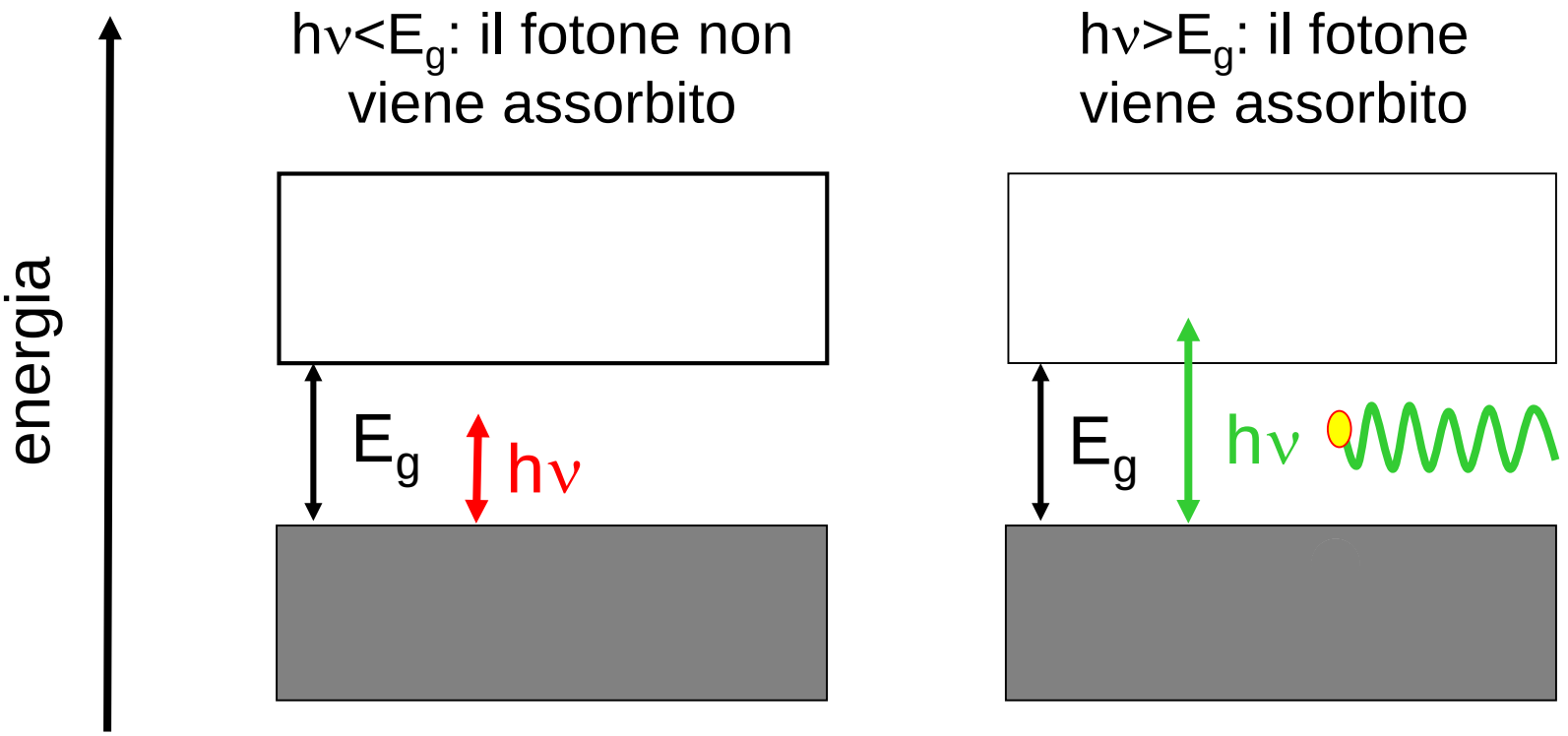
I semiconduttori (monoatomici gruppo IV, binari III-V e II-VI) sono caratterizzati da un gap di energia piccolo, generalmente $E_g < 4$ eV.

Elettroni nei solidi, bande di energia



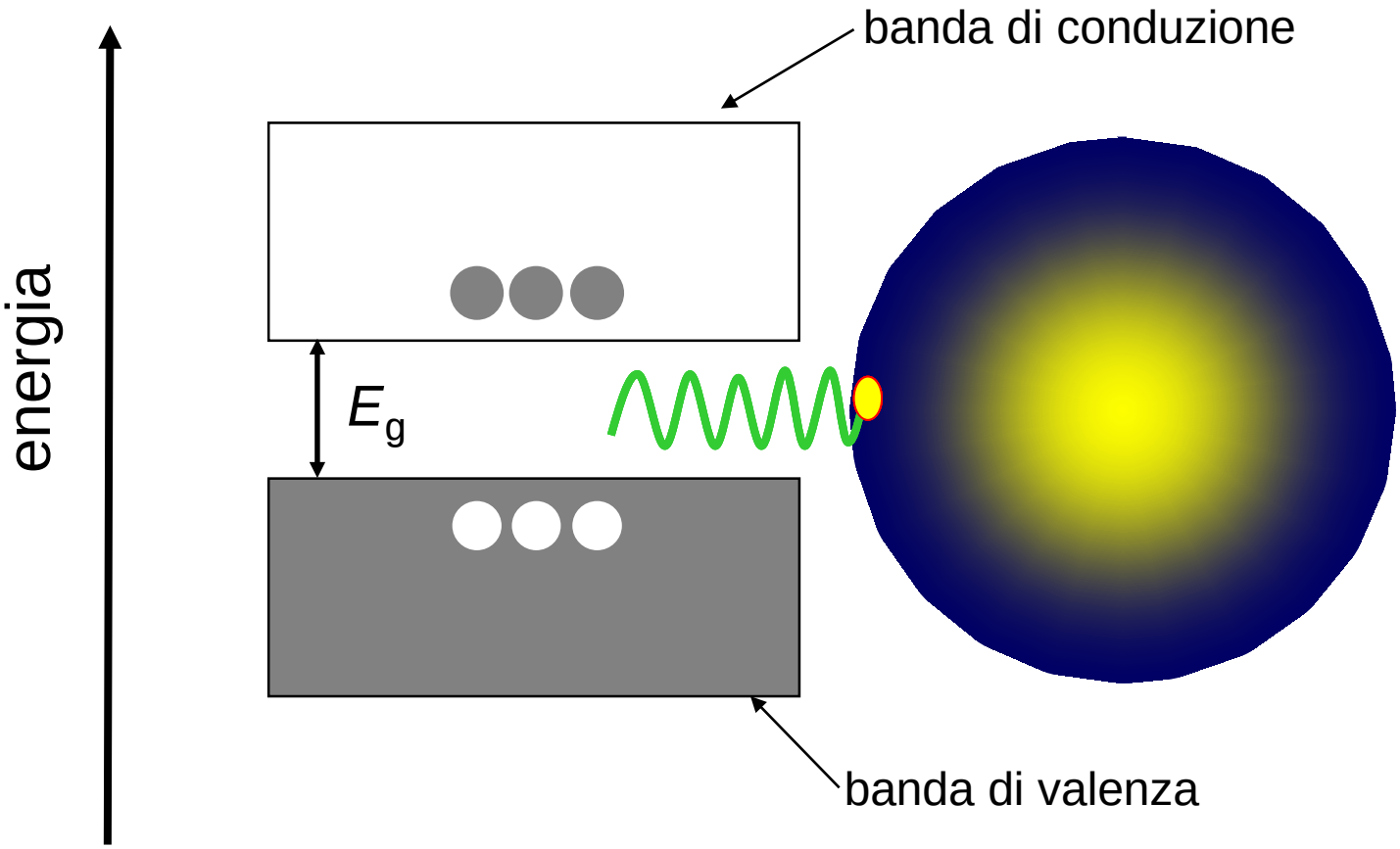
Gli elettroni nei solidi sono caratterizzati da regioni di energia permesse, dette *bande di energia*, e regioni di energia proibite dette *gap di energia*. Gli elettroni occupano i livelli di energia partendo dal più basso, secondo il *principio di esclusione di Pauli*.

Gap di energia e assorbimento ottico



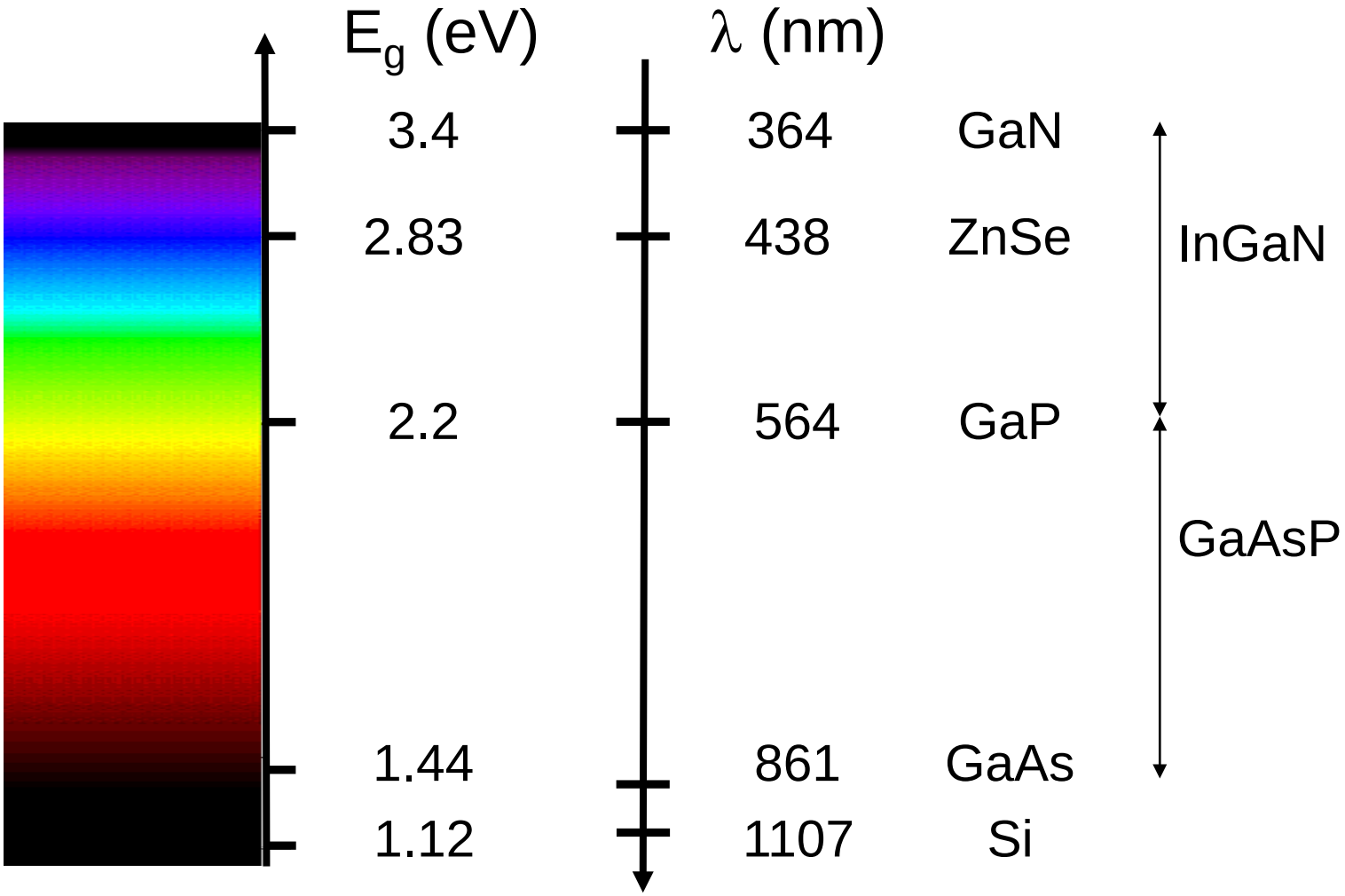
Il gap di energia determina la soglia di assorbimento secondo la relazione $E_g=h\nu=hc/\lambda$. L'esistenza di una soglia di assorbimento indipendente dall'intensità della luce è un fenomeno di natura quantistica, analogo all'effetto fotoelettrico. Si generano così *portatori di carica*, ossia elettroni e lacune.

Emissione di luce in semiconduttori



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

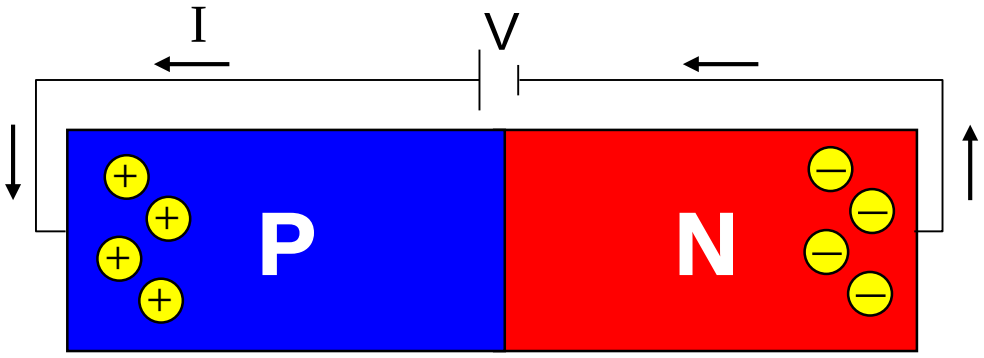
Gap di energia e luce visibile

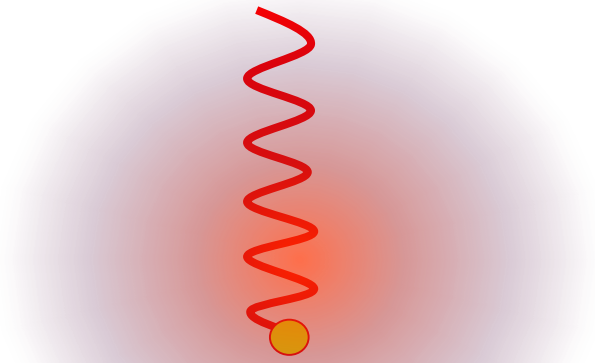


Utilizzando semiconduttori binari e le loro leghe è possibile ottenere emissione/assorbimento di luce in tutto lo spettro visibile

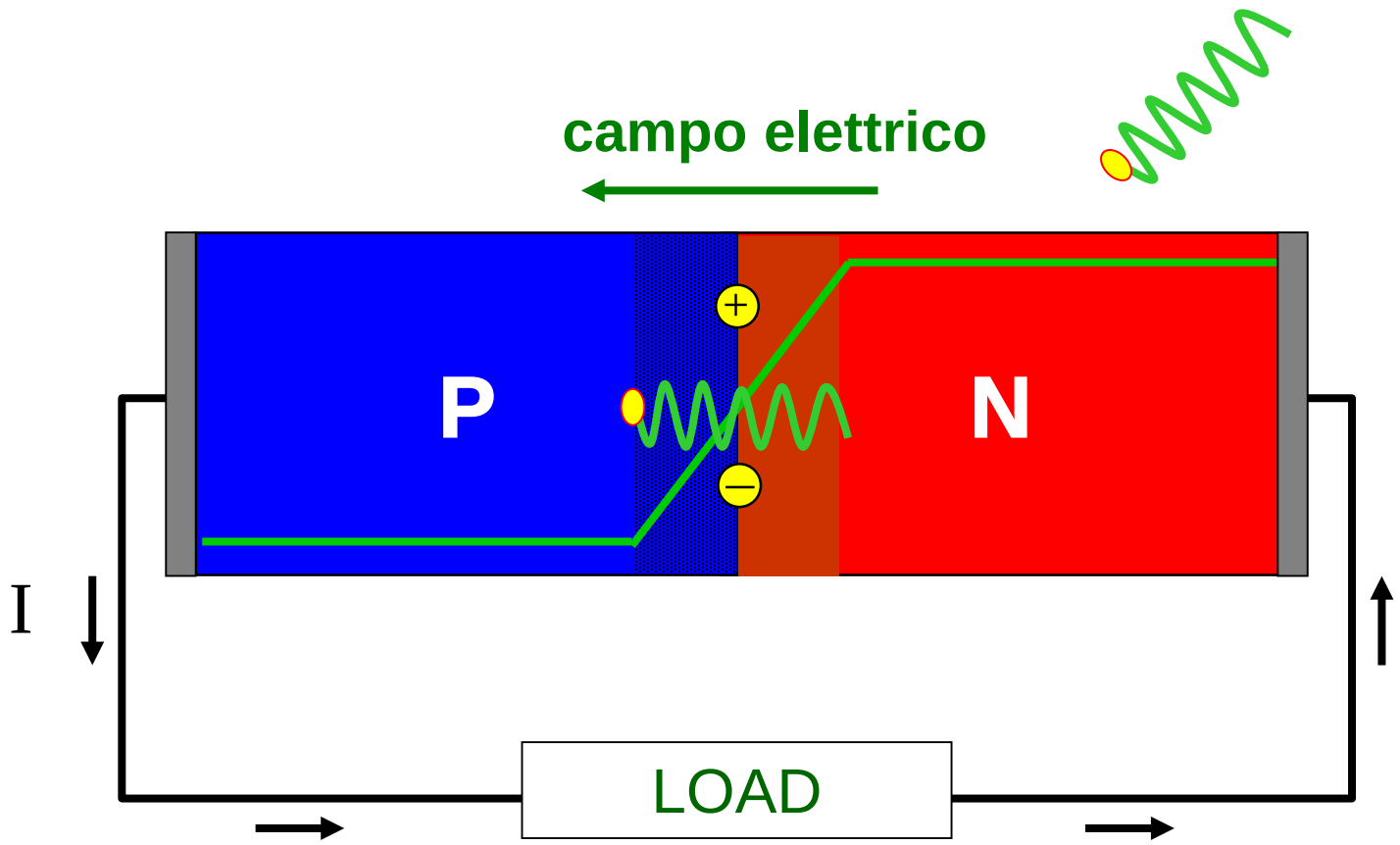
Applicazioni della giunzione p-n:

LED e laser a semiconduttore (con composti III-V: GaAsP, InGaN, …)





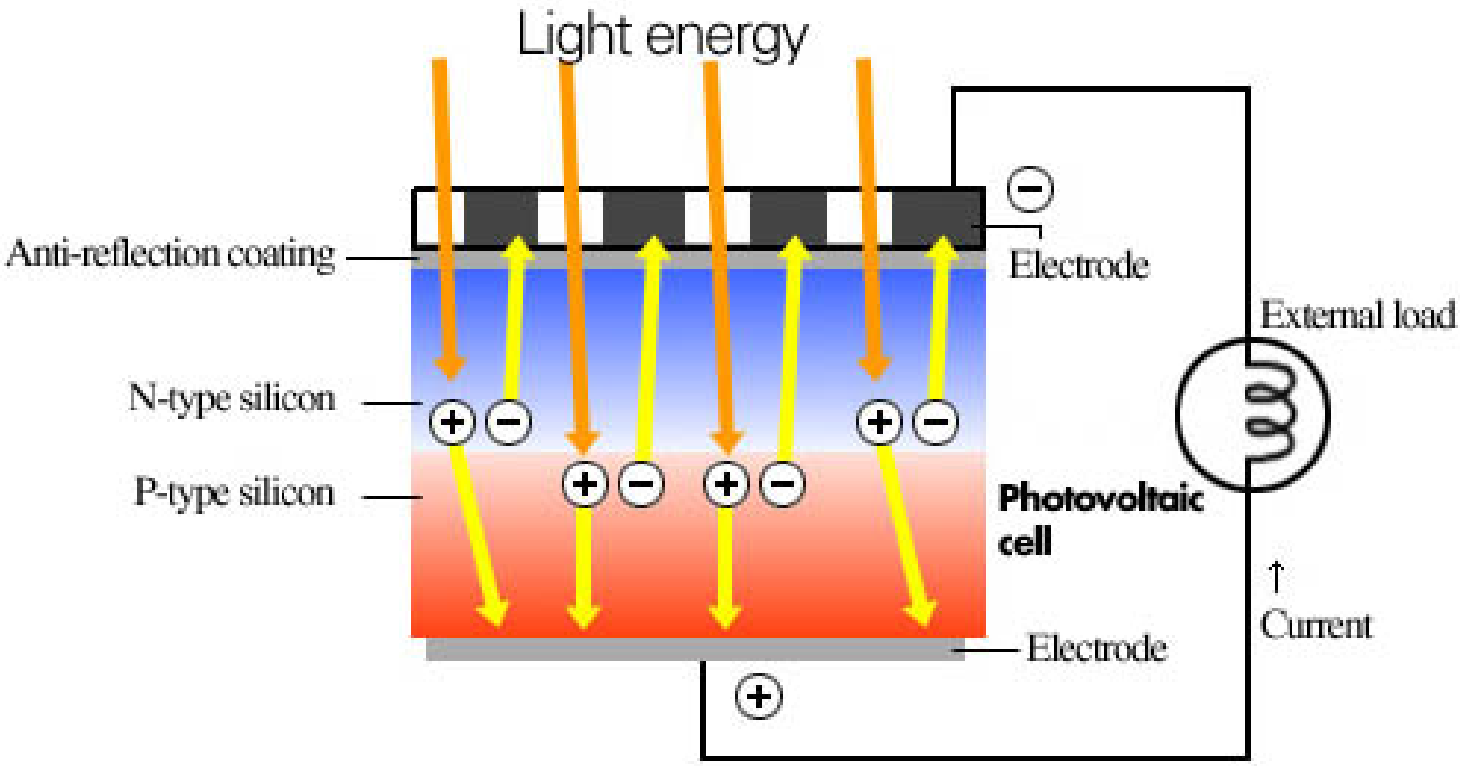
Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata



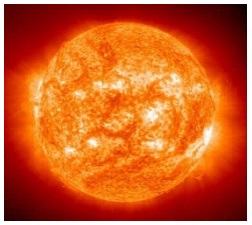
Una cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED: quando viene illuminata, i fotoni di energia $h\nu > E_g$ vengono assorbiti e si produce una corrente che ha il verso della corrente inversa del diodo

Solare fotovoltaico

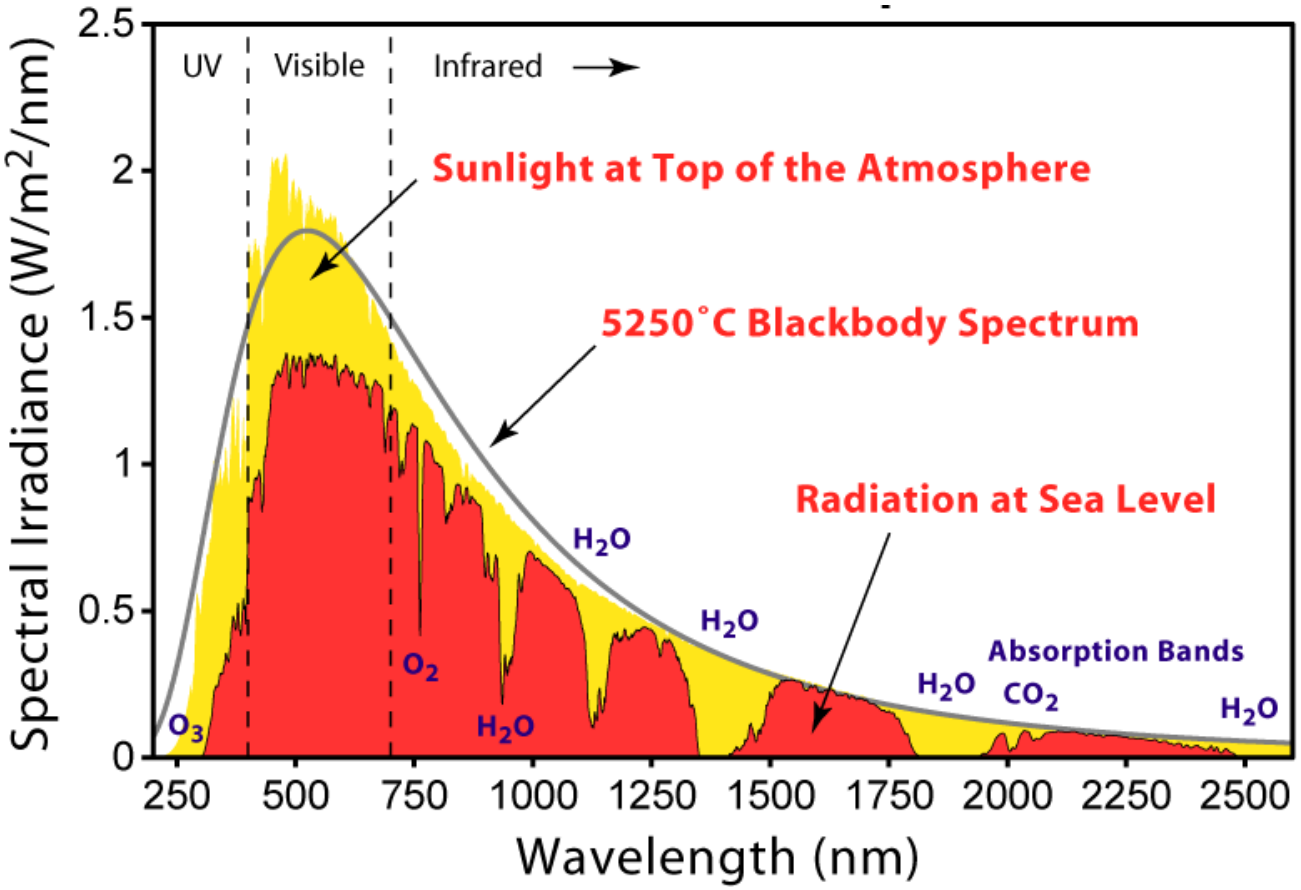
La conversione fotovoltaica dell'energia solare si basa sull'assorbimento di luce in una giunzione p-n di semiconduttori.



Il massimo teorico dell'efficienza di conversione di energia, per celle a singola giunzione, è attorno al 30%; il valore record di laboratorio è ~26%.

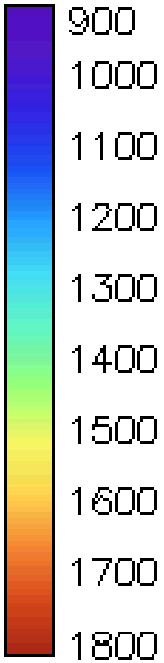


Lo spettro solare



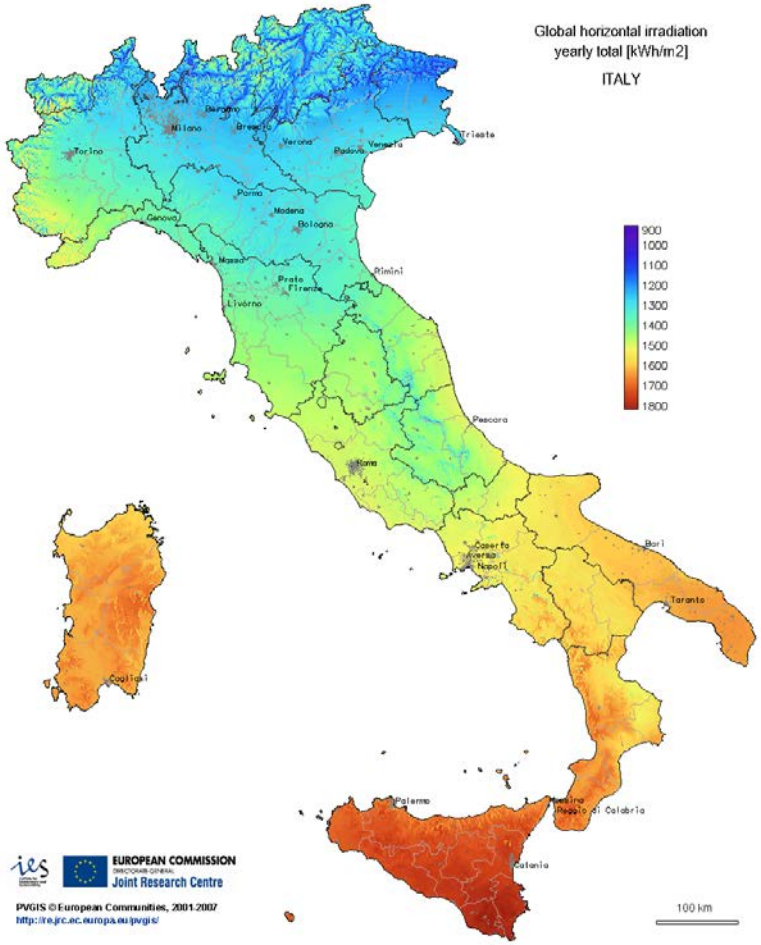
La radiazione elettromagnetica emessa dal Sole ha lo spettro simile a quello di un ***corpo nero*** alla temperatura T=5800 K

Irraggiamento solare annuo (Italia)



EUROPEAN COMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL
Joint Research Centre

PVGIS © European Communities, 2001-2007
http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/



Milano:	1376 kWh/m^2/y
Roma:	1522 kWh/m^2/y
Trapani:	1639 kWh/m^2/y

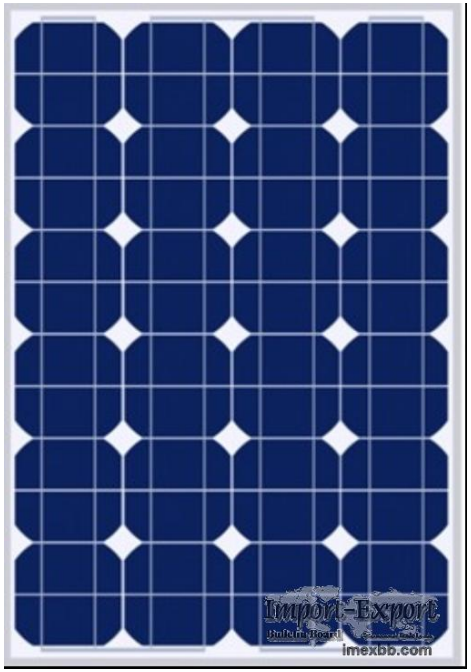
EU: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/

OUTLINE

1. Il problema energetico: una introduzione
2. Energie rinnovabili
3. Fotovoltaico e LED: principi fisici
4. **Il fotovoltaico: tecnologie e prospettive**
5. La transizione energetica: questioni cruciali

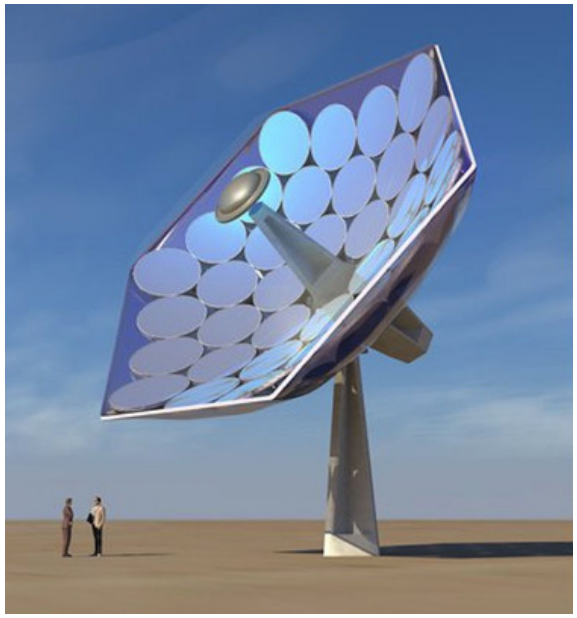
Main photovoltaic technologies

Silicon (wafer-based) photovoltaics



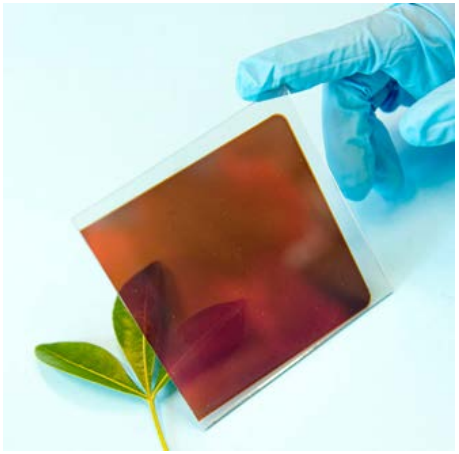
Mono- and poly c-Si: ~94% of global photovoltaic market

Multijunction and concentration photovoltaics



Multijunctions of III-V semiconductors: satellites, CPV

Thin-film photovoltaics



CdTe, $CuInGaSe_2$, perovskites, organics

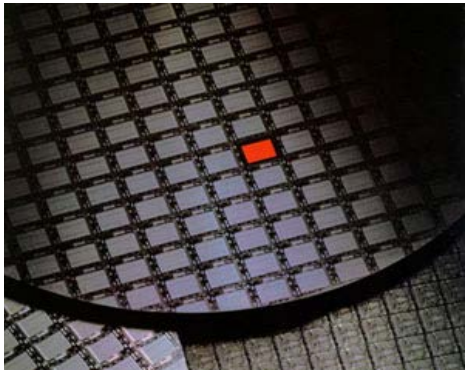
Varie prospettive di ricerca e sviluppo, spesso basate sulle *nanotecnologie*

Il silicio: dalla sabbia ai micro-processori

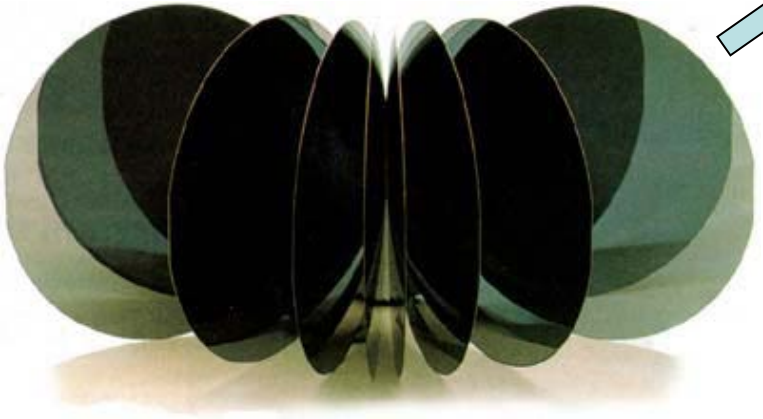
Lingotto

Silicio ultra-puro

Chip



Wafer



Cella solare

oppure

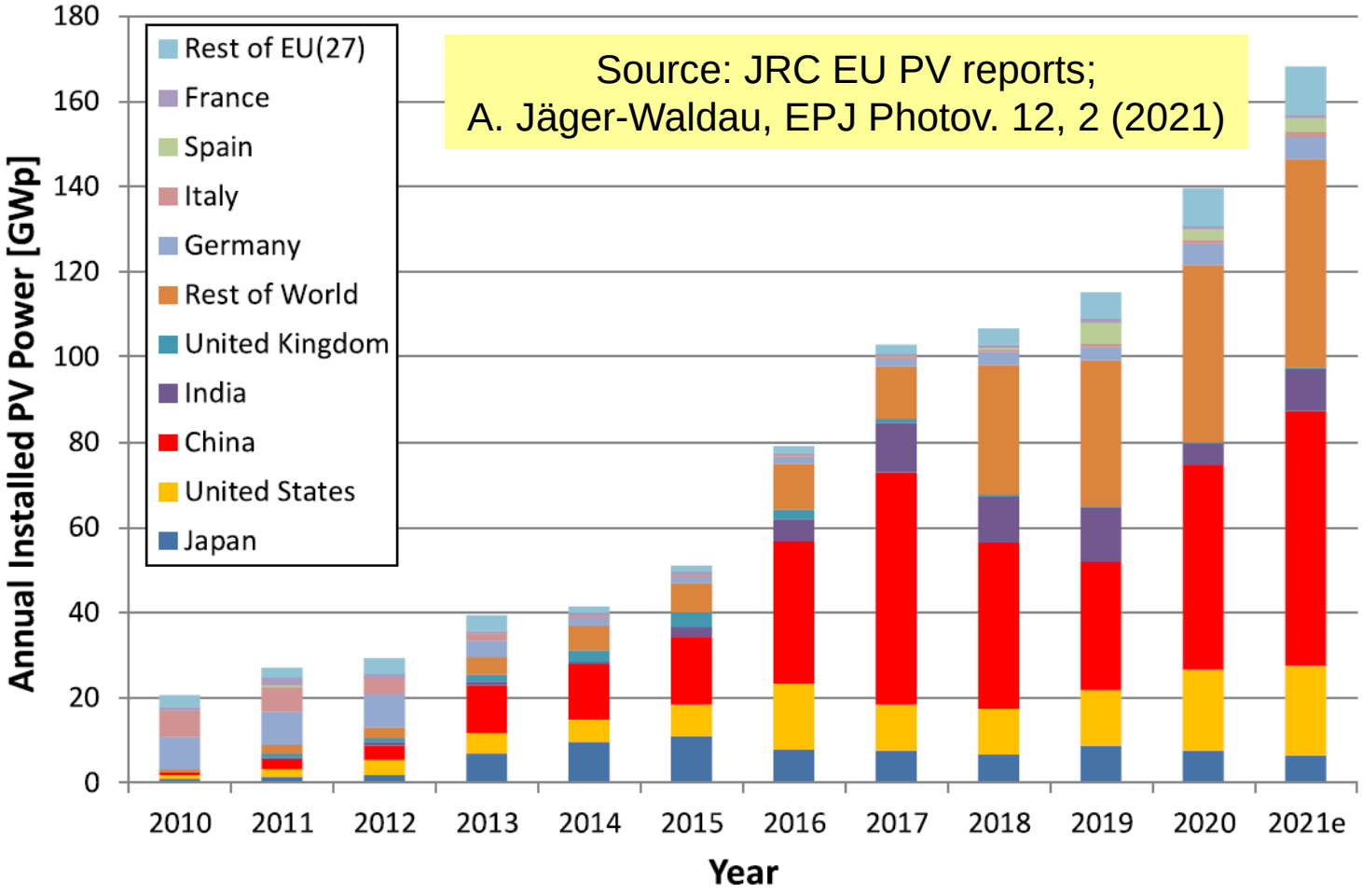
La tecnologia delle celle fotovoltaiche di semiconduttori
è molto vicina alle tecnologie della microelettronica

Solar PV energy on the Earth…

and above...

Potenza fotovoltaica installata: evoluzione storica

GWp

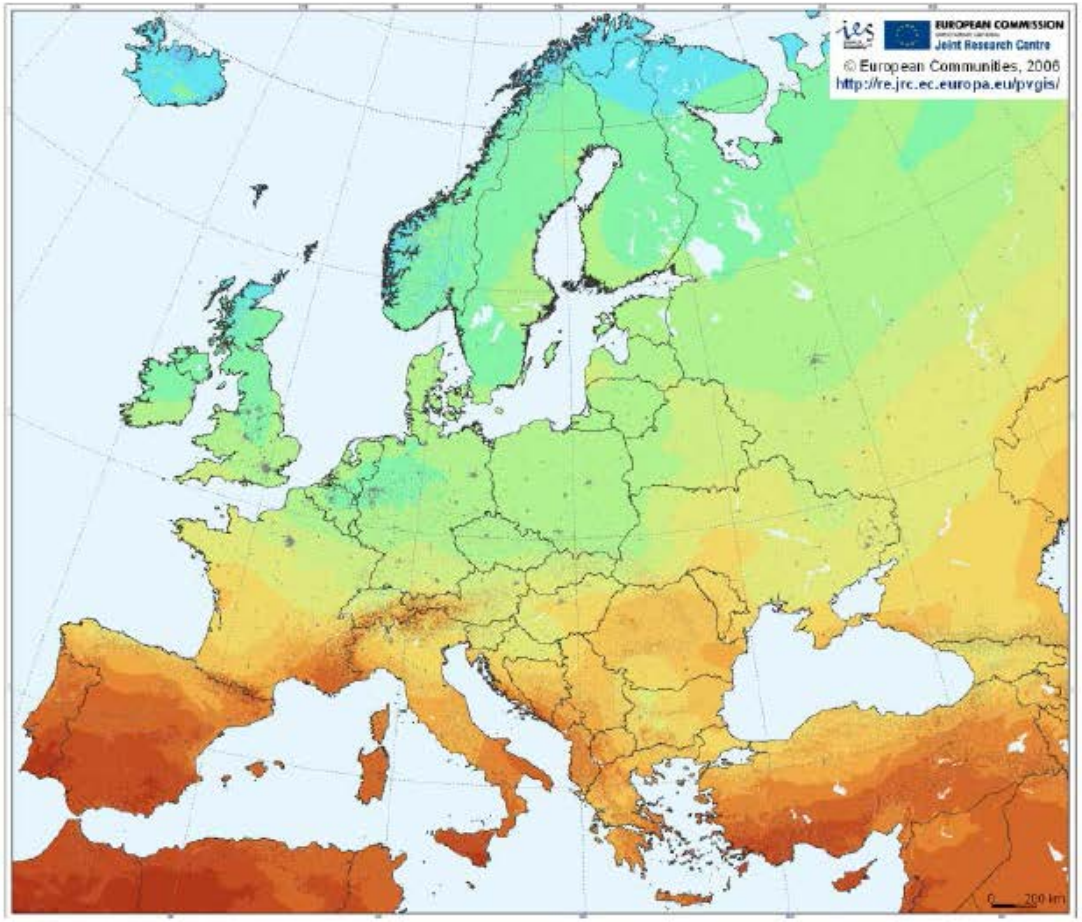


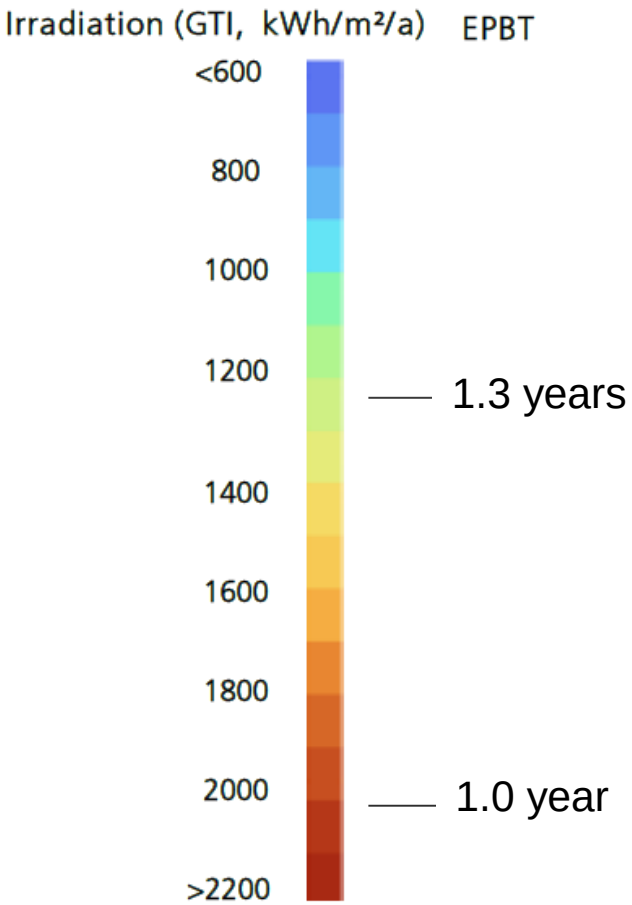
Il tasso di crescita annuo è fra il 24% e il 39%, con un tempo di raddoppio fra 2 e 3 anni e una continua riduzione dei costi grazie all'economia di scala

Energy Payback Time

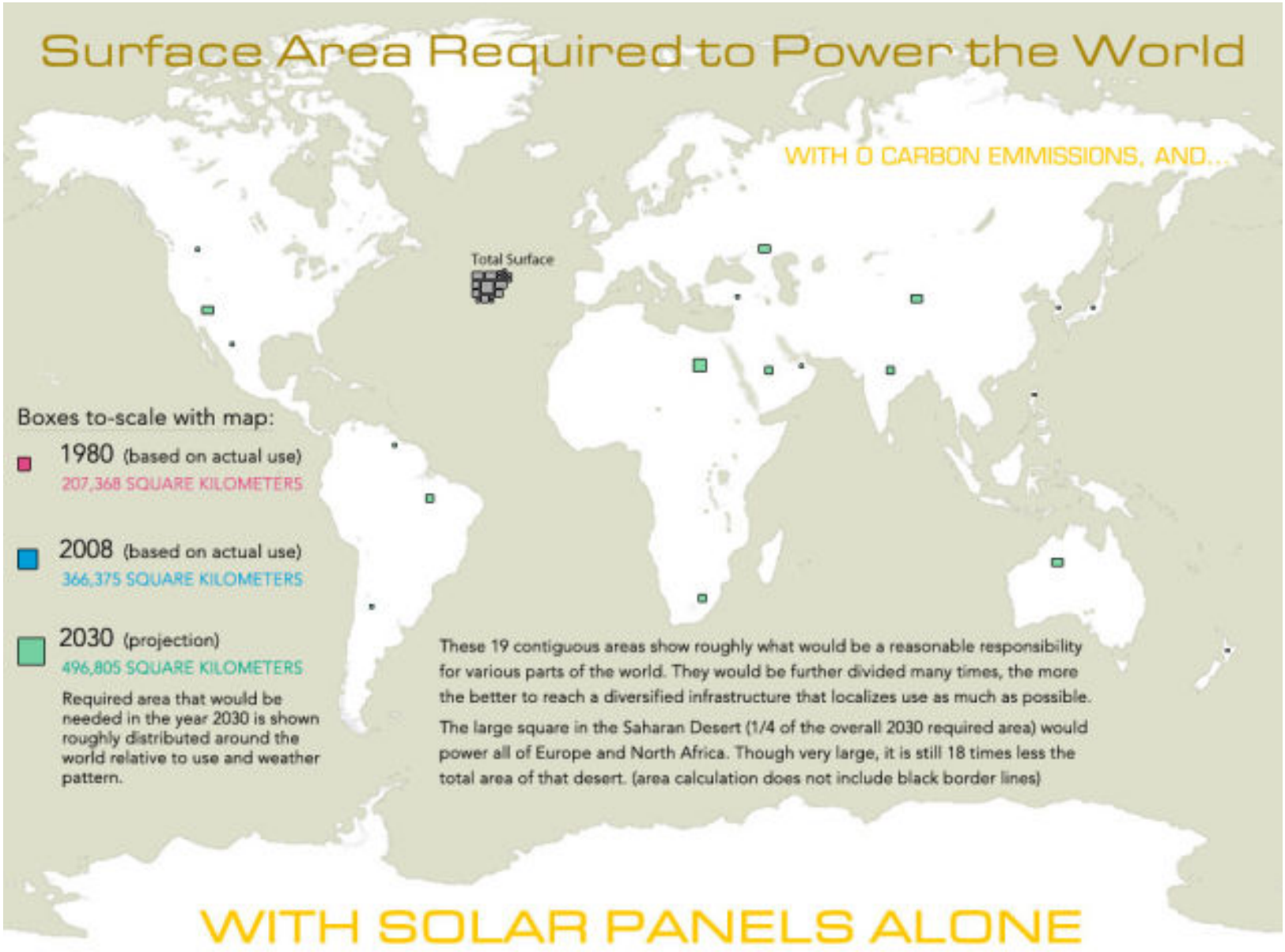
Tempo di ritorno dell'energia: I moduli fotovoltaici durano almeno 20-25 anni.
Dopo quanto tempo restituiscono l'energia spesa per la loro fabbricazione?

Source: Fraunhofer ISE PV report July 2020

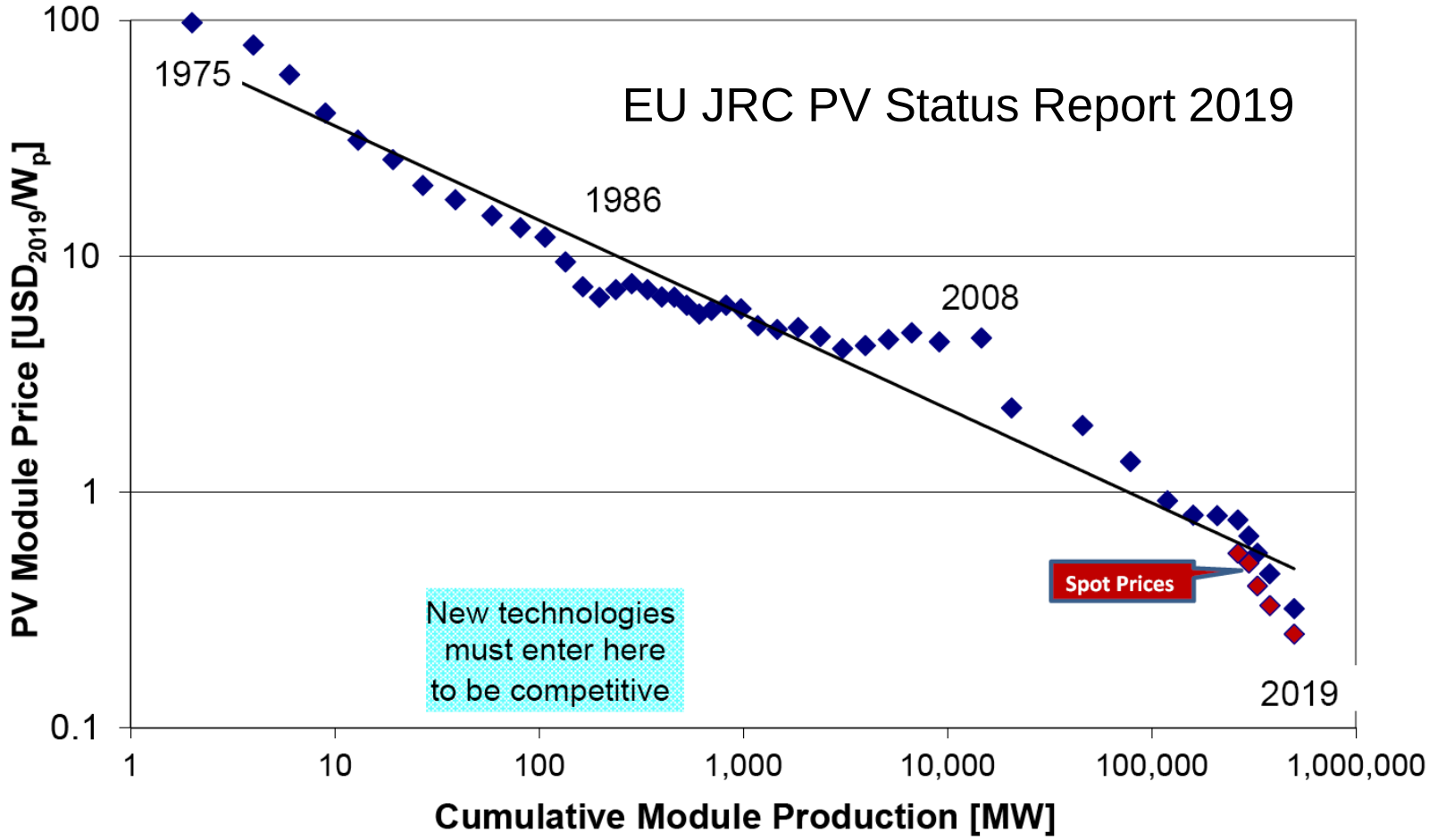




Quanto spazio è necessario?

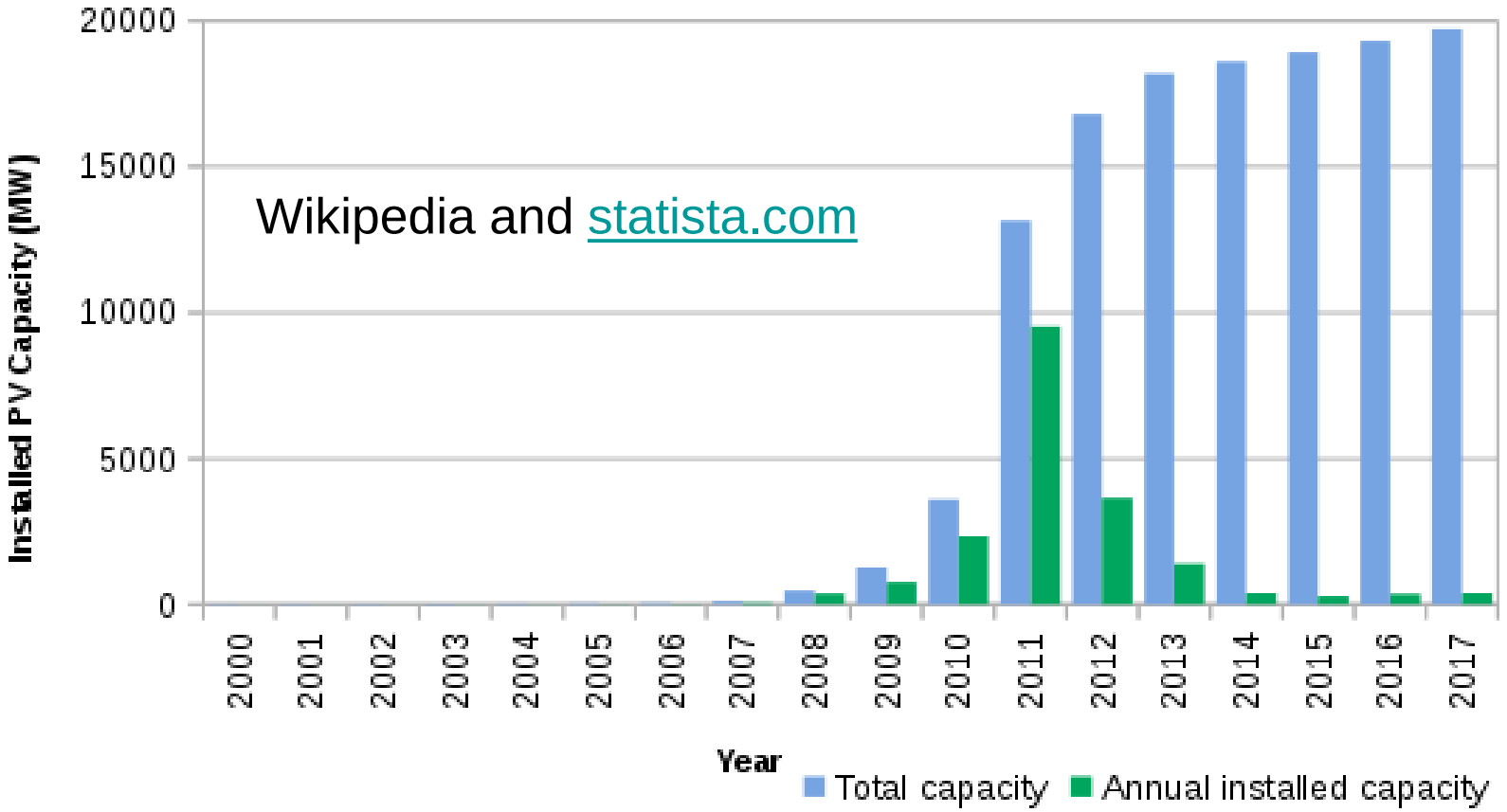


Curva di apprendimento ($/W)



Il costo dei moduli fotovoltaici diminuisce del 22% quando la produzione totale raddoppia, grazie all'economia di scala e all'aumento di efficienza. Costo attuale: 5-10 c€/kWh e parità di rete raggiunta in quasi tutta la EU.

Il fotovoltaico in Italia e in Europa



In Italia sono installati ~20 GW di moduli fotovoltaici, che contribuiscono l'8% dell'energia elettrica consumata e fino al 30% della potenza di picco. In Europa sono installati ~130 GW di moduli fotovoltaici → ~5% dell'energia elettrica.

Ricerca pura o ricerca applicata?

- ***LED e celle fotovoltaiche*** sono dispositivi basati sui semiconduttori. Il loro comportamento dipende in maniera cruciale dalle proprietà quantistiche della materia e della radiazione elettromagnetica (luce).
- 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, scienza dei materiali, micro- e opto-elettronica, fotonica, fotovoltaico sono campi di ricerca strettamente collegati

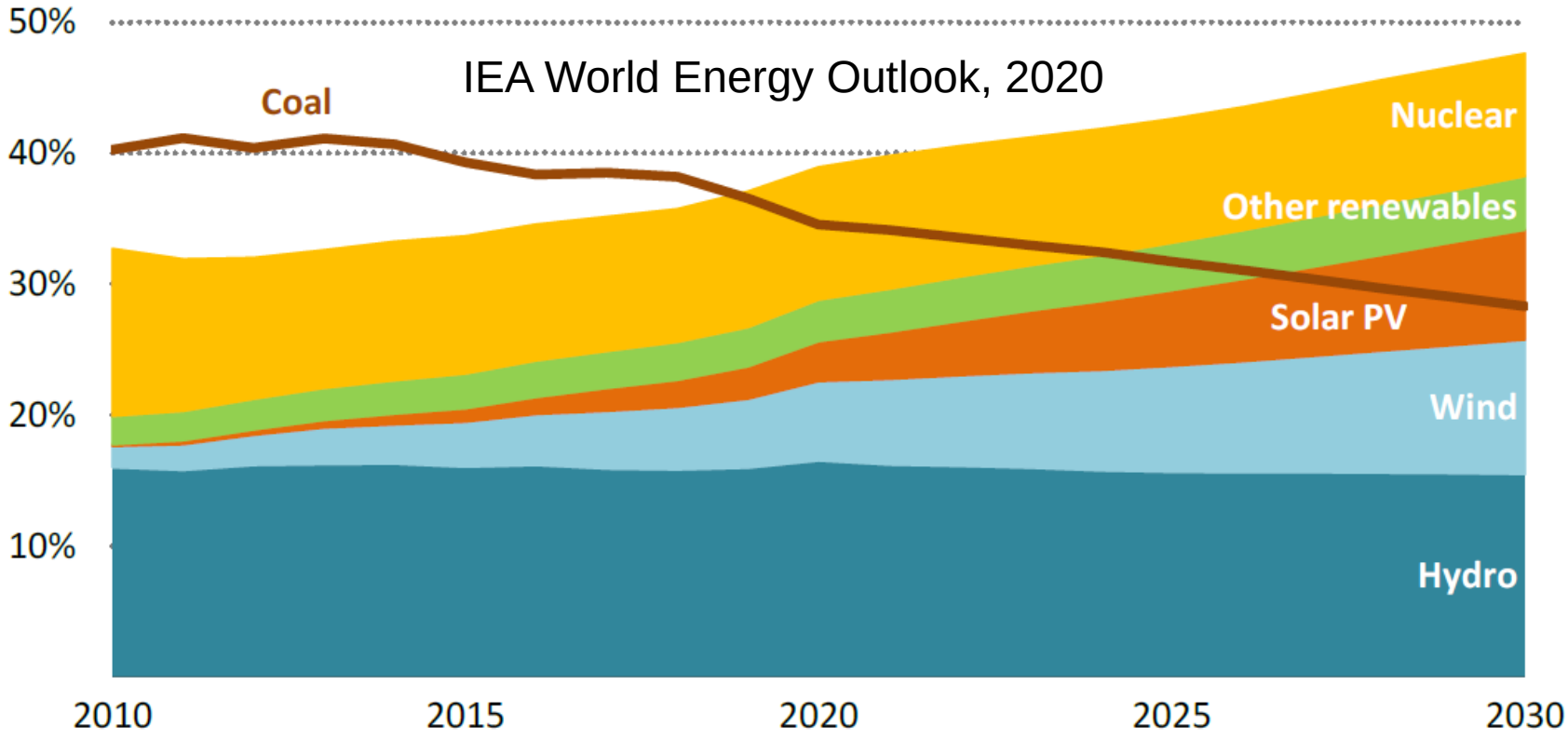
ricerca pura e ricerca applicata
formano un binomio inscindibile

OUTLINE

1. Il problema energetico: una introduzione
2. Energie rinnovabili
3. Fotovoltaico e LED: principi fisici
4. Il fotovoltaico: tecnologie e prospettive
5. **La transizione energetica: questioni cruciali**

Quote sul consumo di energia elettrica

Shares in electricity production in the Stated Policies Scenario



La quota di energie rinnovabili, e soprattutto del solare fotovoltaico, è in rapida crescita

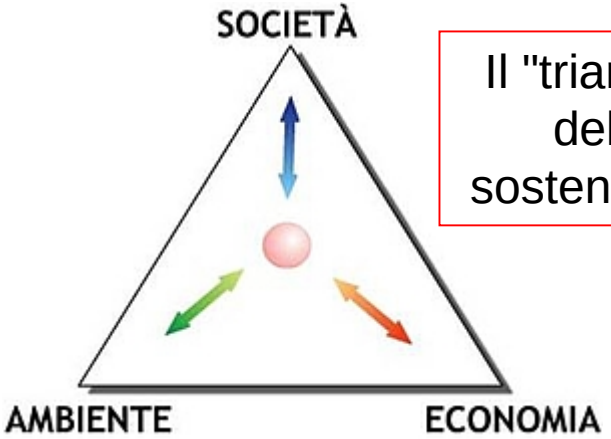
Gli obiettivi dell'Unione Europea nel piano NextGenerationEU: "A European Green Deal"

- Ridurre le emissioni di gas serra almeno del 55% (rispetto al 1990) entro il 2030
  Ciò richiede di aumentare la quota di energie rinnovabili sull'energia primaria almeno al 32% entro il 2030

- Diventare "climate neutral" (zero emissioni nette di CO_2) entro il 2050

E nello stesso tempo

- Crescita economica disaccoppiata dall'uso delle risorse
- Nessuna persona e nessun luogo deve essere lasciato indietro



Il "triangolo della sostenibilità"

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

Questioni cruciali: (1) Storage

L’energia solare e l’energia eolica sono ***intermittenti*** e la loro disponibilità è solo in parte prevedibile. Per essere utilizzate nella rete elettrica, quando raggiungono una quota significativa della produzione, si rendono necessari ***sistemi di stoccaggio***: pumped hydro, batterie, aria compressa, idrogeno…

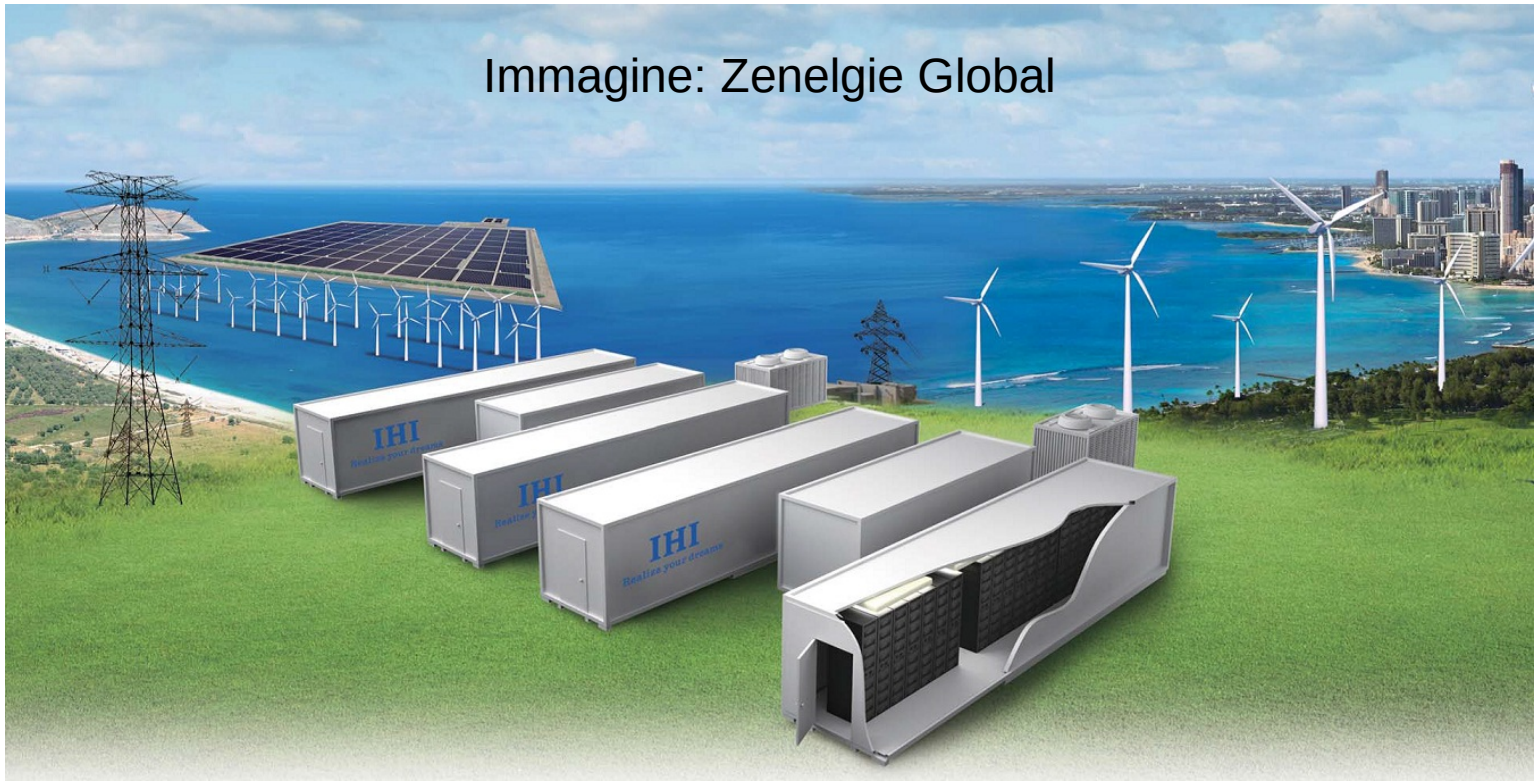
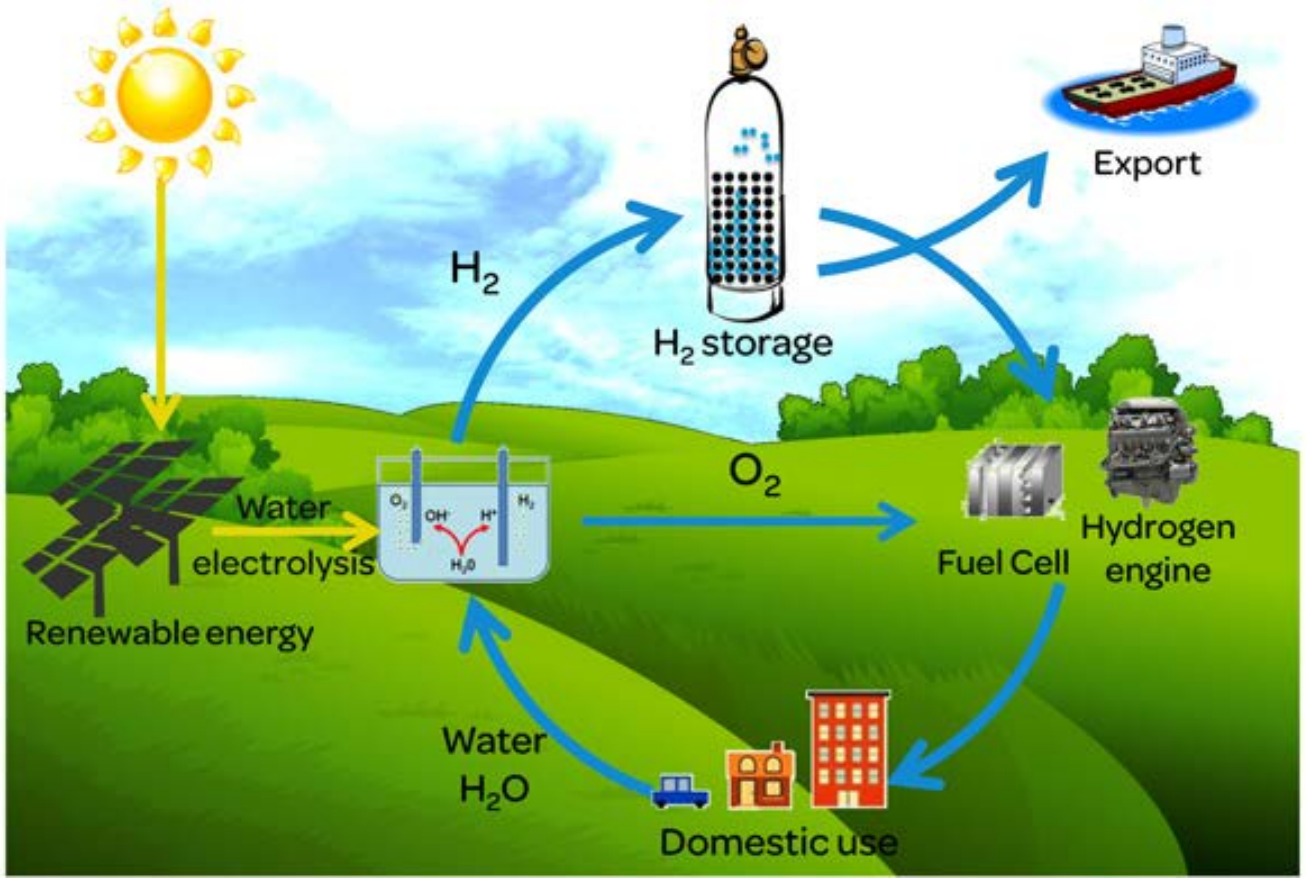


Immagine: Zenelgie Global

L’idrogeno come vettore energetico



Elettrolisi:
$2H_2O$ + energia → $2H_2+O_2$

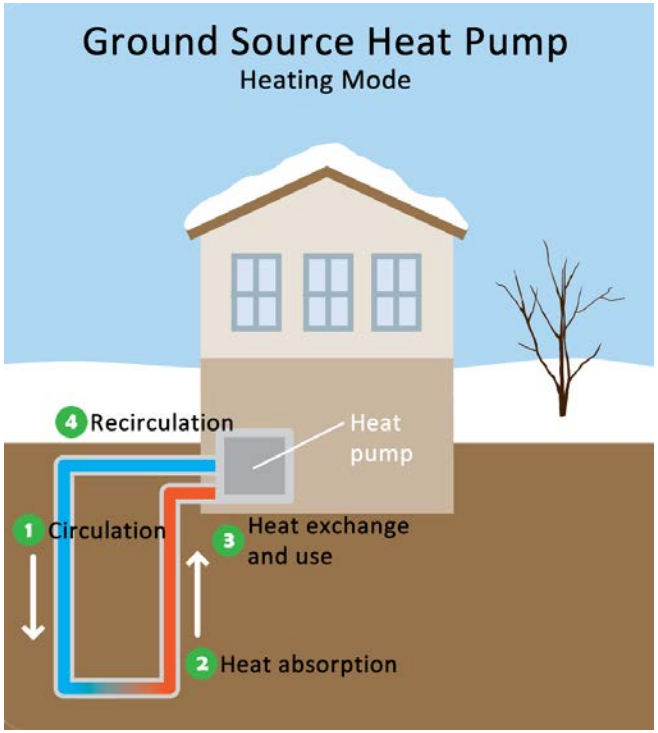
Cella a combustibile:
$2H_2+O_2$ → $2H_2O$ + energia

Elettrificazione dei consumi

Nel settore dei trasporti:

auto elettrica

(oppure: auto a idrogeno…)



Nel settore del riscaldamento:

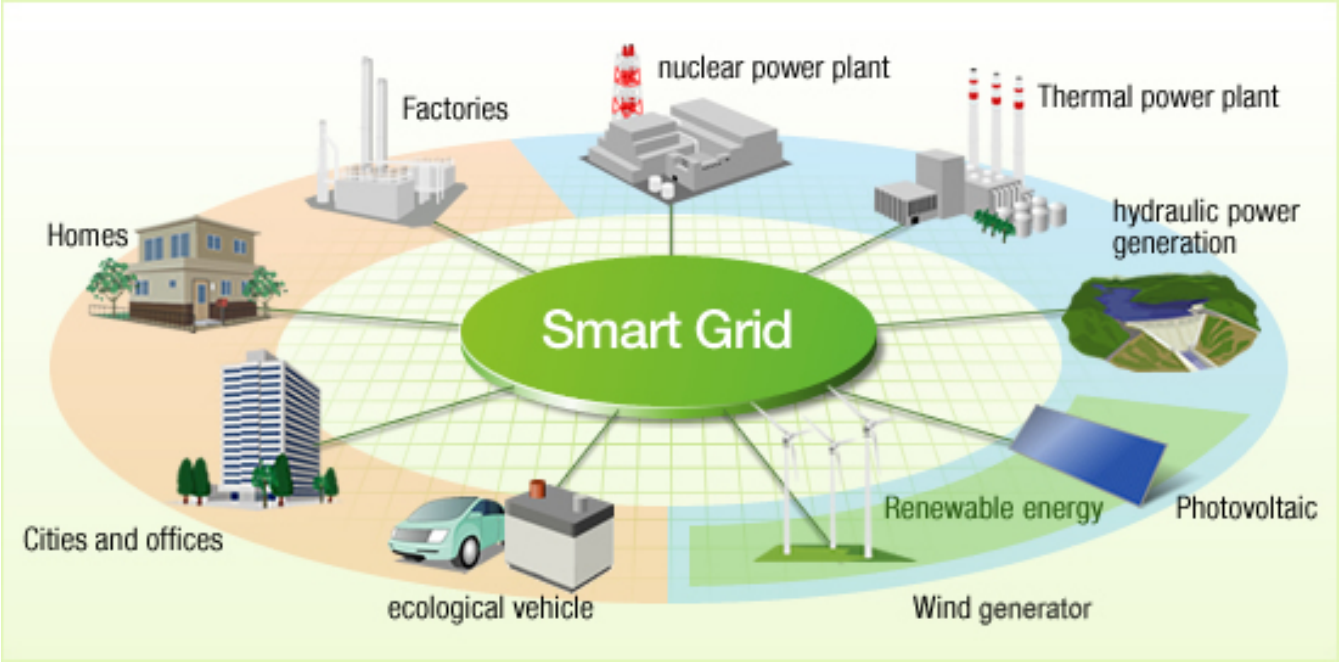
Pompe di calore (heat pumps)

Utilizzano il calore dell'ambiente esterno, attraverso un meccanismo che è l'inverso di quello di un frigorifero, con alimentazione elettrica.

Questioni cruciali: (2) Smart grids

Le ***smart grids*** sono reti intelligenti a controllo informatico che permettono di ottimizzare la distribuzione e il consumo di energia elettrica, minimizzando gli sprechi, integrando le fonti di generazione distribuita (energie rinnovabili) attraverso flussi bidirezionali e aumentando le quote di autoconsumo.

Il concetto di *smart grid* porta a ripensare completamente la rete di distribuzione elettrica, che era stata pensata per poche centrali di produzione e con flussi unidirezionali.



Vedi ad es. Smart Grid Denmark: https://www.youtube.com/watch?v=J-j5NYD-DFw

Riassumendo…

- Gli obiettivi al 2030 e al 2050 per una drastica riduzione delle emissioni di CO_2 richiedono un forte aumento della quota di energie rinnovabili e in particolare del fotovoltaico.
- Il solare fotovoltaico ha il massimo *potenziale* fra le fonti di energia rinnovabile. Le sue prospettive di crescita non sono soggette a limiti fisici, ma dipendono dalla riduzione dei costi e dallo sviluppo della rete.
- Con l'aumento delle quote di energia eolica e solare diventano sempre più rilevanti i problemi dello *storage energetico* e della struttura della rete elettrica, ossia le *smart grids*.
- Sono altrettanto importanti:

  - efficienza energetica (es. LED) e risparmio energetico
  - elettrificazione dei consumi
  - comportamenti individuali e sociali: sustainable community…
- Nella ricerca e nelle tecnologie energetiche si gioca il futuro ..!

Alcune fonti

http://www.iea.org	International Energy Agency [1]
https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it	European Commission
http://www.jrc.ec.europa.eu	Eur. Comm., Joint Research Center [3]
https://www.ise.fraunhofer.de	Fraunhofer Inst. for Solar Energy [4]
http://www.gse.it	Gestore Elettrico Nazionale [5]
http://www.terna.it	TERNA Rete Elettrica Nazionale [6]

[1] IEA World Energy Outlook
[2] Green Deal europeo
[3] EC JRC Renewable Energy and PV reports
[4] Fraunhofer ISE PV reports
[5] GSE - Impianti a fonti rinnovabili
[6] Terna annual reports