



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 AIF, 30-10-2024

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)

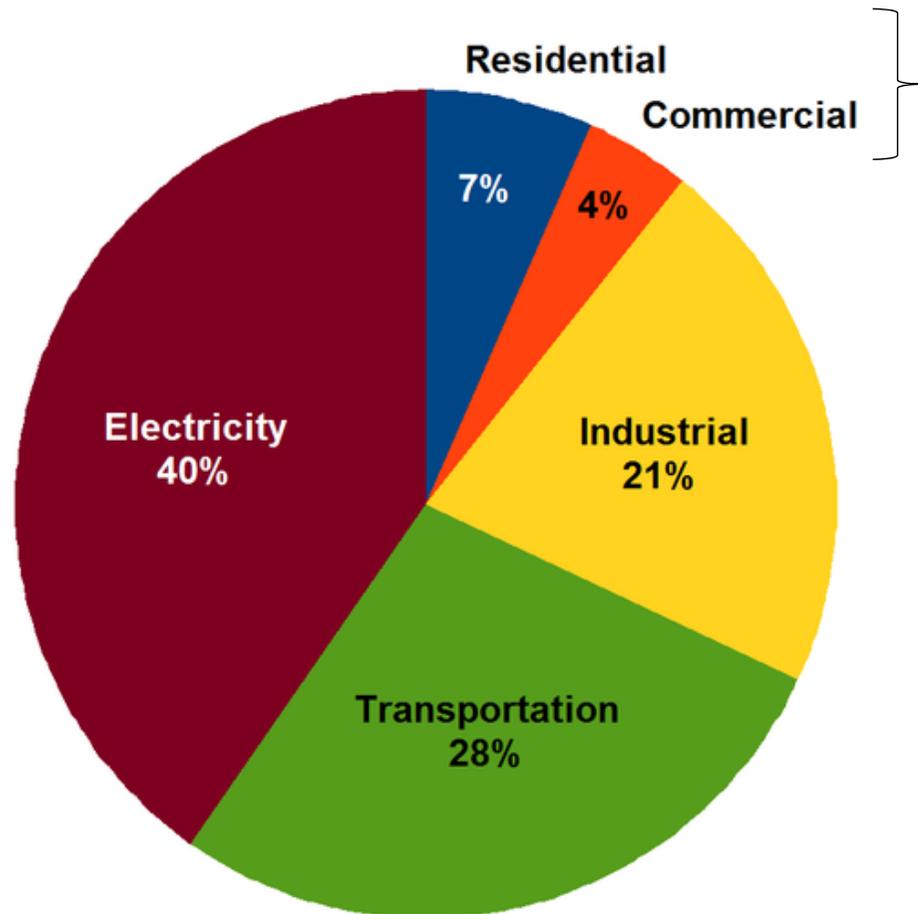
- $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Watt} \cdot 3600 \text{ s} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$
- $1 \text{ kWh} = \text{Energia necessaria per sollevare } 367 \text{ kg di } 1000 \text{ m} (=M \cdot g \cdot h)$
- Quanto lavoro può compiere una persona in 1 giorno? Un uomo che pesa 70 kg, con uno zaino di 20 kg, 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) a persona:
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 4 settori



Riscaldamento

Le fonti principali di energia rinnovabile (idroelettrico, solare fotovoltaico, eolico) producono **energia elettrica**.

Per aumentare la quota di energie rinnovabili sull'energia primaria è necessario **elettrificare** altri settori dell'economia.

Data Source: US Energy Information Agency

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

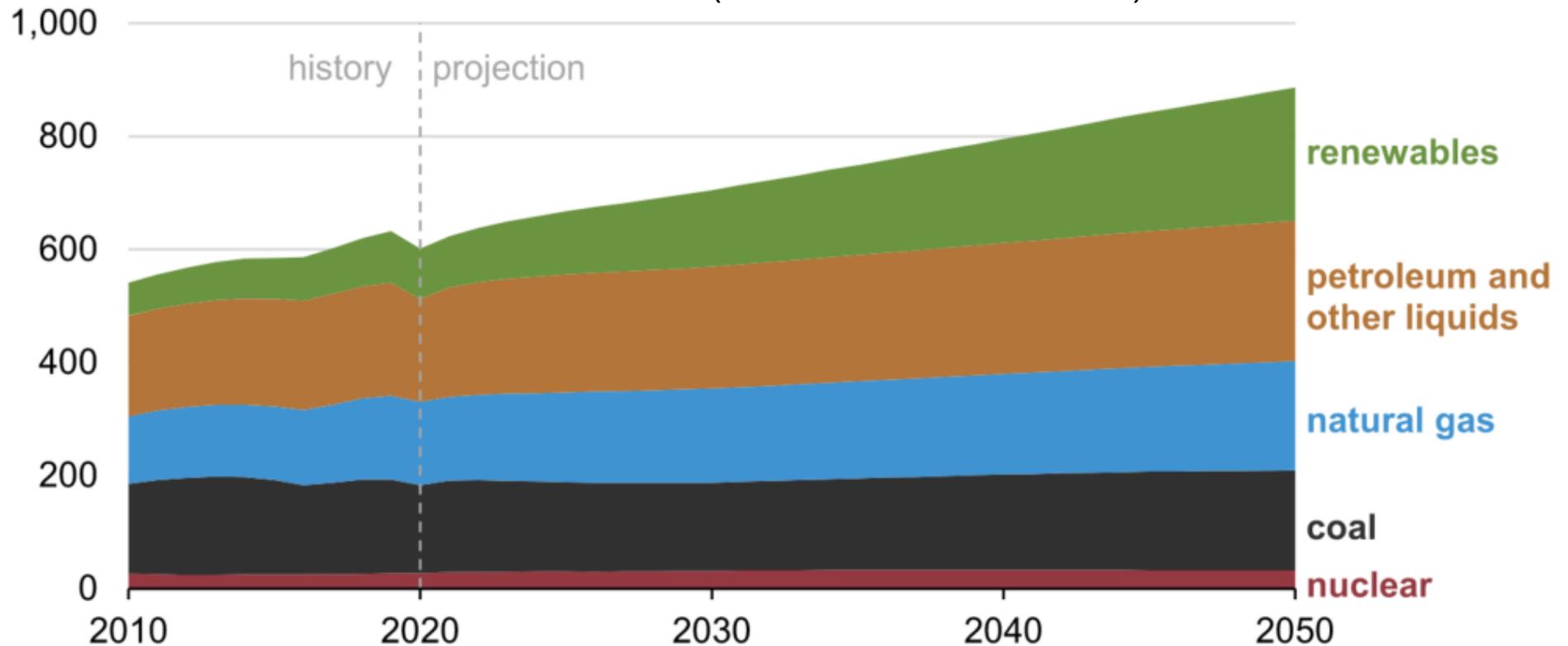
dal 2% ... al 18%

Consumo globale di energia primaria

Global primary energy consumption by energy source (2010–2050)

quadrillion British thermal units

In QBTU (1 QBTU = $1.055 \cdot 10^{18}$ J)



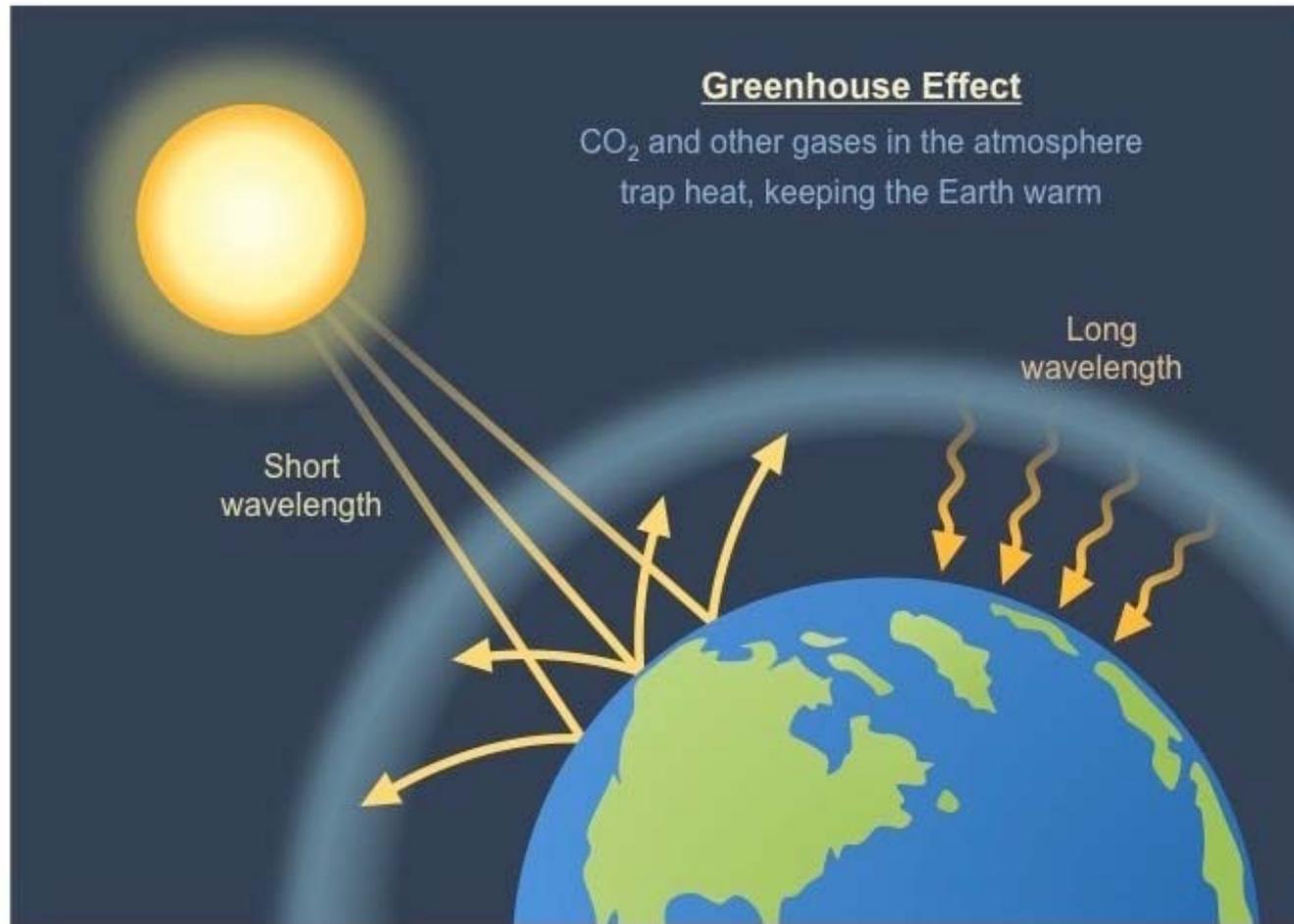
<https://www.instituteforenergyresearch.org/international-issues/eia-expects-energy-demand-to-increase-almost-50-percent-worldwide-by-2050/>

Generazione di energia elettrica/anno

All data in TWh	World*	EU**	Italy***
Coal	10648	417	14.4
Oil	753	42	10.2
Gas	6540	517	119.0
Nuclear	2765	578	---
Hydro	4249	300	42.0
Geothermal	100	13	5.7
Biomass, waste, biogas	714	116	18.4
Wind	2336	420	23.3
Solar PV	1612	200	30.7
Total generation	29863	2641	263.7
Total consumption	29863	~2641	~300
Energy/person/day (kWh)	10	16	13.7

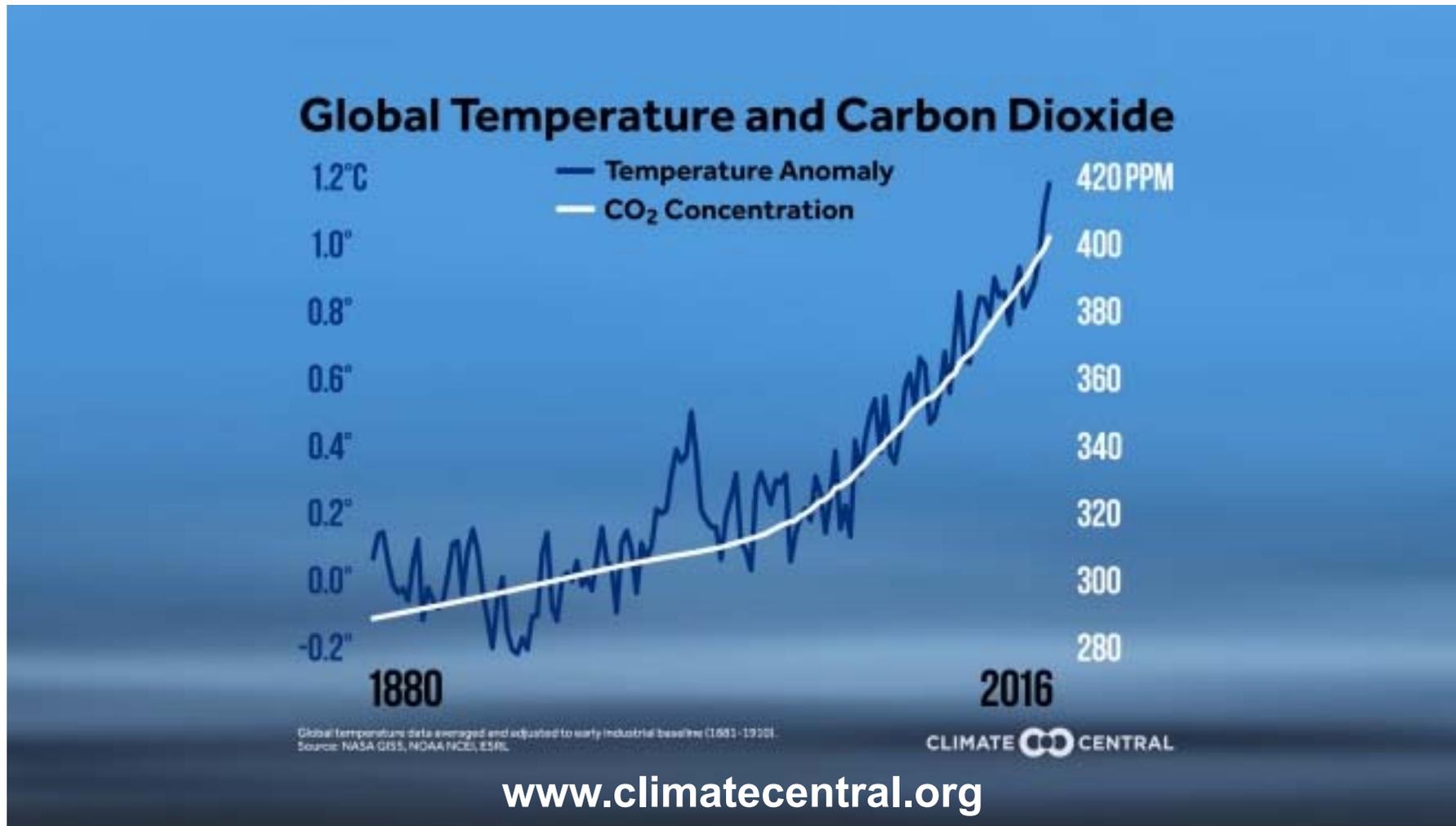
L'effetto serra

È un fenomeno naturale, dovuto alla presenza di CO_2 e altri gas nell'atmosfera, che contribuisce a trattenere parte del calore proveniente dalla radiazione solare e a rendere la Terra abitabile.



L'uso eccessivo dei combustibili fossili aumenta la concentrazione di CO_2 e può portare all'aumento della temperatura media sulla Terra.

CO₂ e aumento della temperatura globale

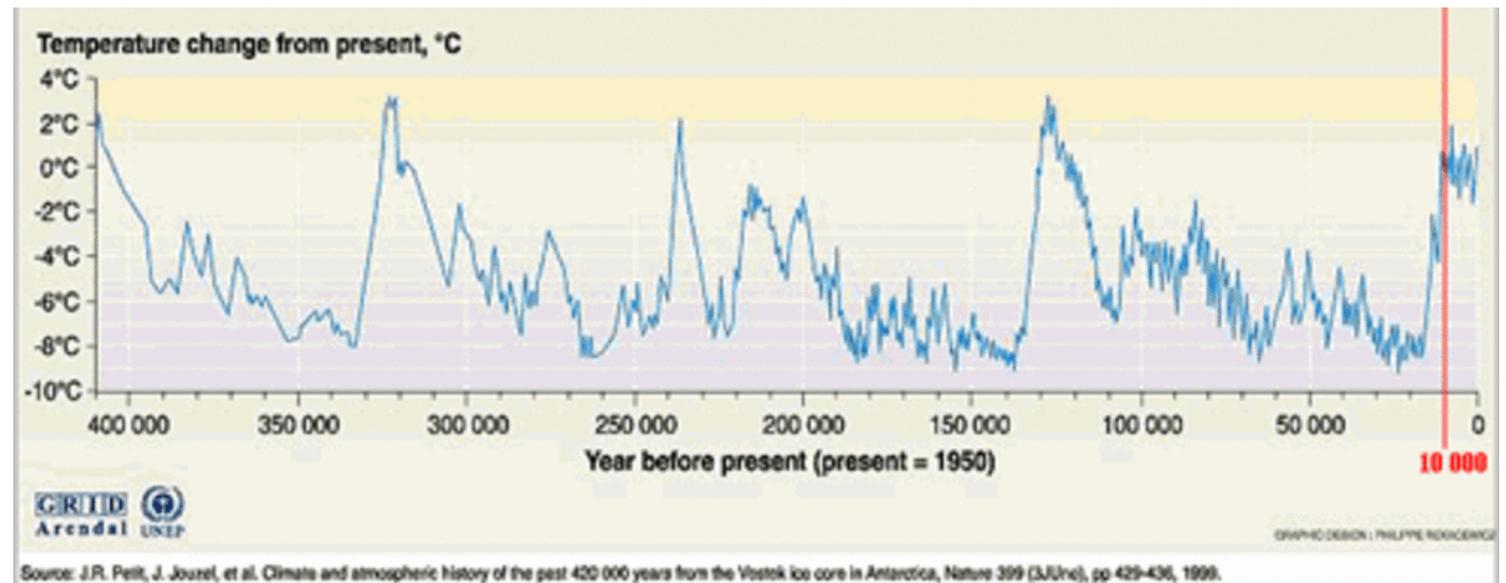
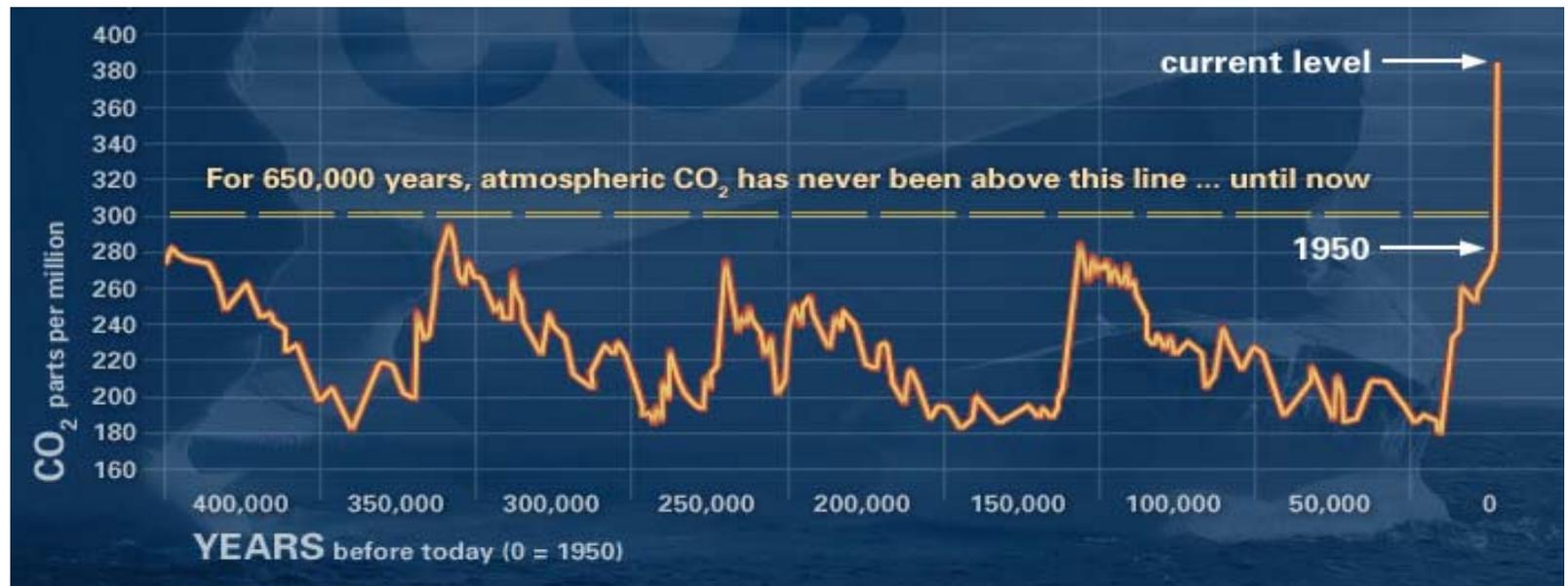


La temperatura globale è aumentata di ≈ 1 °C rispetto ai livelli pre-industriali. Questo è correlato alle emissioni di CO₂, dovute soprattutto all'uso dei combustibili fossili.

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

E rispetto agli ultimi 400'000 anni?

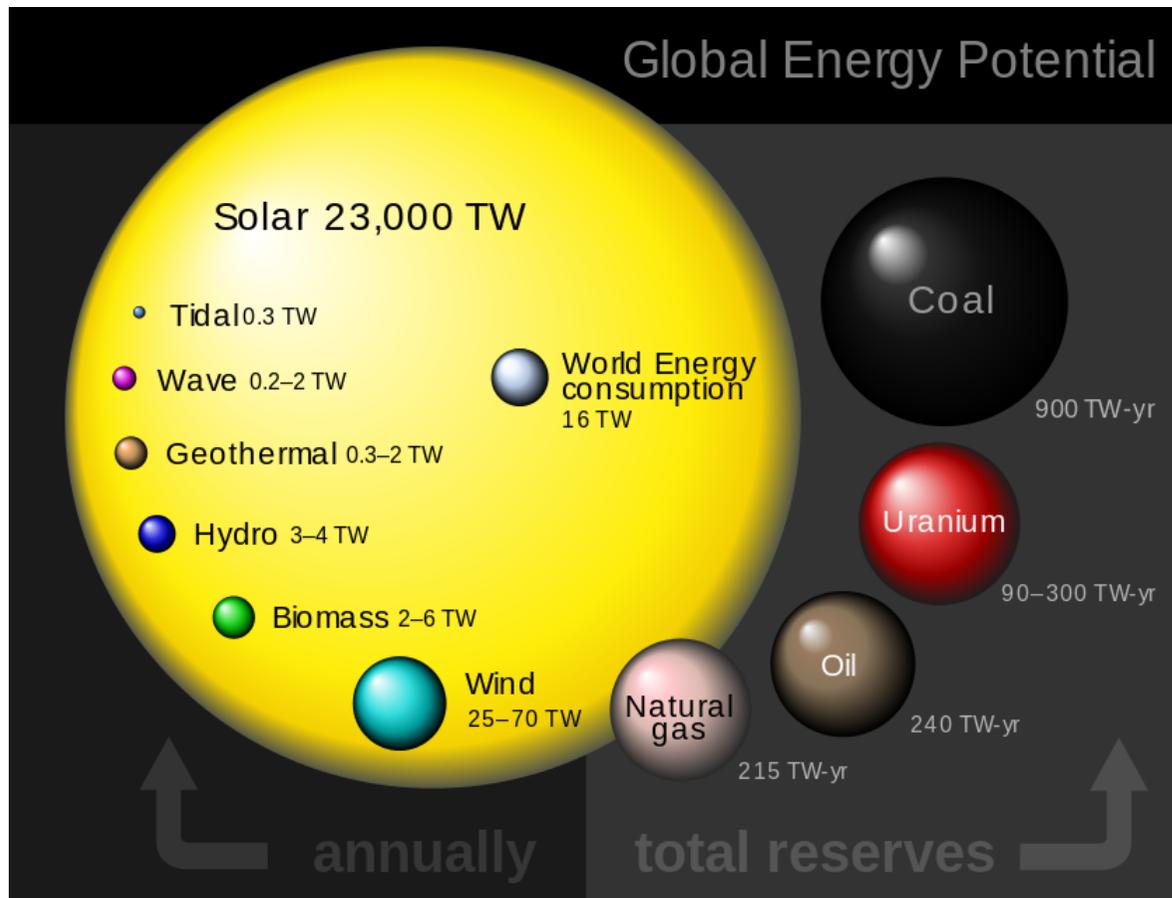
La concentrazione di CO₂ nell'atmosfera ha continuato a fluttuare... ma non aveva mai superato il livello di 300 ppm, e l'aumento rapido negli ultimi 70 anni è chiaramente correlato alle attività umane.



Risorse energetiche: il potenziale

Energie rinnovabili

Combustibili fossili
e nucleare



Fra le fonti di energia rinnovabile, il potenziale maggiore è dato dall'**energia solare**, seguita dall'**energia eolica** (vento).

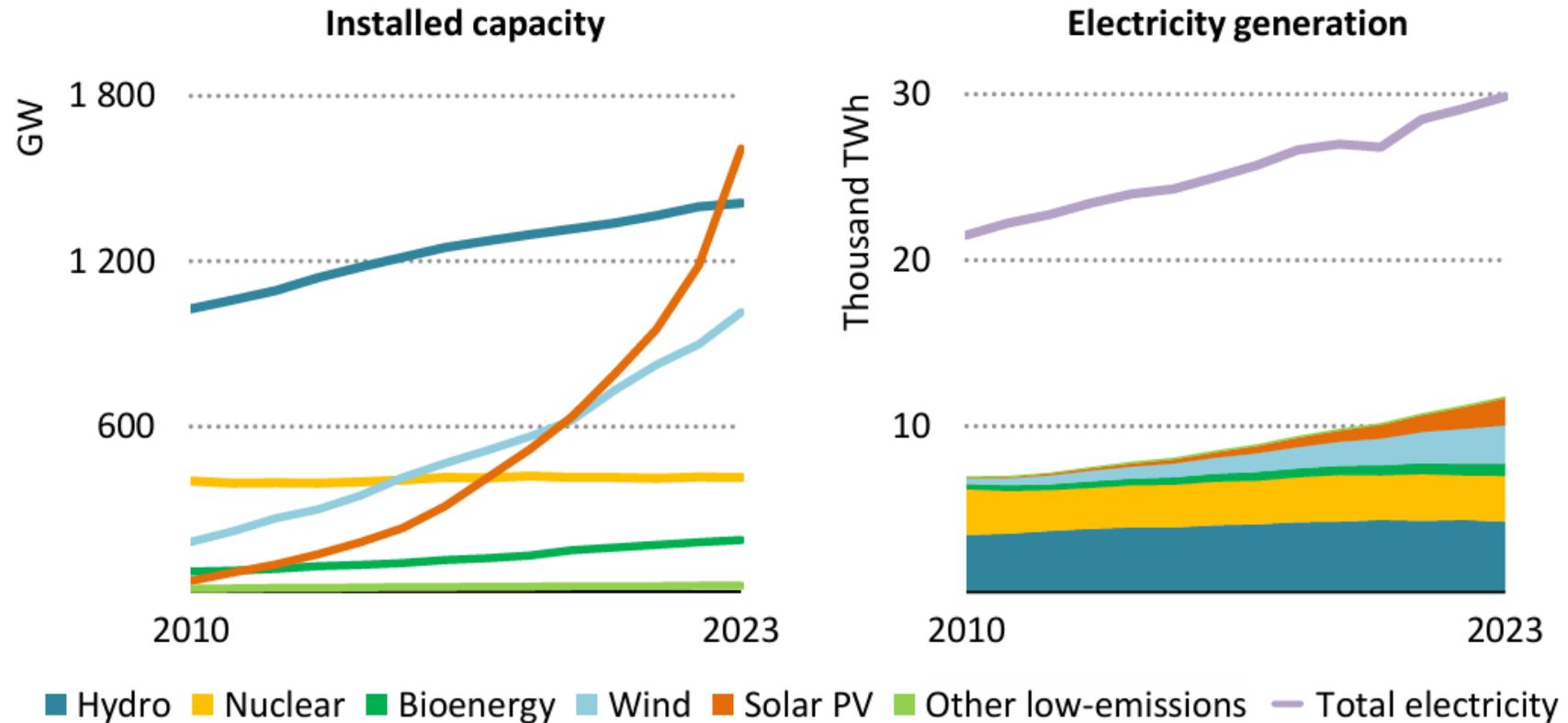
Tuttavia si tratta di fonti di energia **intermittenti**. Il loro uso richiede dunque

- mix energetico (con fonti fossili e nucleare)
- sistemi di stoccaggio
- smart grids.

Idroelettrico, biomasse (+ geotermico, maree, onde...) sono in parte già sfruttati e hanno potenziale inferiore.

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

Global installed clean power capacity and electricity generation, 2020-2023



IEA. CC BY 4.0.

Since 2010, installed capacity of solar PV expanded 40-fold, wind 6-fold, bioenergy 2.5-fold and hydro 1.4-fold, but electricity demand increased faster than clean power generation

IEA World Energy Outlook, 2024

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

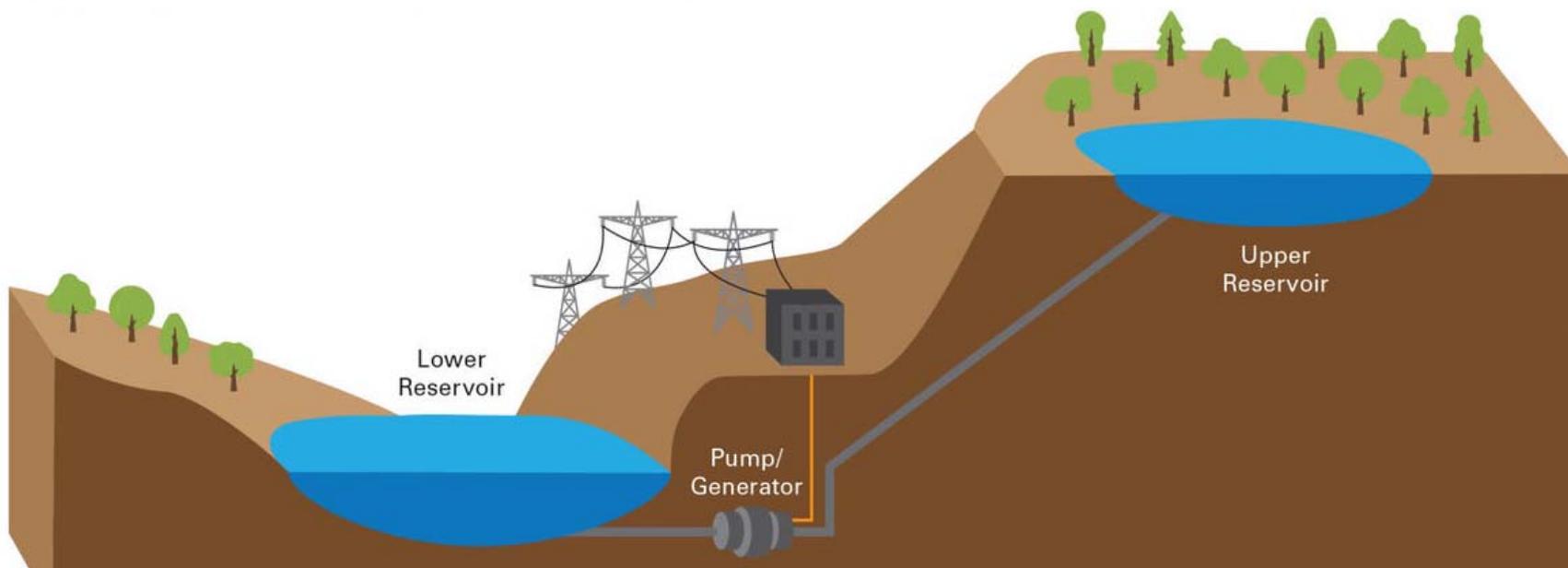
Energia idroelettrica

- 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.

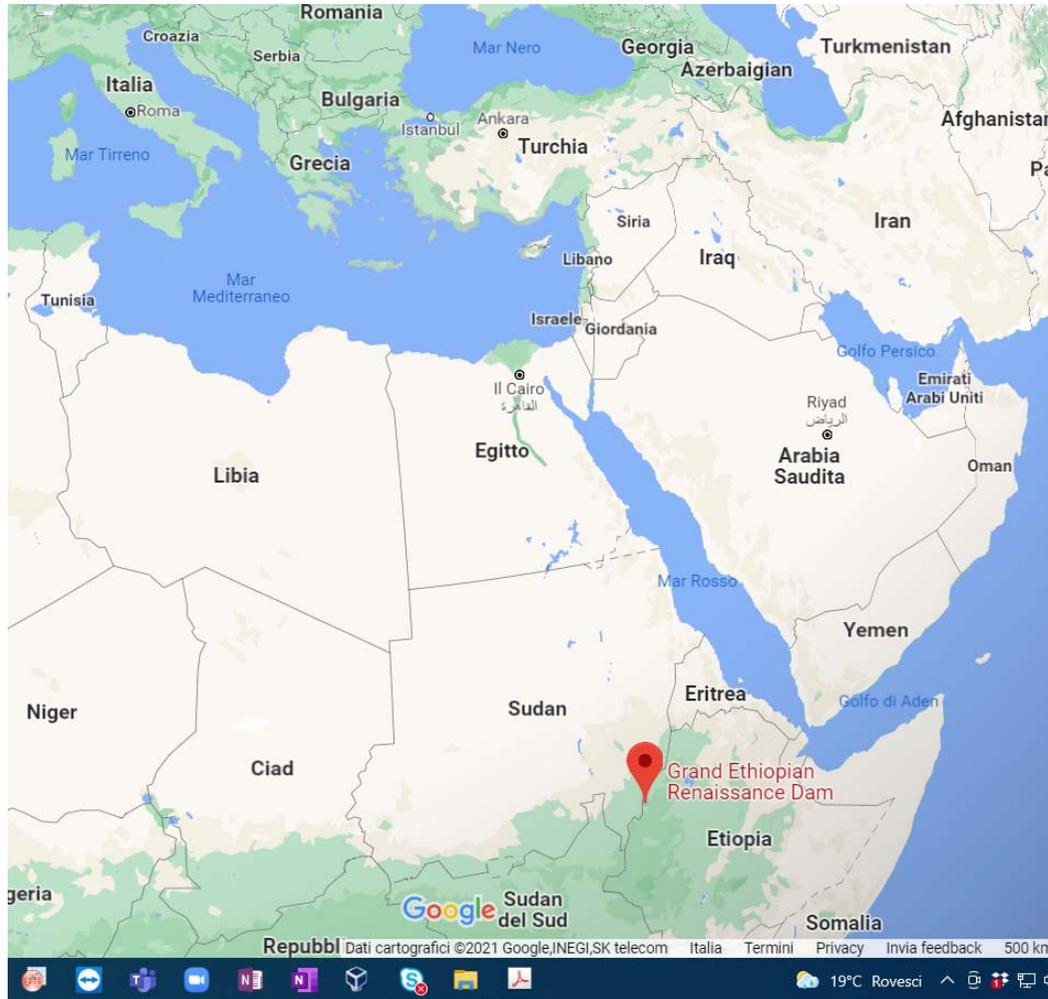


Energia idroelettrica e stoccaggio

- Nell'Unione Europea, l'energia idroelettrica contribuisce alla produzione di energia elettrica per circa il 12% (in Italia il 16%).
- 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*).



Grand Ethiopian Renaissance Dam



In costruzione dal 2011, ha l'obiettivo di fornire 6.45 GW di potenza elettrica sfruttando la caduta d'acqua sul corso del Nilo e dando all'Etiopia l'indipendenza energetica.

Il riempimento del bacino è iniziato nel 2020 e potrà durare fino a 7 anni. Sarebbe la più grande opera idroelettrica in Africa e la no.7 al mondo.

La diga è fonte di forti contrasti regionali fra Etiopia, Egitto e Sudan, in quanto potrebbe modificare fortemente – e ridurre – la portata d'acqua del Nilo e la produzione di energia idroelettrica in Egitto.

Le grandi centrali idroelettriche hanno un notevole impatto ambientale in quanto incidono sull'uso delle acque oltre i confini regionali e nazionali

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:

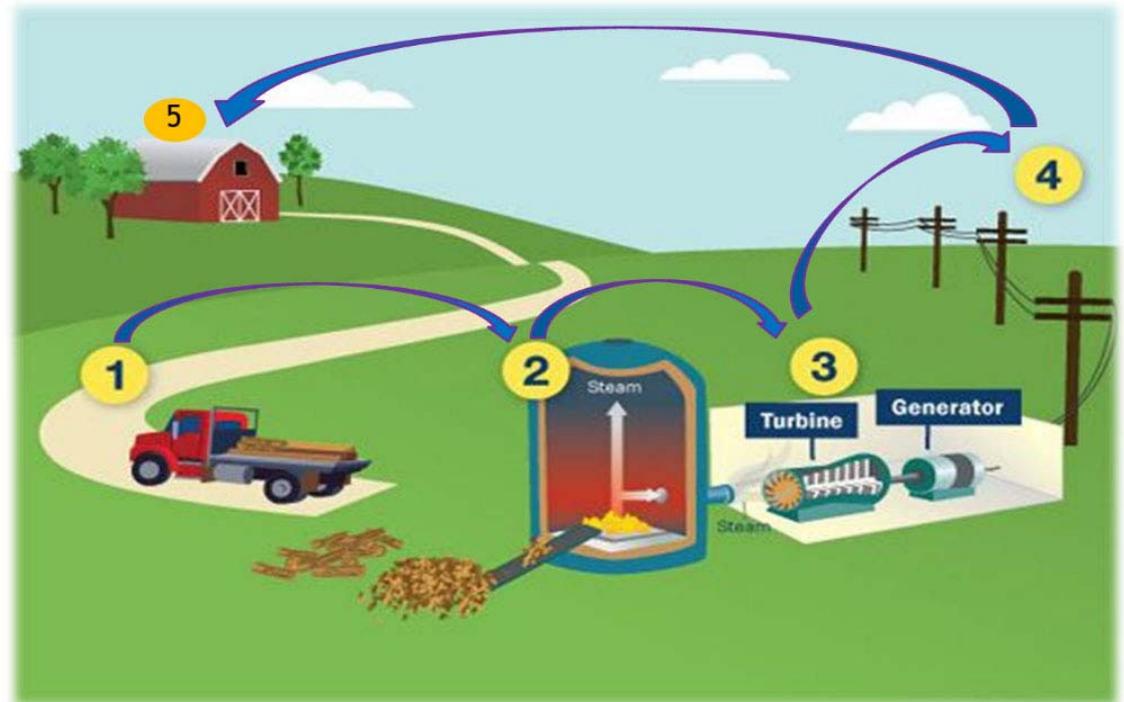
1) Bio-elettricità

2) Riscaldamento

3) Biocarburanti

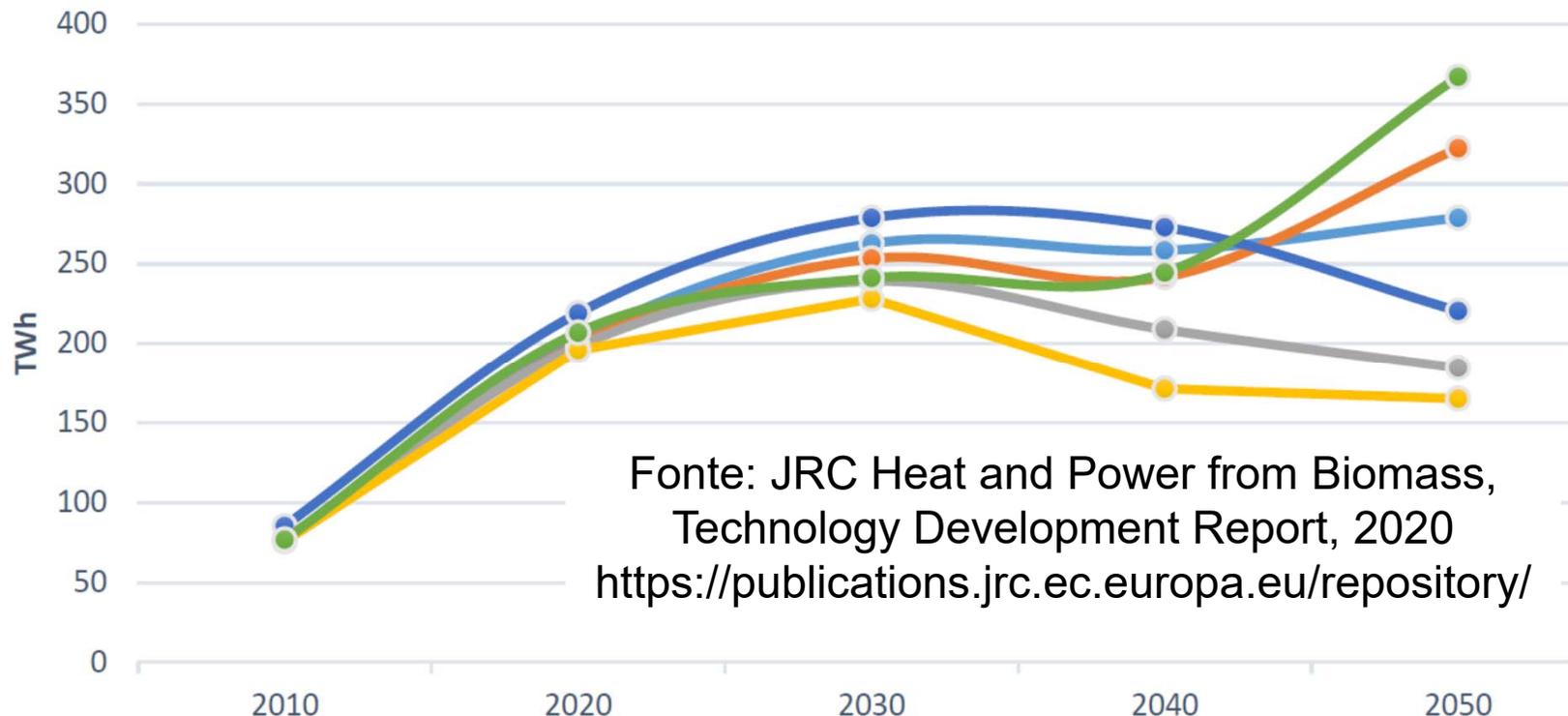
Vi sono aspetti ambientali molto positivi legati al riutilizzo degli scarti agricoli e dei rifiuti.

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



Elettricità da biomasse

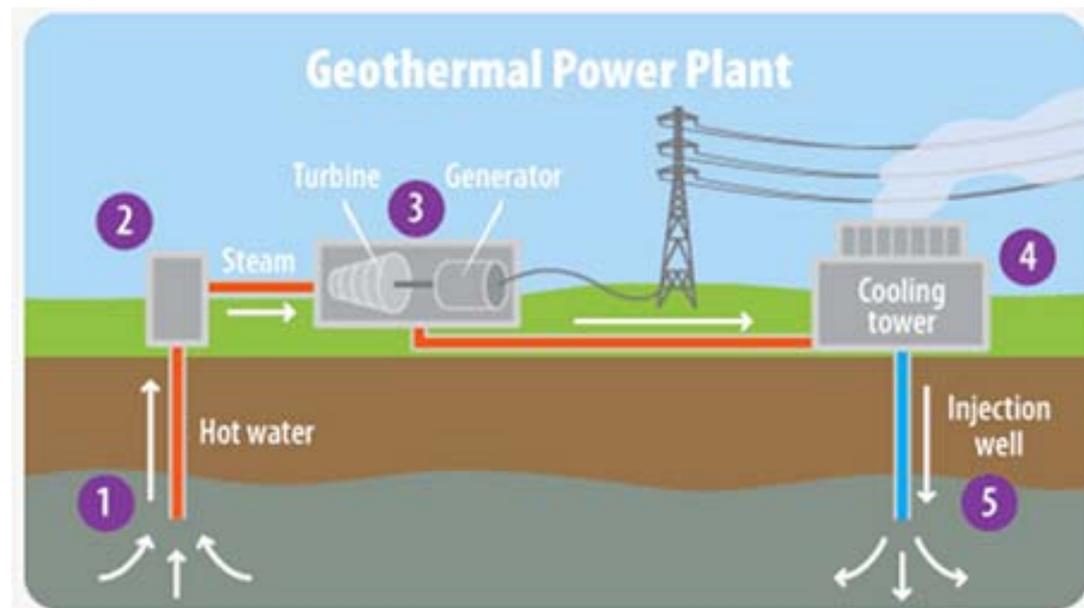
- La bio-elettricità ha il vantaggio che la bio-massa può essere immagazzinata, generando l'elettricità su richiesta.
- E' possibile recuperare parte del calore prodotto nella combustione mediante impianti di co-generazione.
- Nel 2020 la generazione di bio-elettricità in EU è di ~200 TWh (~6% della 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 0.5% dell'energia elettrica prodotta in Europa. Le possibilità di sviluppo sono ristrette ad alcune zone, globalmente sono molto limitate.



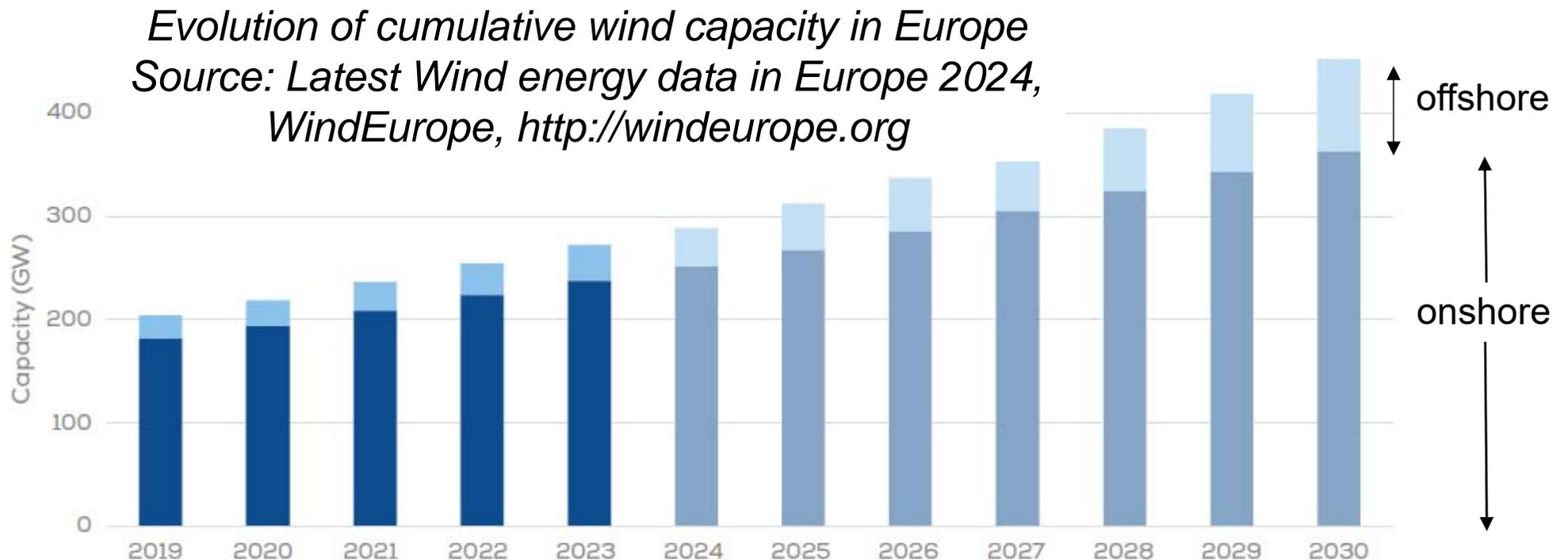
Energia dal vento

- Il vento muove eliche o pale collegate ad una turbina per la generazione di energia elettrica.
- L'energia eolica è rinnovabile, pulita, a basso costo (0.04 €/kWh). Può essere prodotta a terra oppure off-shore.
- Ha un impatto visivo e di occupazione dello spazio non trascurabile.



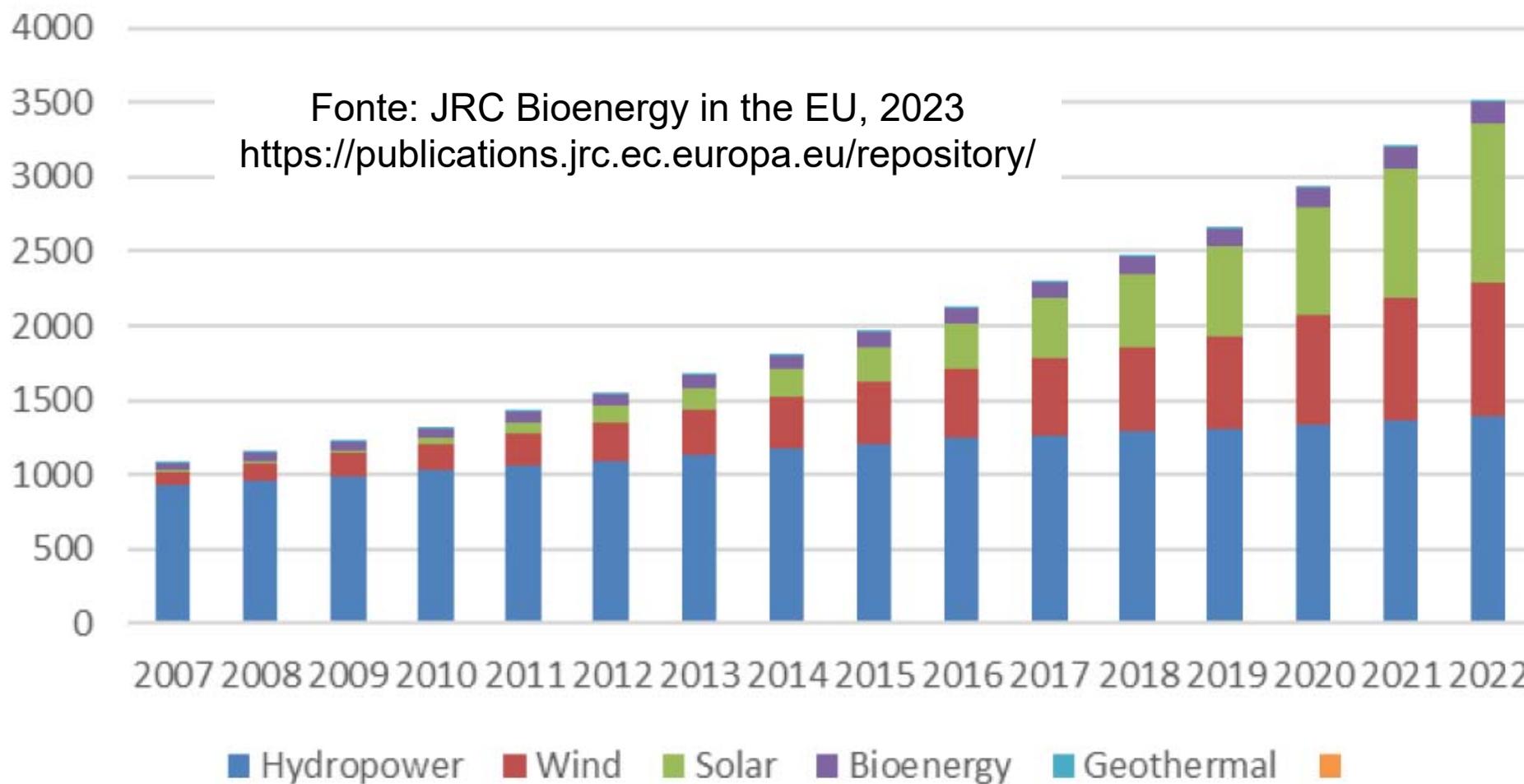
Energia dal vento

- La capacità di energia eolica installata in Europa nel 2023 è di circa 280 GW, per una produzione annua di ~620 TWh di elettricità (circa il 16% 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.



Evolution of renewable energy capacity in the world

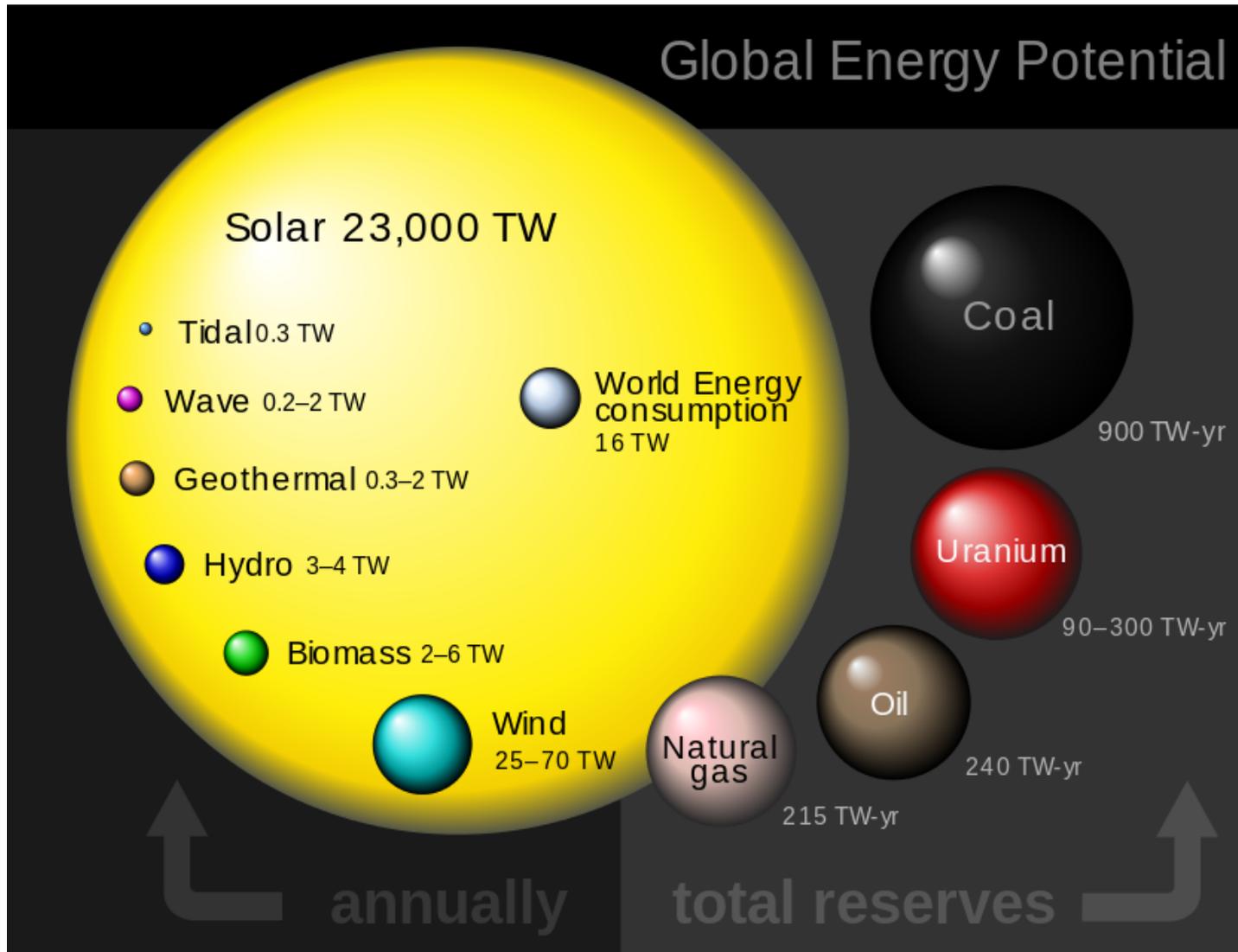
Renewable Power Capacity [GW]



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)



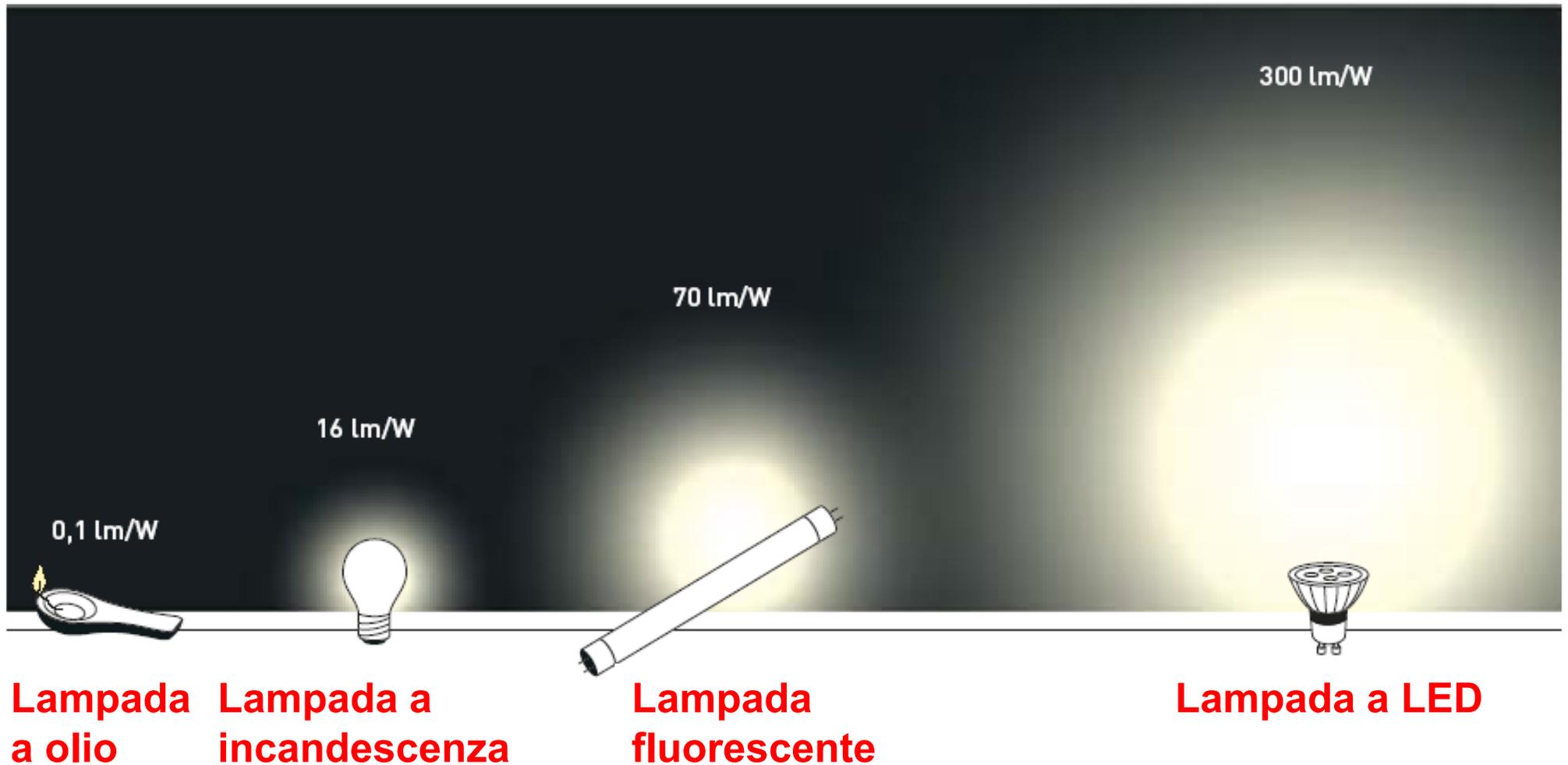
⇒ *illuminazione e risparmio energetico*

Celle fotovoltaiche



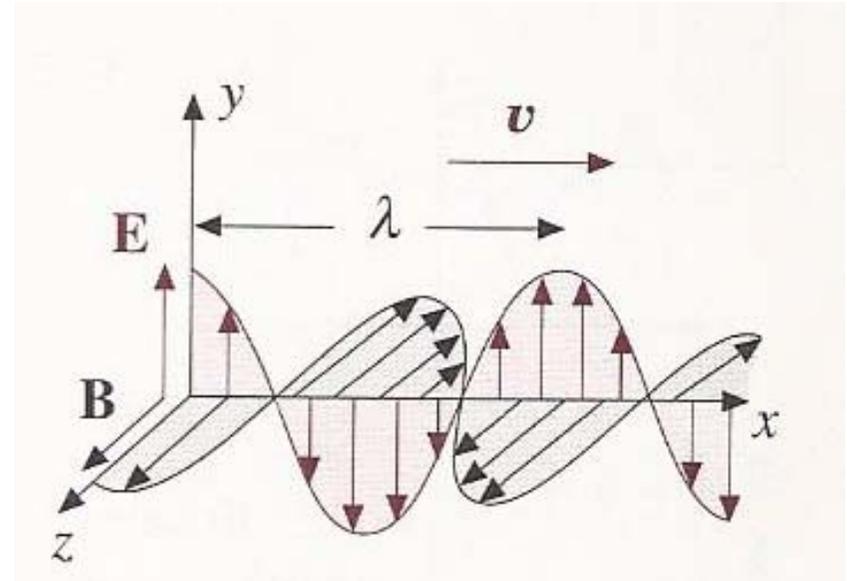
⇒ *energia elettrica da fonte rinnovabile*

Efficienza luminosa



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 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 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) = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ Volt} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

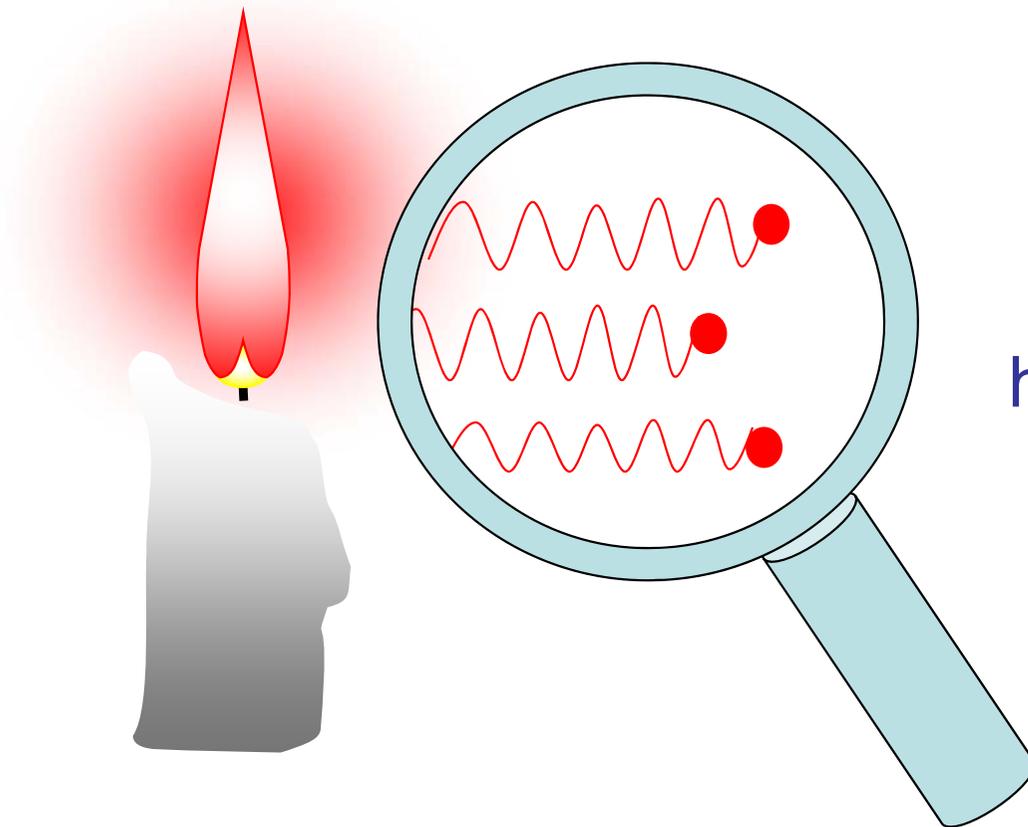
$E \text{ (eV)} = 1240/\lambda \text{ (nm)}$

Quantizzazione 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):

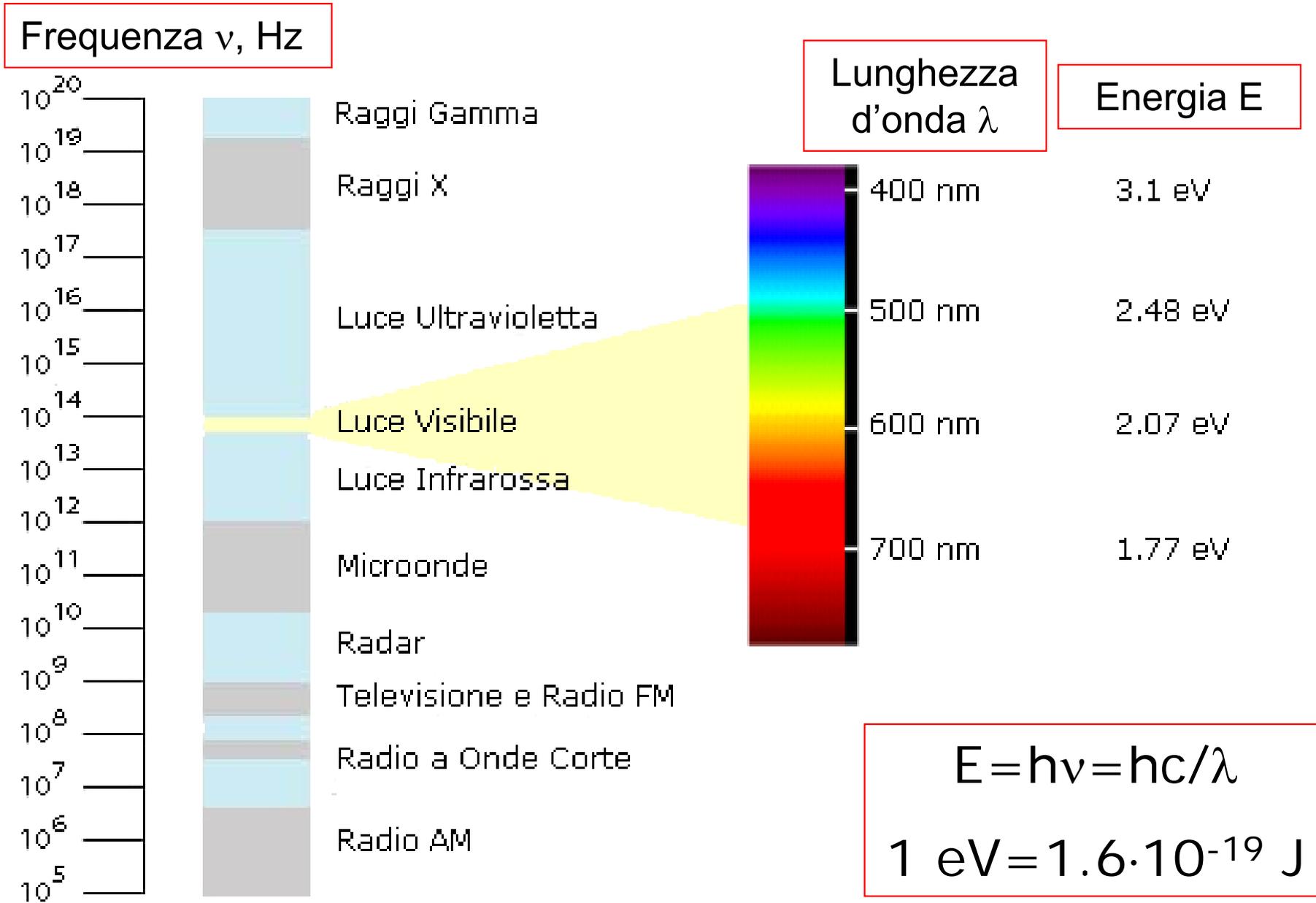
$$E = h\nu = hc/\lambda$$

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



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

Lo spettro delle onde elettromagnetiche

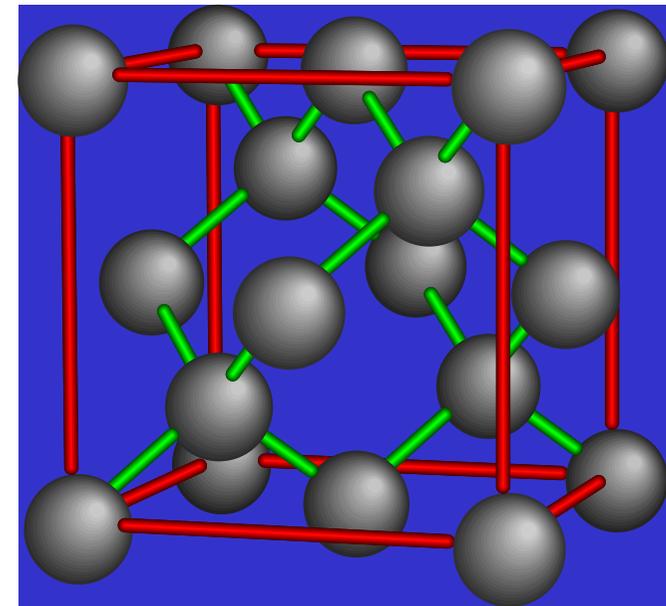


I semiconduttori: struttura cristallina

Tavola periodica

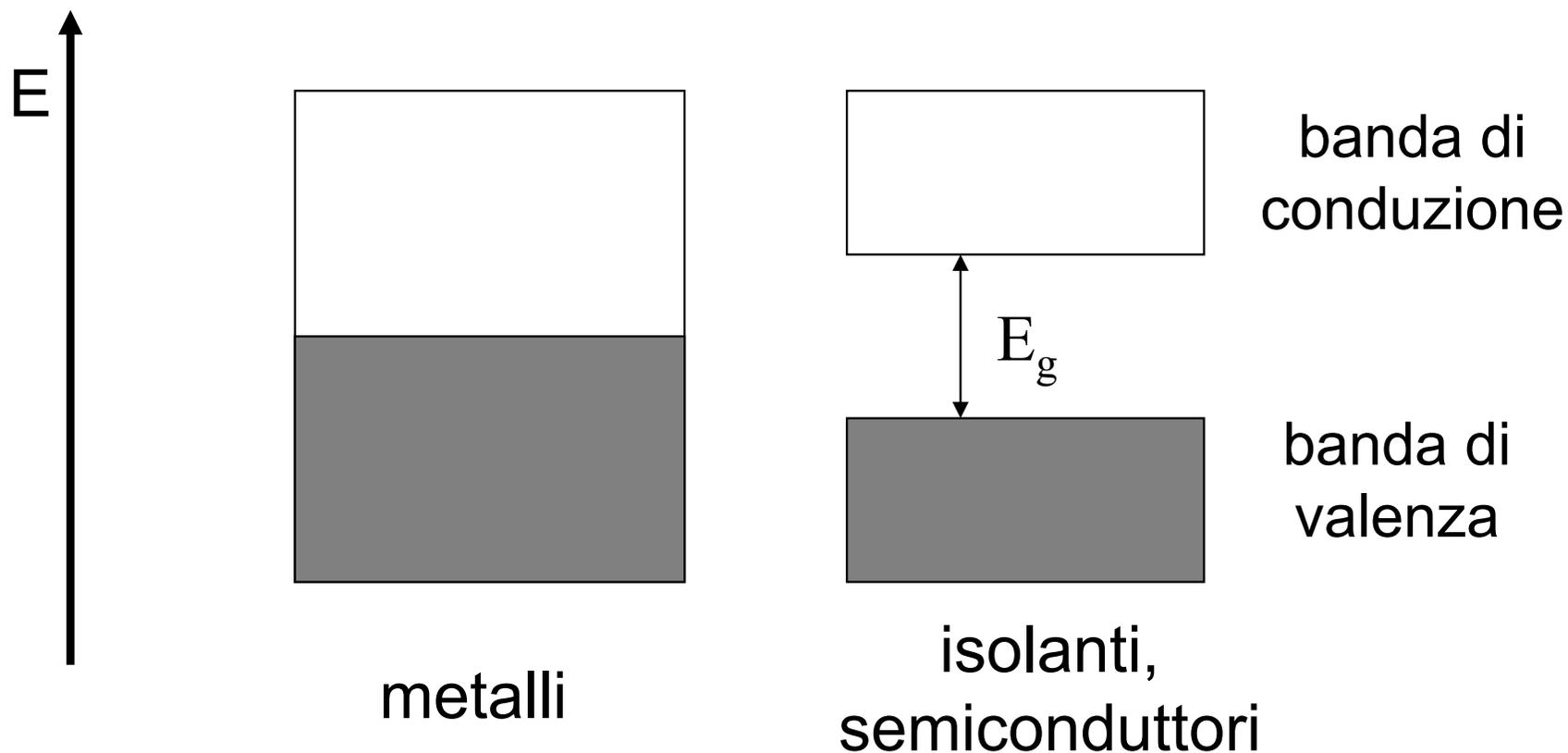
			III	IV	V	VI
			5 B	6 C	7 N	8 O
			13 Al	14 Si	15 P	16 S
IB	IIB					
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	

Cella elementare (Si)



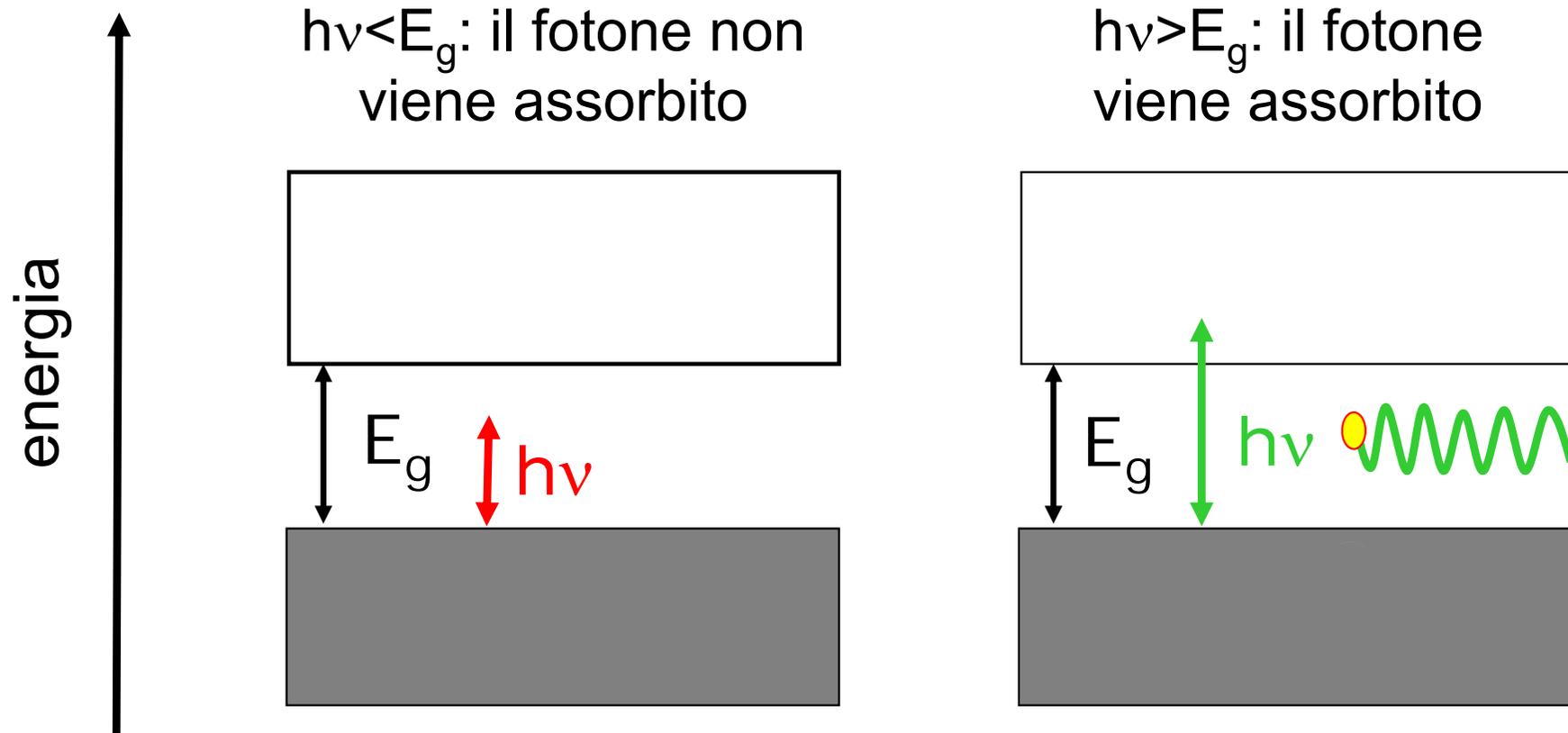
I semiconduttori (monoatomici gruppo IV, binari III-V e II-VI) sono caratterizzati da un gap di energia piccolo, generalmente $E_g < 4$ eV.

Elettroni nei solidi, bande di energia



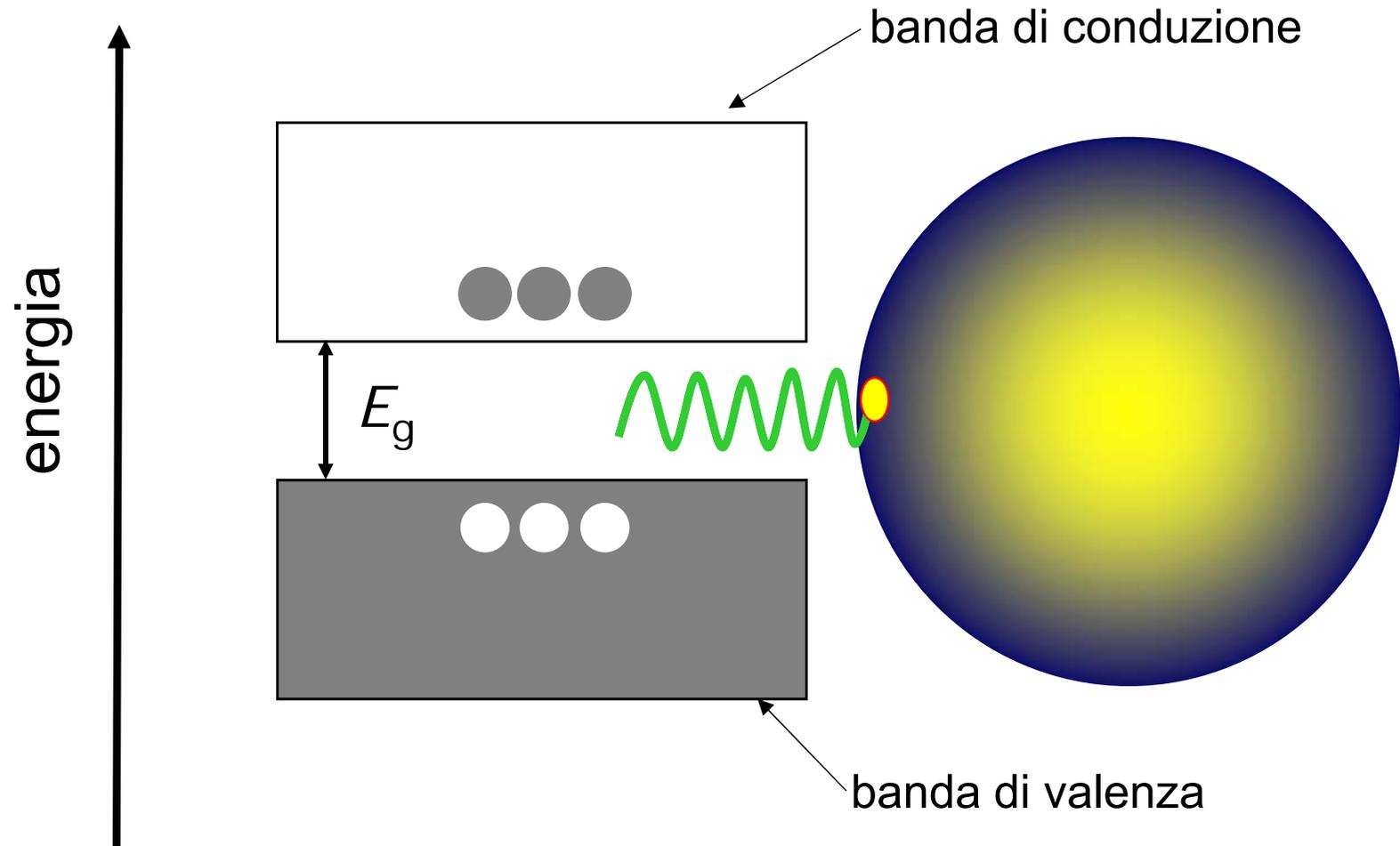
Gli elettroni nei solidi sono caratterizzati da regioni di energia permesse, dette *bande di energia*, e regioni di energia proibite dette *gap di energia*. Gli elettroni occupano i livelli di energia partendo dal più basso, secondo il *principio di esclusione di Pauli*.

Gap di energia e assorbimento ottico



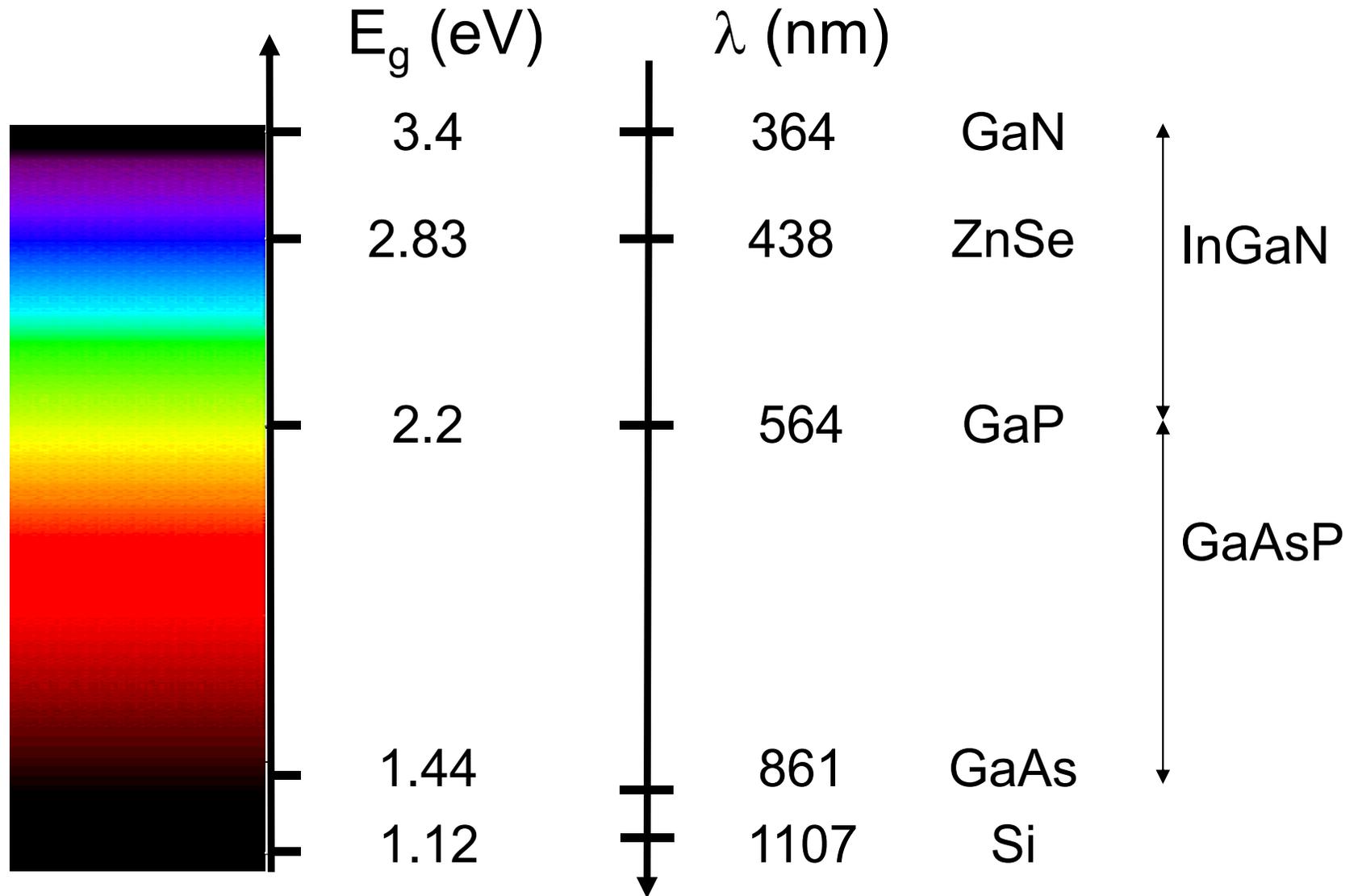
Il gap di energia determina la soglia di assorbimento secondo la relazione $E_g = h\nu = hc/\lambda$. L'esistenza di una soglia di assorbimento indipendente dall'intensità della luce è un fenomeno di natura quantistica, analogo all'effetto fotoelettrico. Si generano così *portatori di carica*, ossia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

Emissione di luce in semiconduttori



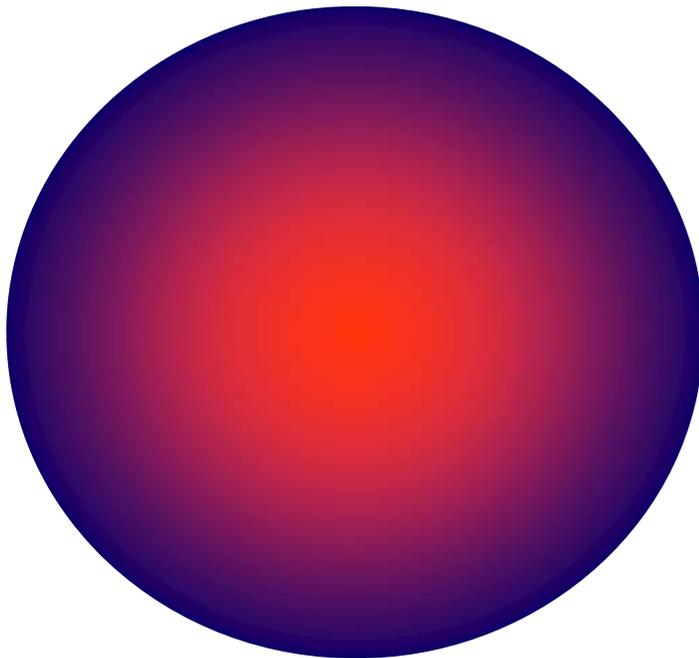
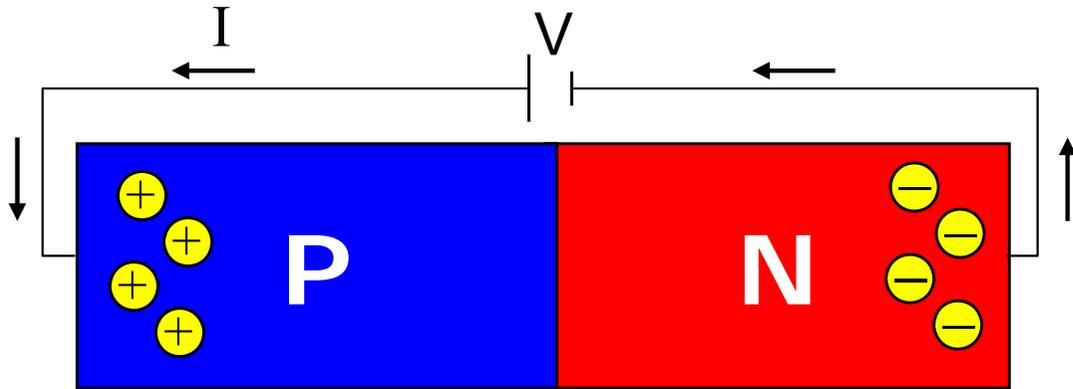
Elettroni e lacune possono ricombinare radiativamente emettendo fotoni con energia $h\nu = E_g \rightarrow$ *luminescenza*

Gap di energia e luce visibile

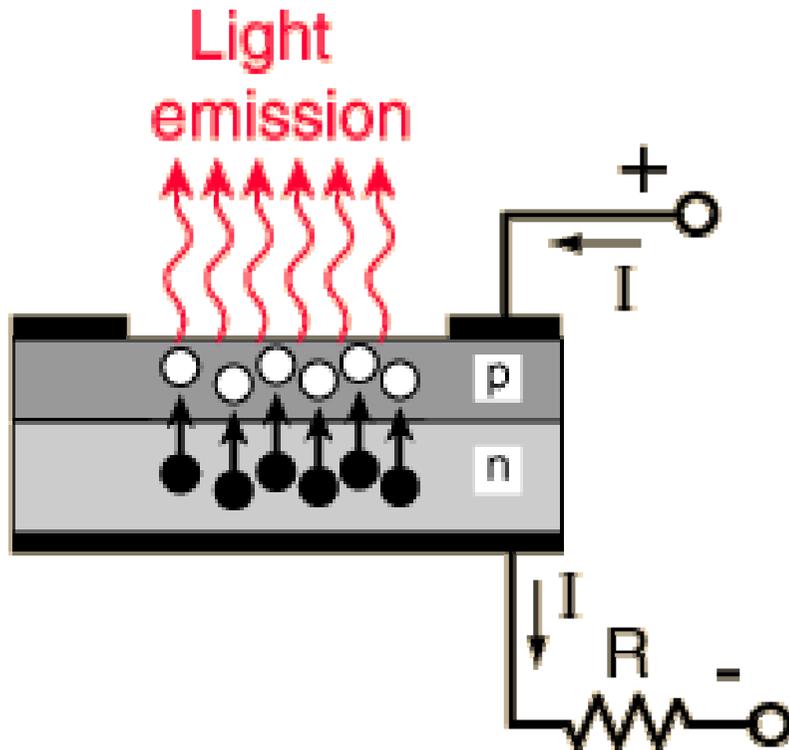


Utilizzando semiconduttori binari e le loro leghe è possibile ottenere emissione/assorbimento di luce in tutto lo spettro visibile

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



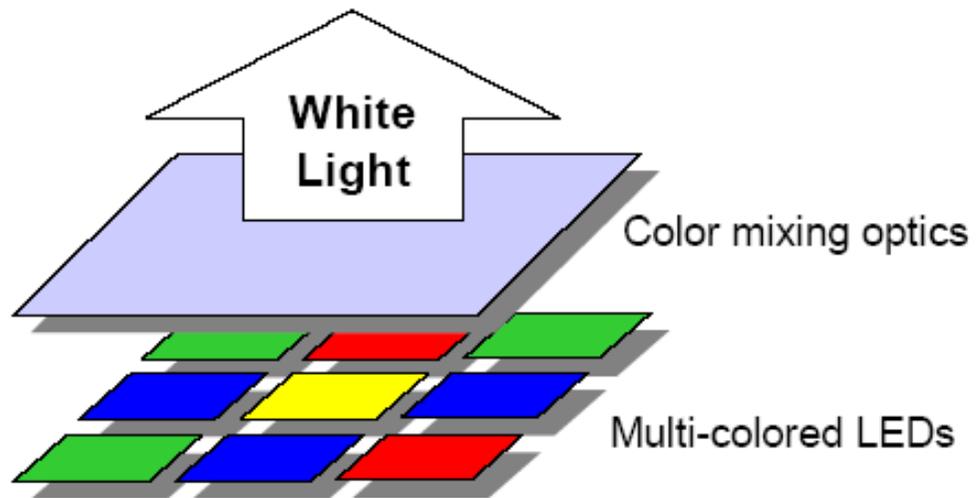
LED (Light Emitting Device)



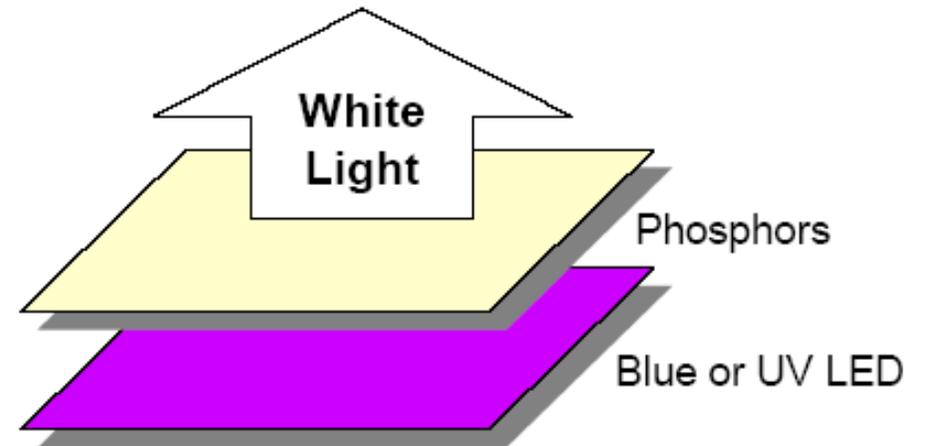
Il colore, ossia la lunghezza d'onda della luce emessa, dipende dal gap di energia del materiale semiconduttore secondo la relazione

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

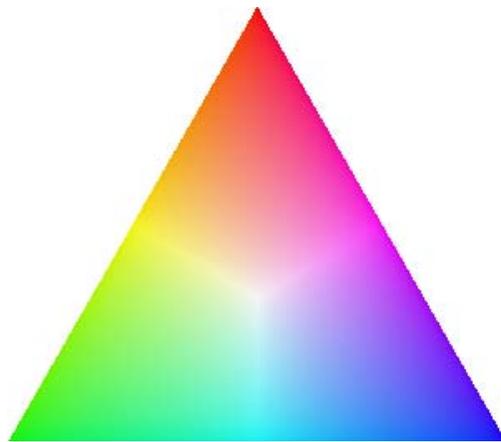
LED a luce bianca



LED RGB (Red-Green-Blue)



LED a fosfori

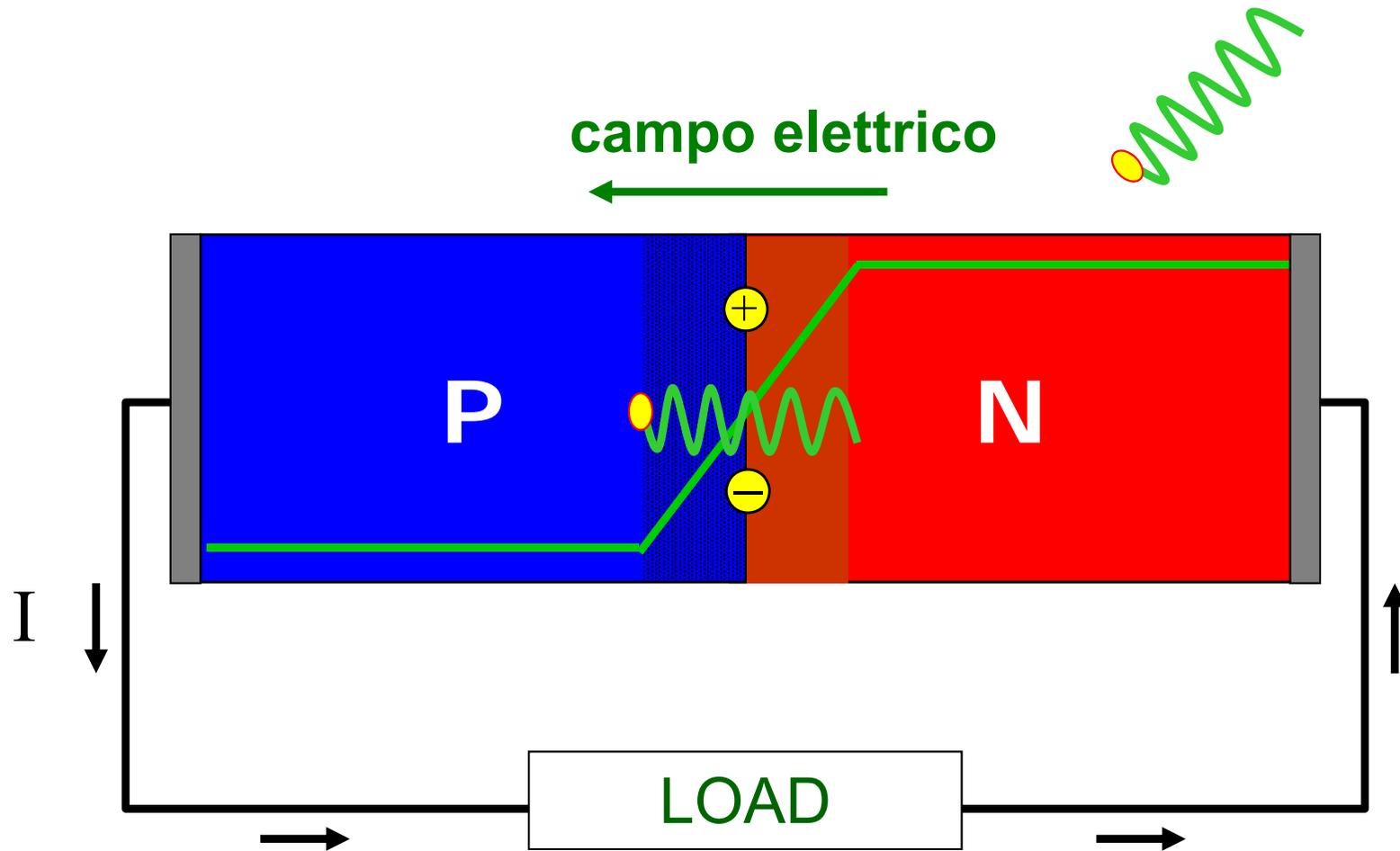


il "triangolo dei colori"



L'illuminazione a LED permette un notevole risparmio energetico

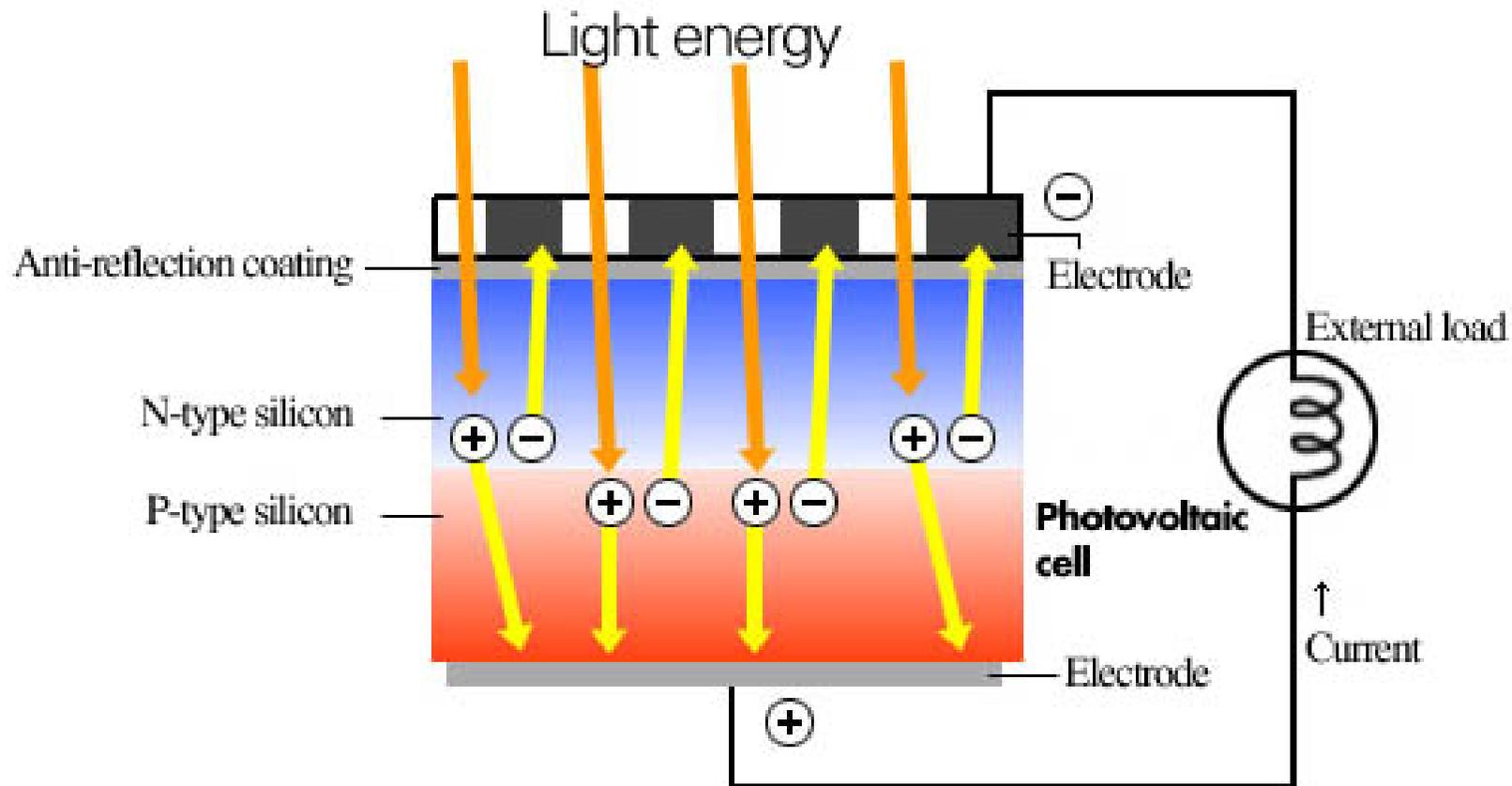
Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata



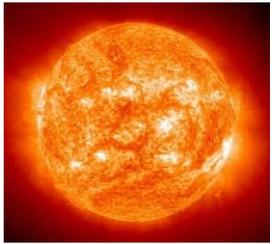
Una cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED: quando viene illuminata, i fotoni di energia $h\nu > E_g$ vengono assorbiti e si produce una corrente che ha il verso della corrente inversa del diodo

Solare fotovoltaico

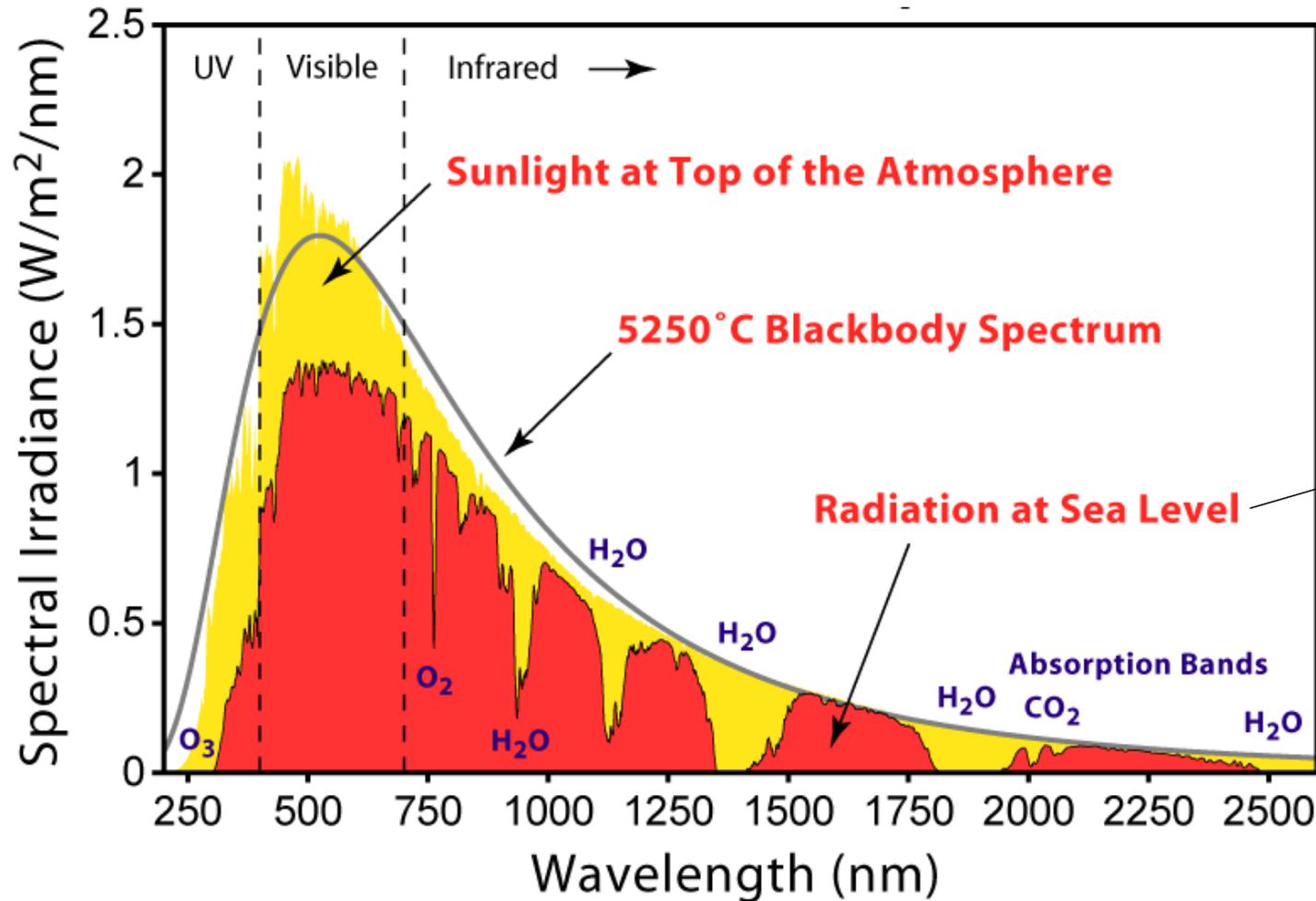
La conversione fotovoltaica dell'energia solare si basa sull'assorbimento di luce in una giunzione p-n di semiconduttori.



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



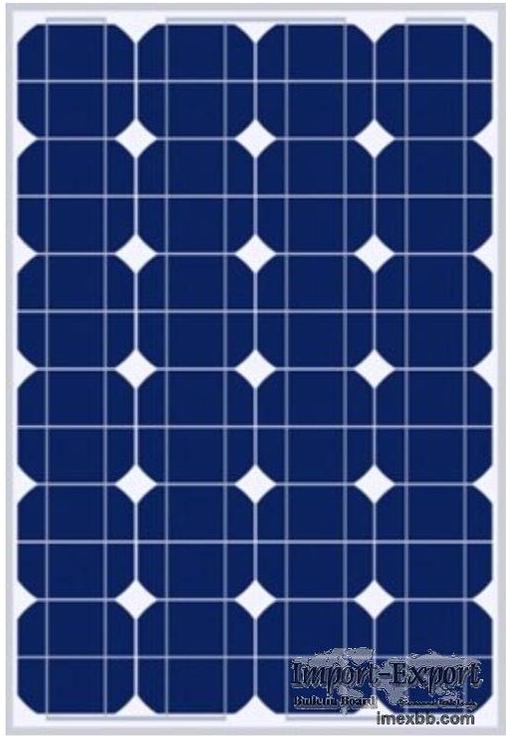
La radiazione elettromagnetica emessa dal Sole ha lo spettro simile a quello di un **corpo nero** alla temperatura $T=5800 \text{ K}$

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

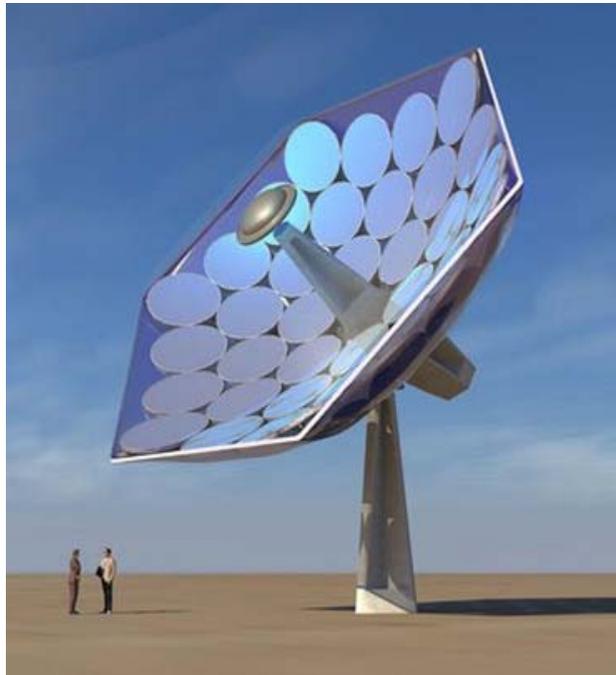
Main photovoltaic technologies

Silicon (wafer-based)
photovoltaics



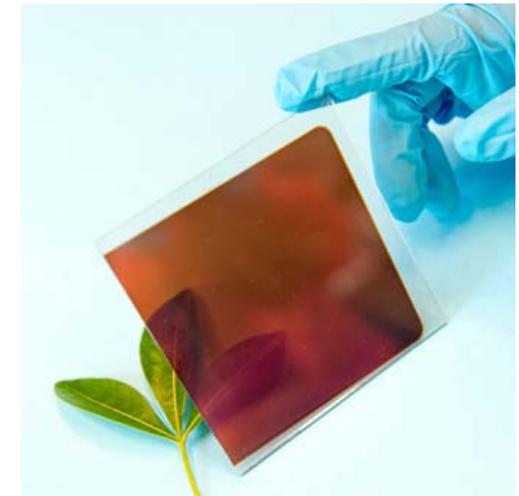
Mono- and poly c-Si:
~94% of global
photovoltaic market

Multijunction and
concentration photovoltaics



Multijunctions of III-V
semiconductors:
satellites, CPV

Thin-film photovoltaics



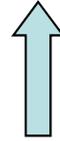
CdTe, CuInGaSe₂,
perovskites, organics

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

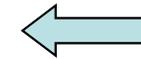
Il silicio: dalla sabbia ai micro-processori



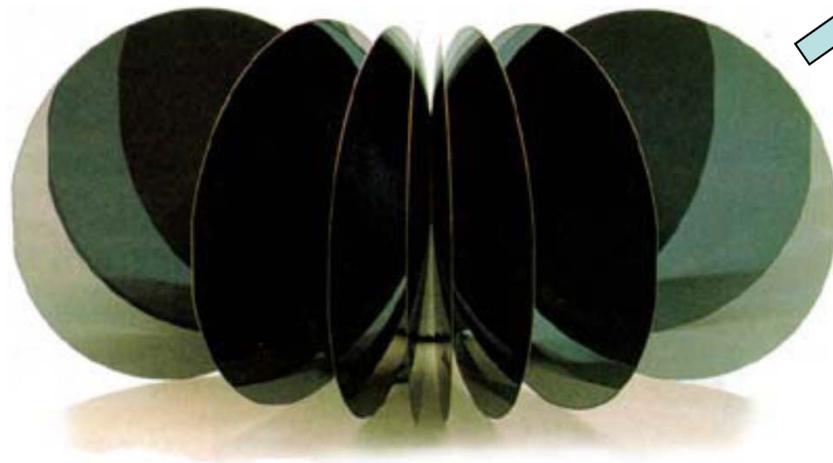
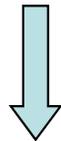
Lingotto



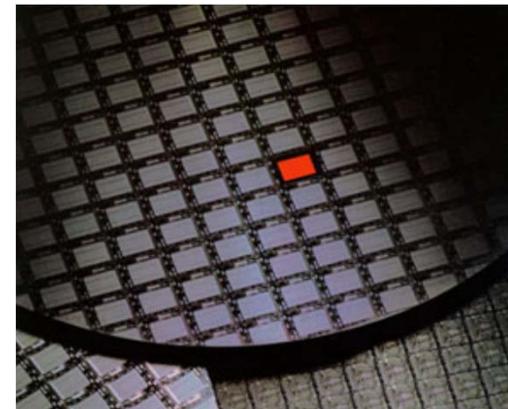
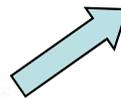
Silicio ultra-puro



Wafer

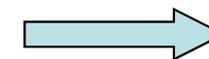


Chip



Cella solare

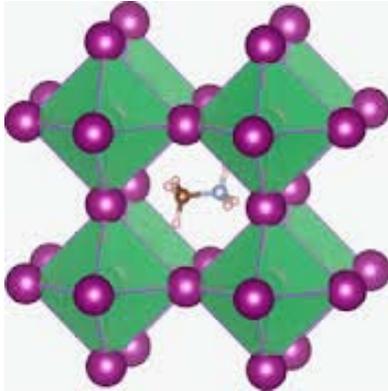
oppure



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

Celle fotovoltaiche a film sottile

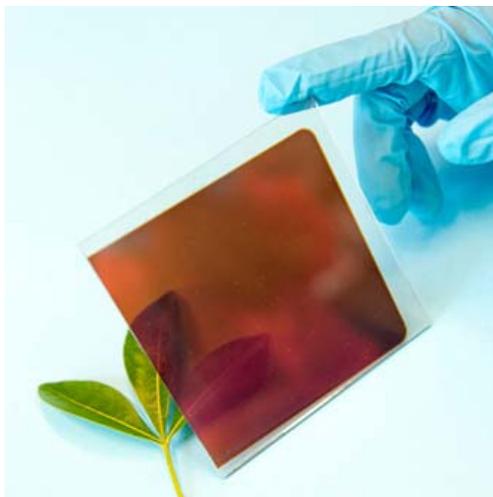
Perovskiti ibride
organico/inorganico



Telluriuro di Cadmio



CIGS – CuInGaSe_2



Questi tipi di celle fotovoltaiche si avvalgono di tecnologie diverse, ma in tutti i casi utilizzano strati molto sottili ($1\text{-}2\ \mu\text{m}$ o anche meno) di semiconduttori.

Gran parte della ricerca di base sul fotovoltaico è orientata allo sviluppo di nuovi concetti, anche basati sulle nanotecnologie, per aumentare l'efficienza e ridurre i costi dei moduli. Le celle a film sottile hanno notevoli margini di miglioramento – ma la ricerca è essenziale!

Solar PV energy on the Earth...

and above...

Copper Mountain Solar Facility, Nevada



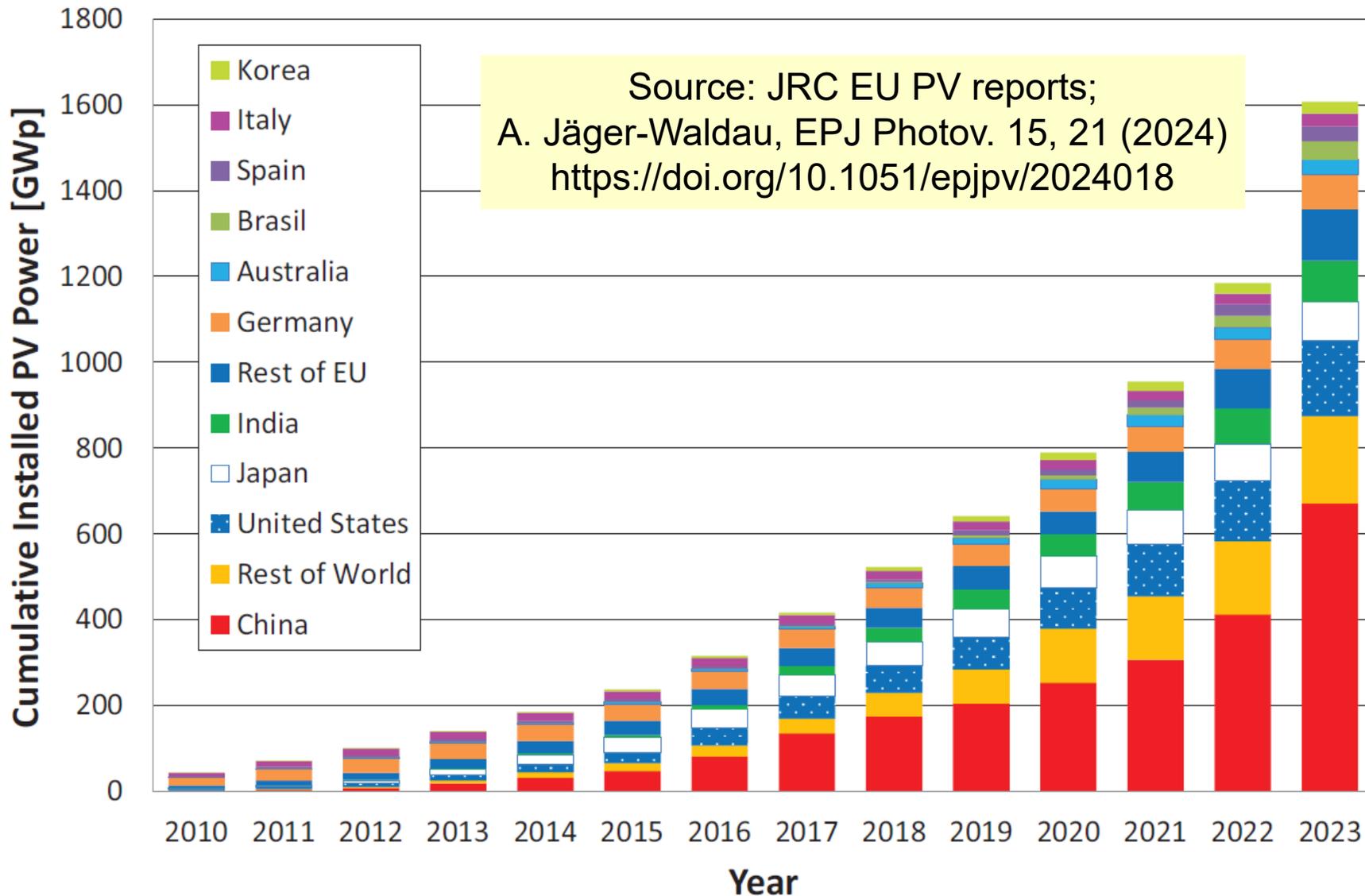
Solar impulse: the solar airplane



Satellites



Potenza fotovoltaica cumulativa

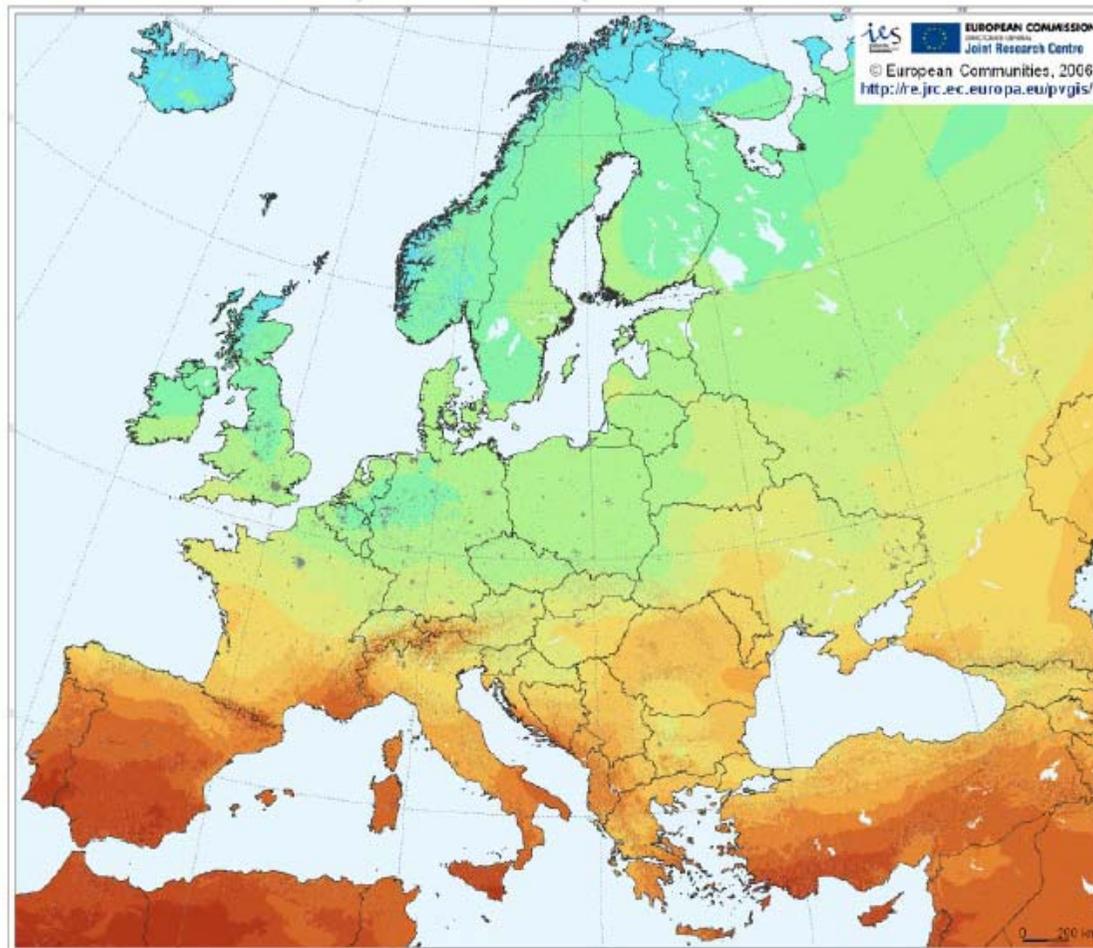


Il tasso di crescita annuo è attorno al 25%, con un tempo di raddoppio di circa 3 anni e una continua riduzione dei costi grazie all'economia di scala

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 2024 (rooftop systems)



Irradiation (GTI, kWh/m²/a) EPBT

<600

800

1000

1200

1400

1600

1800

2000

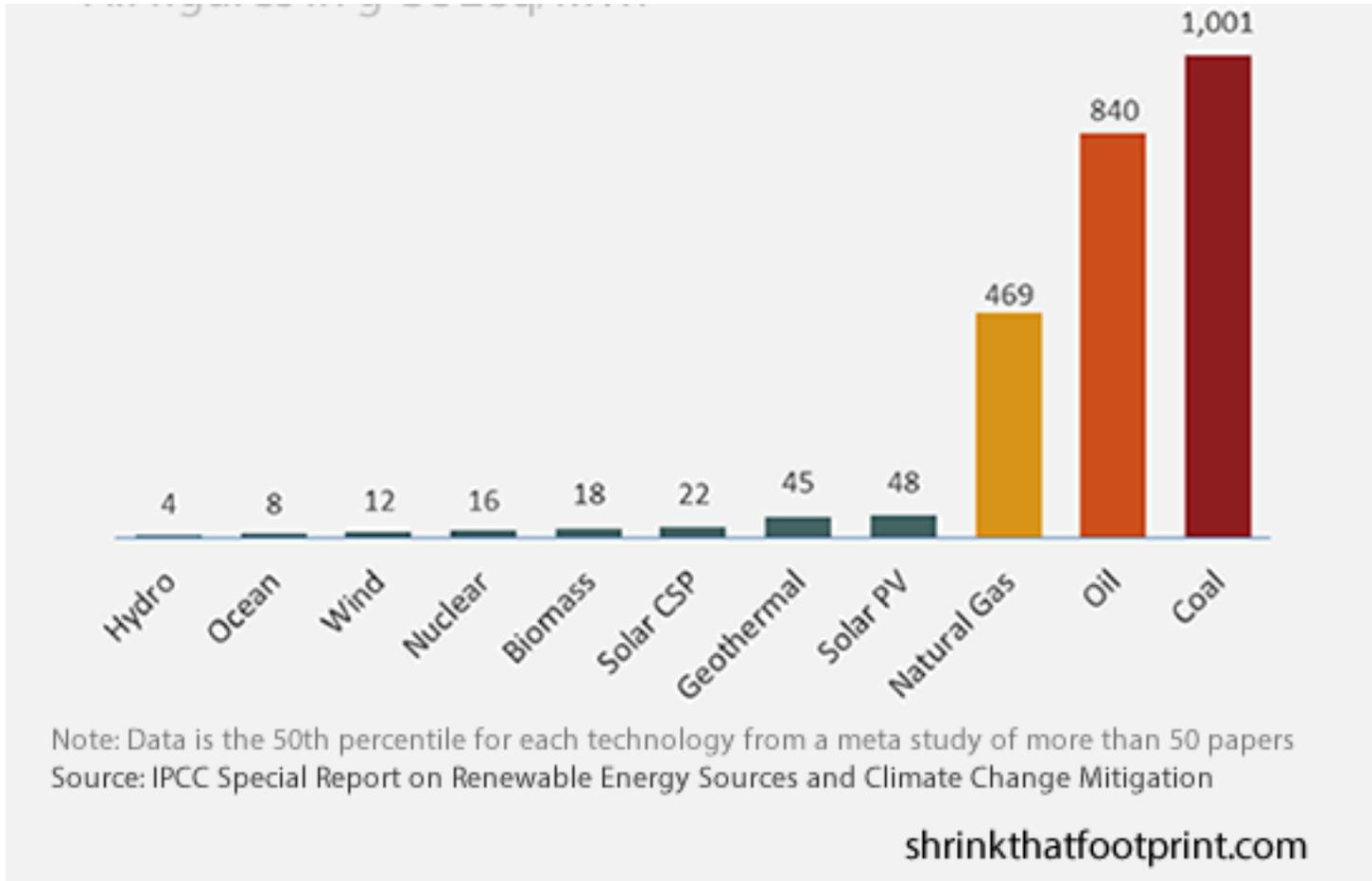
>2200

1.3 years

1.0 year

PSE Projects GmbH 2020 (Modified scale with updated data from Fraunhofer ISE)

Impatto ambientale: gas serra in g CO₂-eq/kWh



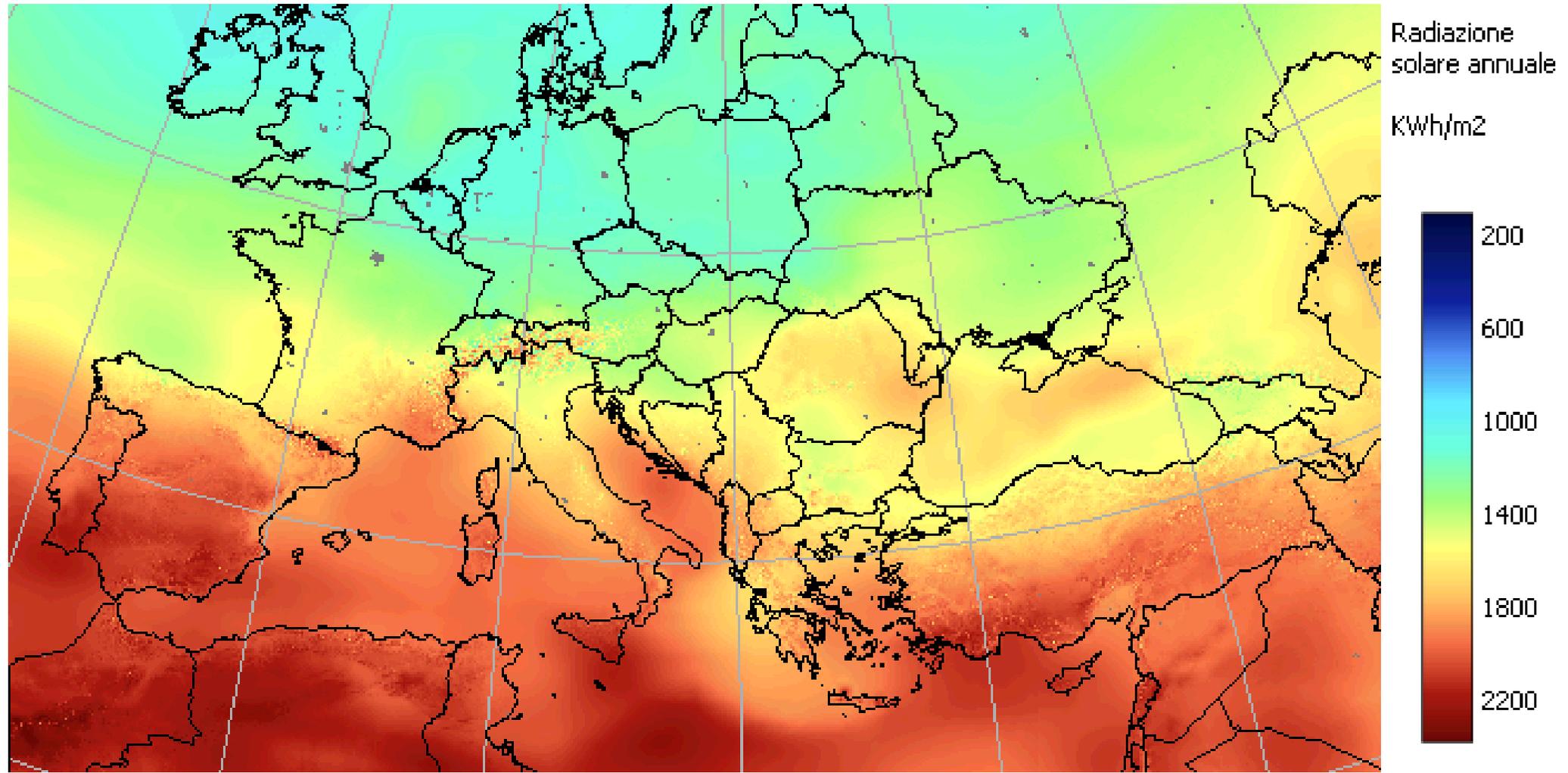
IPCC study:
http://www.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SR_REN_Annex_II.pdf

and

<https://www.vrec.ca/blog/2014/11/05/photovoltaic-energy-better-bcs-grid/>

Le emissioni di gas serra associate ad una cella solare sono legate principalmente all'energia spesa nei processi per la sua fabbricazione, e sono ridotte – rispetto alla stessa energia prodotta da combustibili fossili – di un rapporto pari alla resa energetica della cella stessa.

Irraggiamento solare annuo in kWh/m²



La figura rappresenta l'energia media che incide su 1 m² in un anno, tenendo conto degli effetti di intermittenza (giorno/notte, stagioni)

Potenza installata ed energia prodotta

- La **potenza installata**, misurata in Wp (Watt di picco), rappresenta la potenza prodotta da moduli fotovoltaici in condizioni di illuminazione standard: spettro AM 1.5, radianza 1000 W/m^2 , $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$. Per es, 1 kWp (1 kW installato) produce una potenza di 1 kW quando le celle sono illuminate con spettro AM1.5 di radianza 1000 W/m^2 .
- La potenza installata *non dipende dalla posizione geografica e non tiene conto dell'effetto di intermittenza* della radiazione solare (o *fattore di carico*).
- L'**energia prodotta** da un sistema fotovoltaico dipende sia dalla potenza installata (con orientazione e inclinazione ottimale), sia dalla **radianza media** sul sito: dipende cioè dagli effetti di **intermittenza**, misurati dal **fattore di carico**.
- La **radianza media** è data in kWh/m²/anno: in Italia, varia da 1376 kWh/m²/y (Milano) a 1639 kWh/m²/y (Trapani). Poiché 1 anno ha 8760 ore, si dice che un sistema fotovoltaico lavora per una frazione limitata di ore: 1376 a Milano (fattore di carico 15.7%), 1639 a Trapani (18.7%).
- I moduli fotovoltaici producono **corrente continua** (d.c.), che viene trasformata in **corrente alternata** (a.c.) dall'inverter. Ciò introduce un ulteriore fattore di riduzione detto di **Balance of System** (BOS) di circa 0.85-0.9.

Annual solar irradiation (Italy)

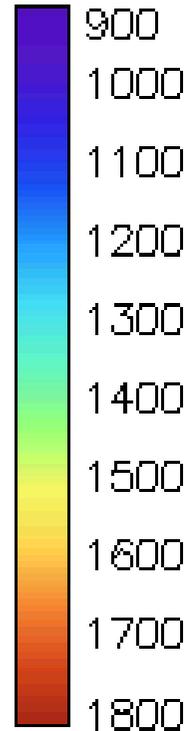
Global horizontal irradiation
yearly total [kWh/m²]

ITALY

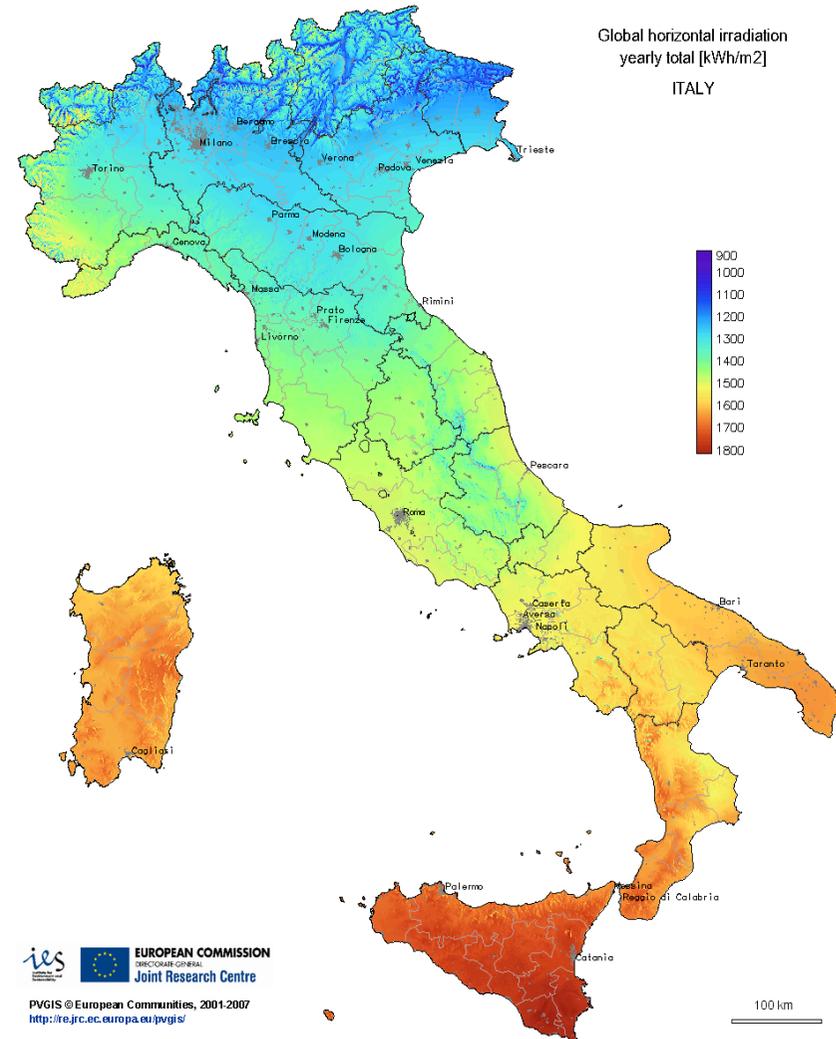


EUROPEAN COMMISSION
DIRECTORATE-GENERAL
Joint Research Centre

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/>

Potenza installata e energia prodotta: Italia

➤ In sostanza, 1 kWp produce circa (BOS factor=0.85):

1170 kWh / year a Milano (0.85·1376 kWh/y)

1393 kWh / year a Trapani (0.85·1639 kWh/y)

➤ In Italia a fine 2023, i sistemi fotovoltaici installati e connessi alla rete elettrica hanno la capacità totale di circa 30 GWp <http://www.gse.it>.

➤ Il massimo di potenza consumata in Italia è di 56.5 GW (13/07/2011 alle ore 12: dati di Terna), il fotovoltaico può contribuire fino al 44%. Il picco di potenza consumata coincide con il massimo di produzione fotovoltaica.

➤ La potenza fotovoltaica installata in Italia produce circa 35 TWh di energia elettrica in 1 anno, cioè circa 11-12% del consumo di energia elettrica in Italia (≈ 300 TWh).

<https://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/fotovoltaico-italia-produzione-potenza-2022/>

Quanto spazio richiede il fotovoltaico?

1 kWp richiede circa 8 m² (sui tetti), 12 m² (al suolo).

Radianza media 1500 kW/m²/anno → 1kWp produce 1275 kWh/anno

Obiettivo PNIEC: installare 55 GWp entro il 2030 → $55 \cdot 10^6 \cdot 12 \text{ m}^2 = 660 \text{ km}^2$

La superficie dell'Italia è di circa 300'000 km² → ~ 0.2% del territorio

Obiettivo ipotetico (e assurdo): produrre tutta l'energia elettrica consumata in Italia, ossia circa 300 TWh/anno, da fonte fotovoltaica. Servirebbero

$$\frac{300 \text{ TWh}}{1275 \text{ kWh}} \cdot 12 \text{ m}^2 \approx \frac{300 \text{ MWh}}{100 \text{ kWh}} \text{ km}^2 = 3'000 \text{ km}^2 = 1\% \text{ del territorio}$$

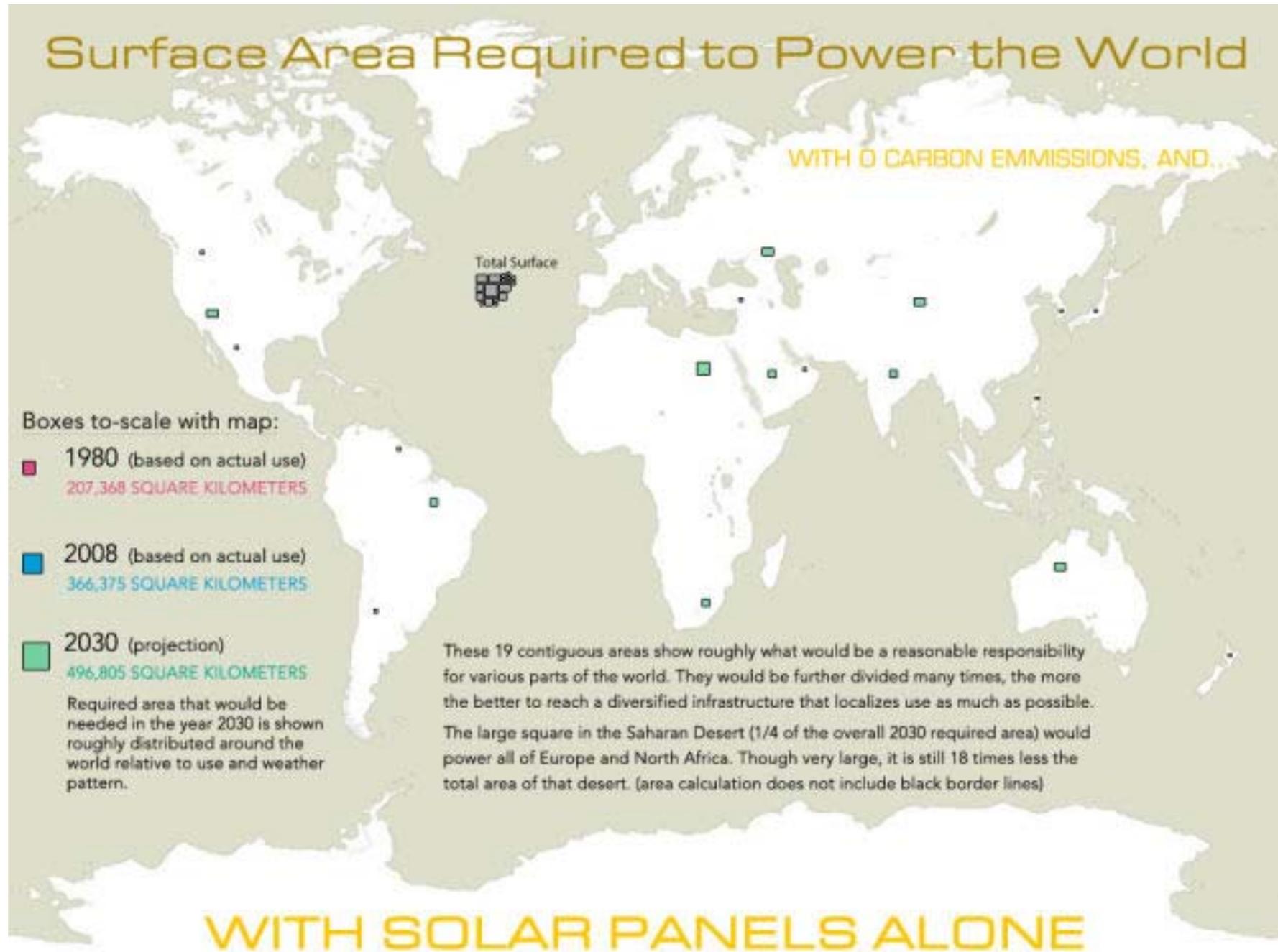
Sono disponibili

tetti e facciate ≈ 1'000 km²

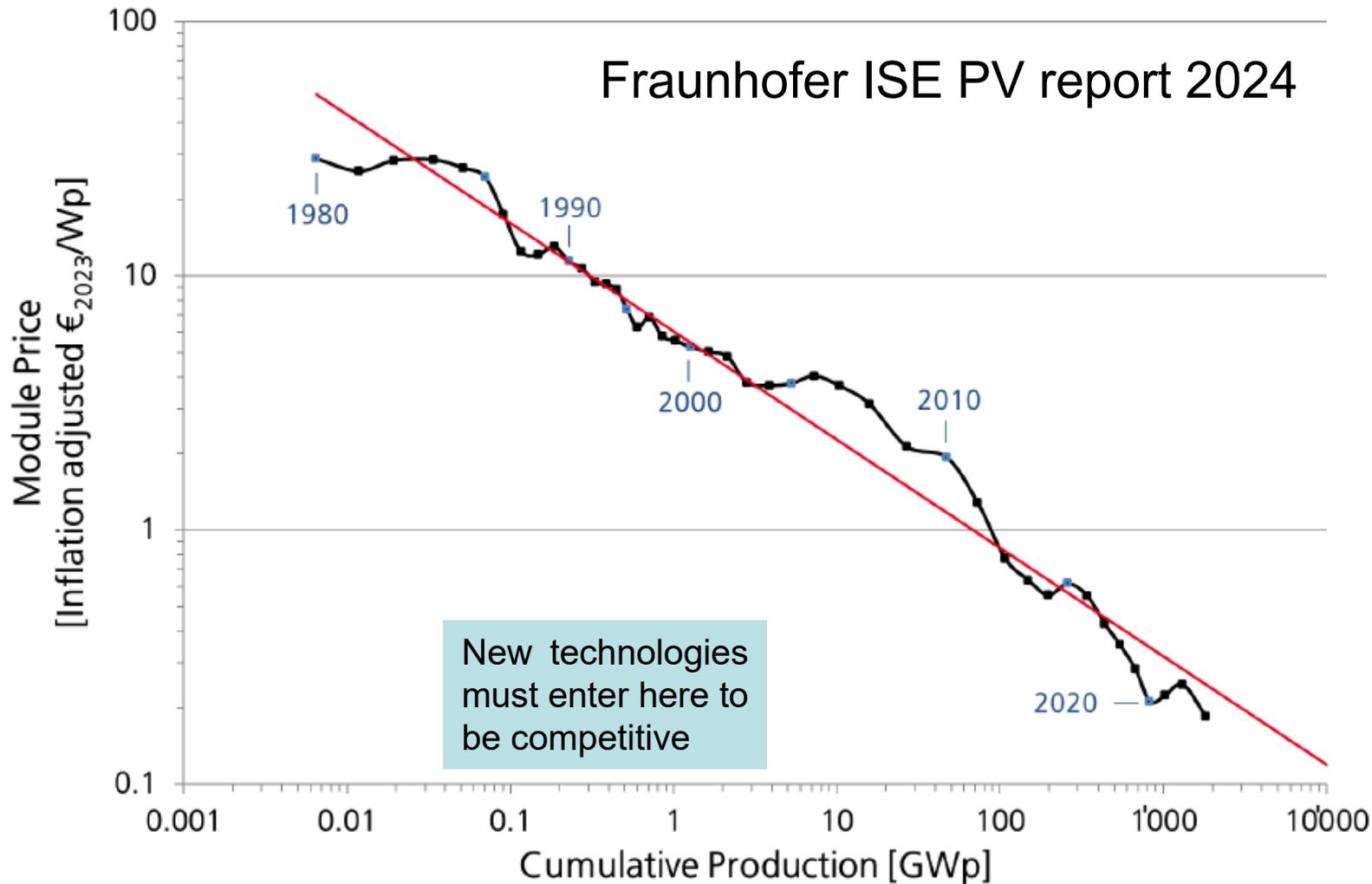
terreni non coltivati e pascoli ≈ 55'000 km²

Lo spazio non è un problema

Quanto spazio è necessario?



Curva di apprendimento (\$/W)



Il costo dei moduli fotovoltaici diminuisce del 24.4% quando la produzione totale raddoppia, grazie all'economia di scala e all'aumento di efficienza. Costo attuale: 3-6 c€/kWh e parità di rete raggiunta in quasi tutta la EU.

Il fotovoltaico in Italia



<https://medium.com/@erofeev.yury/italy-commissioned-more-than-5-gw-of-solar-energy-capacity-in-2023-50117d714613>
data by ItaliaSolare

In Italia sono installati ~30 GW di moduli fotovoltaici, che contribuiscono il 12% dell'energia elettrica generata e fino al 45% della potenza di picco. In Europa sono installati ~250 GW di moduli fotovoltaici → ~8% 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**

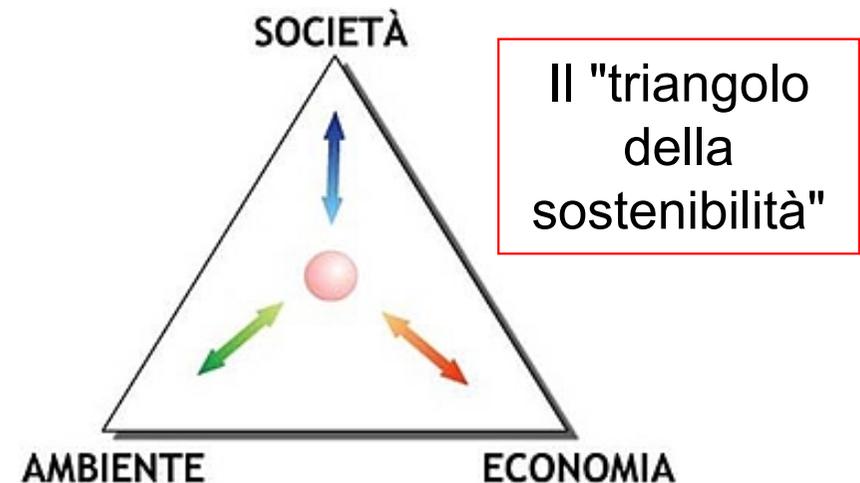


Gli obiettivi dell'Unione Europea nel piano NextGenerationEU: "A European Green Deal"

- 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 CO₂) entro il 2050

E nello stesso tempo

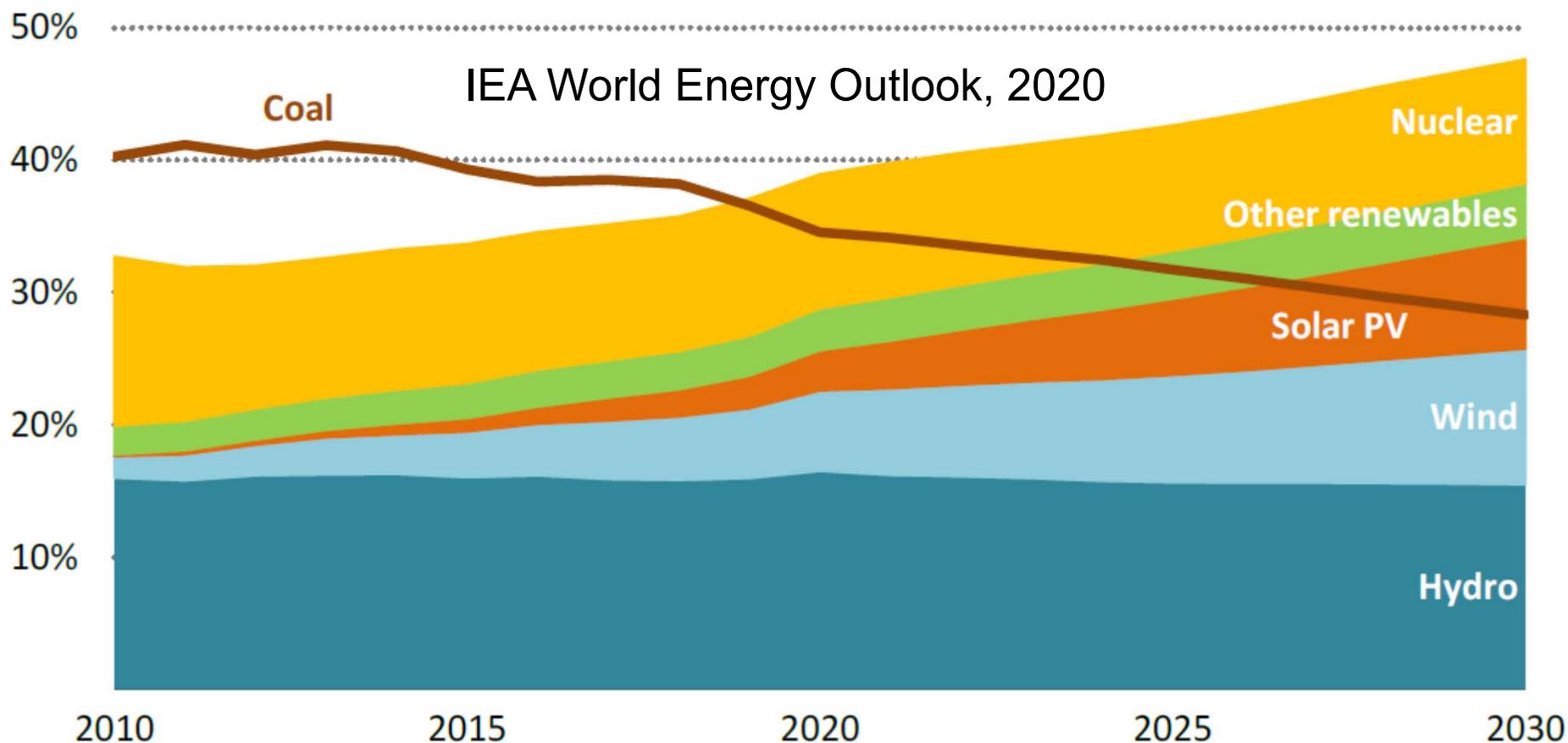
- Crescita economica disaccoppiata dall'uso delle risorse
- Nessuna persona e nessun luogo deve essere lasciato indietro



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

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

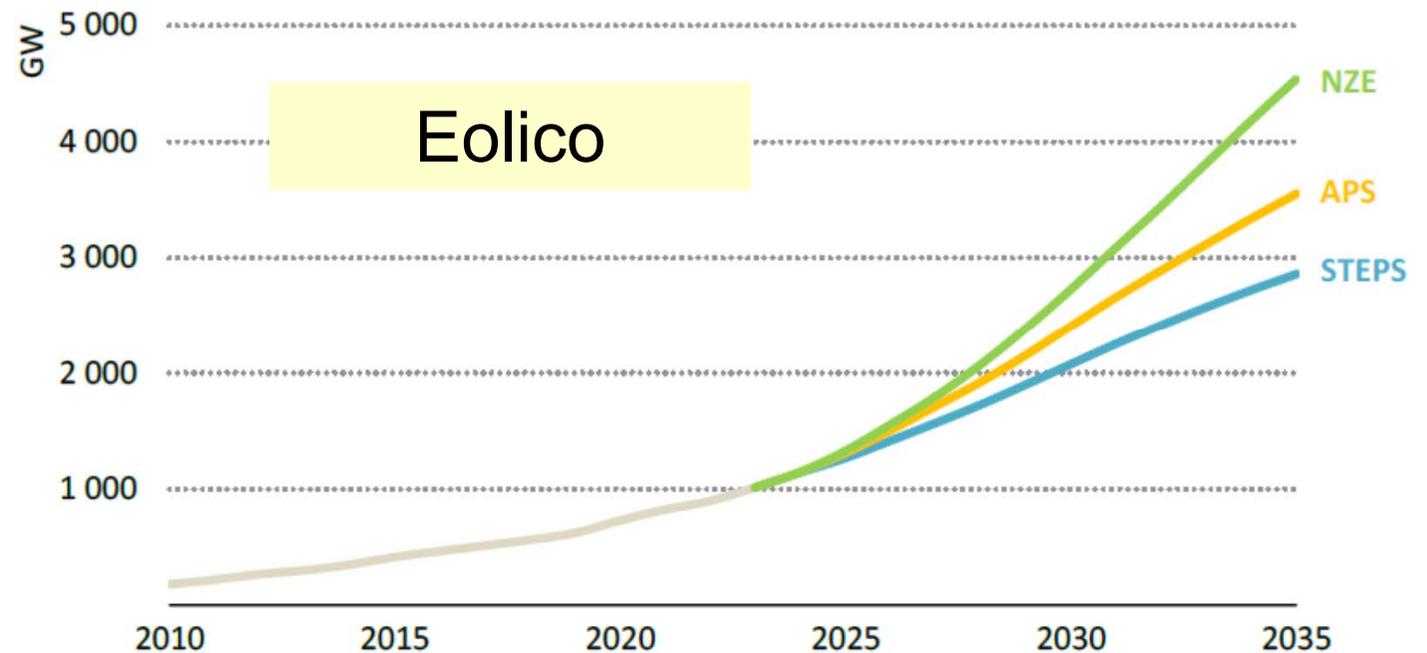
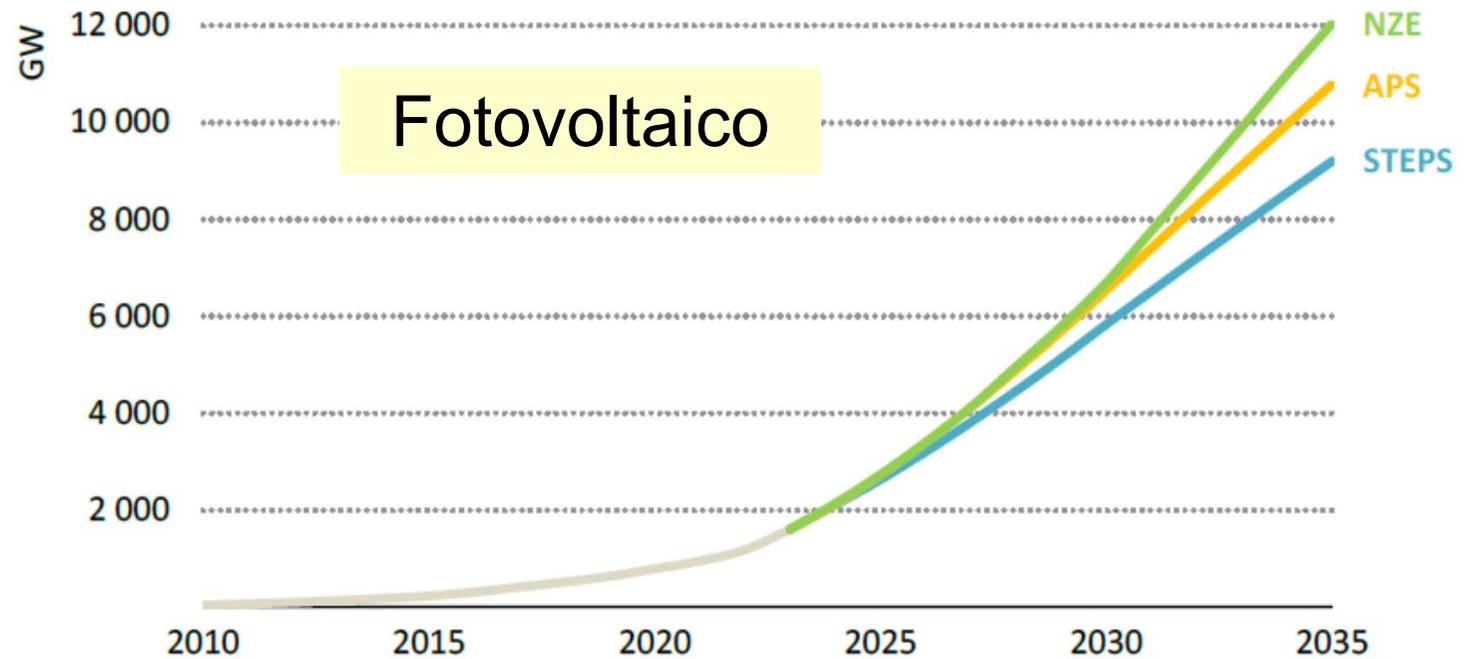
Capacità installata al 2035...

STEPS = Stated Policies Scenario

APS = Accelerated Pledges Scenario

NZE = Net Zero Emission by 2025 Scenario

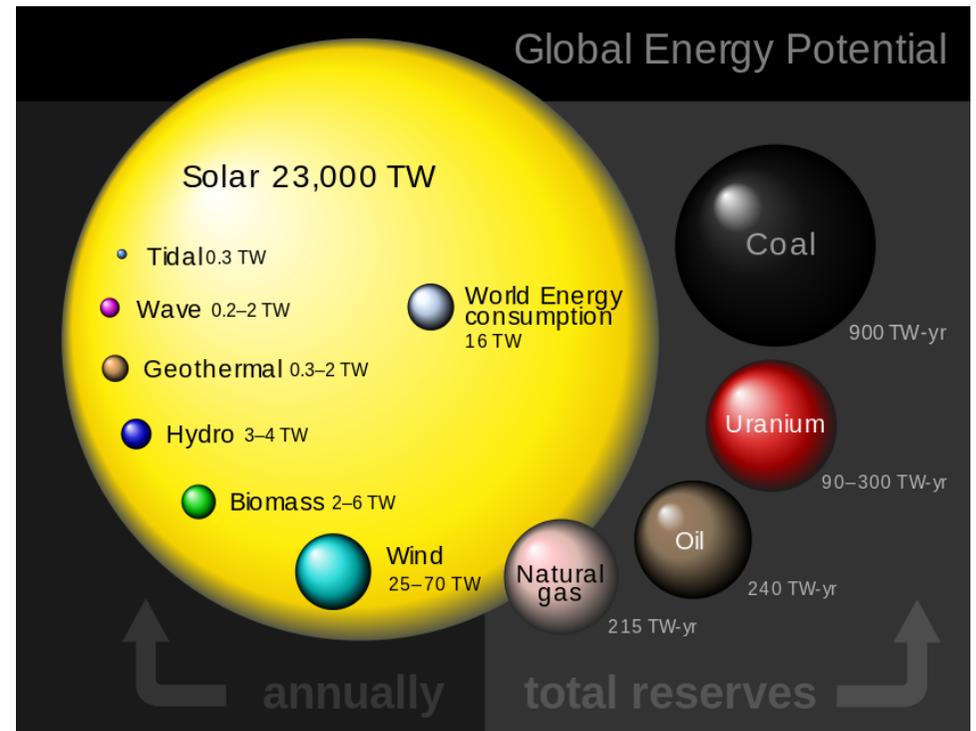
IEA World Energy Outlook, 2024



Potenziale / fattore di capacità (o di carico)



Un sistema energetico stabile deve avere un **mix bilanciato** di fonti, sia continue sia intermittenti



Fonte	Fattore di capacità	Ore di lavoro/anno (1 anno = 8760 ore)	GWh prodotti da 1 GW installato
Nucleare	0.90	~ 8000	8000
Idroelettrico*	0.40	~ 3500	3500
Eolico*	0.45	~ 4000	4000
Solare*	0.18	~ 1500	1500
Gas, carbone...	Su richiesta	Su richiesta (buffer)	Su richiesta

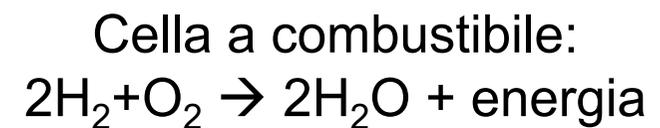
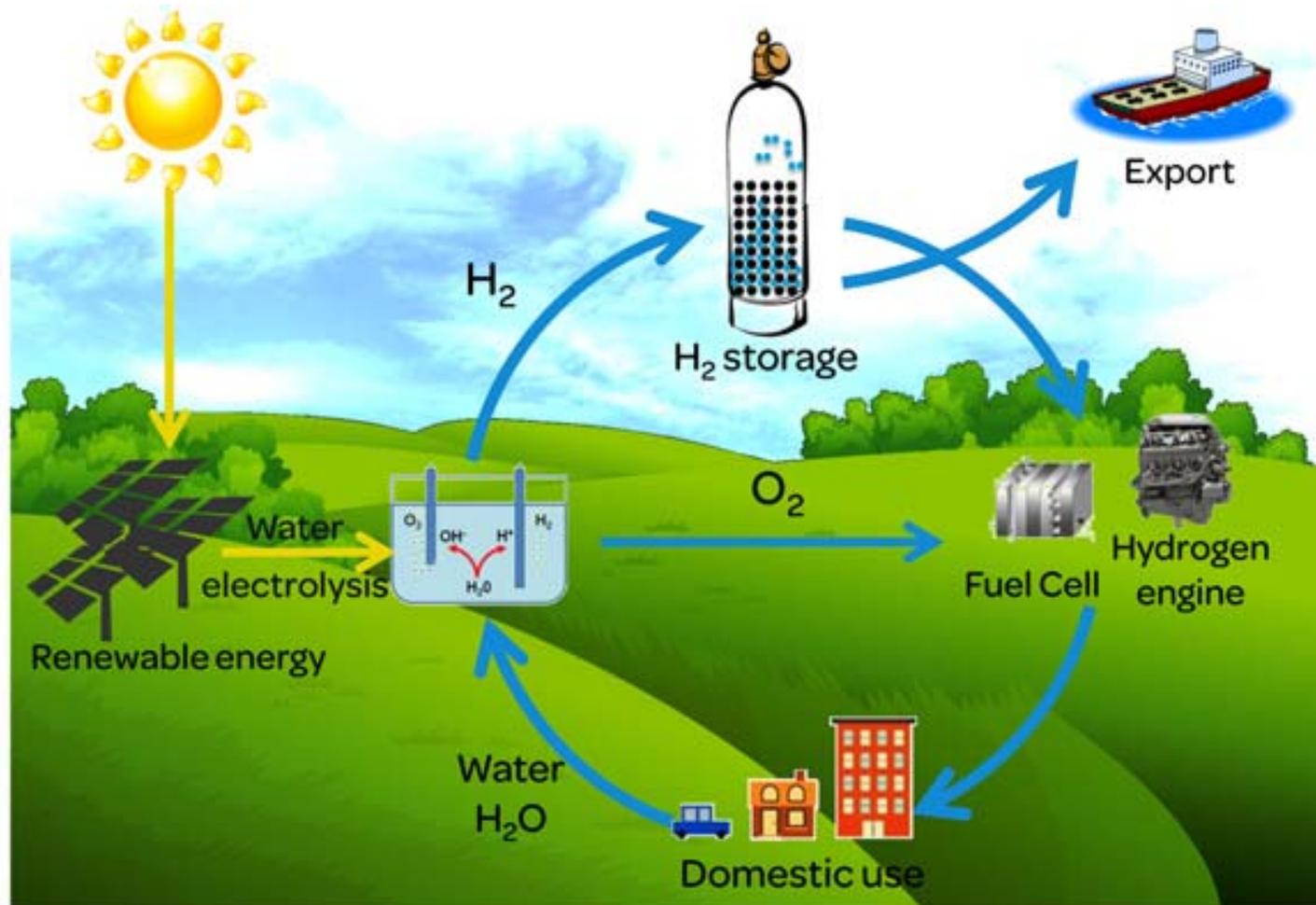
*Il fattore di capacità varia molto a seconda della zona e delle caratteristiche dell'impianto

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...



L'idrogeno come vettore energetico



Elettificazione dei consumi

Nel settore dei trasporti:

auto elettrica

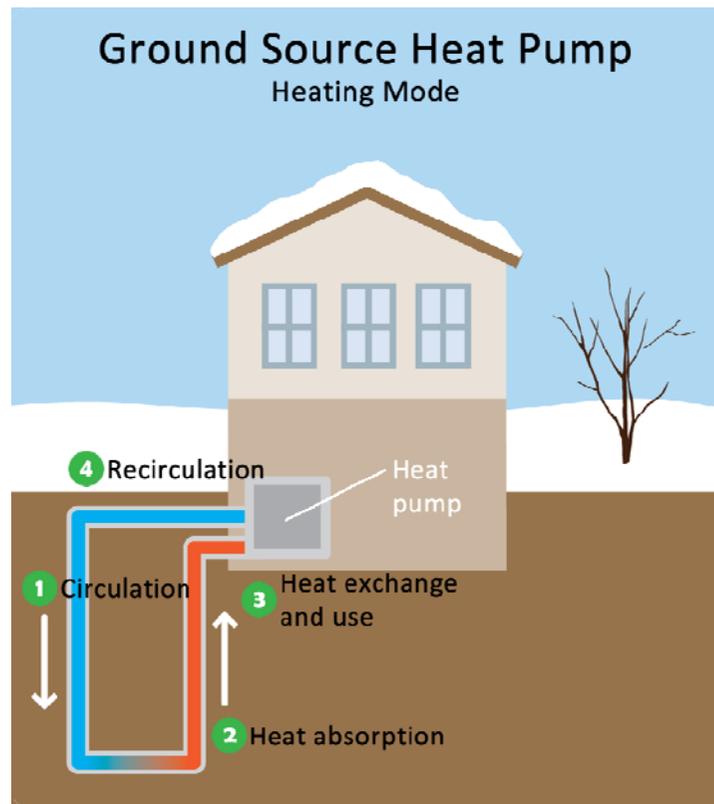
(oppure: auto a idrogeno...)



Nel settore del riscaldamento:

**Pompe di calore
(heat pumps)**

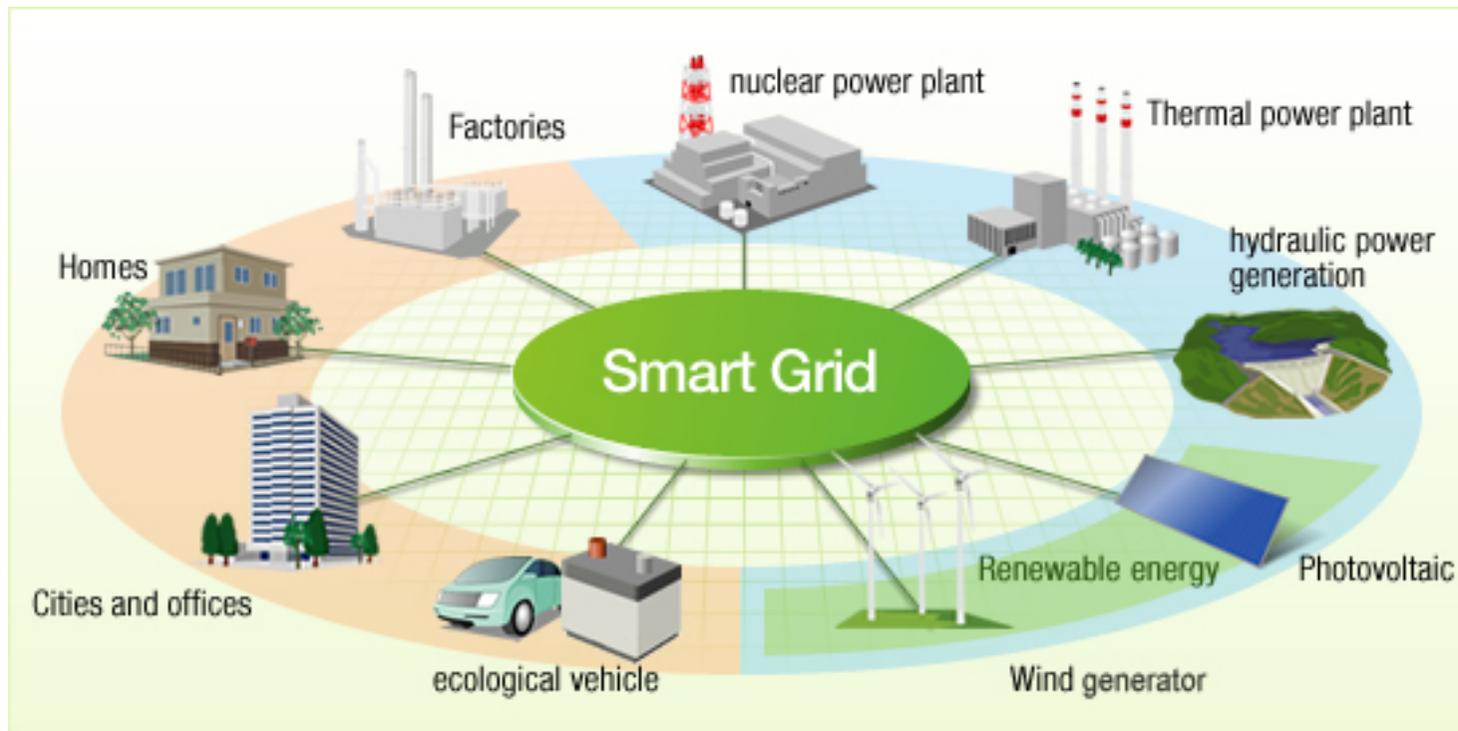
Utilizzano il calore dell'ambiente esterno, attraverso un meccanismo che è l'inverso di quello di un frigorifero, con alimentazione elettrica.



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 CO₂ 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