

Caro Lettore

Rilascio questo compendio che raccoglie le note più interessanti del Primo ciclo della Collana Fotovoltaica tenuta presso l'UTE di San Donato da ottobre a dicembre 2018.

Se troverai un reale interesse di arricchimento informativo, potrai avere la versione completa richiedendola personalmente all'autore sulla e-mail:

waitingman @ libero.it

Specificando il tuo numero di iscrizione a UTE

Milano, Ing. Francesco Frabasile



Quale energia nel futuro ?

UTE
18 - 19

Economia LINEARE - CIRCOLARE

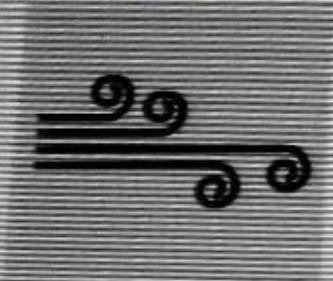
Nel modello economico LINEARE

le risorse primarie (Petrolio, Carbone Gas ecc) alimentano il ciclo produttivo energetico senza recupero → riduzione crescente delle risorse del Pianeta accompagnata da notevole inquinamento ambientale.

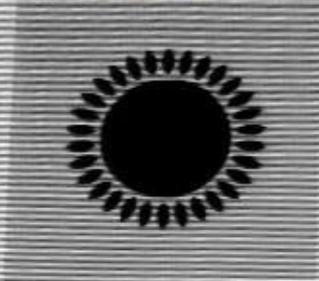
Nel modello economico CIRCOLARE

(definizione della Ellen MacArthur Foundation) i cicli produttivi si possono rigenerare da soli (Eolico, Fotovoltaico Idrico ecc) → le risorse energetiche primarie sono in grado di essere reintegrati senza sprechi e riducendo al minimo gli inquinamenti ambientali.

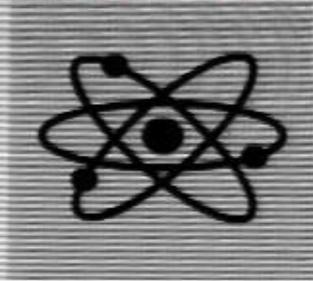
FONTI ENERGETICHE DISPONIBILI



VENTO



SOLE



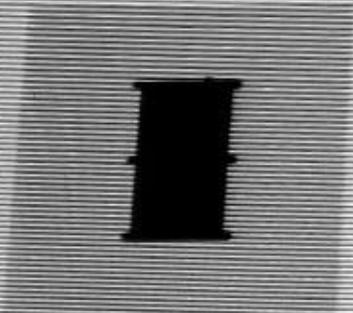
URANIO



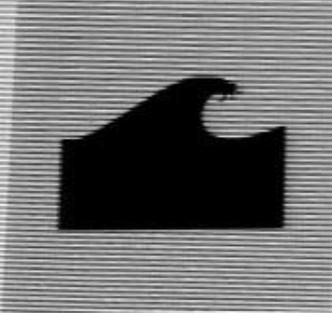
CORSI
D'ACQUA



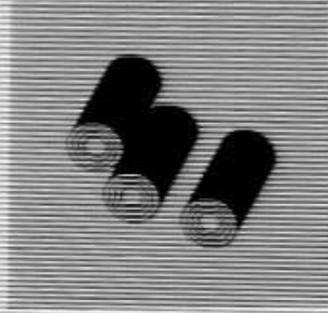
TERRA



PETROLIO
e derivati



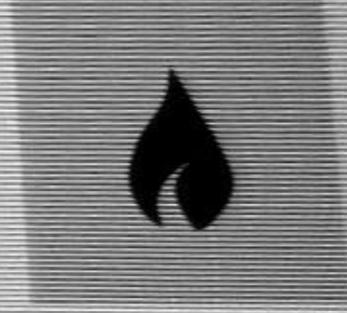
MARE



BIOMASSE
e derivati



CARBONE
e derivati



GAS

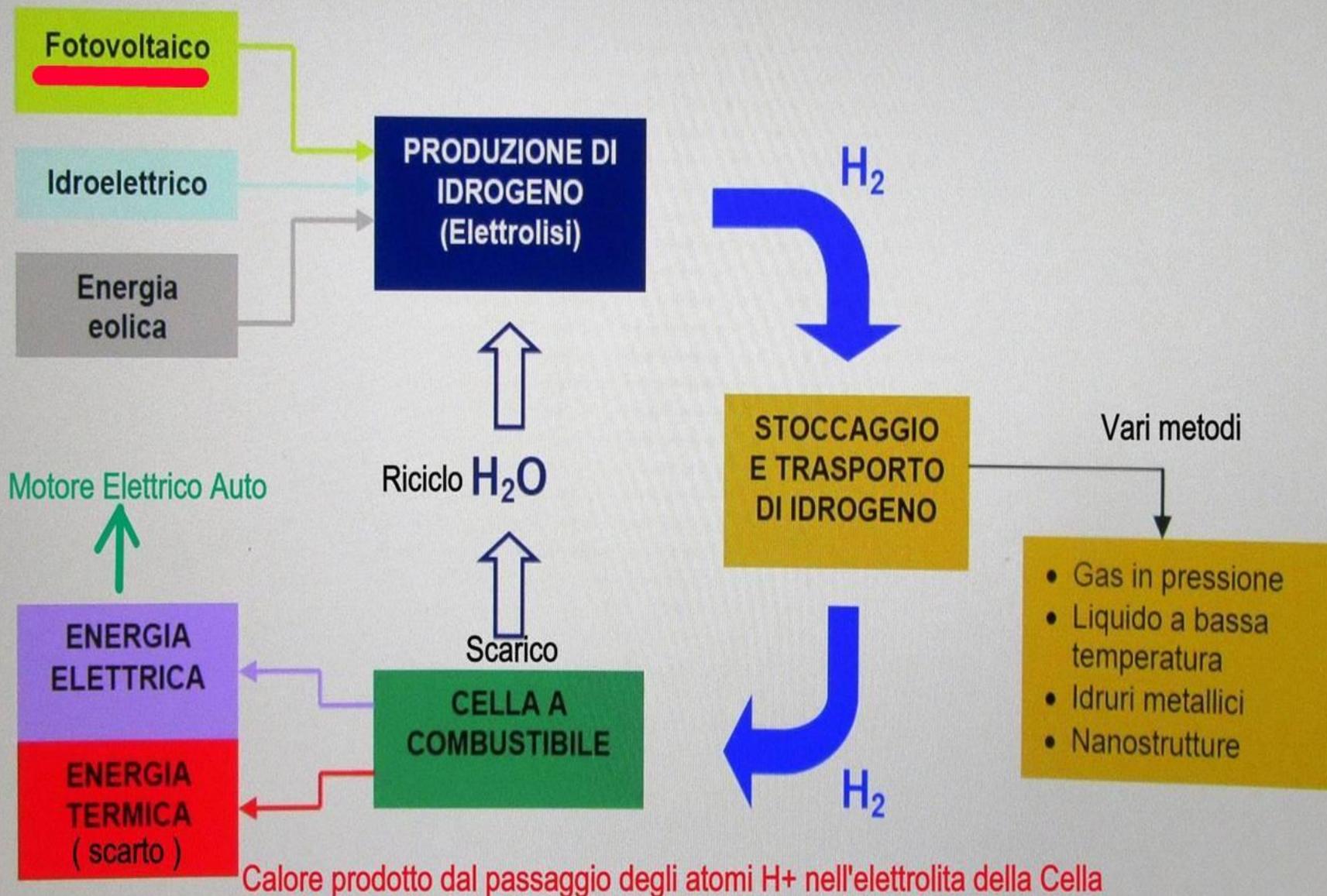


ENERGIA SOLARE (TERMICA - FOTOVOLTAICA)

Acqua calda, riscaldamento, energia elettrica dal Sole.



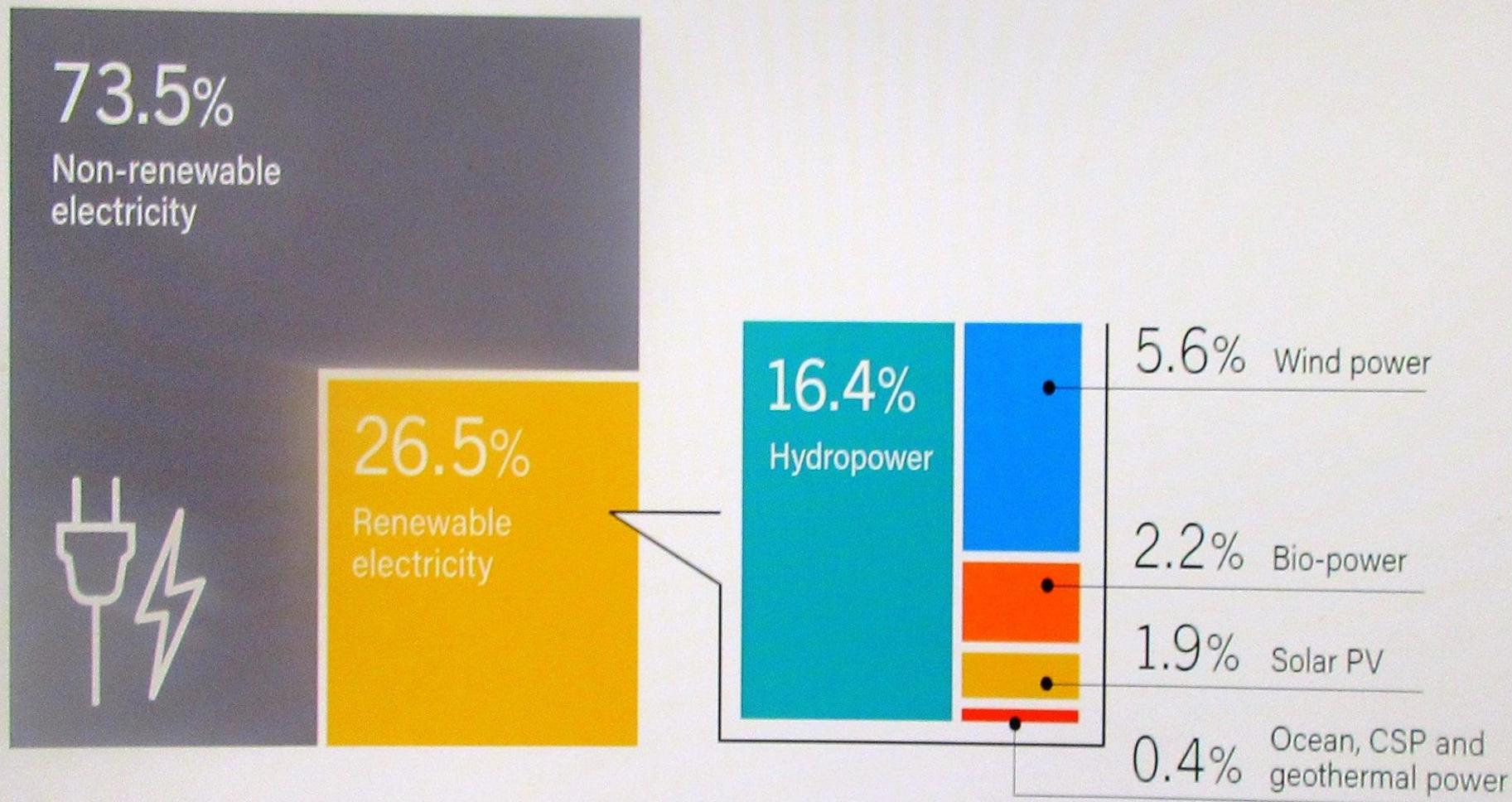
IL CICLO "VIRTUOSO" DELL'IDROGENO



MIX ENERGIA NEL MONDO A FINE 2017

(fonte REN21 2018)

FIGURE 6. Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production, End-2017



Source: See endnote 188 for this chapter.

LAVORO NELLE RINNOVABILI NEL MONDO

A FINE 2017

(fonte REN21 2018)

FIGURE 9. Jobs in Renewable Energy



Bilancio Mensile dell'Energia Elettrica in Italia 2018

periodo gen-set 2018

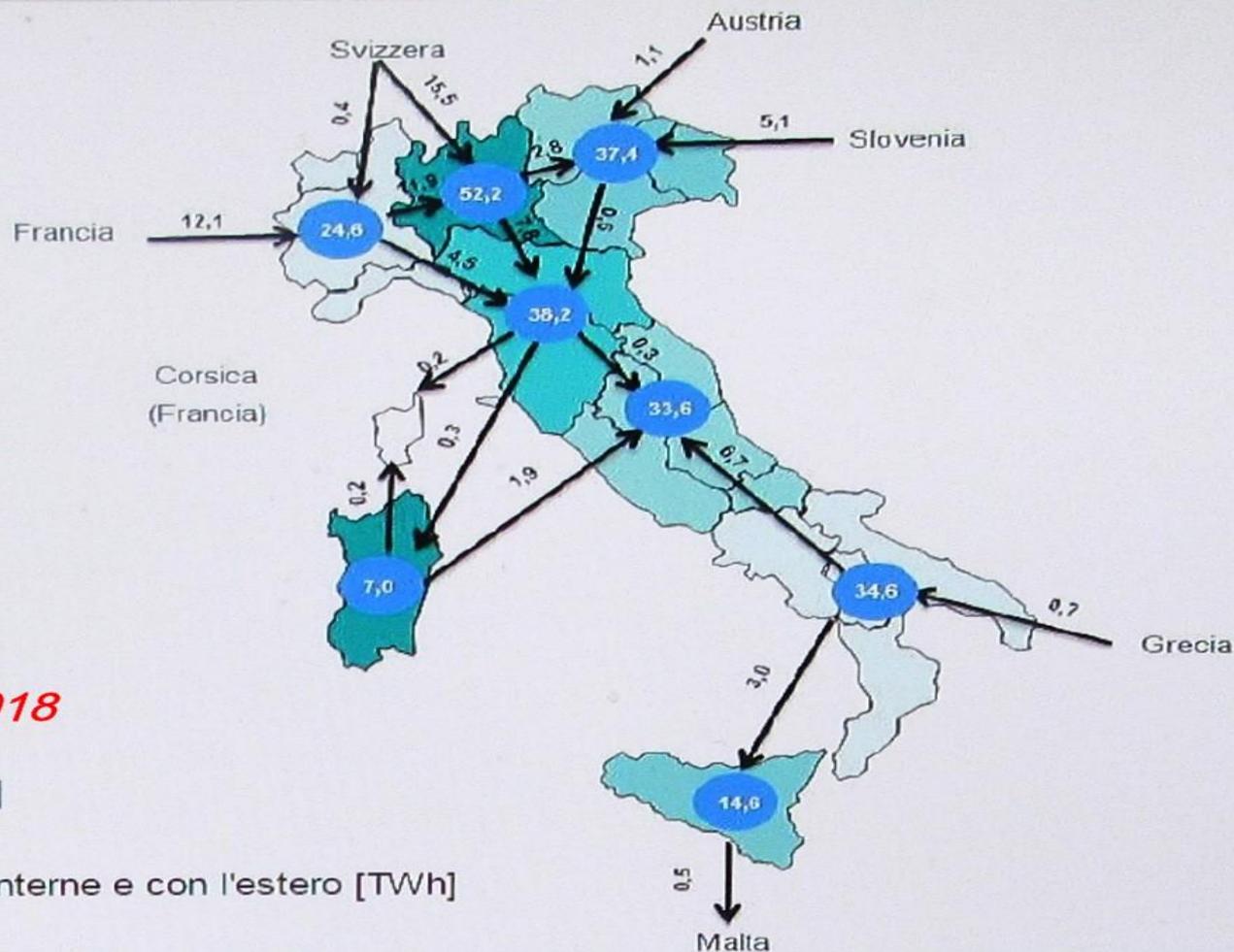
[GWh]	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Totale
Idrica	2.731	2.601	3.187	4.675	6.518	6.018	4.969	4.268	3.397				38.364
Termica	16.650	16.093	15.725	11.940	12.513	13.137	16.568	15.727	16.927				135.280
Geotermica	494	445	492	476	486	466	470	472	464				4.265
Eolica	1.986	1.696	2.422	1.221	909	1.418	1.225	746	949				12.572
Fotovoltaica	1.029	1.052	1.688	2.428	2.437	2.794	2.967	2.702	2.354				19.451
Produzione Totale Netta	22.890	21.887	23.514	20.740	22.863	23.833	26.199	23.915	24.091				209.932
Import	4.899	4.610	4.732	4.004	3.671	3.613	4.686	2.993	3.167				36.375
Export	326	199	179	337	370	275	327	285	147				2.445
Saldo Estero	4.573	4.411	4.553	3.667	3.301	3.338	4.359	2.708	3.020				33.930
Pompaggi	223	192	286	299	201	139	135	109	101				1.685
Richiesta di Energia elettrica (1)	27.240	26.106	27.781	24.108	25.963	27.032	30.423	26.514	27.010				242.177

(1) *Richiesta di Energia Elettrica = Produzione + Saldo Estero - Consumo Pompaggio.*

Bilancio energetico con l'estero

Gennaio – Settembre 2018

Mappa Saldo Movimenti Fisici di Energia



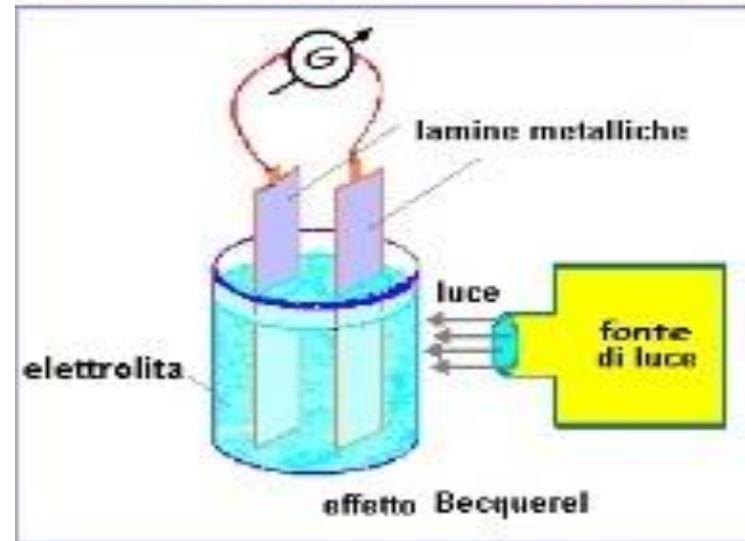
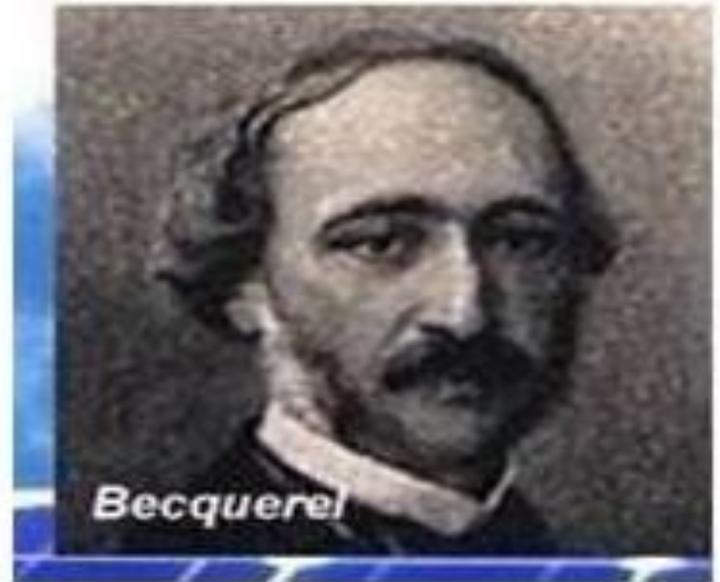


Nel passato per capire il futuro

UTE
Gen 2018

1839 - Becquerel

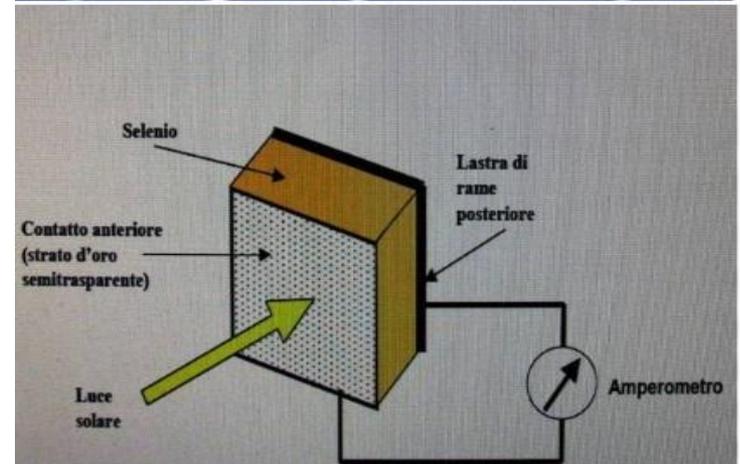
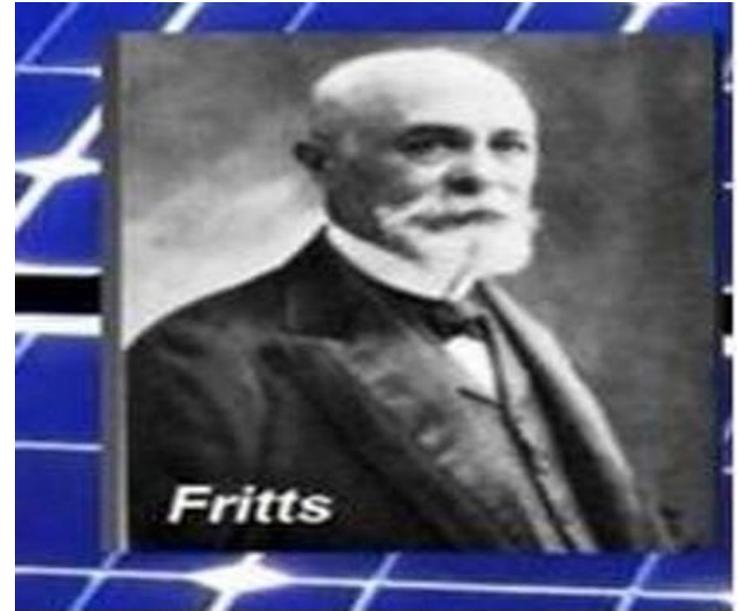
Il fisico francese Edmond Becquerel scopre l'effetto **fotovoltaico** durante alcuni esperimenti con celle elettrolitiche, osservando il formarsi di una differenza di potenziale elettrico tra due elettrodi di platino, uno illuminato e l'altro al buio.



1883 - Fritts

Lo statunitense Charles Fritts realizza e brevetta a New York un dispositivo fotoelettrico al Selenio cioè la **prima Cella Fotovoltaica della storia.**

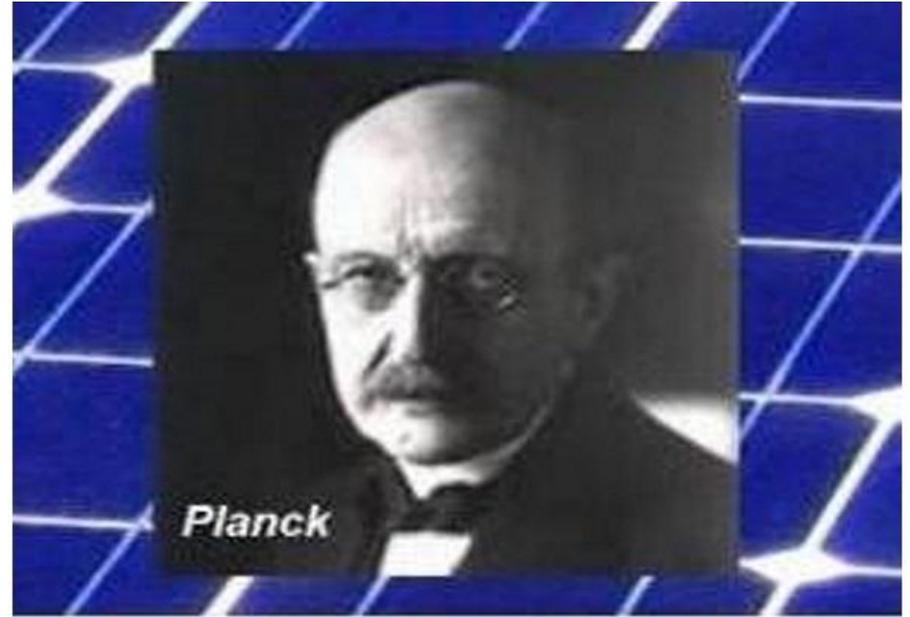
(**Oro – Selenio – Rame**)



1900 - Planck

Lo scienziato tedesco Max Plank ipotizza per primo che gli scambi di energia tra gli atomi di un corpo e la radiazione elettromagnetica incidente, avvengono in modo discontinuo secondo quantità discrete dette “quanti di energia” proporzionali alla frequenza d’onda.

PREMIO NOBEL NEL 1918



- l'energia E emessa o assorbita è proporzionale alla frequenza ν della radiazione secondo la relazione:

$$E = h \nu$$

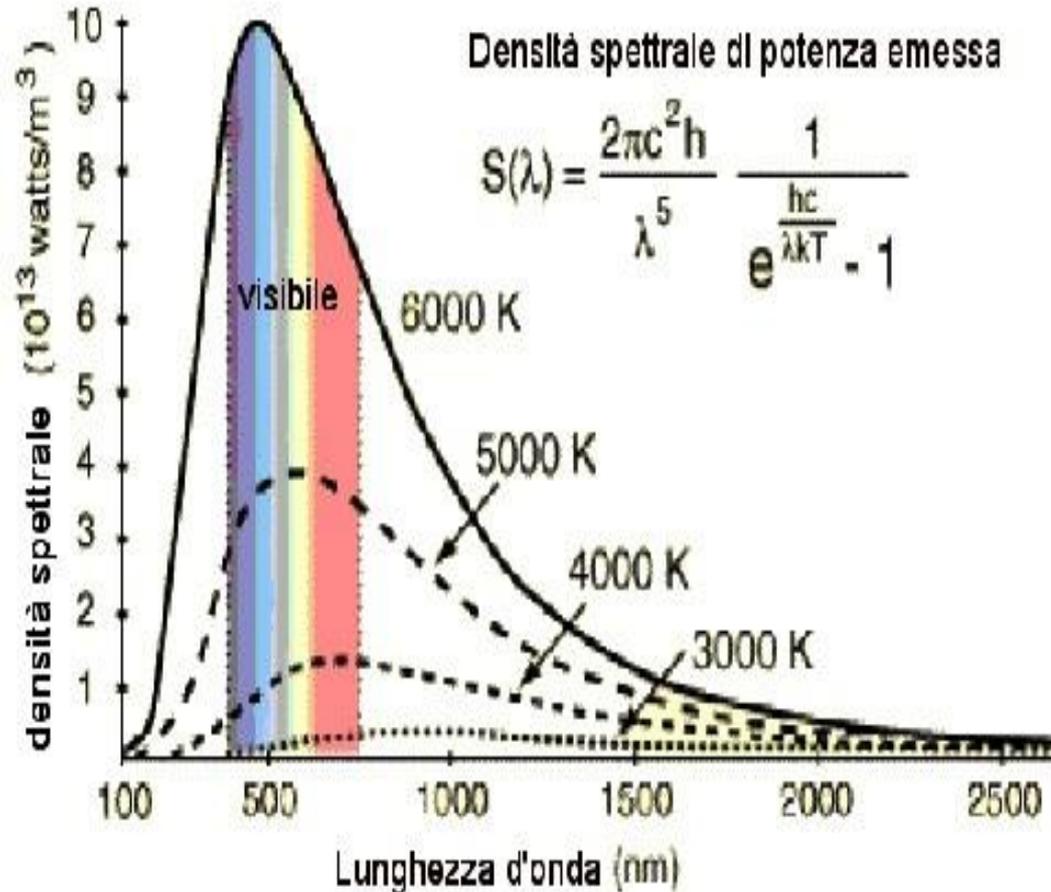
$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ (costante di Planck)

- il quanto $h\nu$ rappresenta il minimo “pacchetto” di energia che può essere scambiato
- tutti gli scambi di energia avvengono secondo multipli interi di $h\nu$

Legge di Planck del corpo nero

Lo **spettro** (intensità o densità della radiazione emessa in funzione della **lunghezza d'onda** (o della frequenza) di un corpo nero è una curva dalla caratteristica forma a **campana** (più o meno asimmetrica e più o meno schiacciata) dipendente unicamente dalla sua temperatura T e non dalla materia che lo compone.

La differenza tra lo spettro di un oggetto reale (per esempio il Sole) e quello di un corpo nero ideale permette di individuare la composizione chimica di tale oggetto (nel caso del sole, Idrogeno ed Elio).



1905 - Einstein (Nobel 1921)

Lo scienziato tedesco Albert Einstein riprende le ipotesi di Plank e presenta una **nuova e rivoluzionaria interpretazione della radiazione luminosa**: gli scambi di energia tra radiazione e materia avvengono in modo **discreto**, cioè l'energia luminosa si propaga secondo quanti di energia detti **"FOTONI"**, particelle che possiedono una quantità di energia proporzionale alla frequenza di radiazione secondo la costante di Plank

$$E_f = h f = h \cdot (c/\lambda) = 19,8 / (10^{26} \cdot \lambda) \text{ Joule}$$

Einstein teorizza così scientificamente l'effetto fotoelettrico:

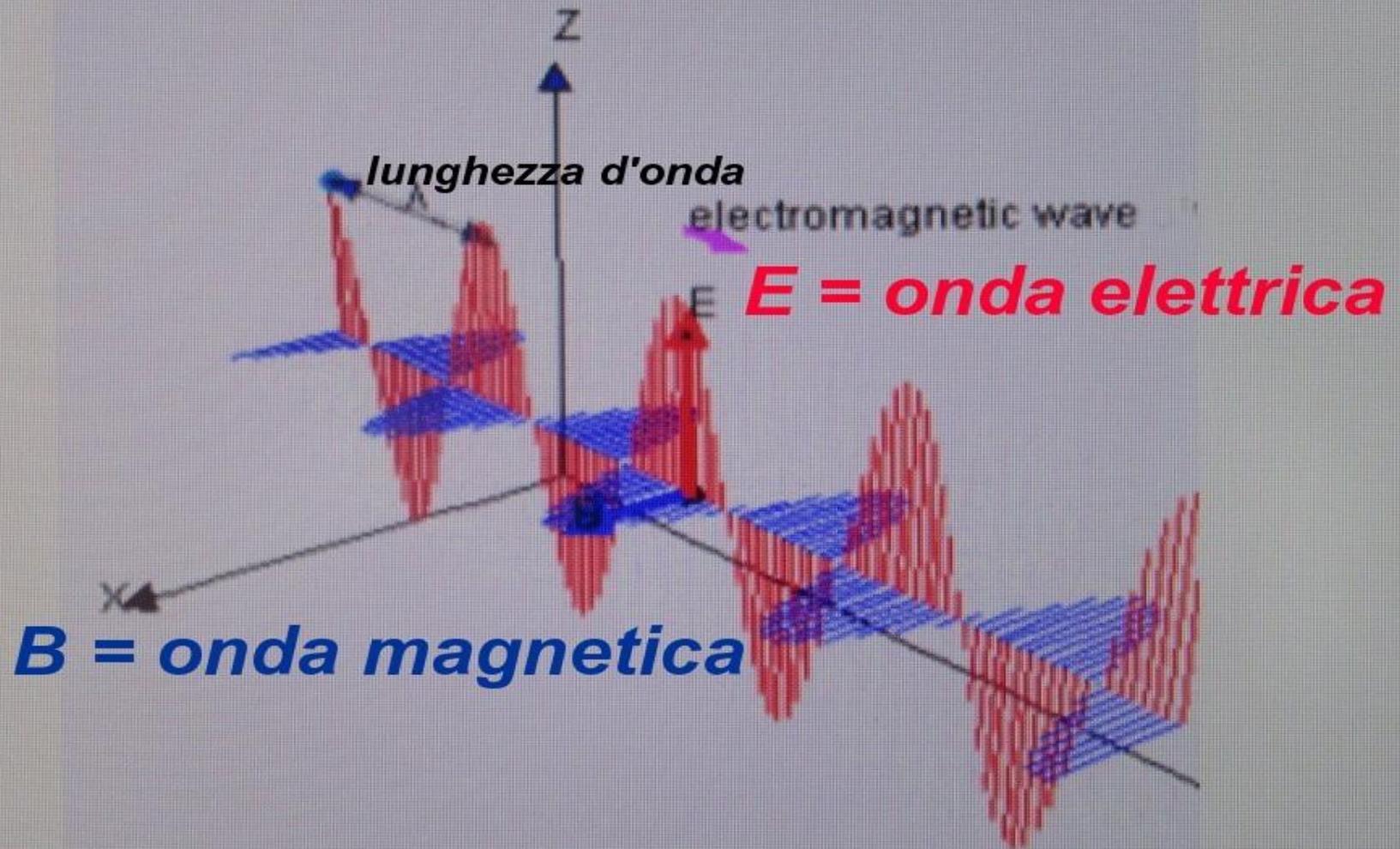
ogni fotone che incide su una superficie, penetra nello strato superficiale e va a colpire **un solo elettrone** trasmettendogli la sua energia.

L'elettrone così eccitato si carica di energia cinetica, raggiunge la superficie del materiale e ne fuoriesce perdendo una parte di energia pari al lavoro W necessario per uscire dal materiale irradiato.

Dal bilancio energetico di questo fenomeno si può calcolare l'energia netta E_e dell'elettrone uscente con la famosa equazione fotoelettrica di Einstein :

$$\underline{E_e = hf - W} \quad (E \text{ si misura in eV} \rightarrow 1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ Joule})$$

Radiazione luminosa = onda elettromagnetica



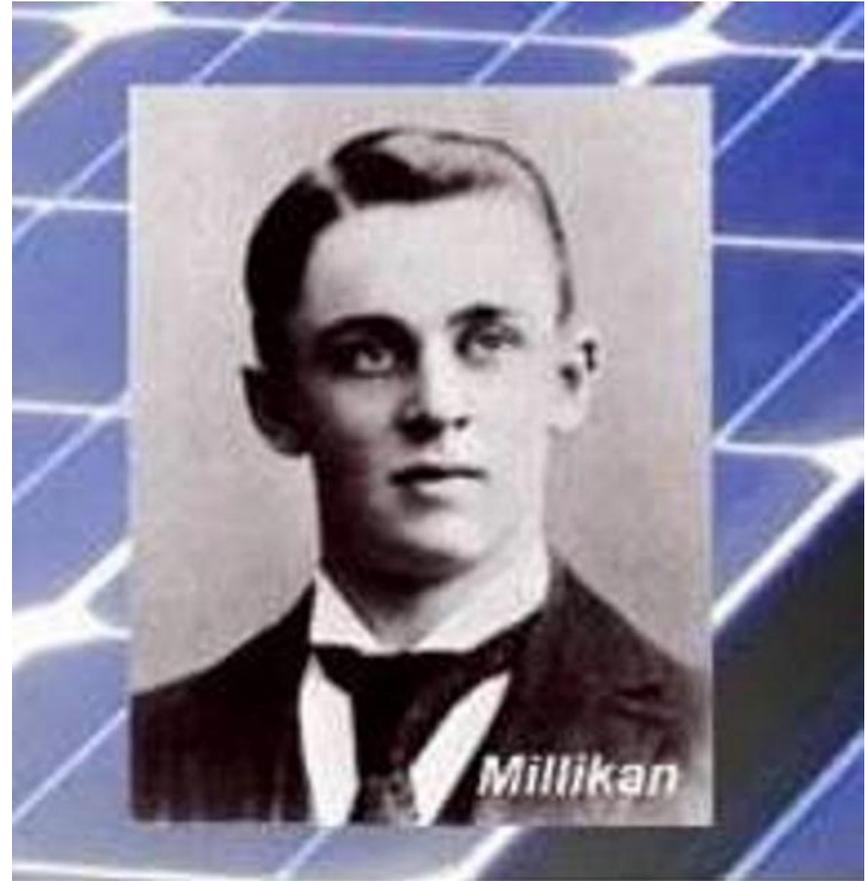
Piani di oscillazione di E e B perpendicolari tra loro

1916 - Millikan (Nobel 1923)

Il fisico americano **Robert Millikan**, dopo oltre dieci anni di misure sempre più accurate, dimostra la validità dell'equazione fotoelettrica di Einstein , confermando sperimentalmente l'effetto fotoelettrico .

Dimostrò sperimentalmente l'ipotesi di Einstein sull'energia del fotone , e quindi dell'elettrone emesso, che dipende soltanto dalla frequenza della radiazione .

Nel 1916 effettuò uno studio sperimentale sugli elettroni emessi da una lamina di Sodio investita da radiazione luminosa.

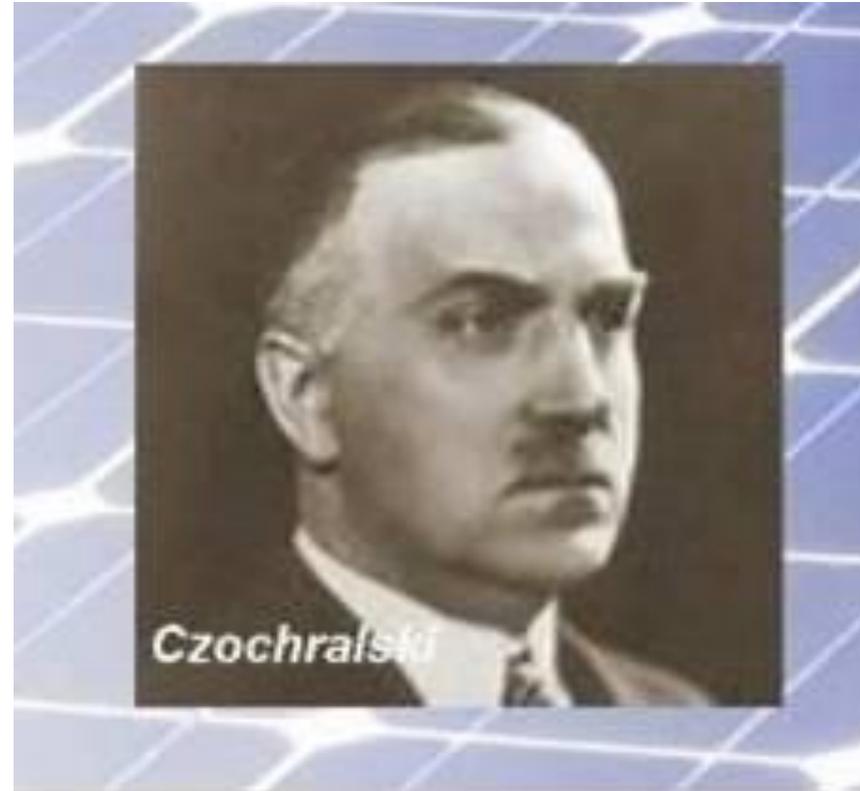


1916 - Czochralski

Il chimico polacco Jan Czochralski inventa e realizza il processo di crescita cristallografica di monocristalli di Germanio e Silicio in lingotti cilindrici inizialmente da 1 – 2 pollici di diametro,

Il processo si basa sul principio della “simpatia cristallografica” partendo da un seme madre di cristallo puro.

Tale processo tecnologico è ancora oggi usato con il suo nome (processo CZ) nell’industria del Silicio sia elettronico che fotovoltaico.



Nasce l'era del Fotovoltaico

1953- Lo scienziato statunitense dei Bell Laboratories **Gerald Pearson** realizza la prima cella FV al Silicio molto più efficiente di quelle al Selenio .



1954- Successivamente, altri due scienziati statunitensi dei Bell-Labs, **Darryl Chapin** e **Calvin Fuller** perfezionano la scoperta di Pearson e realizzano la **prima cella al Silicio** in grado di convertire le radiazioni solari in energia elettrica sufficiente per alimentare dispositivi elettrici di uso normale, con un **rendimento del 6%**.



e poi ...

Anni "50-"60 sia l'Aeronautica e l'Esercito statunitensi che la NASA poi, seguirono molto da vicino lo sviluppo della tecnologia solare sia al Silicio che al Selenio presso i laboratori Bell. Analogamente avveniva anche nelle altre nazioni.

Fine degli anni '50 il Fotovoltaico forniva elettricità ai satelliti americani e sovietici e gli ingegneri progettavano moduli sempre più potenti.

Fine degli anni '70 le celle solari erano ormai diventate fonte energetica abituale per i satelliti artificiali, e così è ancora oggi.

La tecnologia solare era invece ancora troppo costosa per gli usi terrestri e civili e lo rimase praticamente fino ai primi anni Settanta, quando **Elliot Berman**, sostenuto finanziariamente dalla Exxon, progettò un modulo FV molto più economico

Il primo acquirente importante di moduli FV per uso terrestre fu, perciò, l'industria Petrolifera che li usava nei luoghi non serviti dalle linee elettriche.

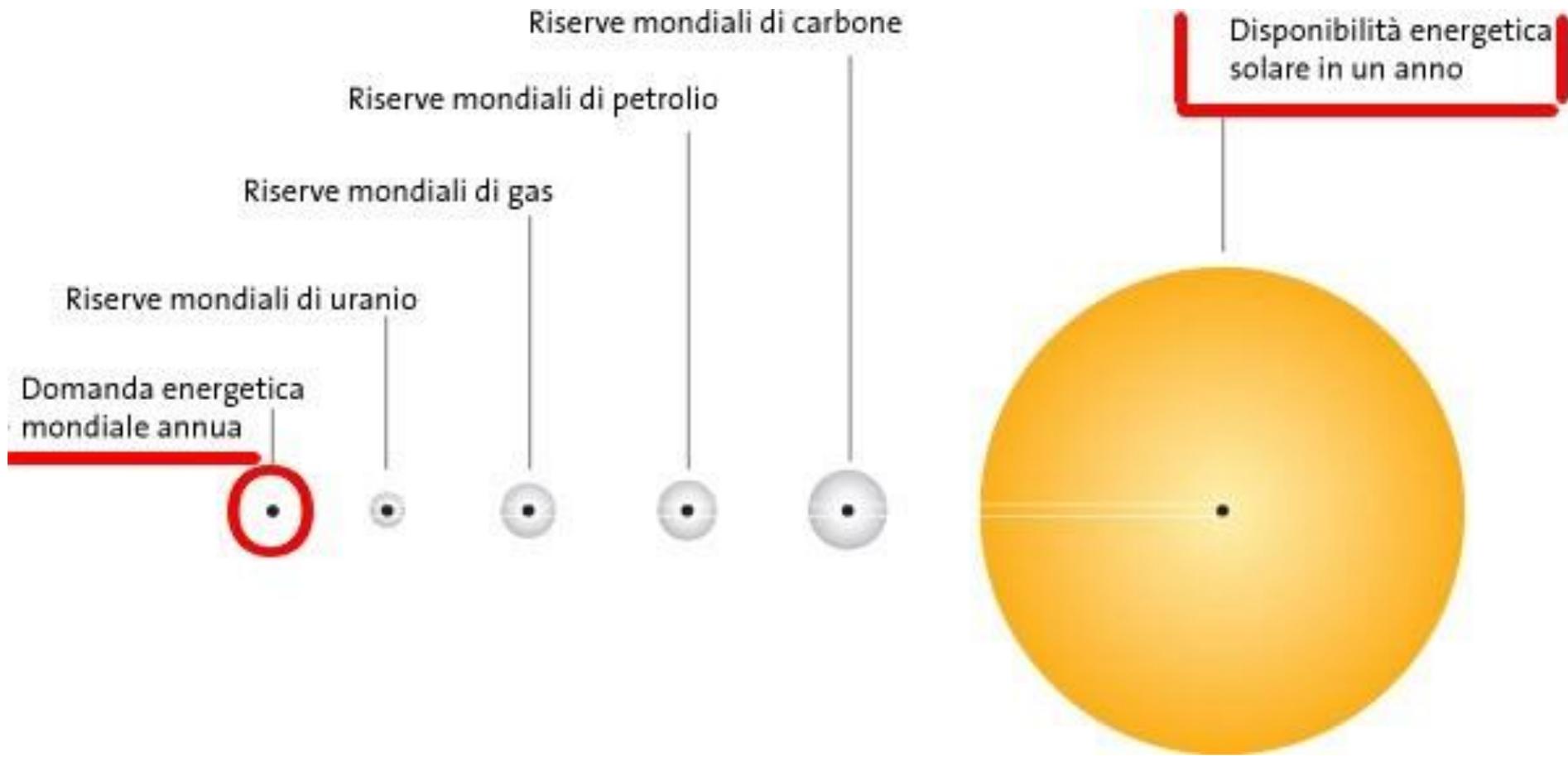
1963- inizia la commercializzazione dei primi pannelli FV
con la giapponese **Sharp** .

PERCHÉ IL FOTOVOLTAICO ?

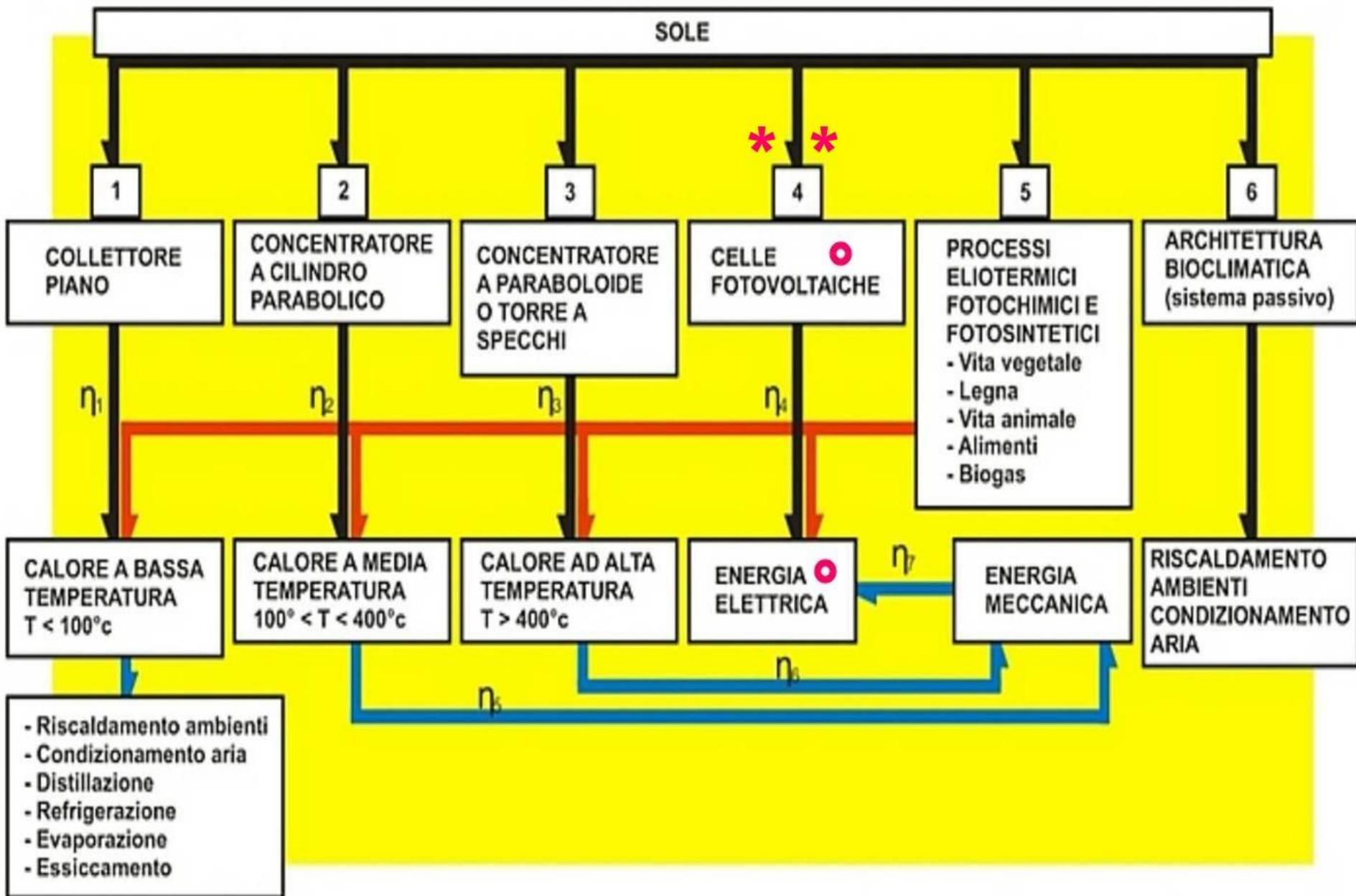
***Potenziale diffusione
capillare sul territorio***

***Energia ricavabile direttamente
dalla luce del Sole
su gran parte del Pianeta***

La radiazione solare di un anno sulla Terra è oltre 10.000 volte il fabbisogno energetico mondiale.



TRASFORMAZIONI DELL'ENERGIA SOLARE



PRO NUCLEARE

Produzione continua di energia per periodi di tempo lunghi.

Non produce gas serra. L'energia nucleare non produce i gas serra. Il combustibile primario non causa l'emissione in atmosfera dei gas responsabili dell'effetto serra (es. CO₂).

Produzione di energia elettrica su vasta scala.

Con piccole quantità di uranio una centrale atomica riesce a produrre una grande quantità di energia elettrica a ciclo continuo.

Ciclo di vita della centrale. L'impianto nucleare può funzionare ininterrottamente per 40-60 anni.

→ Ammortamento costante dell'elevato costo iniziale della centrale atomica.

Approvvigionamento energetico. L'energia nucleare riduce la dipendenza dall'estero per import di gas, carbone o petrolio

CONTRO NUCLEARE

- **Elevati costi iniziali**, elevato know how tecnologico per la gestione degli impianti. Elevati costi per la decontaminazione, lo smaltimento e la messa in sicurezza delle scorie al termine del ciclo di vita dell'impianto.
- Una volta in esercizio **la centrale nucleare non può essere spenta** per diversi anni e necessita di un lungo periodo di tempo prima di poter procedere ad un eventuale smantellamento.
- **Stoccaggio in sicurezza delle scorie radioattive**
le radiazioni durano decine di migliaia di anni.
- **Sicurezza centrali nucleari. E' il principale svantaggio che ha potenziali gravi conseguenze sull'ambiente e sull'uomo (vedi Chernobyl 1987 e Fukushima 2011).** Per questo le centrali nucleari richiedono un livello di sicurezza enormemente maggiore rispetto alle altre centrali elettriche.
- **Proliferazione nucleare.** → disponibilità come sottoprodotto di **plutonio** → possibilità di produrre armi nucleari (bombe atomiche) → il nucleare è un argomento strategico sui tavoli della diplomazia e della politica internazionale (es. nucleare Iran ecc).

LE CENTRALI NUCLEARI OLTRALPE



Confronto Carbone , Uranio , Torio

Si calcola che per alimentare una centrale elettrica da 1 GW per un anno continuativo ci vogliono circa :

- **3.500.000 Tonnellate di Carbone** se termoelettrica
- **200 Tonnellate di Uranio 235** se nucleare ad Uranio
- **1 Tonnellata di Torio** se nucleare con Torio

In conclusione il fotovoltaico conviene?

Un investimento è la garanzia di ottenere nel tempo più benefici di quelli che avrei ottenuto senza investire.

Nel caso del Fotovoltaico i benefici, già sul medio periodo, sono maggiori dei costi sostenuti per realizzare l'impianto.

Infatti come vedremo a suo tempo, ai costi attuali, i tempi di rientro dell'investimento per un **IFV di circa 3 kW** (adatto per una famiglia media di 4 persone) sono

- **circa 4-5 anni nel Norditalia**
- **circa 3-4 anni nel Suditalia e Isole**

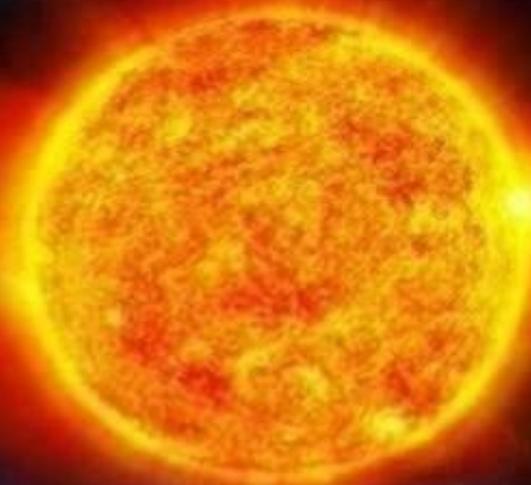
Riassumendo vanno confrontati:

i **“costi”** d'installazione chiavi in mano + di quelli di manutenzione nella vita utile (fino a circa 35 anni) con i **“benefici”** rappresentati dall'energia di autoconsumo + quella che periodicamente immetto in rete (scambio con la rete).

E questo senza contare del beneficio a favore dell'inquinamento (il fotovoltaico produce energia senza rilasciare CO₂ nell'ambiente).

Ecco perchè il fotovoltaico non è un costo, ma un investimento.

Dal Sole



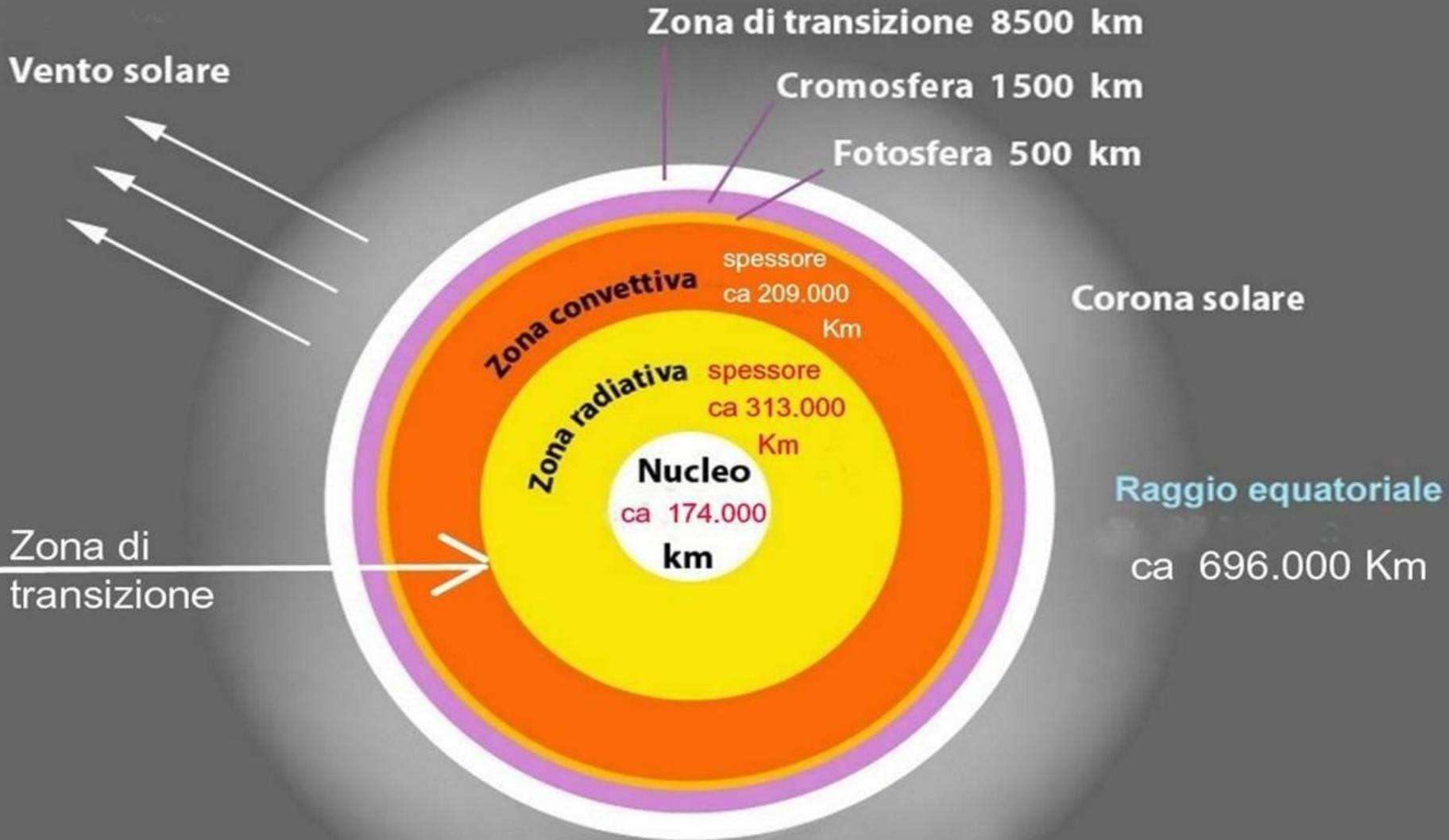
alla Terra



*Energia
elettromagnetica
(Fotoni + Neutrini)*

UTE 18-19

Schema del **Modello Solare Standard** di Guenther (Nasa 1992)



Modello Standard Solare secondo Guenther (1992)

Il Nucleo del Sole → la culla dei Fotoni

Tutto ha origine nel nucleo del Sole (di raggio pari a circa 174.000 Km) , dove avvengono da sempre le reazioni nucleari di fusione nella quali, attraverso tre fasi intermedie, avviene la **fusione di protoni di Idrogeno che genera nuclei di Elio e rilascia energia.**

Senza entrare nella descrizione scientifica della fisica della fusione, tra l'altro reperibile abbastanza facilmente nella letteratura scientifica disponibile anche sul WEB, è qui interessante riassumerne le proprietà e le fasi fondamentali.

Condizioni fisiche presenti nel nucleo interno del Sole che rendono possibile la fusione (secondo il MSS di Guenther 1992) :

- **Altissima temperatura : ca 15,8 milioni di gradi Kelvin**
- **Altissima pressione : ca 238 miliardi di atmosfere**
- **Alta densità : ca 156 gr/cmc**

In queste condizioni la materia si trova nel cosiddetto quarto stato :

il PLASMA → l'atomo idrogeno si scompone in un protone e un elettrone libero.

In questo stato fisico estremo (**plasma solare**) avviene la reazione di fusione dei protoni di idrogeno che , in tre fasi successive, porta alla formazione di nuclei di Elio .

La massa finale di Elio è inferiore dello 0,71% a quella iniziale di quattro protoni

Idrogeno → questo difetto di massa si trasforma in energia come previsto dalla famosa

legge di Einstein $E = m \cdot c^2$.

Reazione di fusione (ciclo p-p) → $4\text{H} \rightarrow 1\text{He} + 2\text{Neutrini} + 2\text{Fotoni gamma}$

Energia rilasciata in un ciclo p-p = 25,6 milioni di eV (MeV)

→ per il 98% come Fotoni γ → per il 2% come Neutrini

In conclusione l'Idrogeno è il “carburante” primario del Sole , il quale grazie alla fusione nucleare genera Elio ed energia elettromagnetica sotto forma di “fotoni” e “neutrini”

L'astronomo inglese **Sir Arthur Eddington** per primo teorizzò che, grazie alla fusione nucleare, il sole produce energia sotto forma di fotoni energetici , "bruciando" continuamente Idrogeno e trasformandolo in Elio

FOTONE – NEUTRINO

FOTONE

- Particella quantica di ENERGIA
- **Energia:** dipende dalla frequenza f
 $E_f = h \times f$ (h è la costante di Plank)
- **Massa:** nulla
- **Carica elettrica:** nulla
- Nella radiazione solare i fotoni assumono varie frequenze
→ spettro solare
- **La luce visibile** contiene fotoni con frequenze corrispondenti al campo 400nm(violetto) – 700nm(rosso)
di lunghezze d'onda λ ($\lambda = 1/f$)

NEUTRINO

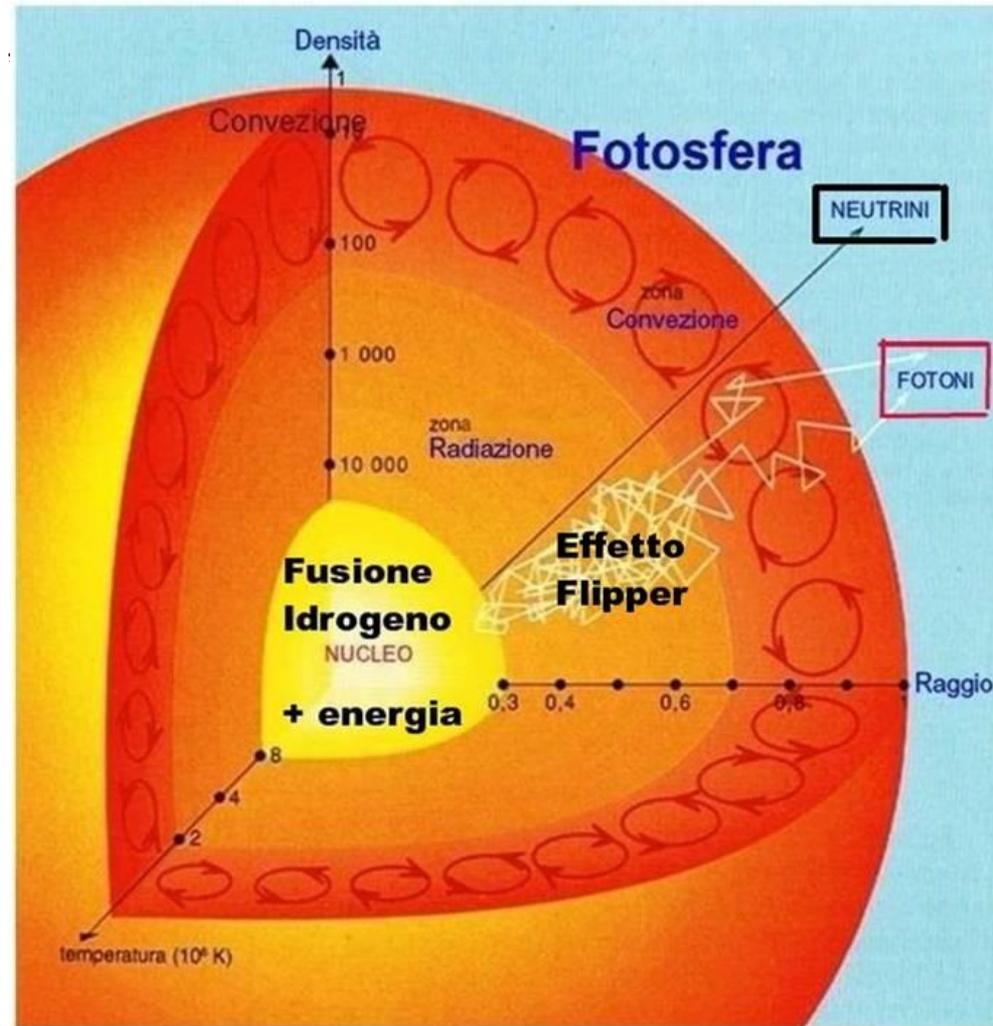
- Particella subatomica elementare
- **Energia:** ca 0,42 MeV
pari a $0,67 \times 10^{-13}$ Joule
- **Massa:** $m = 8,913 \times 10^{-38}$ Kgm
- **Carica elettrica:** nulla
- **Non interagisce** con le particelle circostanti

LA LUNGA STRADA DEI FOTONI VERSO LA FOTOSFERA

I **fotoni gamma** generati dalla fusione nel nucleo interagiscono con le particelle circostanti e ad ogni interazione (urto) viene emesso un nuovo fotone in una catena continua di interazioni secondo percorsi casuali ma statisticamente orientati verso la fotosfera esterna (**effetto “Flipper”**).

È stato calcolato che il **cammino libero medio** di un fotone tra due successive interazioni varia moltissimo da bassi valori al centro (< 1 cm) a valori più elevati verso la fotosfera.

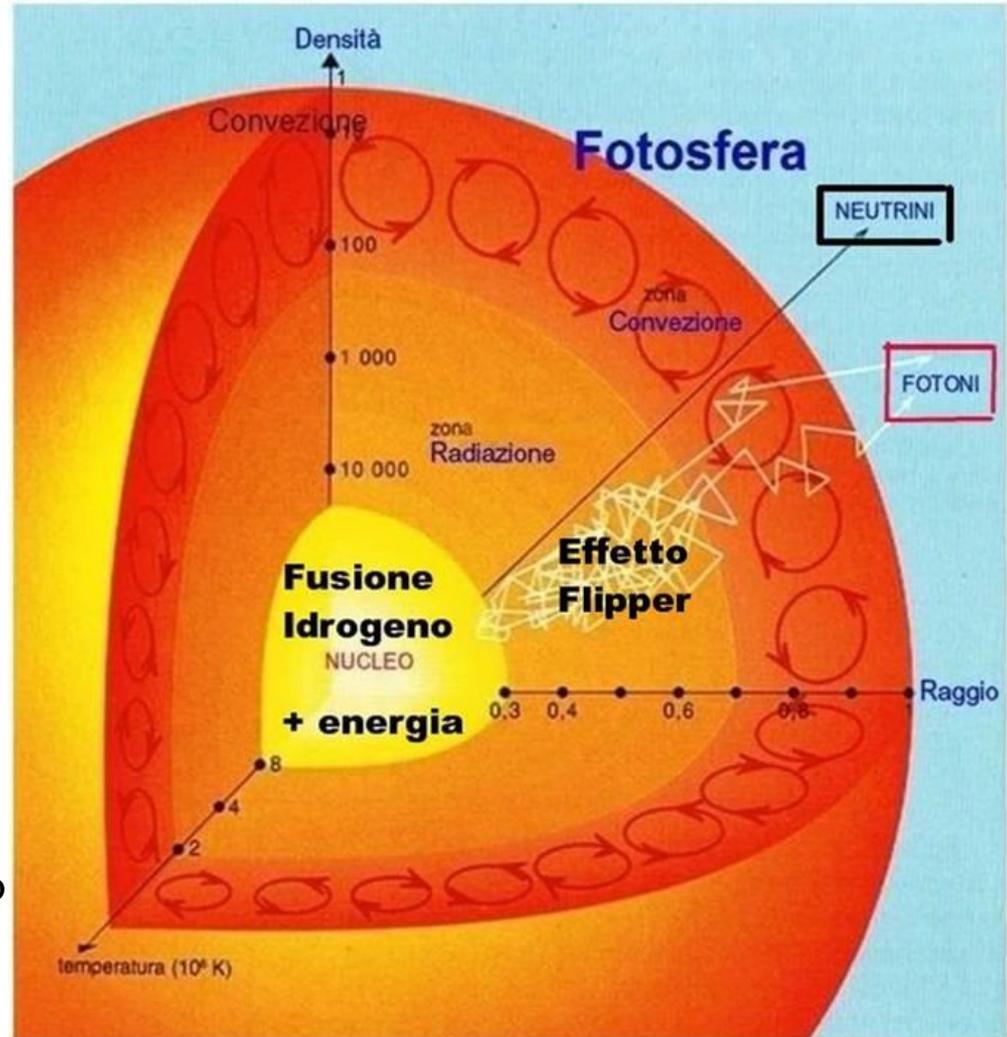
Questa catena di scambi fotonici, assimilabile ad una sorta di **staffetta energetica**, è in stato di equilibrio cioè per ogni fotone assorbito ne viene emesso uno nuovo.



Dal punto di vista energetico possiamo quindi affermare che nel nucleo del Sole le reazioni di fusione producono continuamente energia, la quale viene “trasportata” verso la fotosfera solare per mezzo di **fotoni mutanti** ad ogni interazione con le particelle circostanti.

Questo trasporto di energia avviene :

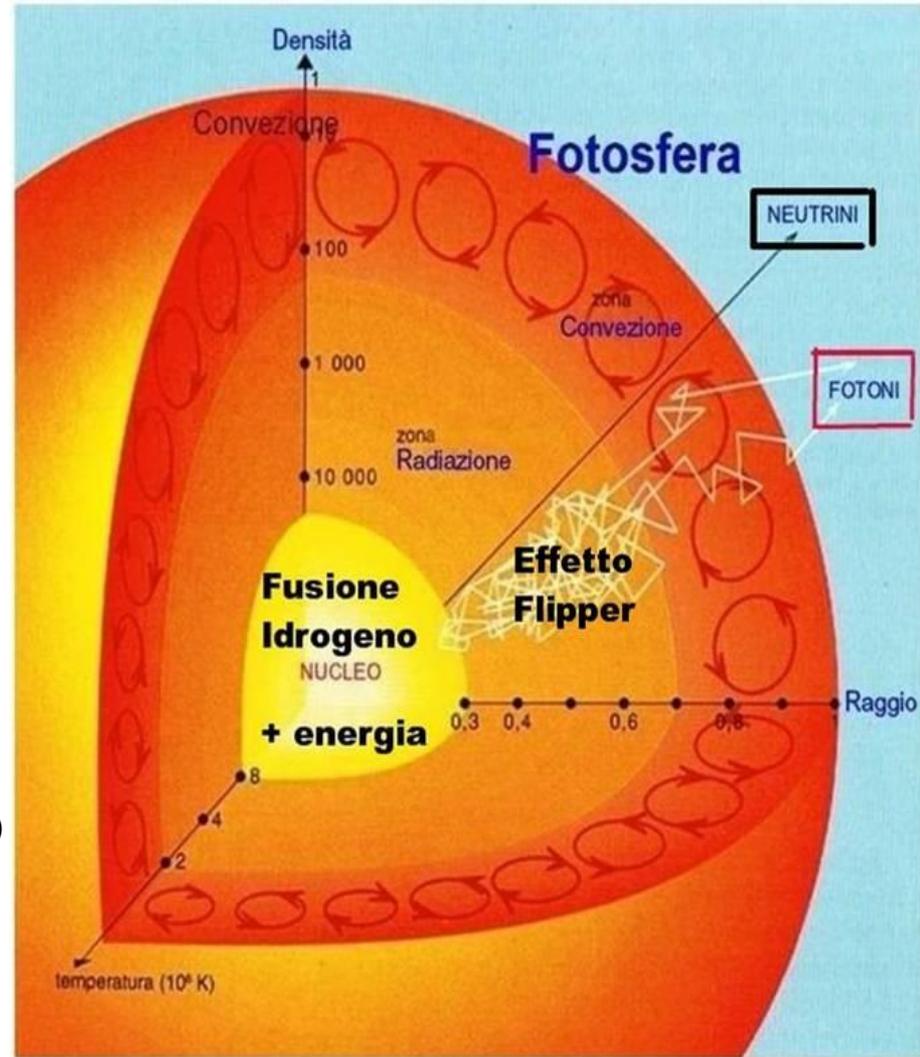
- 1- prima per **“radiazione”** fino a circa 209.000 Km sotto la fotosfera ,
- 2- poi per **“convezione”** negli strati meno densi sino alla fotosfera esterna.



LA DIFFUSIONE DEI FOTONI GAMMA

I fotoni gamma prodotti dalle reazioni di fusione P-P, sono dotati di enorme energia pari a circa 200.000 volte l'energia dei fotoni luminosi (1,75 – 2,62 eV). Se i fotoni gamma viaggiassero “direttamente” verso la fotosfera senza le mutazioni per effetto Compton in poco più di 8 minuti raggiungerebbero la Terra con la loro elevatissima energia **rendendo impossibile ogni forma di vita.**

In questo senso dunque **la massa solare fa da “filtro protettivo”** energetico col seguente meccanismo: nella zona di radiazione, ad ogni interazione il fotone perde un po' di energia (aumentando la sua frequenza) raggiungendo sulla fotosfera un valore nettamente minore e **tale da consentire poi sulla Terra la “vita” come da sempre la conosciamo.**



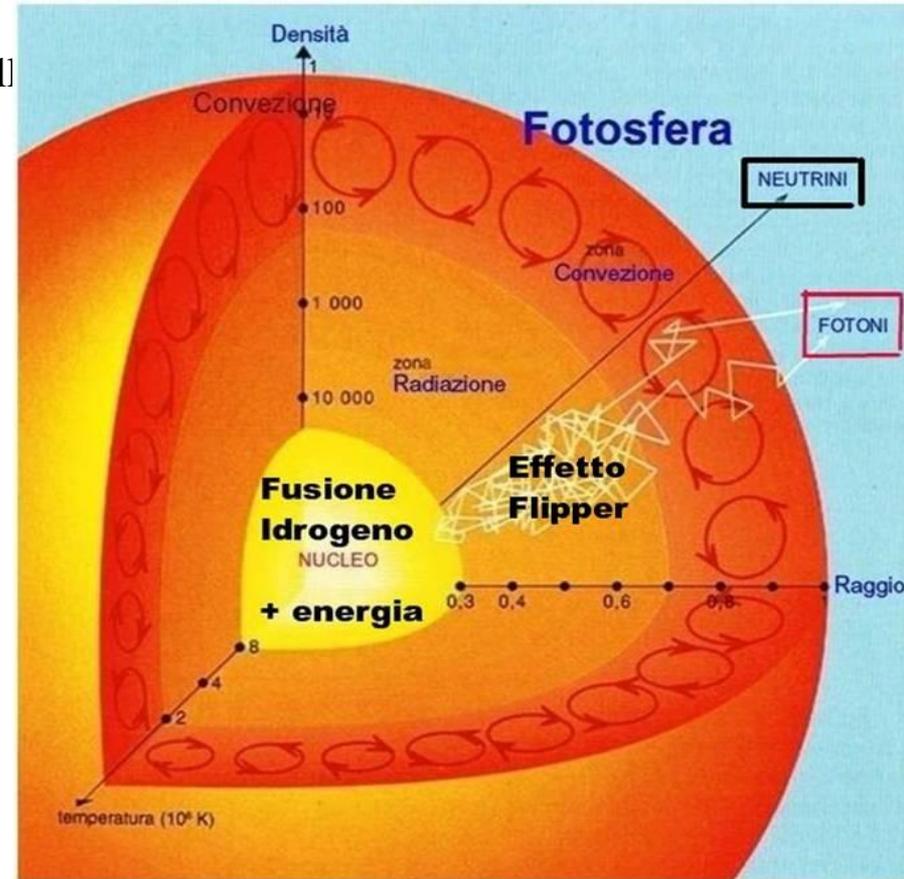
TEMPI DI DIFFUSIONE DEI FOTONI GAMMA

Non rientra nei limiti di questa conferenza, entrare nel dettaglio degli studi teorico-sperimentali del **tempo di attraversamento** dei fotoni nel Sole. Una ricerca nella letteratura scientifica porta però ai seguenti risultati basati sul modello di Gunther:

Zona radiativa: per l'effetto Flipper, il tempo di attraversamento è elevatissimo. I vari studi danno valori da ca 5-6 mila anni a milioni di anni.

Il valore più accreditato in base al modello Gunther è di 170.000 anni (sostanzialmente confermato dallo esperimento Borexino 2014 del Gran Sasso (> 100.000 anni).

Zona convettiva: il tempo di attraversamento è trascurabile (ca 30-40 gg) grazie ai moti convettivi di trascinamento dei fotoni simili alla salita verso la superficie delle bolle d'acqua che bolle.

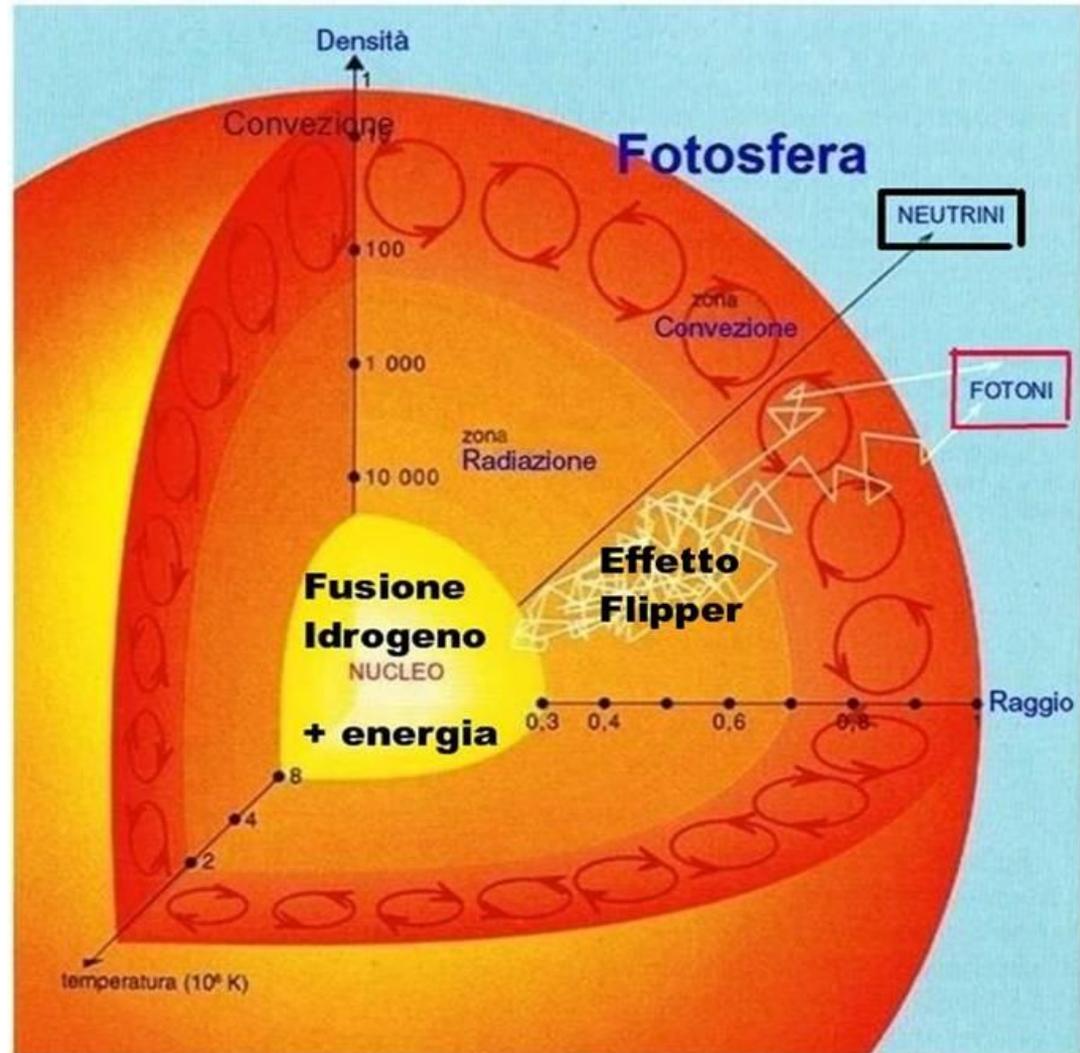


TEMPI DI DIFFUSIONE DEI NEUTRINI

I **neutrini** invece non interagiscono con le particelle circostanti, ma si propagano secondo linee rette radiali verso la fotosfera (alla velocità della luce).

Quindi raggiungono la superficie terrestre in poco più di 8 minuti.

Sulla Terra arrivano Neutrini prodotti dal Sole da circa 8 minuti e Fotoni ... discendenti ... dei fotoni gamma prodotti dal Sole ca 170.000 anni fa , quando la specie umana muoveva i suoi primi passi !!!



L'ENERGIA DELLA FUSIONE P-P

L'energia prodotta dal Sole con le reazioni nucleari di fusione, viene trasmessa sulla Terra come **energia elettromagnetica** sotto forma di **“fotoni” (energia fotonica)**.

La massa del Sole è costituita per circa il 74% da Idrogeno e il 24% da Elio

Ogni secondo nel nucleo del Sole 600.000.000 di tonnellate di Idrogeno H vengono convertite in 595.740.000 tonnellate di Elio He .

Il difetto di massa (4.260.000 tonnellate) , in base alla legge di Einstein, si trasforma in energia ($E = m \cdot c^2$) .

Ogni secondo il ciclo di fusione P-P genera quindi una energia radiante

$$\mathbf{E_r = m \cdot c^2 = 4,26 \cdot 10^9 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ Joule}}$$

cioè una potenza radiante pari a $\mathbf{Pr = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ Watt}}$

Questa potenza radiante, grazie al sostanziale bilancio energetico del Sole, corrisponde anche alla potenza radiante emessa dalla fotosfera solare dove quindi abbiamo una **radiazione superficiale di circa 63.000 kW/m^2** (valore che si ottiene dividendo la potenza radiante per la superficie sferica media della fotosfera).

Questo valore decresce via via che aumenta la distanza dal Sole, poiché aumenta via via la superficie sferica di attraversamento.

RADIAZIONE SOLARE SULLA TERRA

Dopo circa 150.000.000 Km, la radiazione solare raggiunge la nostra atmosfera ma il suo valore unitario (cioè i Watt/ m²) è notevolmente diminuito. Di quanto?

Per valutarlo dobbiamo considerare che **la Terra intercetta solo una piccolissima frazione (*) della potenza irradiata dal Sole nello spazio**, proporzionale all'angolo solido sotto cui è vista dal Sole; tale angolo dipende dalle dimensioni della Terra e dalla sua distanza dal Sole.

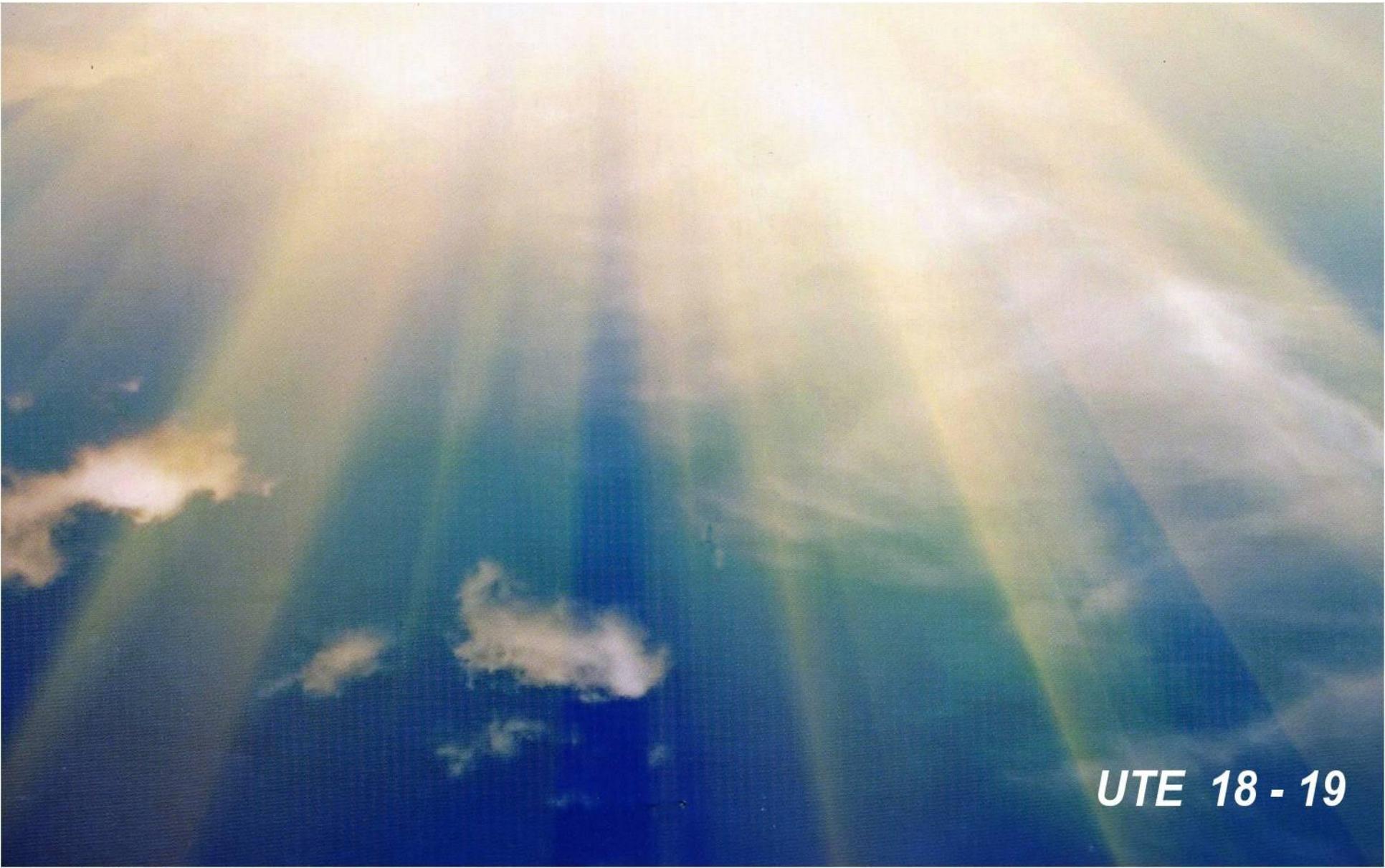
Più precisamente l'area terrestre d'intercettazione della radiazione solare equivale circa ad un cerchio di raggio 6.370 Km con la superficie **perpendicolare** ai raggi solari, i quali si possono considerare paralleli all'asse Sole-Terra, data l'enorme distanza Sole-Terra.

In base alla distanza media Sole-Terra e alla potenza radiante totale emessa dalla fotosfera solare, si può calcolare l'irraggiamento solare incidente sulla superficie captante terrestre (area del cerchio di prima) **fuori dall'atmosfera terrestre**, indicato col simbolo S_0 .

Il calcolo porta al valore medio di: **$S_0 = 1.367 \text{ W/ m}^2$ (Costante Solare)**

(*) La quota parte di energia solare che la Terra riceve dal Sole è circa mezzo miliardesimo della totale energia emessa radialmente nello spazio dalla nostra stella.

RADIAZIONE SOLARE SULLA SUPERFICIE TERRESTRE



UTE 18 - 19

Il valore della radiazione sulla superficie della Terra scende a **circa 1000 W/ m²**, valore ottimale che si raggiunge in condizioni di tempo sereno nelle zone in cui il Sole è allo Zenit (raggi perpendicolari alla superficie) a livello del mare e a 25°C) .

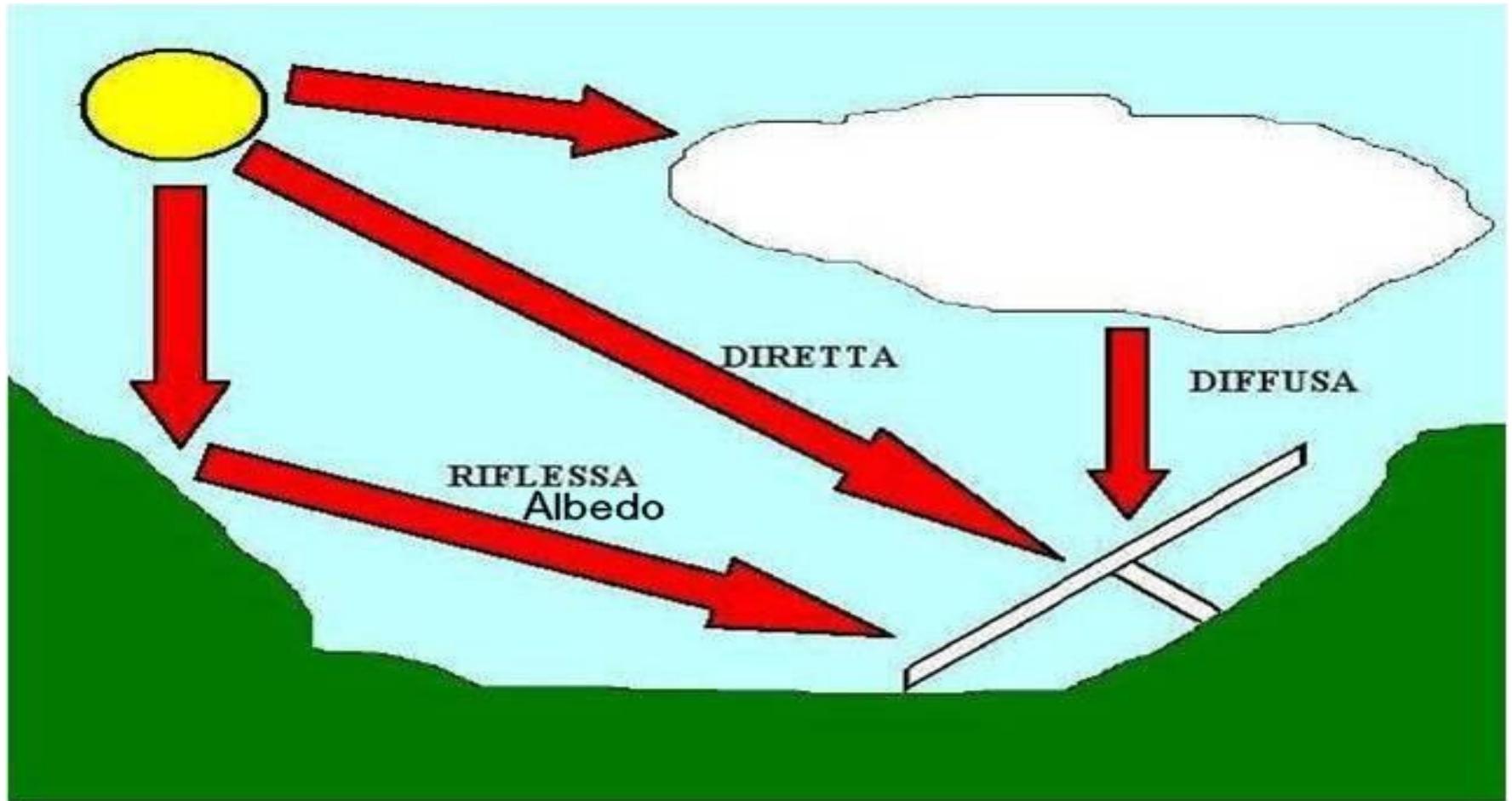
Questo valore è **inferiore di circa il 27% rispetto a quello esterno dell'atmosfera** (costante solare pari a 1367 W/m²).

I vari strati dell'atmosfera terrestre costituiscono quindi un **filtro che attenua la luce solare** .

Per quali ragioni ?

- 1-L'atmosfera terrestre è **spessa circa 100 km** (limite della mesosfera) lungo la verticale ma la radiazione solare arriva al suolo con direzione quasi sempre inclinata, la quale cambia durante il giorno in quanto dipende dalla posizione del Sole e cambia durante le stagioni nell'arco dell'anno → il percorso effettivo è quasi sempre > di 100 Km.
- 2-L'atmosfera è composta da **varie sostanze** (Ossigeno, Azoto, anidride carbonica, vapore acqueo ecc) ciascuna delle quali assorbe i raggi del Sole in modo selettivo, facendo peraltro da filtro protettivo.
- 3-Le sostanze presenti in atmosfera **deviano i raggi del Sole** e quindi alcuni raggi vengono **riflessi e rinviati verso lo spazio**, mentre gli altri raggiungono il suolo.

RADIAZIONE SOLARE SU UN PANNELLO FV



Radiazione solare incidente sul pannello fotovoltaico

Analisi dettagliata delle tre componenti della radiazione totale sul suolo.

- **radiazione diretta:** giunge al suolo direttamente dal Sole. Essa è in funzione dell'angolo d'incidenza dei raggi solari sulla superficie del pannello FV e quindi è massima quando tale superficie è **perpendicolare** ai raggi del Sole.
- **radiazione diffusa:** raggiunge la superficie del pannello FV dopo essere stata riflessa e in parte assorbita dall'atmosfera. E' detta anche radiazione **indiretta** e rappresenta il contributo energetico presente nei giorni con cielo coperto, contributo che diventa più significativo con l'aumento della nuvolosità. Nel periodo invernale con cielo coperto può essere addirittura maggiore del contributo della radiazione diretta.
- **radiazione riflessa (albedo) :** parte della radiazione che giunge sulla superficie del terreno circostante il pannello FV e che viene riflessa rendendosi così disponibile per il pannello FV stesso, **solo se questo , però, è inclinato** (la radiazione riflessa , infatti, **non interessa** la superficie orizzontale). I diversi tipi di terreno sono caratterizzati da un coefficiente di riflessione di **albedo con valori compresi tra 0 e 1**. Un valore di albedo maggiore corrisponde a maggior capacità riflettente del terreno.

Nella realtà di tutti i giorni, la radiazione solare al suolo, varia da istante a istante, da stagione a stagione e da un luogo geografico all'altro.

Il fenomeno aleatorio delle nubi, poi, rende ancor più irregolare e imprevedibile l'andamento dei suoi valori nel corso del tempo.

Dai dati Enea si ricavano i seguenti valori medi in Italia su superficie orizzontale :

RADIAZIONE UNITARIA



ENERGIA SOLARE ANNUA SFRUTTABILE

1- **Pianura Padana** circa **160 W/m²**

→ $160 * 8760 \text{ h} = \text{circa } \mathbf{1.400 \text{ kWh/m}^2 / \text{anno}}$

2- **Italia Centrale** circa **170 W/m²**

→ $170 * 8760 \text{ h} = \text{circa } \mathbf{1.490 \text{ kWh/m}^2 / \text{anno}}$

3- **Sud e Isole** oltre **180 → 200 W/m²**

→ $180 * 8760 \text{ h} = \text{circa } \mathbf{1.577 \text{ kWh/m}^2 / \text{anno}}$

→ **1.752 kWh/m² /anno**

(8.760 = ore totali in un anno)

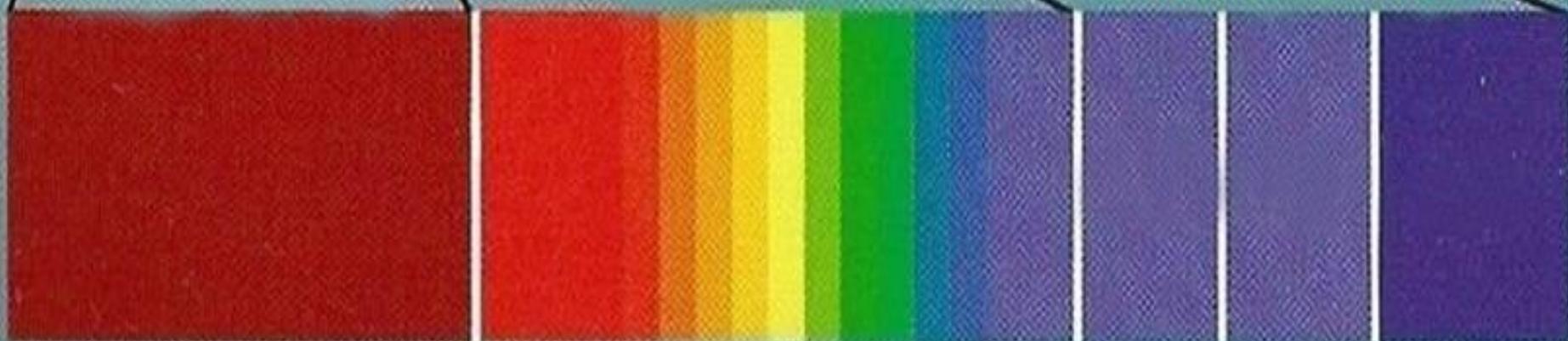
Le mappe isoradiative, cioè la distribuzione dei valori della radiazione solare media annuale per tutta l'Italia, sono il data base fondamentale e necessario per l'analisi fotovoltaica di un sito.

ANALISI DELLE RADIAZIONI

INFRAROSSO

VISIBILE

ULTRAVIOLETTO



Lunghezze d'onda

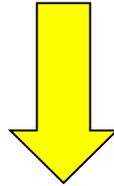
Frequenze

SPETTRO SOLARE

- *Rappresentazione fisica delle radiazioni solari che, come in una radiografia, consente di analizzare la consistenza e il comportamento delle varie componenti elettromagnetiche delle radiazioni emanate dal Sole.*
- **Contenuto energetico** della radiazione solare cioè dei fotoni
- **Strumenti :**
 - Solarimetri - Piranometri sulla Terra
 - Tecnologia satellitare fuori dell'atmosfera
- **Chiave di lettura** di quanta energia fotonica possiamo trasformare in energia elettrica con il fotovoltaico.

CONTENUTO DELLO SPETTRO SOLARE

Componenti con diverse frequenze , associati energeticamente ai **fotoni** paragonabili a piccolissimi “**proiettili di energia**” .



Parametri fisici delle radiazioni luminose:

- Frequenza di oscillazione “**f**”
- Lunghezza d’onda “**λ**”

$$f = c / \lambda$$

Relazione di proporzionalità inversa
(**c** = velocità della luce = 300.000 Km/sec)

CLASSIFICAZIONE RADIAZIONI LUMINOSE

1- **Radiazioni gamma ed ultraviolette** molto energetiche ma pericolose (ustioni anche molto gravi o letali).

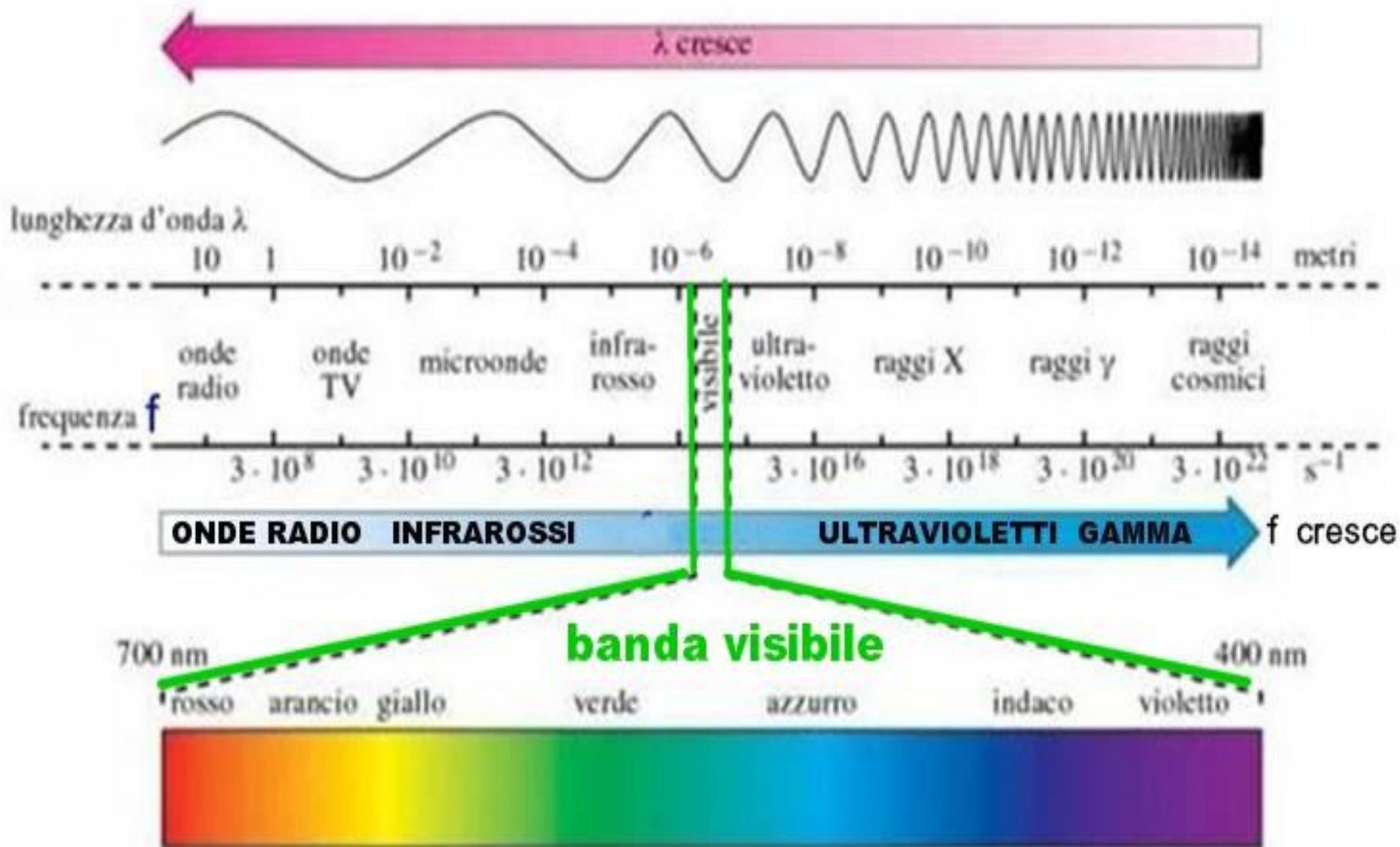
Lunghezze d'onda molto piccole e quindi elevate frequenze.

2- **Radiazioni visibili all'occhio umano** lunghezze d'onda e frequenze intermedie **dal violetto → al rosso**

3- **Radiazioni infrarosse e onde radio** poco energetiche lunghezze d'onda elevate e quindi basse frequenze.

Nel suo complesso, però, la radiazione solare è costituita dalla **mescolanza** di tutte le lunghezze d'onda in quantità e proporzioni tali che la fanno percepire come **luce bianca**

GRAFICA DEI VALORI DELLO SPETTRO SOLARE



LEGGE MATEMATICA DI PLANCK

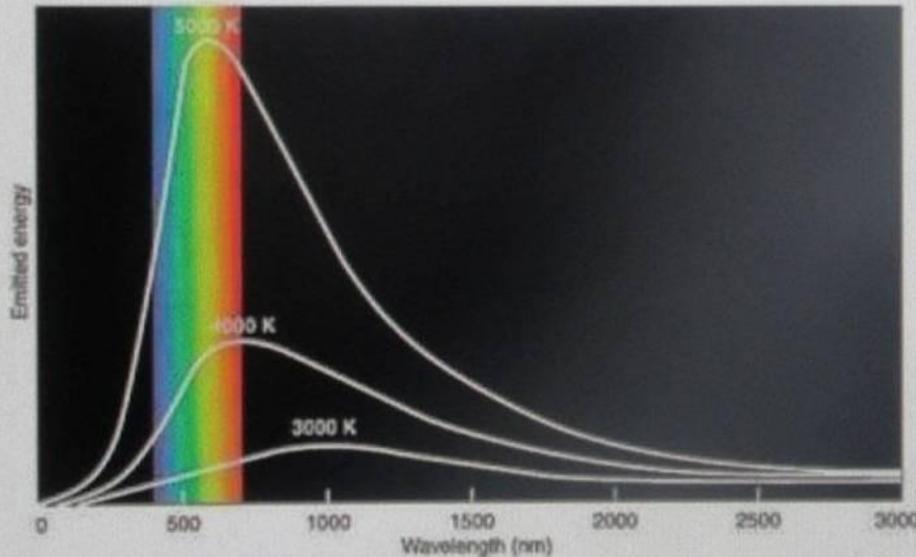
Legge di **Planck** (in funzione della lunghezza d'onda λ)

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

h = costante di Planck

K = costante di Boltzmann

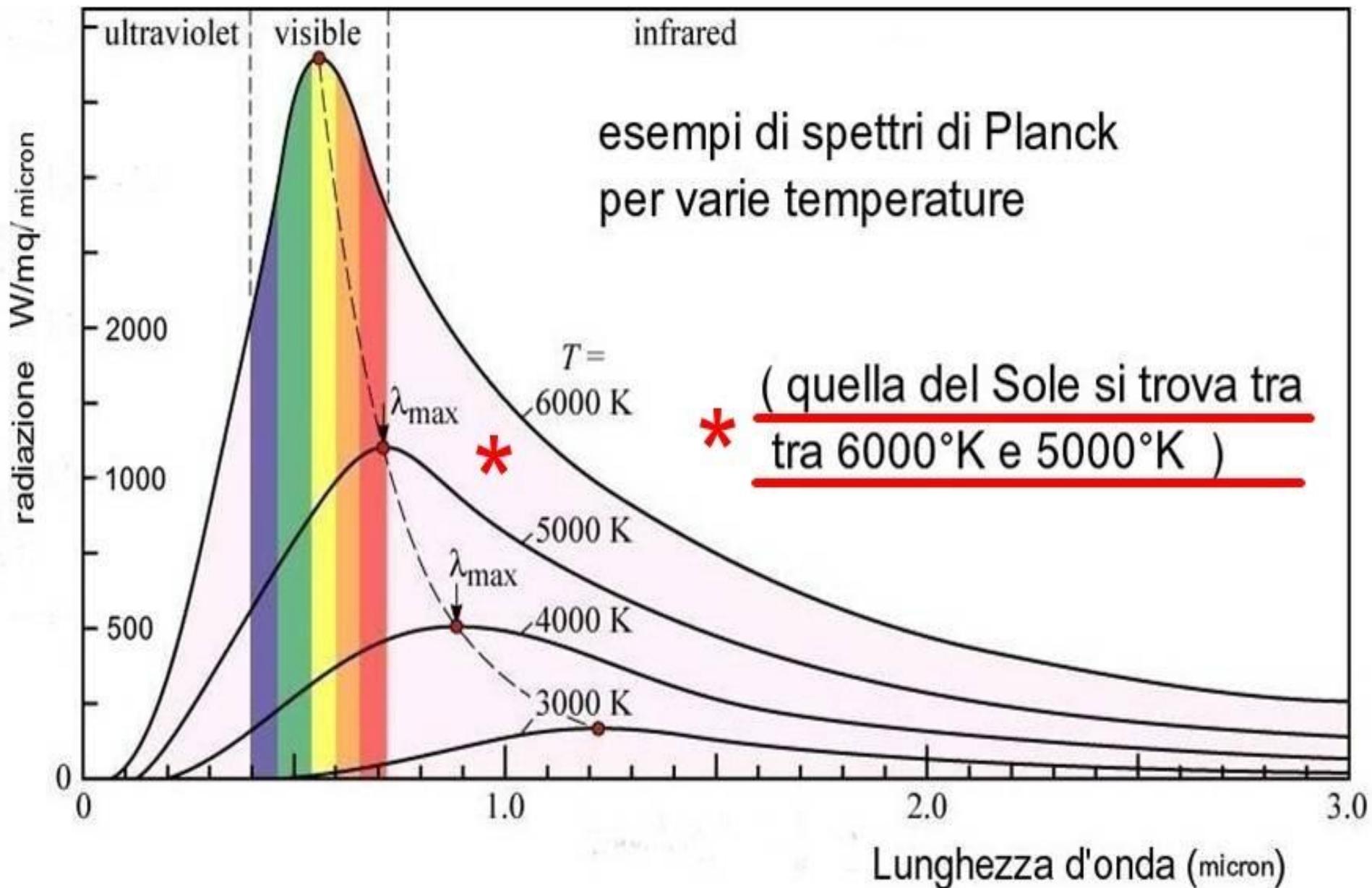
$I(\lambda, T)$ rappresenta l'energia irradiata, ossia l'energia emessa per secondo dalla superficie di un m^2 , per una unità di lunghezza d'onda.



- $h = 6,625 \cdot 10^{-27}$ erg-sec (costante di Planck)
- $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ erg/k (costante di Boltzmann)
- $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec (velocità della luce)

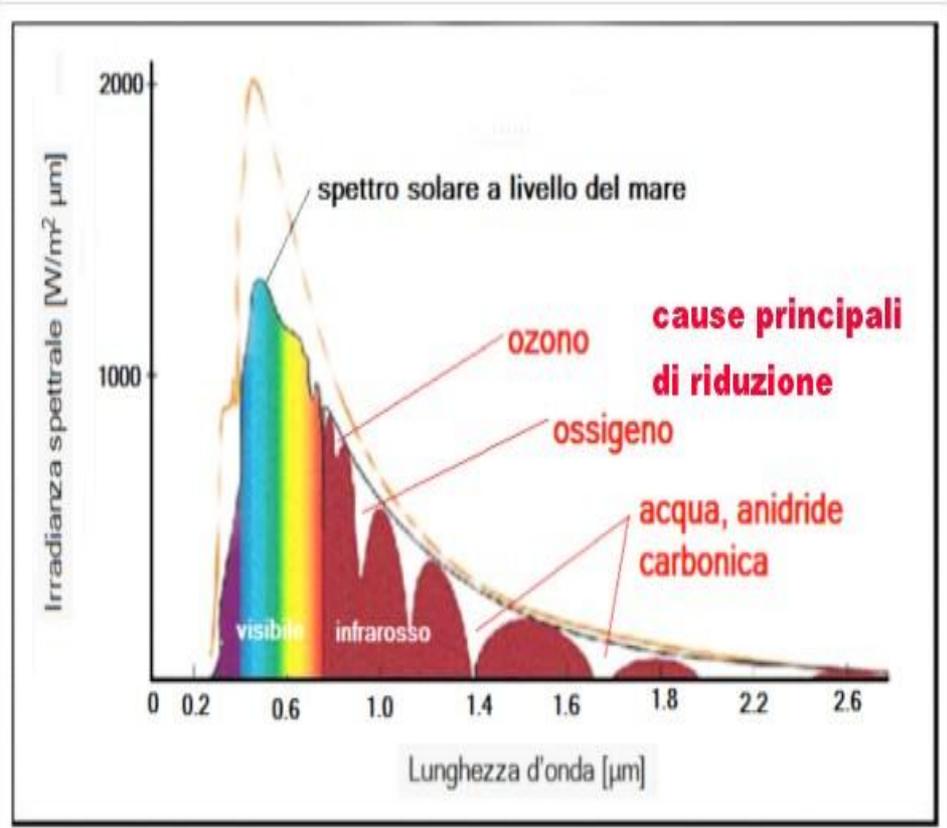
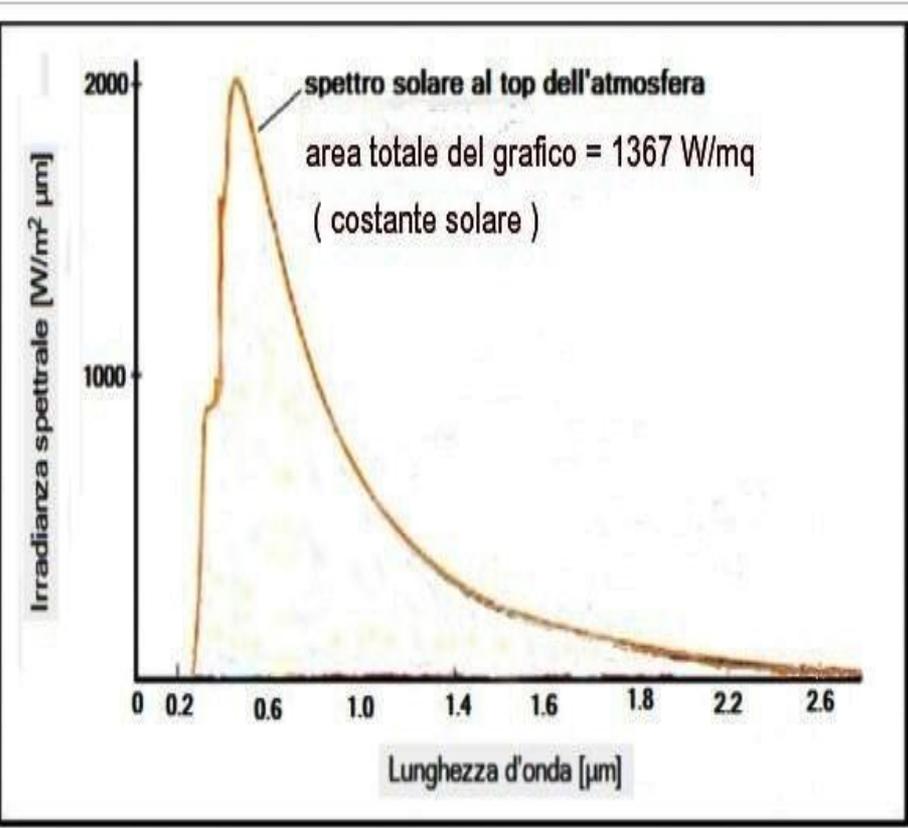
Spettri di corpo nero per oggetti a tre differenti temperature: 5000 K, 4000 K, 3000K.

ESEMPI SPETTRI DI PLANK



SPETTRO SOLARE FUORI DELL'ATMOSFERA E A LIVELLO DEL MARE

L'area compresa fra la curva e l'asse delle ascisse rappresenta l'energia totale emessa, nell'unità di tempo, dall'unità di superficie del corpo entro tutto l'intervallo di lunghezza d'onda (o frequenza) considerato



POTENZA FOTONICA UTILE PER IL FV COL SILICIO

Soglia fotonica del Si = 1,1 micron

Campo verde + rosso (1+2)

potenza **disponibile** per la conversione FV (circa 75% della potenza totale dello spettro).

Campo verde (1) potenza **utile** cioè trasformabile in energia elettrica (**30-40%** della totale).

(max teorico per monogiunzione monosilicio **32,5 % limite Shockley-Queisser**)

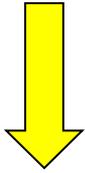
Campo rosso (2) potenza in **eccesso** non trasformabile in energia elettrica.

Campo nero (3) potenza inutilizzabile .



Radiazione solare sul pannello

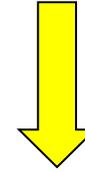
Dipende da vari fattori



Prevedibili e calcolabili

- Costante solare ($1367 \text{ W/m}^2 \pm 3,3\%$)
- Spessore dell'atmosfera
cioè posizione relativa Terra Sole

Fattori ciclici nell'anno
esattamente prevedibili e calcolabili
con vari metodi.



Imprevedibili ed aleatori

- Contenuti di “areosol” e gas
minori
- Condizioni meteo in sito
- Caratteristiche del terreno

Fattori difficilmente calcolabili
→ esperienza e coefficienti
sperimentali

Contenuto delle mappe solari

Le mappe solari (dette anche isoradiative) forniscono i valori medi di radiazione solare cioè l'energia riferita comunemente alla superficie orizzontale di un metro quadro.

Sono disponibili valori medi giornalieri, mensili, annui.

I valori fisici riportati possono essere di due tipi :

→ **Potenza solare** (detta anche Irraggiamento) in **Watt/mq**

→ **Energia solare** (detta anche radiazione) in **kWh/ mq**

NB: se l'energia solare è data in MJ/m^2 (MegaJoule al m^2)

il valore va diviso per 3,6 per averlo in kWh/m^2 .

Valori medi giornalieri in KWh/m^2 dell'energia solare (radiazione) che arriva al suolo nelle varie aree della Terra (medie annuali).

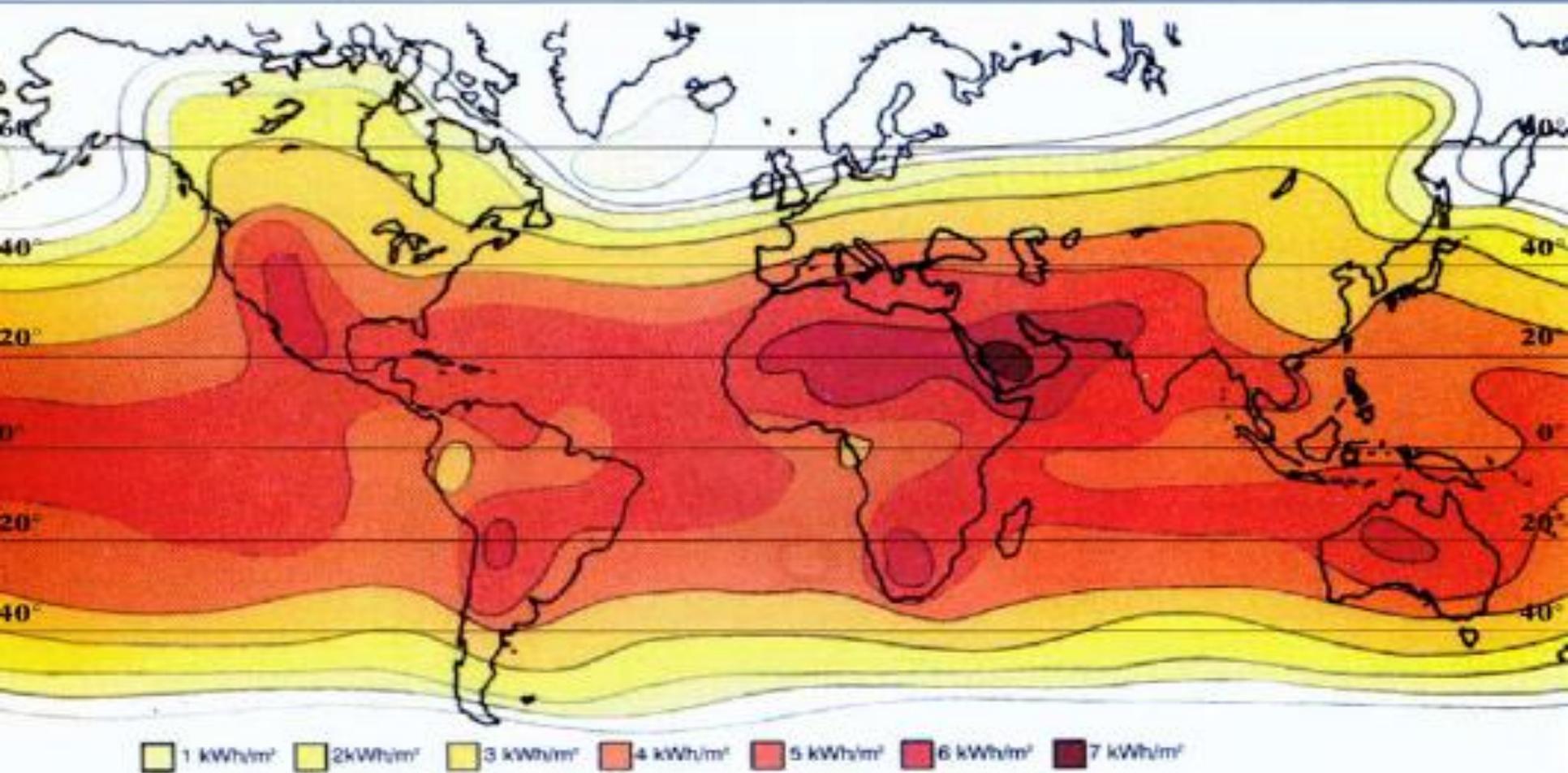


Dipartimento di
Energetica "S. Stecco"

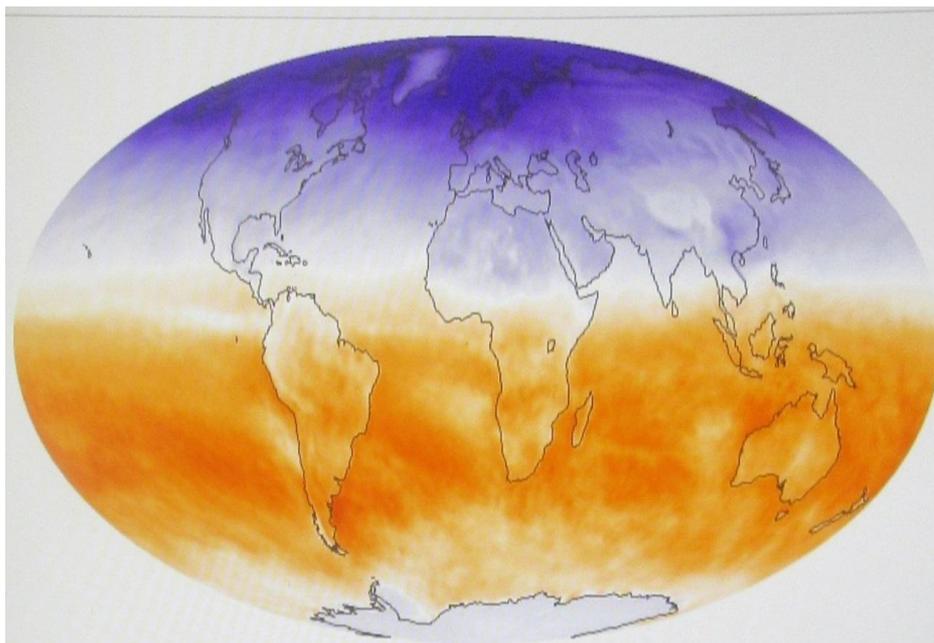
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Ingegneria



Insolazione quotidiana del globo terrestre (media annuale).

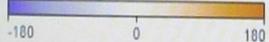


Esempio di mappe dal “earthobservatory.nasa.gov” confronto gennaio – agosto 2018



Net Radiation

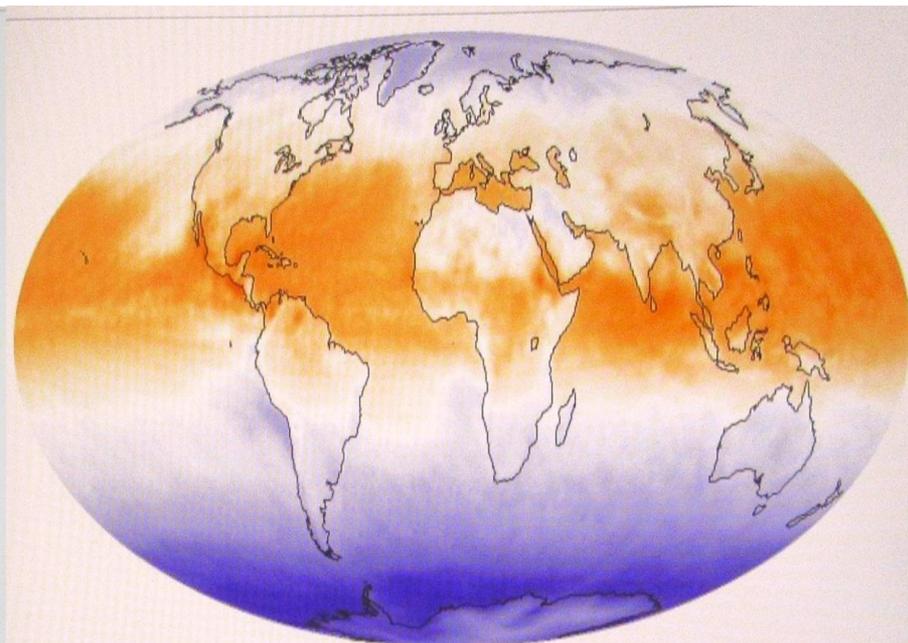
W / m²



July 2006

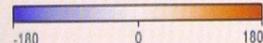
January 2018

August 2018



Net Radiation

W / m²



July 2006

August 2018

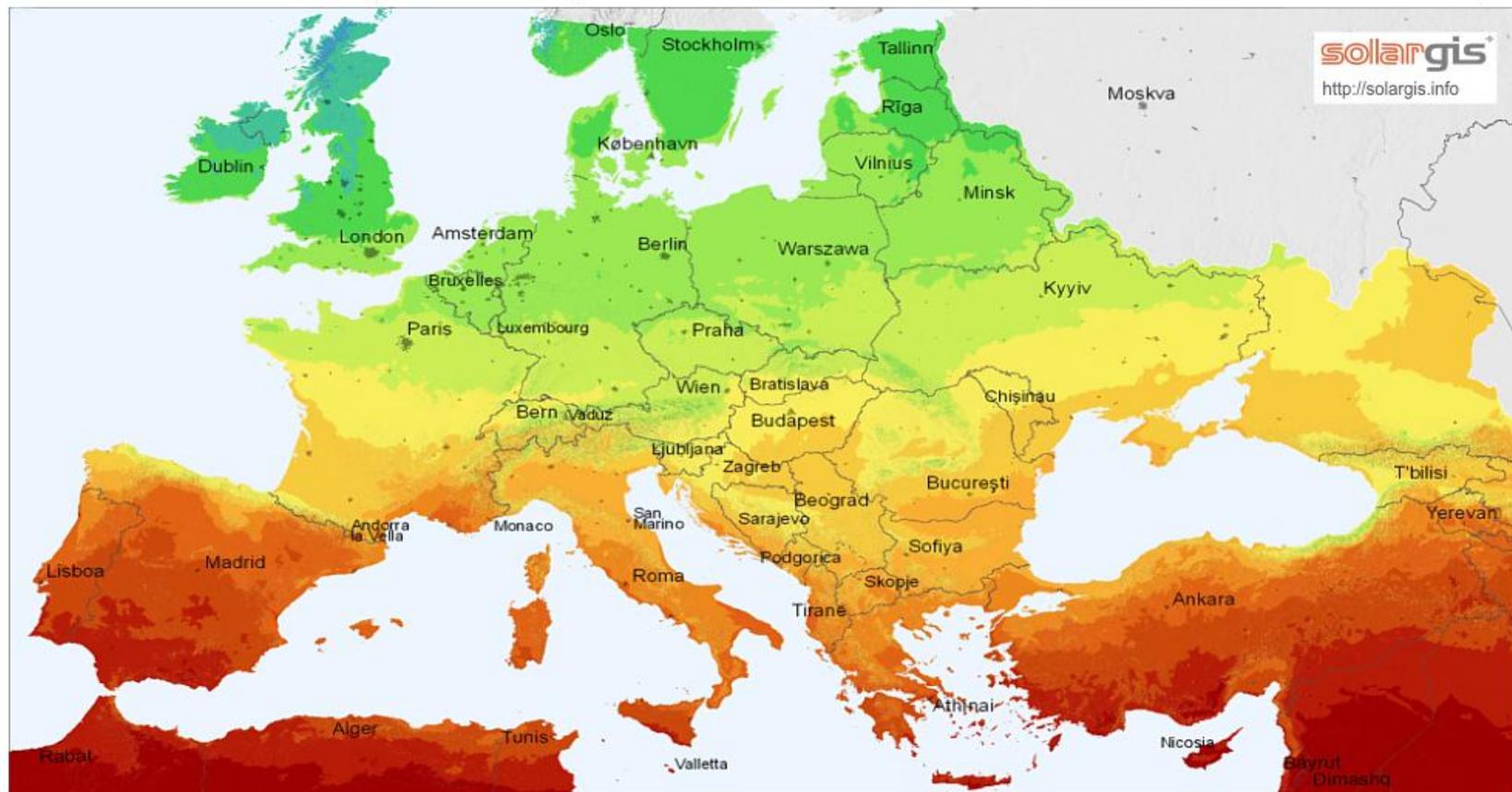
August 2018



Valori medi annuali in kWh/m² dell'energia solare che arriva al suolo nel settore europeo

radiazione solare globale sul piano orizzontale

Europa



Media della somma annuale (4/2004 - 3/2010)



< 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 > kWh/m²

0 250 500 km

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

**Mappa insolazione
media in Italia .
Energia solare in
kWh/mq**

**Dal WEB
SolarGis**



Media somma annuale (4/2004 - 3/2010)



Radiazione solare di alcune città del Norditalia (fonte Enea)

comune	gen(minimo) (MJ/m ² /giorno)	giu/lug(massimo) (MJ/m ² /giorno)	media anno (kWh/m ² /anno)
• Alessandria	5.4	23.1	1410
• Torino	5.0	22.4	1372
• Aosta	3.6	21.8	1282
• Bergamo	5.0	22.3	1355
• Brescia	5.2	22.5	1374
• Como	4.9	22.2	1351
• Milano	5.2	22.7	1389
• Pavia	5.4	23.0	1404
• Bolzano	4.4	21.0	1280
• Merano	4.0	20.8	<u>1256 min</u>
• Venezia	5.1	22.9	1390
• Trieste	4.8	22.2	1339
• Udine	4.8	21.7	1318
• Genova	5.5	23.0	1412
• San Remo	6.0	23.0	<u>1446 MAX</u>
• Savona	5.6	23.0	1420

Radiazione solare di alcune città del Centroitalia (fonte Enea)

• comune	gen(minimo) (MJ/m ² /giorno)	giu/lug(massimo) (MJ/m ² /giorno)	media anno (kWh/m ² /anno)
• Bologna	5.4	23.3	<u>1427 min</u>
• Rimini	5.3	23.3	1428
• Firenze	5.7	23.2	1433
• Livorno	6.0	23.5	1457
• Viareggio	5.8	23.2	1432
• Siena	6.1	23.3	1457
• Terni	6.4	23.2	1472
• Ancona	5.6	23.5	1452
• Roma	7.0	23.9	<u>1534 MAX</u>
• L'Aquila	6.2	23.0	1458

Radiazione solare di alcune città del Suditalia (fonte Enea)

• comune	gen(minimo) (MJ/m ² /giorno)	giu/lug(massimo) (MJ/m ² /giorno)	media anno (kWh/m ² /anno)
• Capri	7.2	24.0	1560
• Napoli	6.9	23.9	1539
• Bari	6.7	24.1	1539
• Brindisi	6.9	24.3	1559
• Vieste	6.5	24.2	1529
• Taranto	7.0	24.1	1558
• Potenza	6.7	23.7	<u>1517 min</u>
• R.Calabria	7.6	24.1	1606
• Catania	8.1	24.2	1633
• Palermo	8.0	24.3	1631
• Siracusa	8.5	24.4	<u>1665 MAX</u>
• Trapani	8.4	24.4	1649
• Nuoro	7.2	24.0	1563
• Olbia	7.1	24.0	1559
• Sassari	7.3	24.1	1569



**Conversione
fotovoltaica**

UTE 18 - 19

FOTONI – ELETTRONI

attori principali del fotovoltaico

FOTONE

- **Particella quantica di Energia**
- **Energia:** dipende dalla frequenza f
 $E_f = h \times f$ (h = costante di Plank)
- **Massa:** nulla
- **Carica elettrica:** nulla
- **Nella radiazione solare i fotoni assumono varie frequenze**
→ spettro solare
- **La luce visibile** contiene fotoni con frequenze corrispondenti al campo di lunghezze d'onda λ ($\lambda = 1/f$)
400nm(violetto) – 700nm(rosso)

ELETTRONE

- **Particella subatomica elementare**
- **Energia:** dipende cinematicamente dalla velocità → $\frac{1}{2} m v^2$
- **Massa:** $m = 9,1 \times 10^{-31}$ Kg
- **Carica elettrica:** - $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb
- **Gli elettroni sono presenti nei vari livelli energetici (orbitali) attorno al nucleo degli atomi.**
- **Solo gli elettroni degli orbitali esterni (detti di valenza) possono essere colpiti dai fotoni.**

PROPRIETÀ Fisiche - Chimiche

(alla temperatura di $300^{\circ}\text{K} = 27^{\circ}\text{C}$)

Gruppo IV della tabella degli elementi

Numero atomico 14
(nr totale di elettroni attorno al nucleo)

Peso atomico 28,1

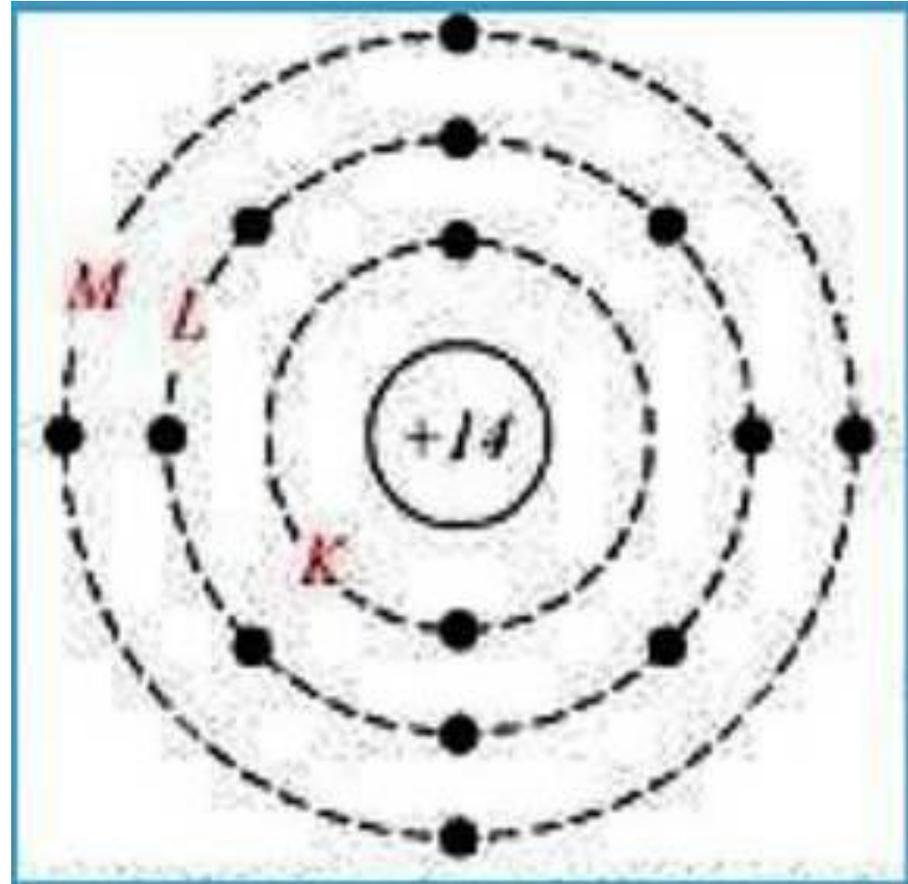
Densità (g/cm³) 2,33

Nr. elettroni di valenza 4
(orbitale esterno M)

Energia d'estrazione di Gap

Eg = 1,12 eV

(1 eV = 1 Volt x carica elettrica elettrone
= $1,6 \times 10^{-19}$ Joule)



STRUTTURA CRISTALLOGRAFICA

Gli atomi di Silicio possono aggregarsi tra loro in **tre differenti strutture**:

- **Monocristallina → monosilicio**

Atomi disposti in modo ordinato e ripetitivo → reticolo cristallino **cubico** senza interruzioni, con grado di purezza elevatissimo (fino a 1 parte d'impurità su 10^{10})

E' questa la forma di Silicio più pura e costosa del Silicio per il fotovoltaico.

- **Policristallina → polisilicio**

Atomi aggregati ancora in strutture cristalline però disposte in modo **disallineato** detto policristallo. Il grado di purezza è inferiore a quello del monosilicio .

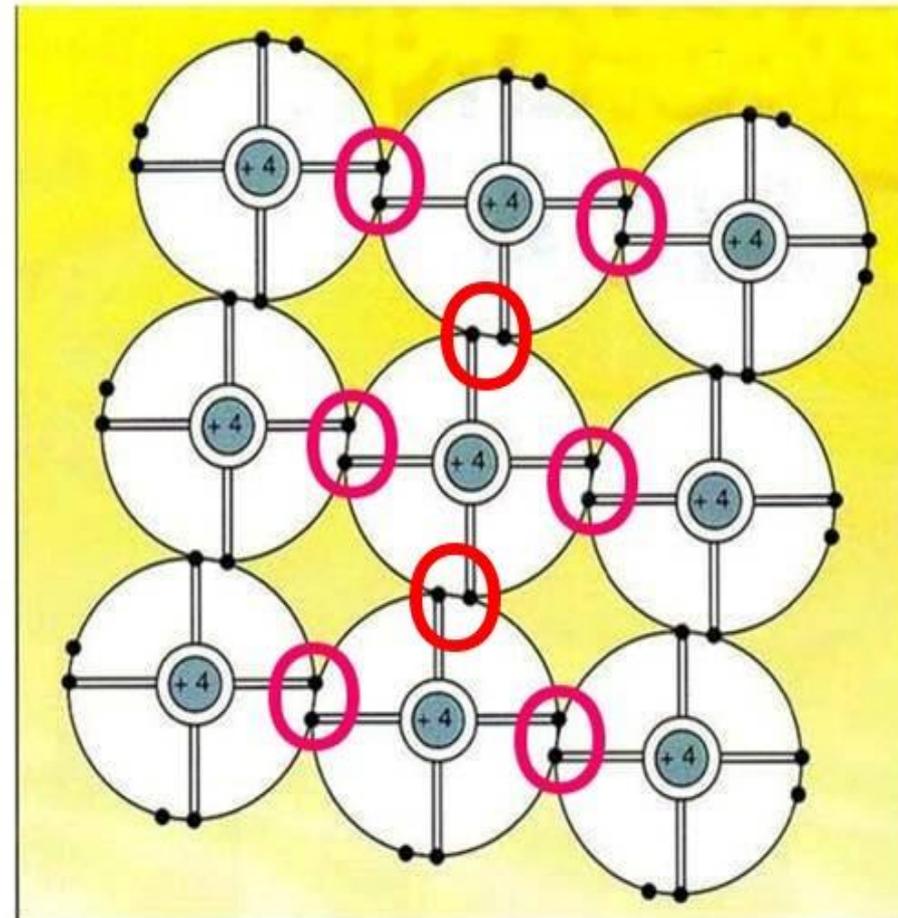
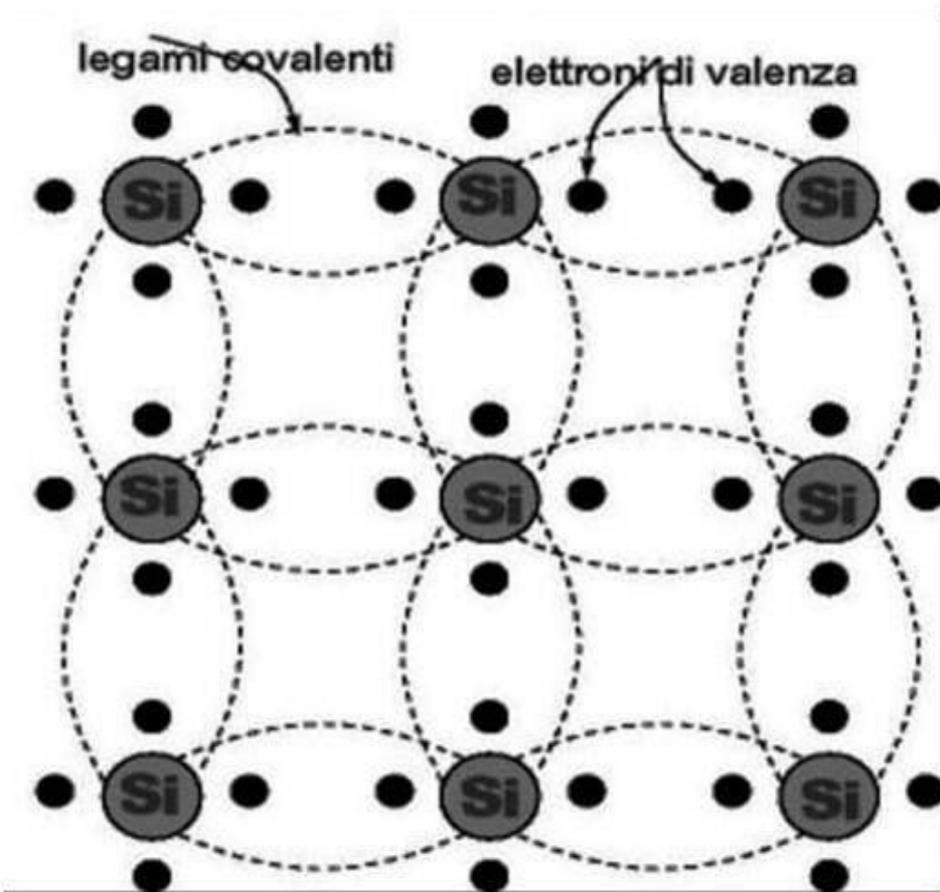
- **Amorfa**

Atomi non più aggregati in cristalli ma depositati su opportune superfici, ottenendo così strati di copertura detti **film** spesso o sottile, sensibile alla luce.

MODELLO ATOMICO PIANO DEL SILICIO

I 4 elettroni esterni di valenza partecipano alle interazioni con i corrispondenti degli altri atomi di Si circostanti (**legami covalenti**).

Ogni atomo Si è collegato con ciascuno dei suoi vicini con una coppia di elettroni.



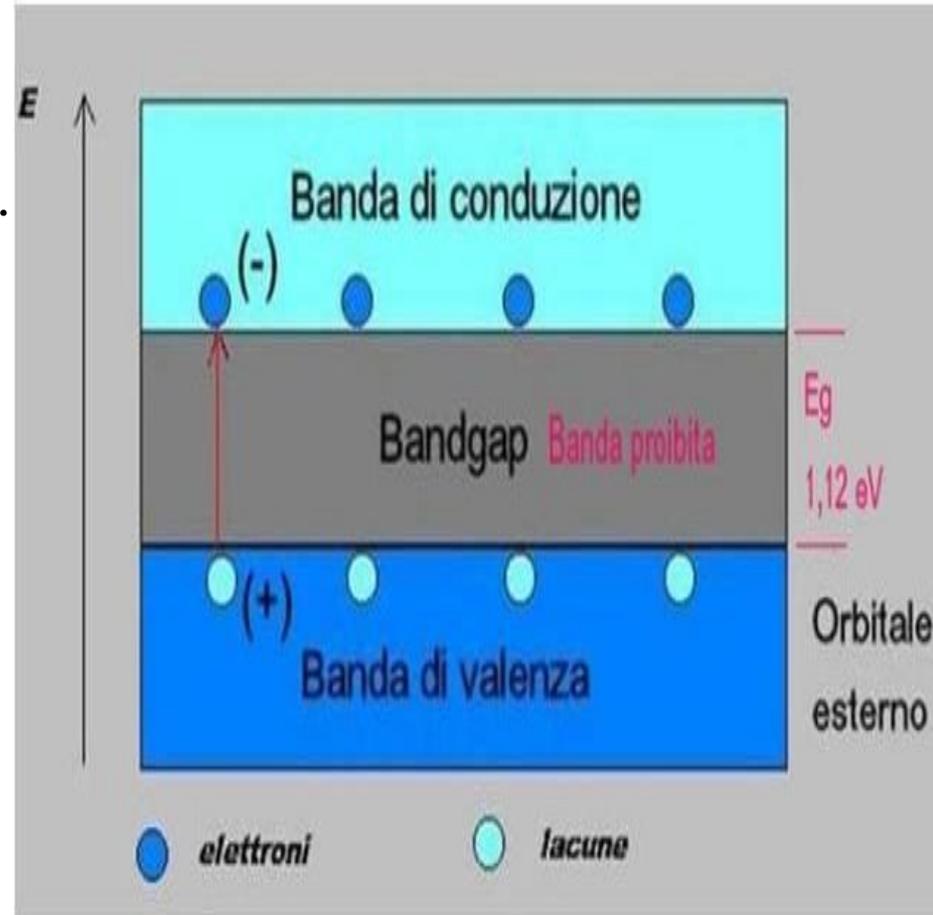
ENERGIA DI GAP DEL SILICIO

Solo gli elettroni esterni si possono estrarre dal loro orbitale naturale, ma solo se eccitati con un'energia \geq all'energia di Gap (E_g) che per il Si ha il valore di 1,12 eV.

L'elettrone estratto, diventa una carica negativa libera in grado di muoversi se sollecitato da un campo elettrico. Uscendo dall'orbitale esterno, l'elettrone lascia senza una carica negativa il suo atomo che quindi diventa una carica positiva (lacuna).

In altre parole gli elettroni orbitali esterni:

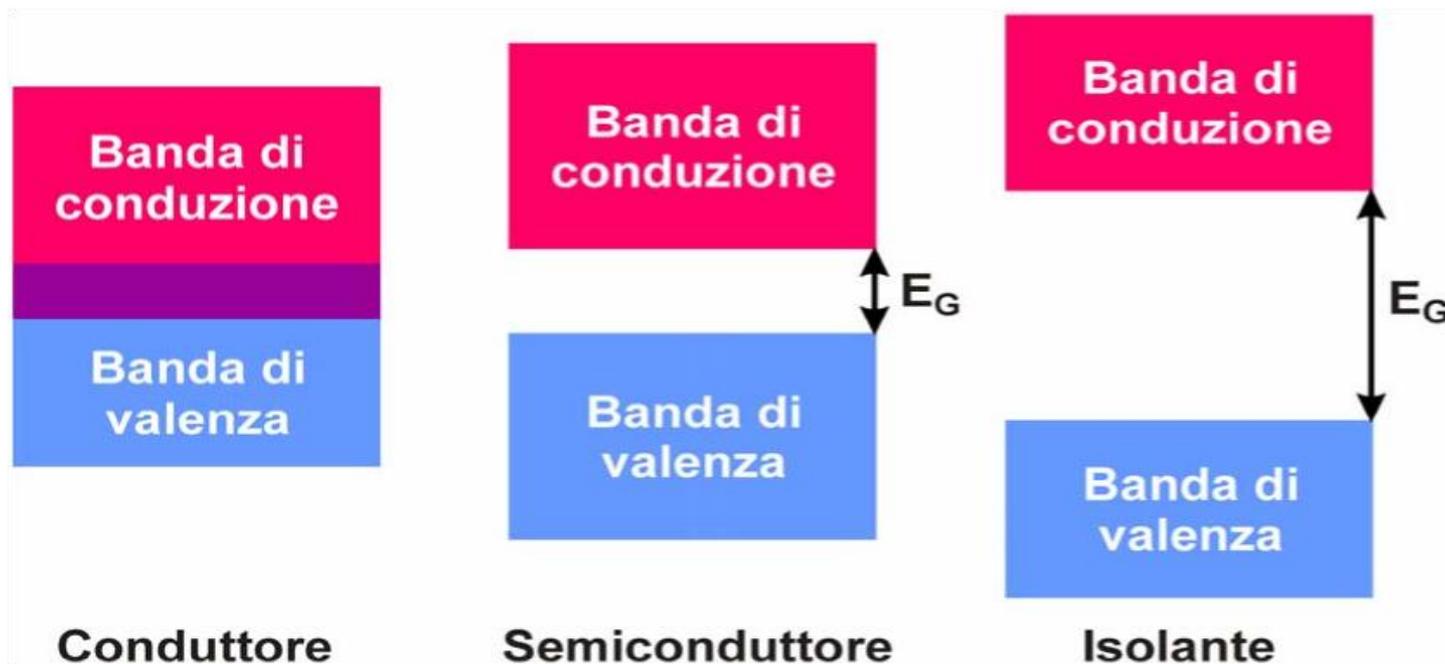
- 1- se non eccitati, occupano un intervallo energetico stabile detto **banda di valenza**.
- 2- per diventare elettroni liberi di conduzione, devono entrare nella **banda di conduzione** che è separata da quella inferiore di valenza da un intervallo energetico detto **bandgap** (1,12 eV per il Si).



Bande energetiche esterne nei conduttori, semiconduttori e isolanti

Per completezza riporto la grafica seguente dove si vede che:

- **nei conduttori** la banda di valenza esterna dell'atomo (ad esempio il Rame) si sovrappone per una certa parte con la banda di conduzione esterna per cui l'elettrone orbitale esterno del conduttore fluttua libero ed è di per sé già pronto a muoversi se sottoposto ad un campo elettrico
- **nei semiconduttori** (come appunto il Silicio) esiste un gap proibito tra le due bande di valore limitato e quindi è possibile, con un'energia esterna E_G (energia di gap) estrarre l'elettrone dalla banda di valenza (per il Silicio $E_G = 1,12\text{eV}$)
- **negli isolanti** il gap è talmente elevato che gli elettroni non possono essere estratti dal loro orbitale esterno.



GIUNZIONE N-P CUORE DELLA CELLA FV

Il funzionamento della cella FV si basa sulla giunzione N-P formata da una coppia di zone del Silicio:

- **una drogata negativamente (zona N)**
- **una positivamente (zona P).**

Per drogare il Silicio si usano materiali diversi:

- **In grado di cedere un elettrone (→ zona N), tipico usato nell'industria il Fosforo (donatore) .**

L'atomo di Fosforo (V gruppo chimico) ha 5 elettroni esterni di valenza.

- **In grado di togliere un elettrone virtuale (→ zona P) , tipico usato nell'industria il Boro (accettore) .**

L'atomo di Boro (III gruppo chimico) ha 3 elettroni esterni di valenza.

SILICIO DROGATO DI TIPO N

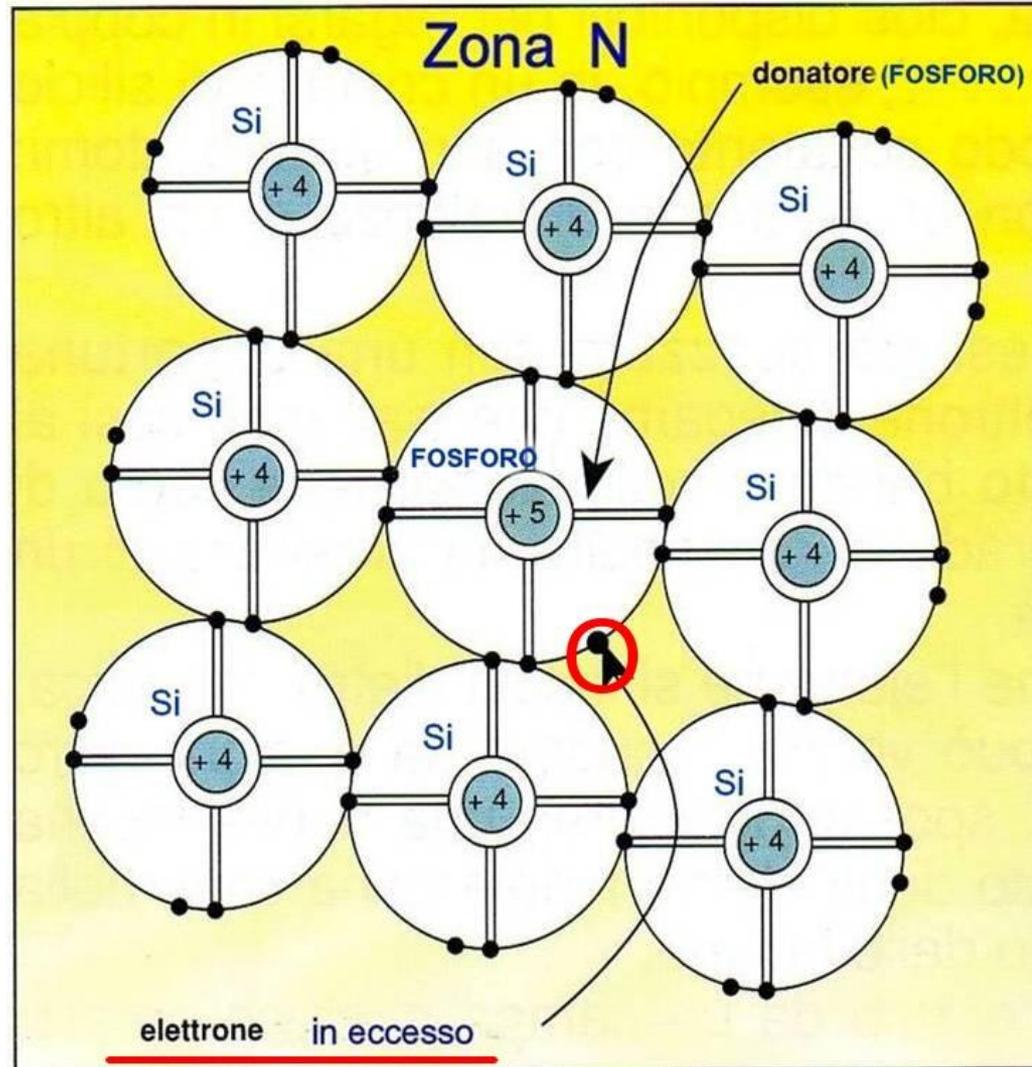
Silicio cristallino drogato con Fosforo (5 elettroni esterni)

l'orbitale esterno di ciascun atomo di Fosforo, ha "8+1" elettroni, con eccedenza di un elettrone rispetto all'ottetto.

Ciò determina un "elettrone" in eccesso uno per ogni atomo di fosforo inserito.

Si ha così una zona "N" – Negativa

con concentrazione **MAGGIORITARIA DI ELETTRONI** (una per ogni atomo di Fosforo) .



SILICIO DROGATO DI TIPO P

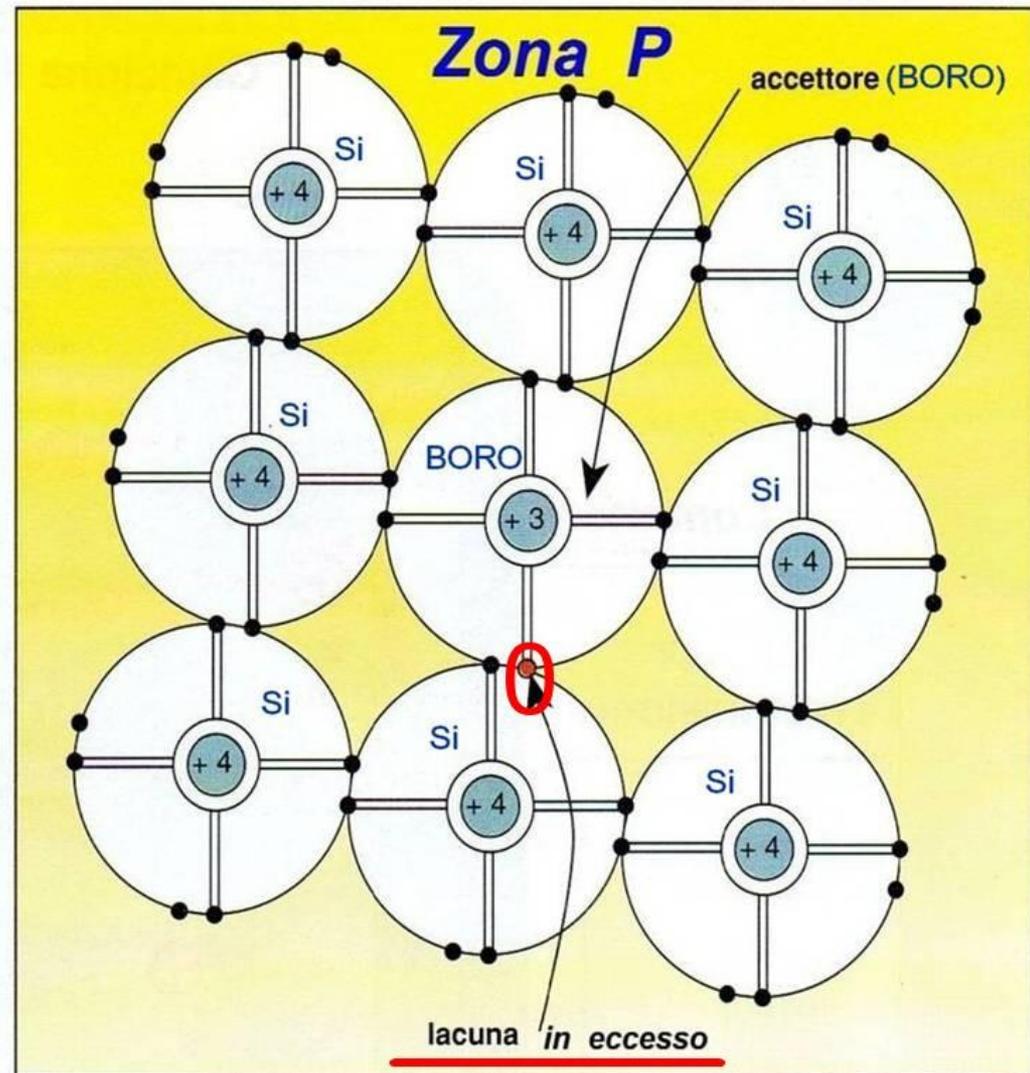
Silicio cristallino drogato con Boro (3 elettroni esterni)

l'orbitale esterno di ciascun atomo di Boro, ha "8-1" elettroni, con carenza di un elettrone rispetto all'ottetto.

Ciò determina una "lacuna" che corrisponde ad una carica positiva una per ogni atomo di boro inserito.

Si ha così una zona "P" + positiva

con concentrazione **MAGGIORITARIA DI LACUNE** (una per ogni atomo di Boro introdotto).



Giunzione P-N in Equilibrio elettrico

I continui fenomeni di diffusione e deriva delle cariche a cavallo della giunzione creano una **zona di “svuotamento”** di spessore X_s dell'ordine del micron, costituita da:

- eccesso stabile di cariche negative (-) (elettroni ex P) sul bordo della zona P
- eccesso stabile di cariche positive (+) (lacune ex N) sul bordo della zona N

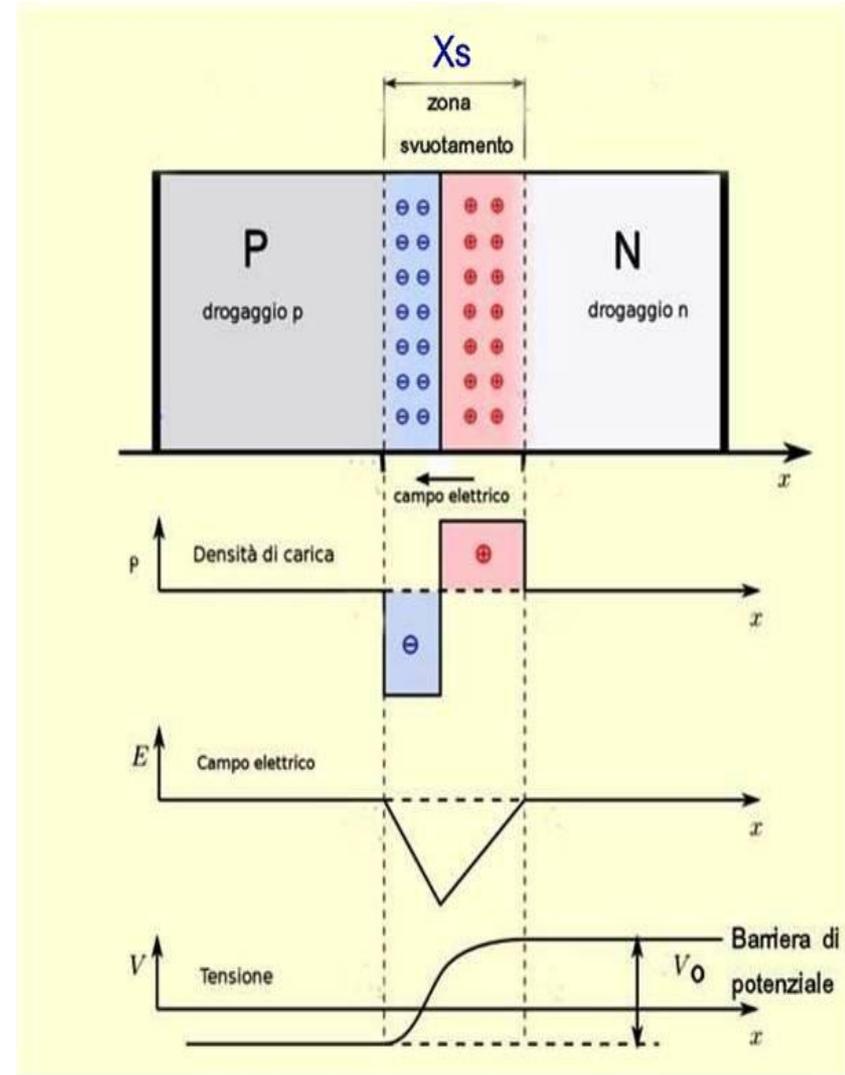
Di conseguenza si determina:

- una differenza di potenziale tra i due “confini” della zona di svuotamento con un conseguente campo elettrico stabile $N \rightarrow P$ che non fa passare:

gli elettroni dalla zona N alla zona P

le lacune dalla zona P alla zona N

→ **barriera di potenziale V_0**
(per il Silicio vale ca 0,6-0,7 V).



CONCLUSIONE

A cavallo della giunzione P-N si crea una zona detta di svuotamento che divide in senso elettrico la zona P dalla zona N.

Nella zona di svuotamento rimangono stabilmente le cariche elettriche residue del processo di diffusione e precisamente:

- Cariche negative lato zona P**
- Cariche positive lato zona N**

Queste cariche danno luogo al campo elettrico di giunzione nella regione di svuotamento.

**La zona di svuotamento diventa così il terreno fertile per l'azione fotoelettrica dei fotoni incidenti (→ generazione di elettroni)
(culla potenziale della corrente fotovoltaica).**

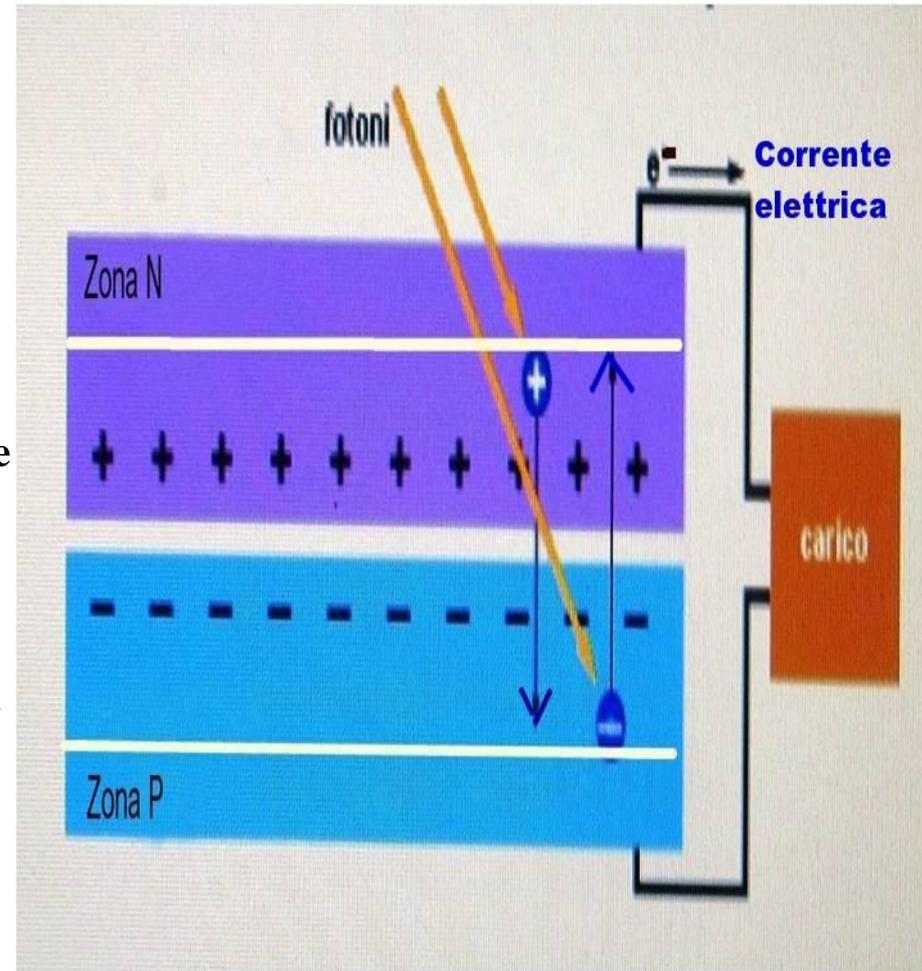
CORRENTE FV NELLA GIUNZIONE

Se la giunzione N-P è investita da una radiazione solare, **i fotoni cedono energia agli atomi di Si** portando gli elettroni (uno per ogni atomo colpito) dalla banda di valenza a quella di conduzione, liberando così coppie di elettroni-lacune, che diventano libere di muoversi all'interno della giunzione.

Il campo elettrico di giunzione separa gli elettroni liberi dalle rispettive lacune e li spinge in direzioni opposte :

- **gli elettroni verso la zona N**
- **le lacune verso la zona P.**

Una volta attraversato il campo di giunzione, gli elettroni liberi non possono più tornare indietro perchè contrastati dal campo e quindi se si connettono i terminale della cella FV con un circuito esterno si ottiene un flusso esterno di elettroni cioè una corrente elettrica continua .



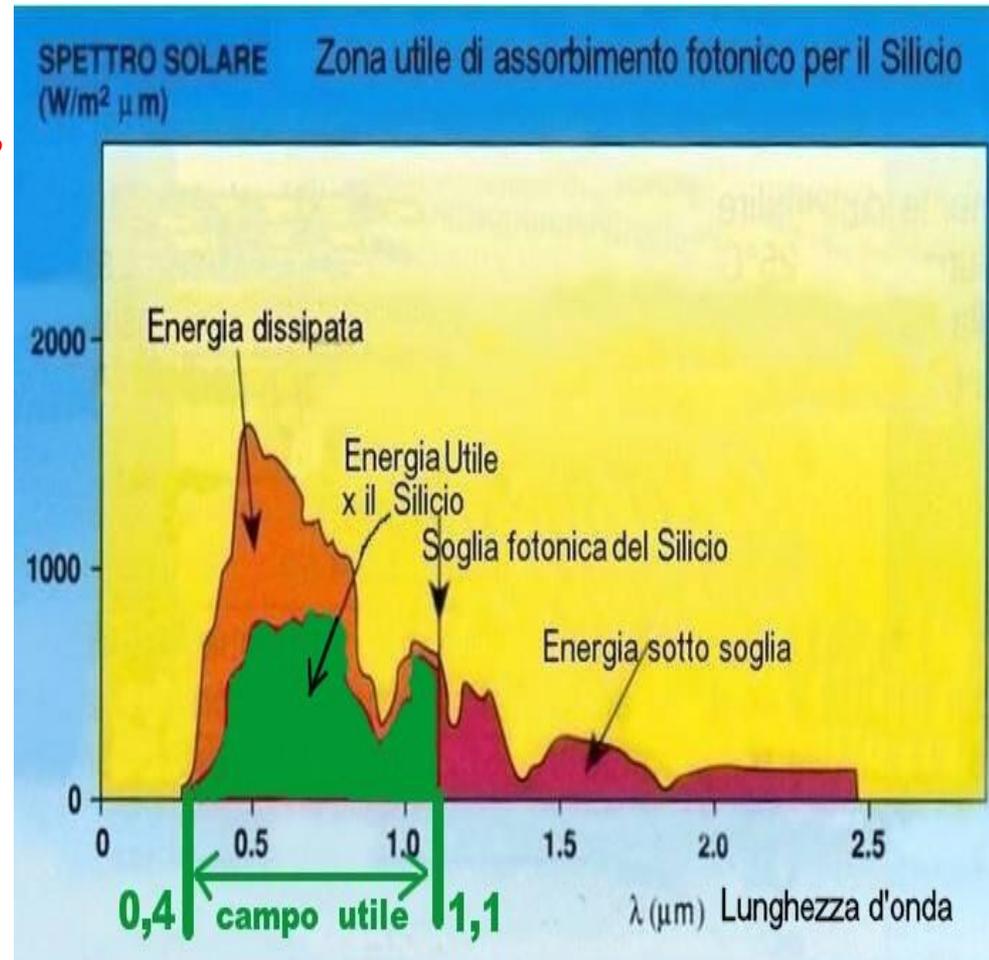
Solo una parte dell'energia luminosa captata si trasforma in energia elettrica :

l'energia utile è rappresentata dall'area verde, con un campo utile

da 0,4 a 1,1 μm

L'energia eccedente il valore utile di soglia non serve a creare le coppie elettrone-lacuna , ma viene dissipata in calore (zona arancione).

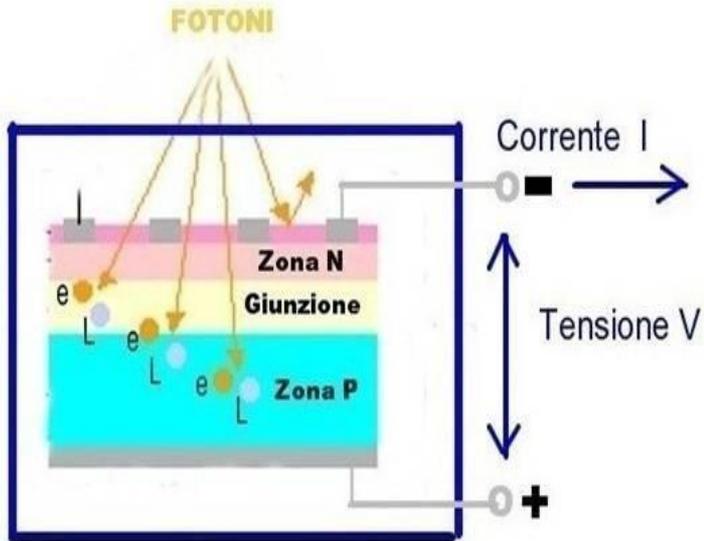
L'energia sotto soglia che non concorre alla formazione delle coppie elettrone-lacuna, è indicata dalla zona rosa.



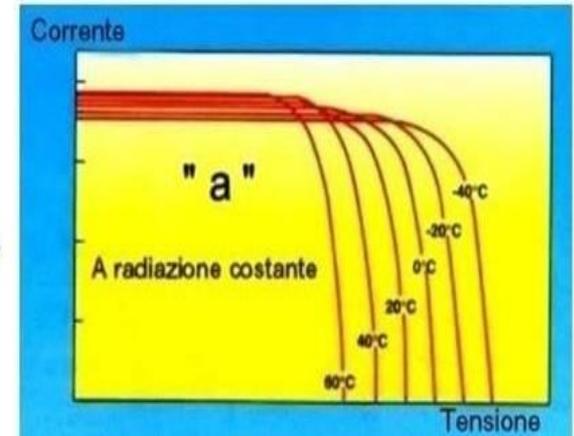
CARATTERISTICHE ELETTRICHE FOTOVOLTAICHE

La tensione generata e la corrente erogata dipendono da:

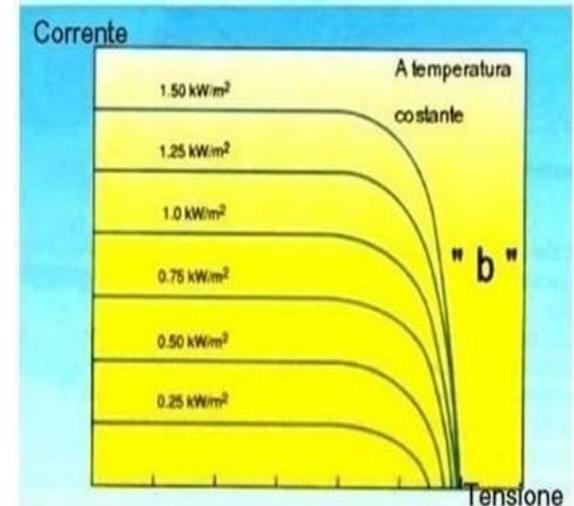
- Radiazione solare
- Temperatura



Con radiazione standard massima (1 kW/mq a 25°C)
una cella di Monosilicio di 100 cmq fornisce circa :
3 A con una tensione di 0,6 V --> 1,8 Watt



Elaborato da Fonte Enel

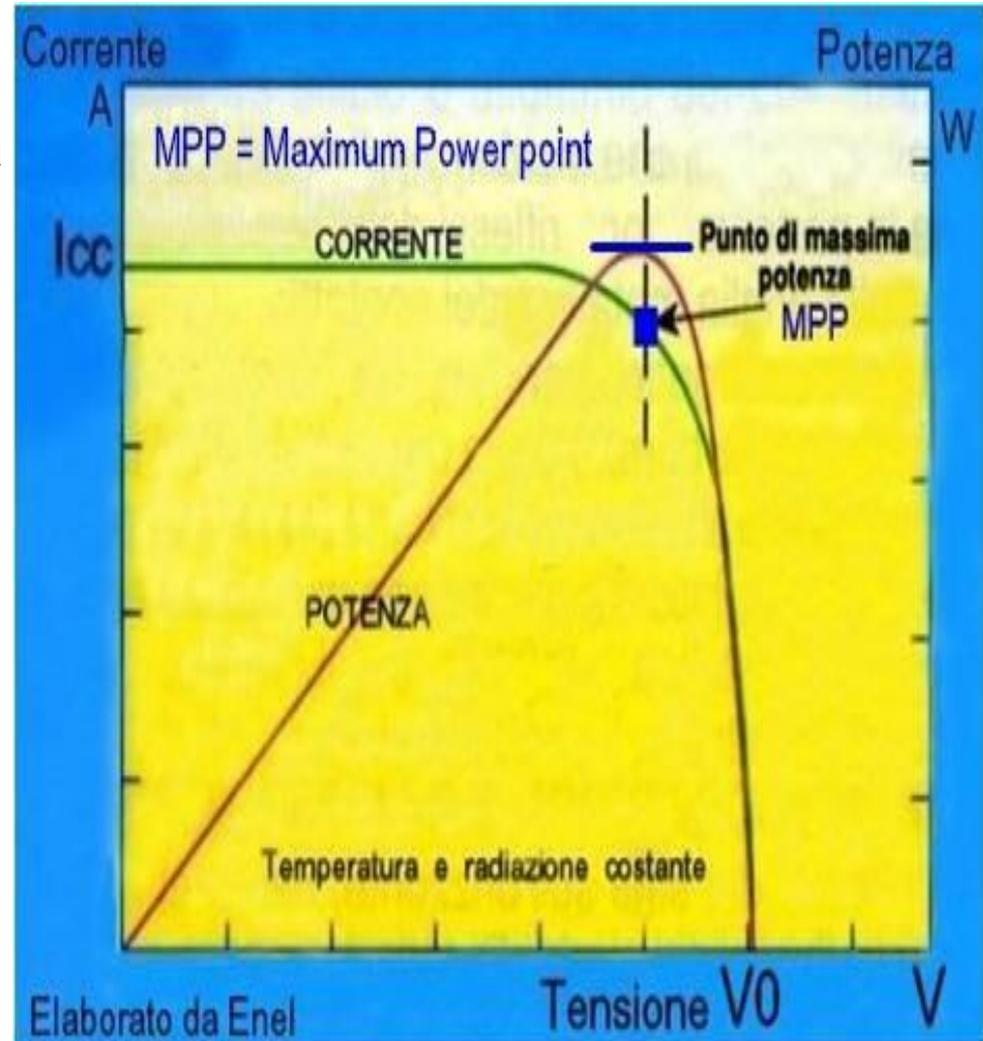


Condizione di massima potenza erogata (MPP)

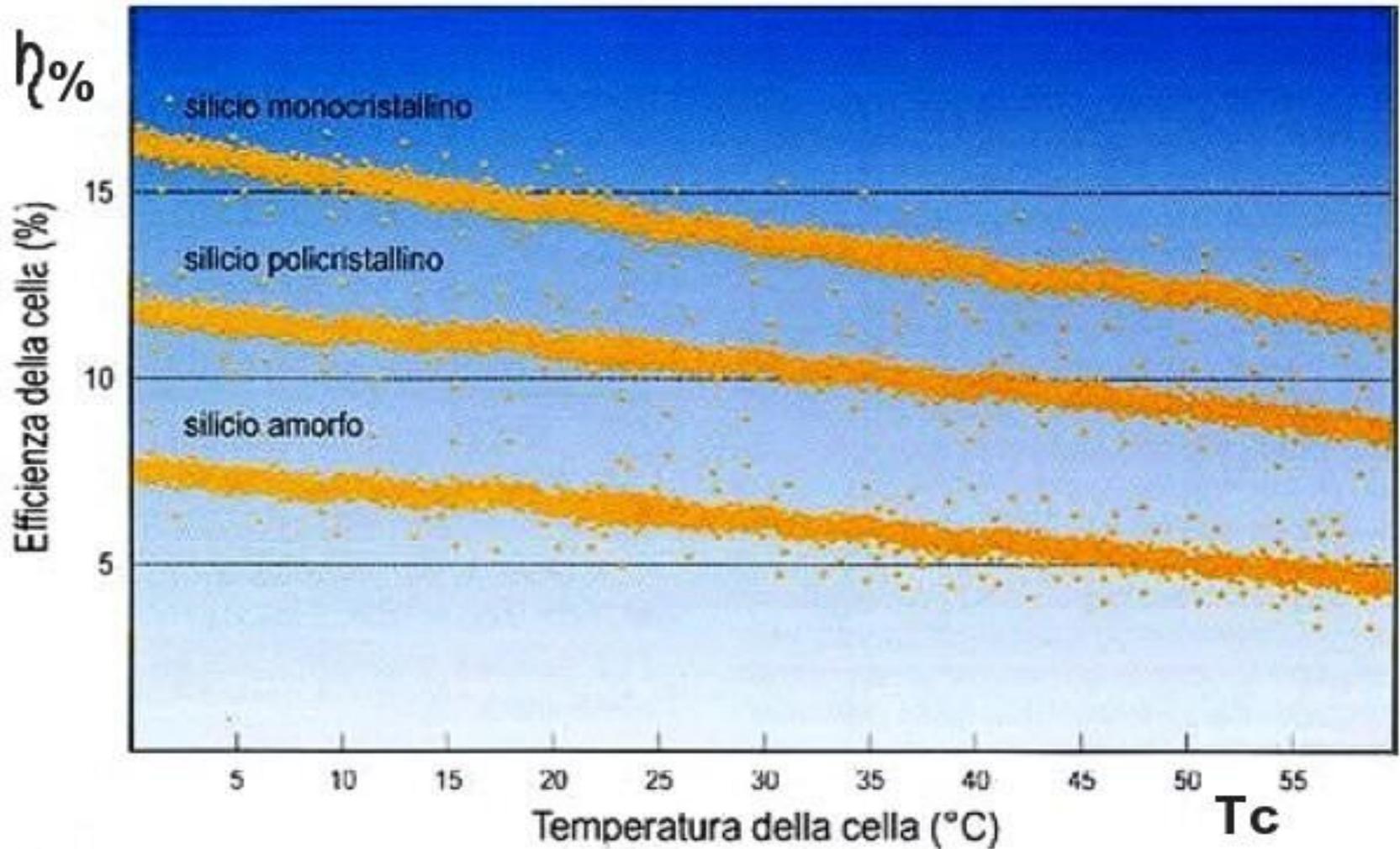
La caratteristica riporta gli andamenti della corrente e della potenza di una cella FV a temperatura e radiazione costante.

Il funzionamento ottimale della cella corrisponde al punto di potenza massima erogata MPP.

MPP si determina partendo dal punto di max tangenza della curva della potenza come indicato nel grafico.



ANDAMENTI DELL'EFFICIENZA $\eta\%$ IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA



DALLA CELLA AL PANNELLO

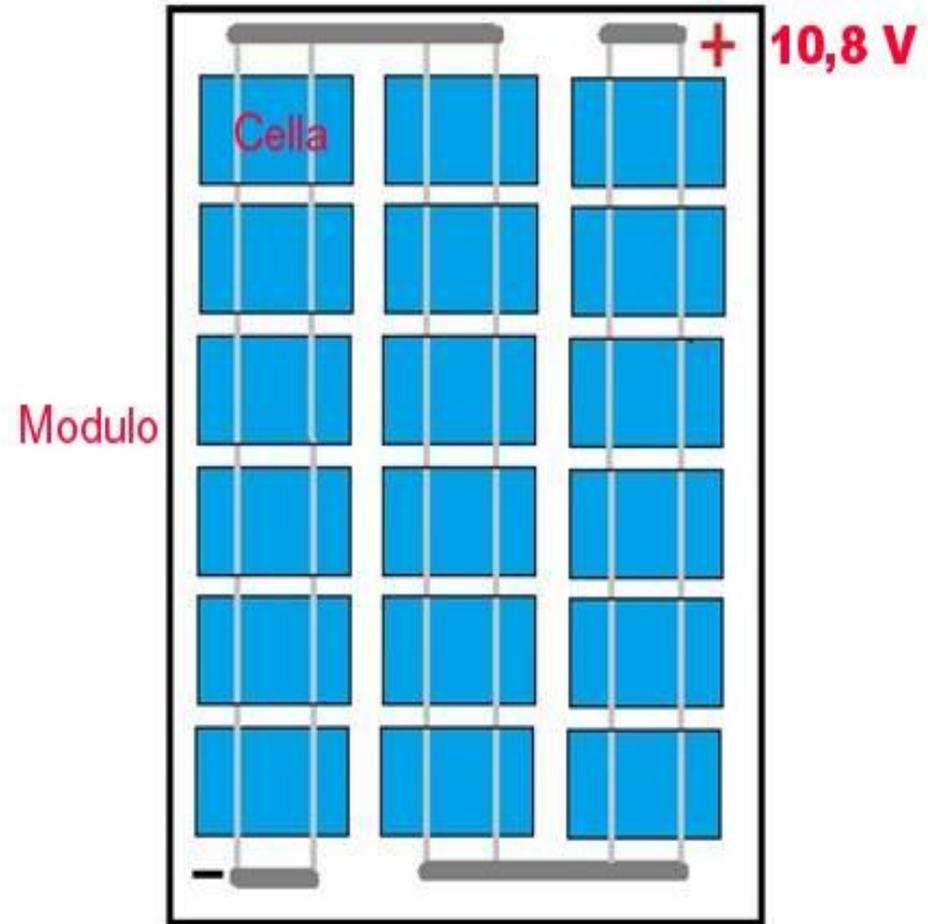
Una tipica cella solare al silicio ha una tensione nominale di ca 0,6 Volt.

Per avere un pannello (modulo) bisogna collegare in serie più celle

→ il polo (+) di una cella va collegato con quello (-) dell'altra , come indicato nello schema accanto.

3 stringhe da 6 celle solari collegate tra loro in serie, quindi considerando 0,6 V per cella, si ha in totale una tensione di $18 \times 0,6 = 10,8 \text{ V}$.

L'efficienza dei moduli è minore di quella delle celle di circa il 5-6 %



TIPICHE COMPOSIZIONE MODULARE DEI PANNELLI FV

Celle	File	Collegamento
36	4 x 9	Serie
40	4 x 10	Serie
48	6 x 8	Serie
50	5 x 10	Serie
54	6 x 9	Serie
60	6 x 10	Serie
72	6 x 12	Serie
88	8 x 11	Serie
96	8 x 12	Serie / Parallelo
120	10x12	Serie / Parallelo

Potenze di picco fino a ca 350 Wp

Efficienza del pannello FV

Un pannello FV può utilizzare solo una parte dell'energia della radiazione incidente.

Questa energia sfruttabile dipende da numerosi fattori legati sia al fenomeno fotoelettrico sia alla tecnologia di produzione.

Nella tecnica si parla quindi di efficienza di conversione ($\eta\%$) del modulo FV intendendo, con questo fondamentale parametro, quantificare la percentuale di energia luminosa effettivamente trasformata in energia elettrica, cioè il rapporto tra la potenza massima erogata in watt e la radiazione captata in condizioni di prova standard STC radiazione solare di 1000W/m^2 , temperatura esterna di 25°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), a livello del mare.

La formula base dell'efficienza fotovoltaica è pertanto la seguente:

$$\eta\% = [(P_{\max}) / (1000 * S_c)] * 100$$

P_{\max} = potenza massima erogata dal modulo FV (W/m^2),

S_c = superficie captante del modulo (m^2)

Es: modulo $1,4 \times 0,8$ m con potenza nominale 220 W

$$\eta\% = [(P_{\max}) / (1000 * S_c)] * 100 = (220 / 1000 * 1,4 * 0,8) * 100 = (220 / 1120) * 100 = 19,64 \%$$

TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

Prima parte IL SILICIO

UTE
18 - 19

PRINCIPALI TECNOLOGIE FV

SILICIO	NUOVE TECNOLOGIE IN CONTINUA EVOLUZIONE Film sottile		NUOVA TECNO Potenziale	
1^ GENERAZIONE SILICIO	2^ GENERAZIONE INORGANICHE	3^ GENERAZIONE ORGANICHE		3^ GENERAZIONE INNOVATIVA
Monosilicio monogiunzione	Multigiunzione	Polimeriche	Pigmenti coloranti	Perovskite + Grafene
Polisilicio monogiunzione	CdTE Cadmio-Tellurio			
Silicio Amorfo Film sottile	CIS Rame Indio Selenio			
Concentrazione Ibrido FV+Termico	CIGS Rame Indio Gallio selenio			

**TARGET DI EFFICIENZA RAGGIUNTI A LIVELLO RS
DALLE CELLE FV NEL 2017-2018
(fonte Fraunhofer report 8-18)**

TIPO DI CELLA	EFFICIENZA %
Si Monocristallino monogiunzione	26,7 %
Si Policristallino monogiunzione	22,3 %
Si Amorfo (pannello)	16 - 18 %
Film sottile CdTe	21 %
Film sottile GaAs (molto costoso)	29-30 %
Film sottile CIS-CIGS	22,9 %
Multigiunzione con concentratori	43-44 %
Film sottile Polimeriche	13 %
Film sottile Perovskite + Grafene	20,9 % → 25,2 %

LE VARIE FORME DEL SILICIO UTILIZZATE NEGLI IFV

- 1- SILICIO MONOCRISTALLINO (MONOSILICIO)** con struttura atomica tetraedrica orientata e purezza elevatissima (\geq a 10^{-10}).
- 2- SILICIO POLICRISTALLINO (POLISILICIO)** costituito da grani di monosilicio aggregati e orientati casualmente.
- 3- SILICIO AMORFO** con atomi orientati in modo casuale come nei liquidi senza struttura cristallografica.
- 4- FILM SOTTILE** costituito da microspessori di Silicio amorfo depositati su strati di vetroresine , materiali plastici e metallici , nastri continui.

La tecnologia FV è nata e si è sviluppata col Silicio Cristallino (Mono e Poli) che ancora oggi costituisce l'elemento di riferimento per tutte le tecnologie FV alternative, in termini di efficienza, affidabilità e durata.

FILIERA PRODUTTIVA del Silicio FV

Legata all'industria elettronica

Si “ offgrade “

**1-Preparazione e fusione degli scarti
(teste e code) dei lingotti di Si elettronico**

2A- Monocristallino :

Crescita cristallografica da un seme col
metodo Czochralski → lingotti
cilindrici → **celle MonoSi**

2B- Policristallino :

Frammentazione e fusione degli scarti (ex
teste e code) → solidificazione e
ricristallizzazione → metodo Casting
→ Blocchi parallelepipedi → **celle PoliSi**

Indipendente da industria elettronica

Si “ solare “

1- Produzione del Silicio metallurgico

2- Purificazione del Si metallurgico

tipico processo → Siemens

→ **Polysilicon di grado solare a blocchetti**

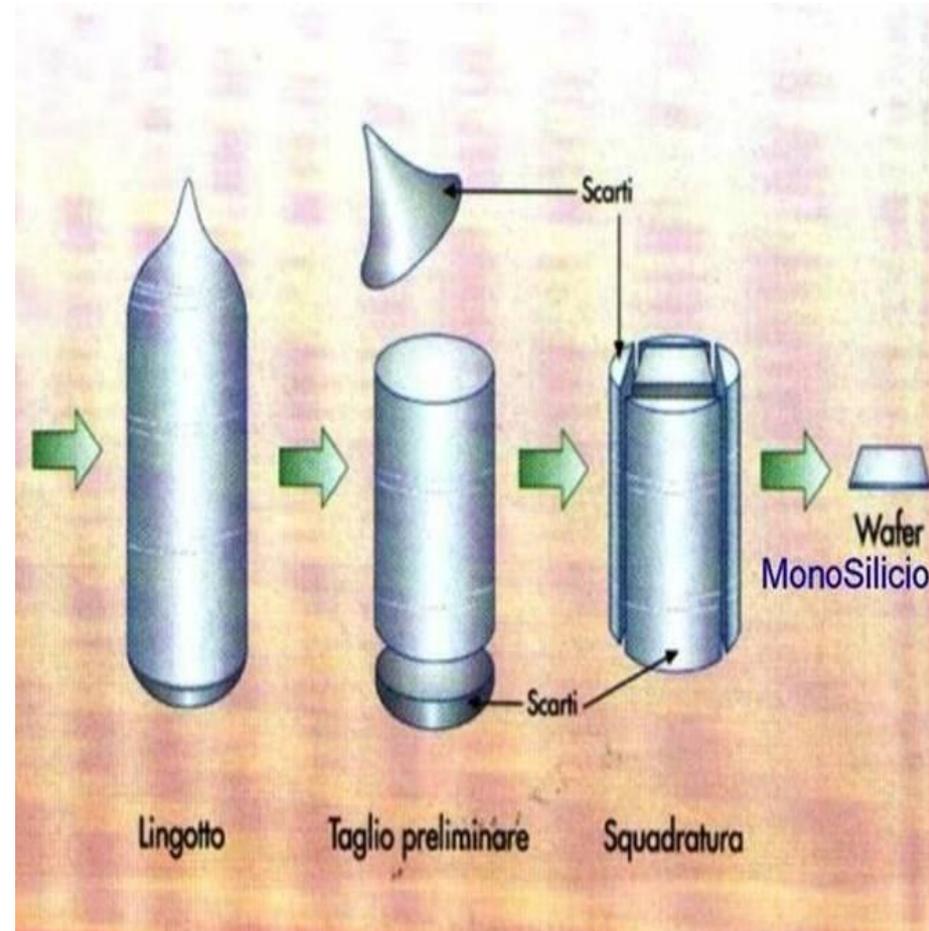
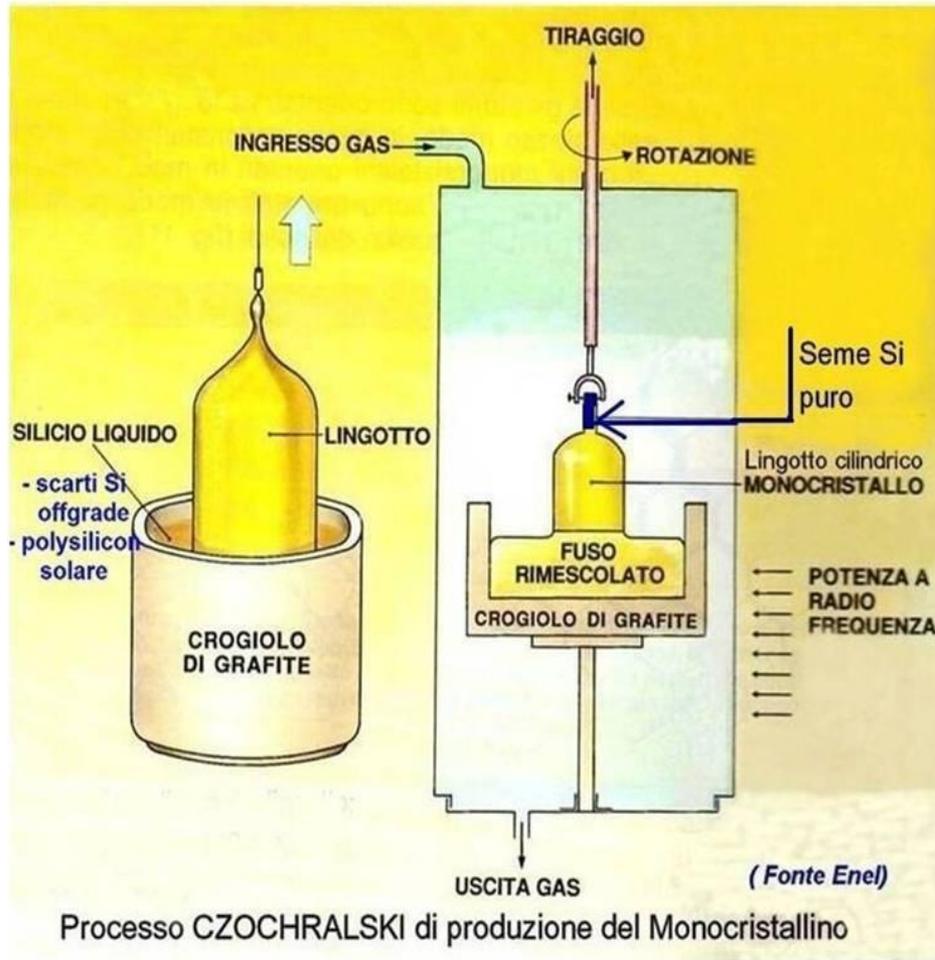
3A- Monocristallino :

Crescita cristallografica da un seme col
metodo Czochralski → lingotti
cilindrici → **celle MonoSi**

3B-Policristallino :

Frammentazione e fusione del polysilicon
→ solidificazione e cristallizzazione
→ metodo Casting
→ Blocchi parallelepipedi → **celle PoliSi**

PRODUZIONE di Wafer MonoSilicio

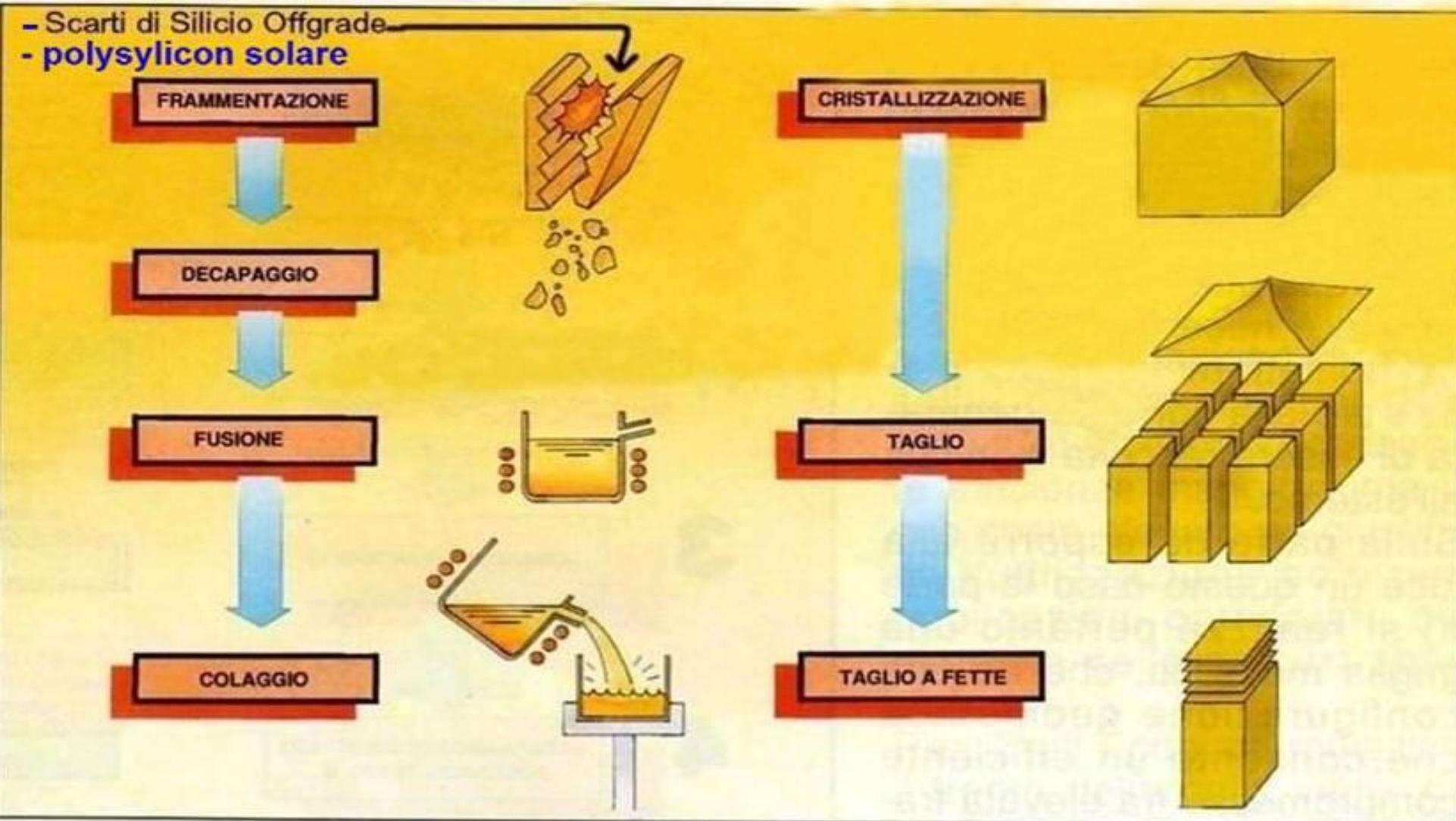


CELLA SILICIO MONOCRISTALLINO

- Ottenuta da un unico grande cristallo di Monosilicio (lingotto cilindrico).
- Colore **uniforme e scuro** (**blu notte ÷ grigio nero**) .
- Forma quadrata con **spigoli arrotondati** essendo ricavati da un lingotto cilindrico (i moduli monocristallini si distinguono per i caratteristici **rombi bianchi** di separazione e collegamento tra le celle).

- **Efficienza** fino a **25-26 %**.
- **Dimensioni tipiche:** 80x80 mm , **125x125mm (5"x5") , 156x156mm (6"x6")**
spessori 180÷200 µm
- **Vantaggi:**
 - efficienza maggiore delle altre celle.
 - rendimento sino al 90% dopo 25 anni di funzionamento.
- **Svantaggi:**
 - maggior costo rispetto alle policristalline
 - preferiscono la luce solare con direzione perpendicolare.
 - efficienza minore con luce inclinata e con cielo nuvoloso.

PRODUZIONE di Wafer PoliSilicio



Processo di produzione del silicio policristallino: metodo Casting

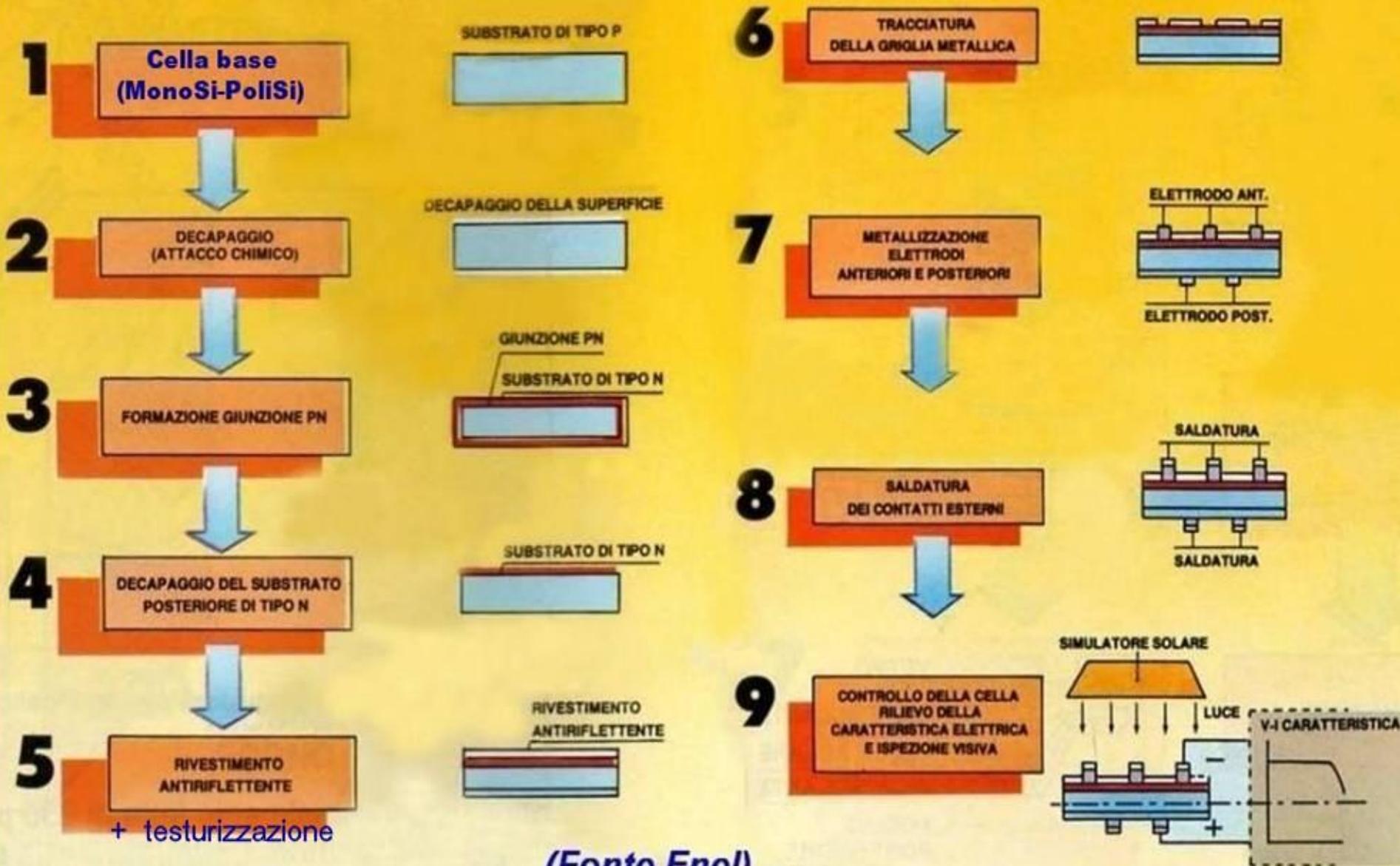
(Fonte Enel)

CELLA SILICIO POLICRISTALLINO

- Formate dall'insieme di molti aggregati cristallini di silicio.
- Forma quadrata e/o rettangolare con **spigoli vivi**.
- Colore **bluastro elettrico con riflessi e striature**.
- Un modulo policristallino presenta una superficie uniforme fatta di celle posizionate molto vicine le une alle altre.

- **Efficienza delle celle** fino a **22 %** .
- **Dimensioni tipiche:** **156x156 mm (6"x6")** , 165x98 mm , 175x206 mm.
spessori 180÷200 μm .
- **Vantaggi:**
 - minor costo rispetto alle monocristalline
 - buona efficienza con esposizione solare inclinata.
 - migliore resa con cielo nuvoloso.
 - Rendimento sino a 85-90% dopo 25 anni di produzione.
- **Svantaggi:** - lieve perdita di efficienza se esposte al radiazione solare perpendicolare.

FLUSSO TIPO PRODUZIONE CELLA FV



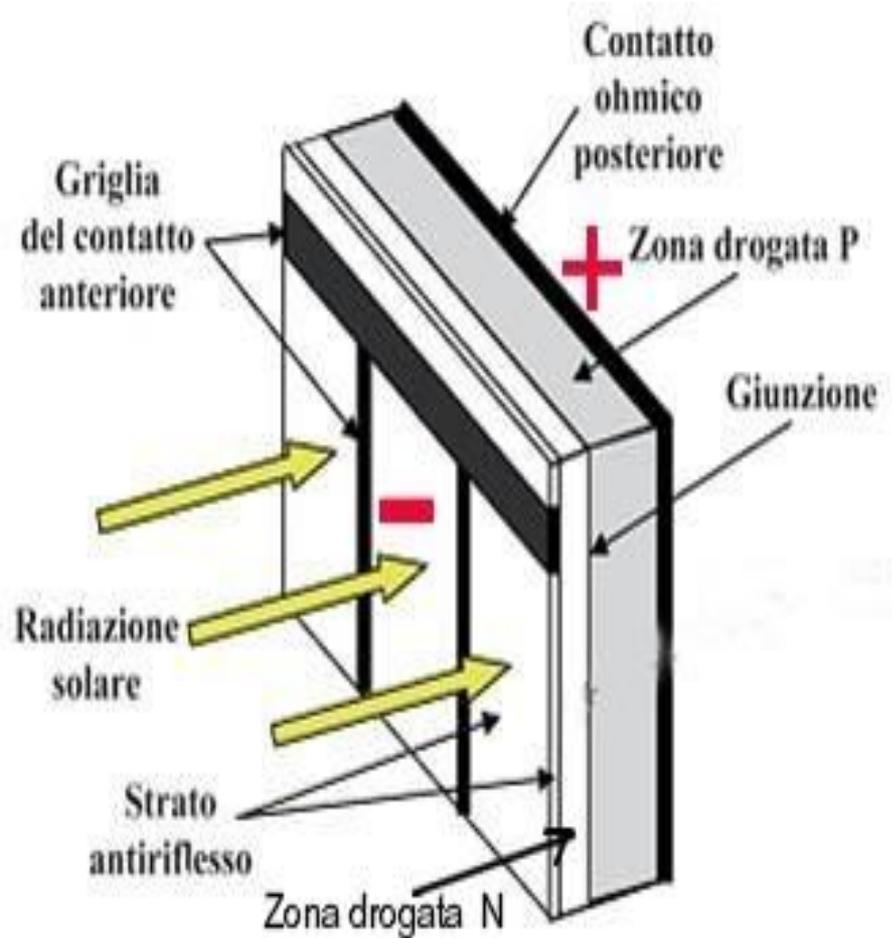
(Fonte Enel)

STRUTTURA TIPO DELLA CELLA FV

Contatto metallico **+** lato posteriore = Zona P
colore grigio argento.

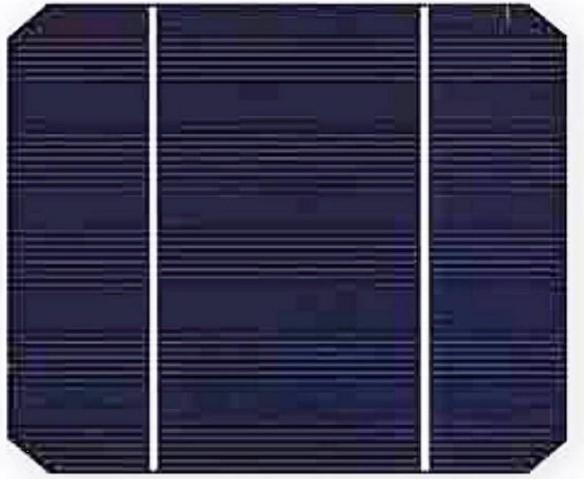
Contatto metallico **-** lato frontale illuminato
= Zona N
colore bluastro-scuro
griglia di raccolta dei
fotoni.

Sulla zona N frontale è depresso uno strato
di materiale **trasparente antiriflesso**,
per massimizzare la cattura dei fotoni ,
con uno spessore **piccolissimo** per favorire
l'attraversamento dei fotoni verso la giunzione,
dove il campo elettrico raccoglie e divide le
cariche fotogenerate .

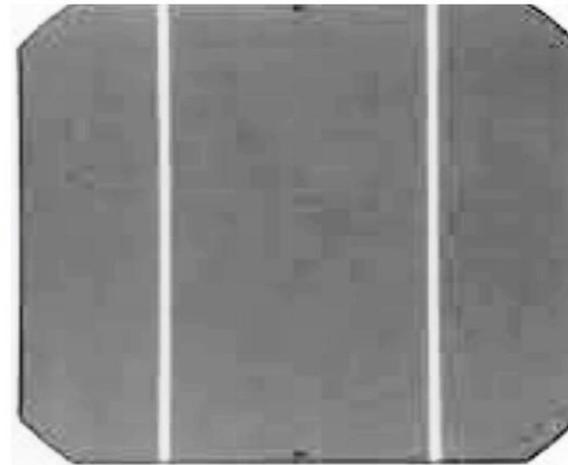


POLARITÀ DEI CONTATTI

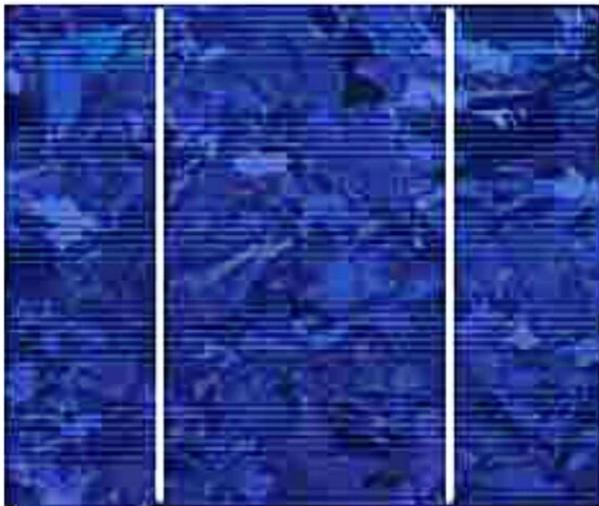
- 1- Il lato frontale (scuro o blu) è quello negativo e deve essere illuminato dal Sole
- 2- Il lato posteriore (argenteo chiaro) è quello positivo e deve essere oscurato



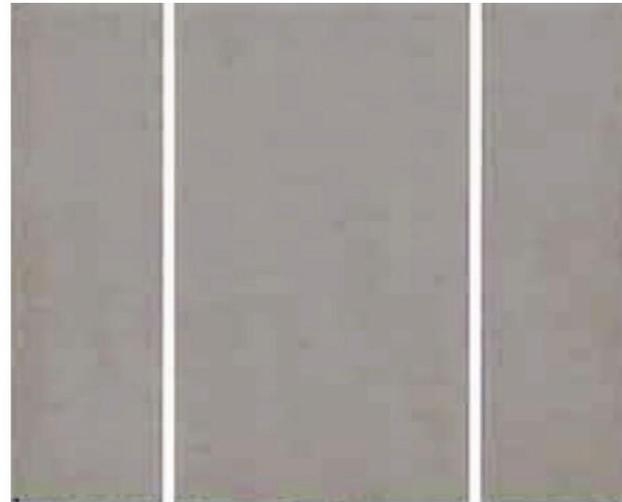
FRONTE (Polo Negativo)



RETRO (Polo positivo)



CELLA
POLISI



MODULI DI SILICIO

Cella MonoSi

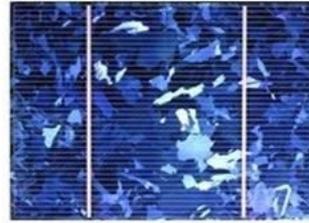


Lingotto cilindrico --> spigoli arrotondati



Modulo MonoSi

Cella PoliSi



Parallelepipedo --> spigoli vivi



Modulo PoliSi

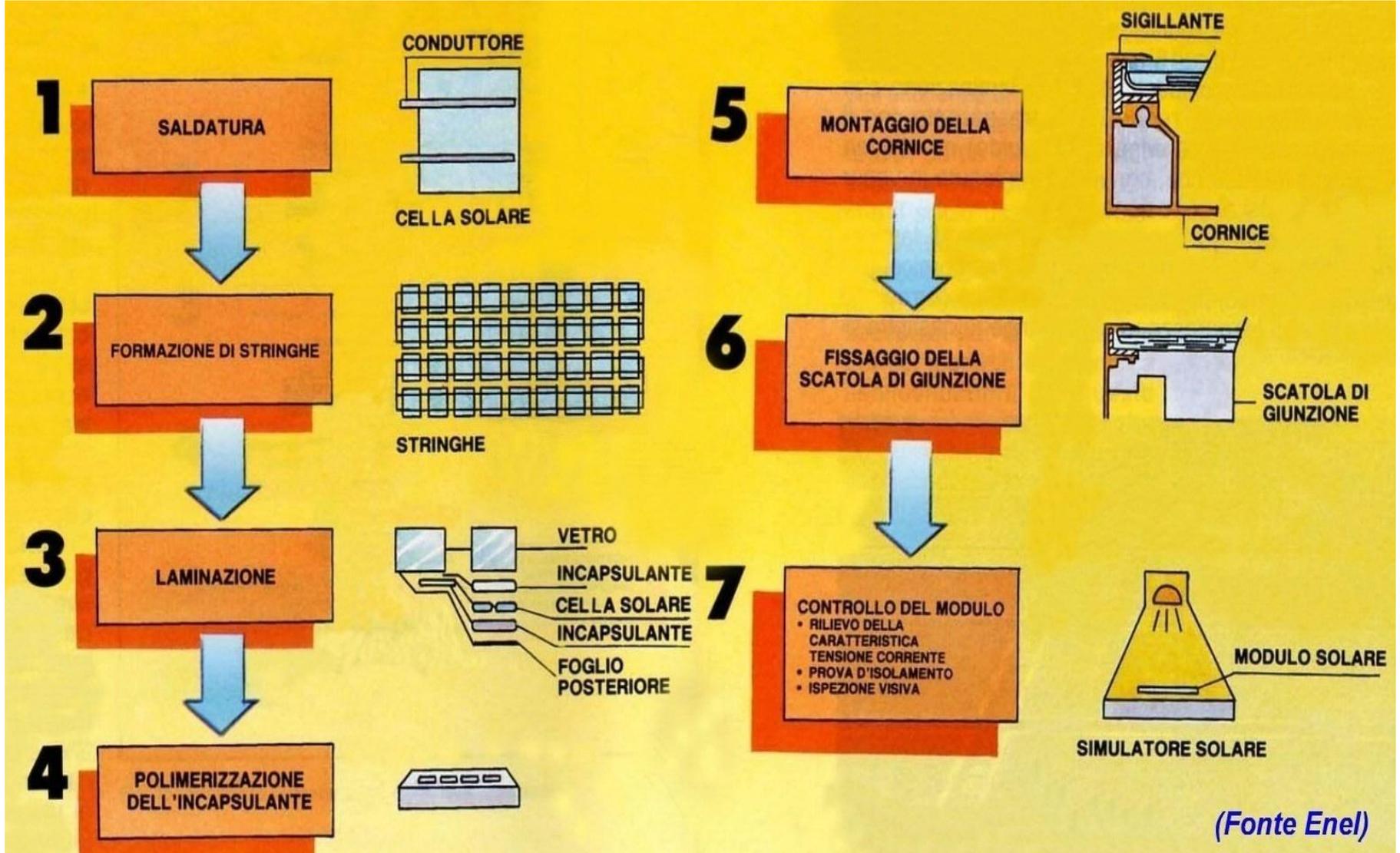


Modulo Silicio Amorfo



Nastro Si Film sottile

FLUSSO TIPO PRODUZIONE MODULO FV



(Fonte Enel)

CONFRONTO MODULI DI SI CRISTALLINO E AMORFO

SILICIO CRISTALLINO

VANTAGGI

- **Maggior potenza installabile per m²**
- **Maggiore affidabilità nel tempo**
- **Minore calo delle prestazioni nel tempo**

SVANTAGGI

- **Alto coefficiente di temperatura**
- **Presenza di lastre di vetro → più pesante**

- **Difficile integrazione negli edifici**

- **Poco sensibile alla luce diffusa**

SILICIO AMORFO

VANTAGGI

- **Basso coefficiente di temperatura**
- **Più robusto (si evita l'uso del vetro)**
- **Facile integrazione negli edifici**

- **Maggior sensibilità a bassi livelli di irraggiamento solare e alla luce diffusa**

- **Estetica e leggerezza**
- **Costo < del Si cristallino (- 30 - 40 %)**

SVANTAGGI

- **Minor potenza installabile per m²**
- **Instabilità prestazioni nel tempo**
- **Calo iniziale di efficienza (circa – 15-20%)**

EFFICIENZA DI PICCO DEL MODULO FV

L'efficienza $\eta\%$ di un modulo FV si può facilmente calcolare conoscendo la potenza di picco W_p e le dimensioni del modulo (comprese le cornici).

$$\eta\% = [W_p / (\text{Superficie} * 1000)] * 100$$

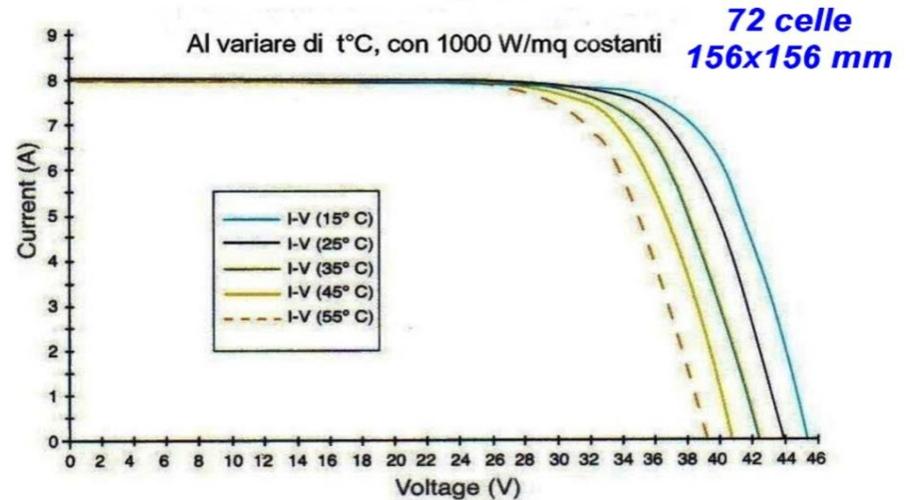
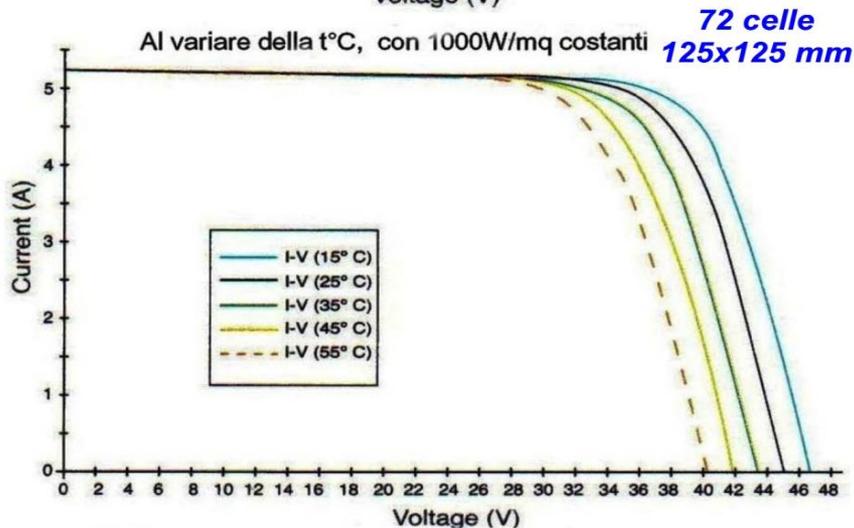
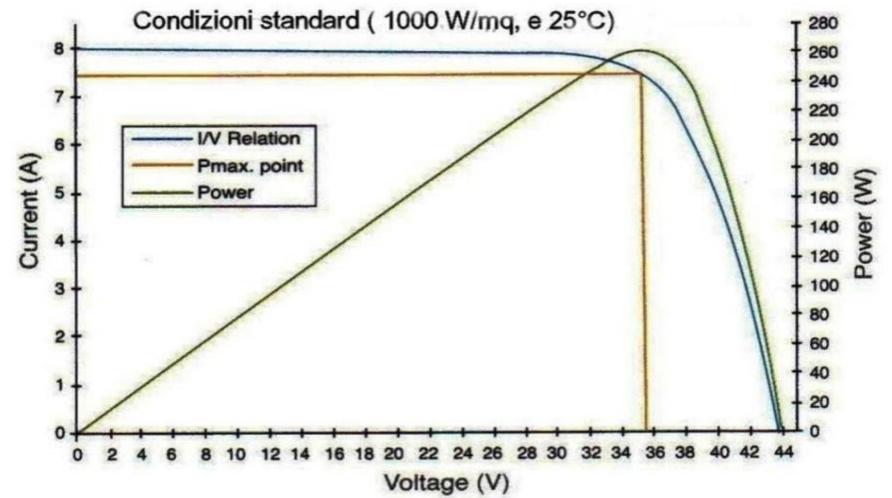
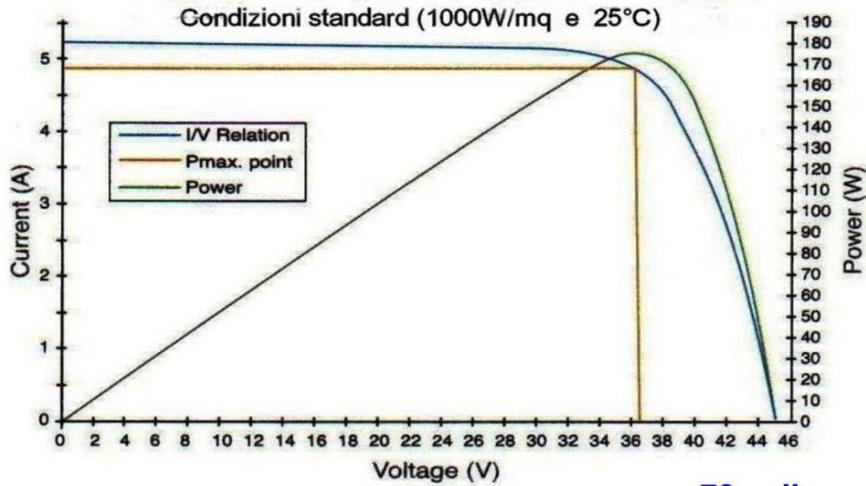
Es: modulo con potenza di picco $W_p = 320W$ e dimensioni di $1,4 \times 1,2$ mq

$$\eta\% = [320 / (1,4 * 1,2 * 1000)] * 100 = 19,05\%$$

Questo valore ci dice che in condizioni di irraggiamento al suolo di $1000W/mq$ con cielo sereno e temperatura del modulo di $25^\circ C$, il modulo FV converte in energia elettrica il $19,05\%$ della radiazione solare Incidente.

MODULI FV

Esempi di caratteristiche di Moduli in Si Monocristallino



TIPOLOGIA DEI MODULI FV

Il modulo FV (chiamato anche pannello) è il **componente base** per realizzare l'impianto Fotovoltaico ed è assemblato con celle FV collegate in serie e serie /parallelo.

COMPOSIZIONI MODULARI TIPICHE DEI MODULI FV (Mono e Poli)

Celle	File	Collegamento
36	4 x 9	Serie
40	4 x 10	Serie
48	6 x 8	Serie
50	5 x 10	Serie
54	6 x 9	Serie
60	6 x 10	Serie
72	6 x 12	Serie
88	8 x 11	Serie
96	8 x 12	Serie / Parallelo
120	10x12	Serie / Parallelo

Potenze di picco fino a oltre 350 Wp

Celle a concentrazione

Sono innovativi pannelli solari piani che utilizzano concentratori ottici per convogliare la radiazione su una cella fotovoltaica multigiunzione, caratterizzata da un'efficienza più che doppia rispetto ai pannelli tradizionali.

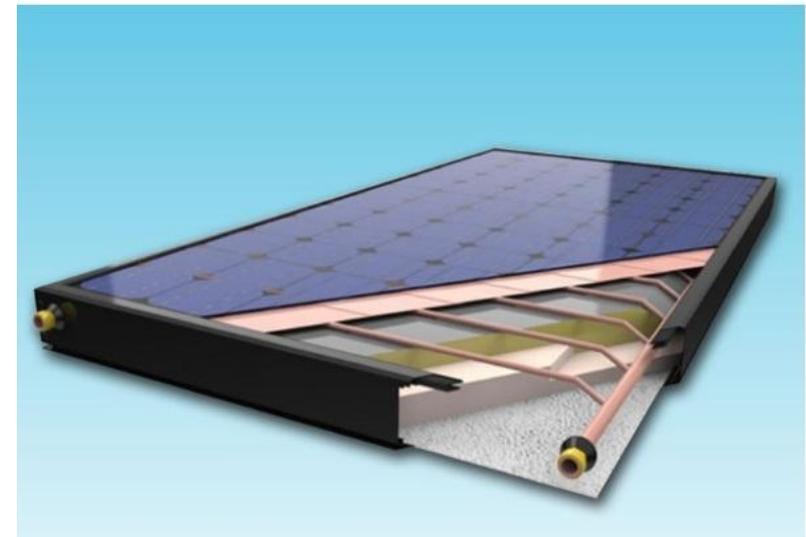
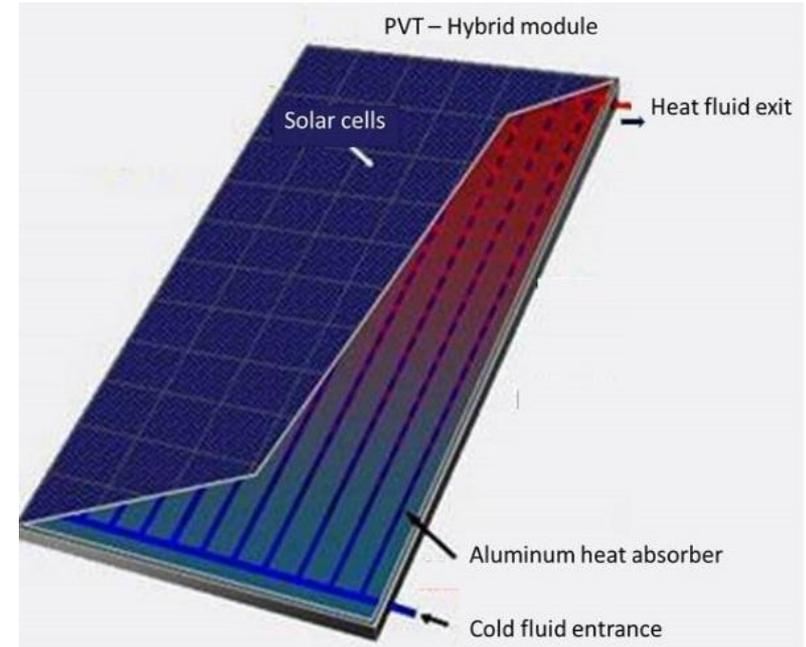


Pannelli Ibridi “ FV-termici ”

La Tecnologia “FV-termico ” (TPV) , consolidata da anni, combina il solare FV con quello termico, in un **unico pannello termico-fotovoltaico** che converte in elettricità la radiazione solare irradiata da una superficie calda e contemporaneamente riscalda acqua contenuta in uno scambiatore di calore interno al pannello.

Vantaggi

- *l'esposizione del modulo al sole produce anche calore*
- *mantenere a bassa temperatura le celle FV*
- *aumenta il rendimento fino al 20%*
- *sovrapponendo termico e FV si raddoppia l'area disponibile*



TOP 10 PRODUTTORI DI MODULI FV 2016 – 2017(=2018)

Top-10 Module Suppliers in 2016

Ranking	Producer	
1	JinkoSolar	CINA
2	Trina Solar	CINA
3	Canadian Solar	CANADA
4	Hanwha Q-CELLS	SUDKOREA - GE
5	JA Solar	CINA
6	GCL	CINA
7	First Solar	USA
8	Yingli Green	CINA
9	Talesun	CINA
10	Risen	CINA

Top-10 Module Suppliers in 2017

Ranking	Producer	
1	JinkoSolar	Cina
2	Trina Solar	Cina
3	Canadian Solar	Canada
4	JA Solar	Cina
5	Hanwha Q-CELLS	SKorea-Ge
6	GCL-SI	Cina
7	LONGi Solar	Cina
8	Risen Energy	Cina
9	Shunfeng (incl. Suntech)	Cina
10	Yingli Green	Cina

TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

*Seconda parte
le nuove Tecnologie*

UTE
18 - 19

PRINCIPALI TECNOLOGIE FV

SILICIO	NUOVE TECNOLOGIE IN CONTINUA EVOLUZIONE Film sottile		NUOVA TECNO Potenziale	
1^ GENERAZIONE SILICIO	2^ GENERAZIONE INORGANICHE	3^ GENERAZIONE ORGANICHE		3^ GENERAZIONE INNOVATIVA
Monosilicio monogiunzione	Multigiunzione	Polimeriche	Pigmenti coloranti	Perovskite + Grafene
Polisilicio monogiunzione	CdTE Cadmio-Tellurio			
Silicio Amorfo Film sottile	CIS Rame Indio Selenio			
Concentrazione Ibrido FV+Termico	CIGS Rame Indio Gallio Selenio			

OBIETTIVO DI FONDO DELLE NUOVE TECNOLOGIE

Il materiale FV ideale è quello in grado di essere sensibile all'effetto fotoelettrico **in tutto il campo di lunghezze d'onda dei fotoni** della radiazione solare sulla terra.

Un tale materiale potrebbe così "assorbire" tutta l'energia fotonica dello spettro con efficienza molto superiore a quella raggiungibile col Silicio .

Le nuove tecnologie cercano quindi di sfruttare al meglio l'energia fotonica distribuita su tutto lo spettro solare.



2[^] GENERAZIONE CELLE FV INORGANICHE

- Celle Multigiunzione**
- Celle CdTe (Cadmio-Tellurio)**
- Celle CIS (Rame-Indio-Selenio)**
- Celle CIGS (Rame-Indio-Gallio-Selenio)**

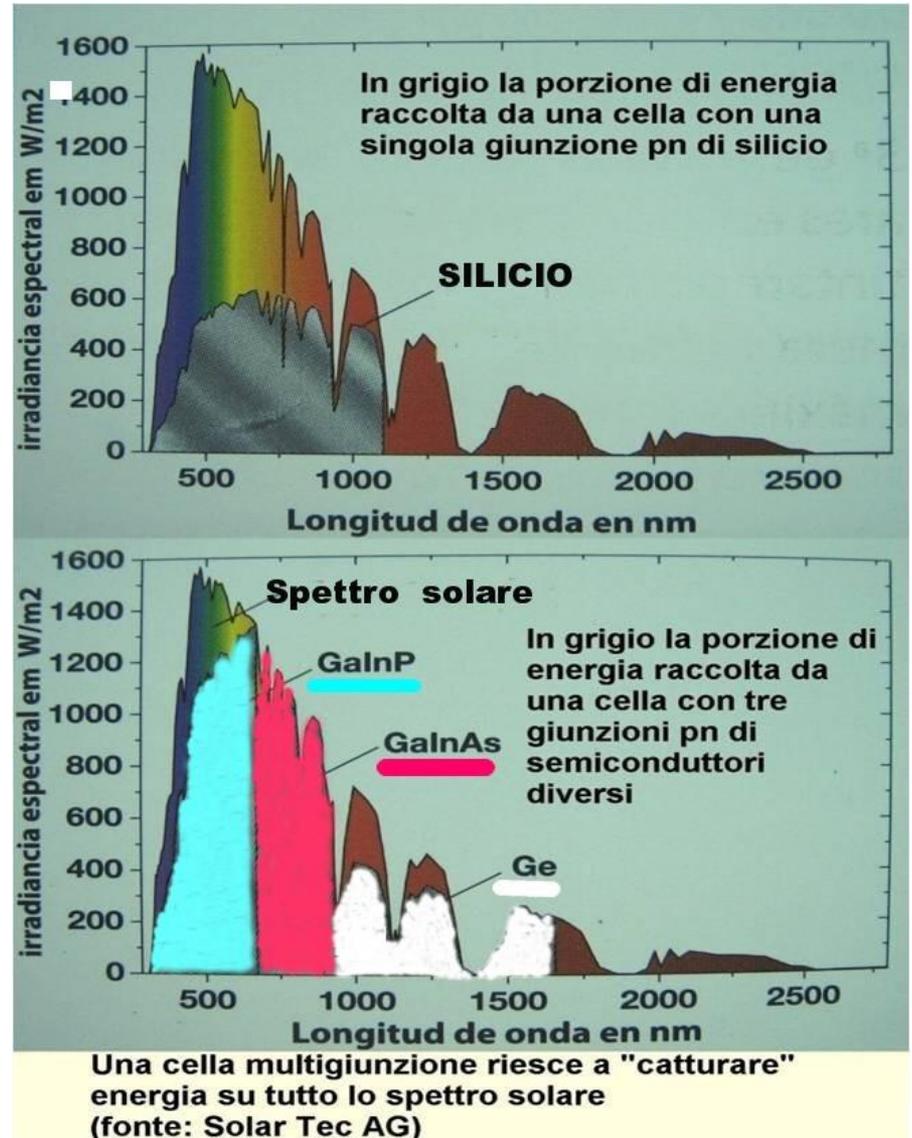
CELLE FV MULTIGIUNZIONE

Per aumentare l'efficienze FV si sono studiate varie soluzioni per raccogliere e utilizzare i fotoni nell'intero spettro di emissione del sole.

→ Si utilizzano due o più giunzioni in serie, ciascuna realizzata con materiali di diverso grado di assorbimento dei fotoni cioè energie di Gap diverse.

Esempio : tre giunzioni:

- Germanio (Ge) → Gap 0,6 eV
- Arsenurio di Gallio-Indio – (GaInAs)
→ GAP 0,7-1,5 eV
- Fosforo di Gallio-Indio (GaInP)
→ GAP 1,5-2,3 eV



CELLE CdTe (Cadmio - Tellurio)

Con le giunzioni di CdTe (Tellururo di Cadmio) si hanno efficienze di conversione FV molto vicine a quella ottenibile con il Silicio cristallino (→ ca 21%).

1- elevato coefficiente di assorbimento della luce → spessori di pochi micron assorbono più del 90% dei fotoni incidenti.

2-maggior generazione di corrente fotovoltaica → il CdTe assorbe energia anche con basse intensità luminose e con luce diffusa.

→ maggior efficienza in situazioni di nuvolosità e nelle ore di alba e il tramonto.

3- le celle CdTe patiscono meno l'aumento della temperatura di esercizio

→ producono più elettricità al caldo tipico dei mesi estivi.

Controindicazione : la presenza di Cadmio (velenoso) obbliga i costruttori a ridurre al minimo i tassi d'inquinamento entro i limiti imposti dalle normative Europee. In realtà è documentata la tossicità del Cadmio ma non quella del CdTe (tellururo di cadmio).

“Film sottile” CIS (Rame-Indio-Selenio)

Sono film sottili di Seleniuro di Rame e Indio con efficienze → ca 14% .

Vantaggi :

- **assorbono un campo più ampio dello spettro solare**
- **Mantengono gran parte dell’ efficienza anche in condizioni meteo scarse (sole basso, nuvoloso)**
- **elevata affidabilità e vita utile**
- **Adattabili a varie soluzioni d’integrazione in edifici**

L’aspetto del prodotto e la sua adattabilità dimensionale lo rendono elemento architettonico di interesse per soluzioni di design di stile



"Film sottile" CIGS (Rame-Indio-Gallio-Selenio)

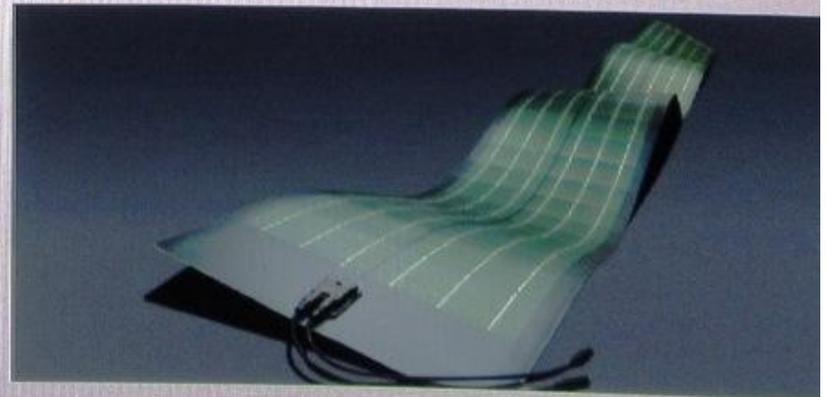
La tecnologia è tra le più promettenti del film sottile →

"efficienza di conversione" molto elevata e stabile nel tempo.

Il Seleniuro di Rame Indio Gallio gran parte dei fotoni dell'intero spettro solare con efficienze fino a ca 22 %

Un'altra caratteristica è la costanza delle prestazioni nel tempo sino a 25 anni grazie alla presenza rame.

Alcuni moduli CIGS possono staccarsi e riattaccarsi come adesivi, altri sono realizzati con macchinari a stampaggio, che depositano uno strato di nano inchiostro assorbente su di un sottile foglio metallico di alluminio.



CELLE ORGANICHE

- **Celle Polimeriche**
a base di polimeri conduttori

- **Celle con Pigmenti**
(coloranti organici)

CELLE ORGANICHE

Dispositivi con la parte fotoattiva composta da :

- **composti organici derivati da polimeri (→ celle Polimeriche)**
- **coloranti organici come ad esempio le antocianine derivate dai frutti di bosco (→ celle a Pigmento)**

La struttura base della cella organica è detta "a sandwich" ed è composta da:

- **substrato vetroso o in plastica flessibile**
- **sottilissime pellicole, che contengono i materiali fotoattivi**
- **due elettrodi conduttivi esterni di raccolta delle cariche elettriche**

Molteplici campi applicativi:

- **1 - possono essere applicate ad ogni tipo di superficie rigida (vetro, metallo) o flessibile (fogli e/o nastri di plastica).**
- **2- grazie alla loro flessibilità e leggerezza possono essere applicate su superfici curve e sulle facciate e coperture degli edifici .**

Costi di produzione nettamente inferiori.

Evoluzione storica della cella FV organica

**La prime realizzazione (1991) è stata la famosa cella DSSC di Gratzel
(Dye-Sensitised Solar Cells)**

con materiale fotosensibile (pigmento) costituito da coloranti .

Il pigmento attivo è costituito da un colorante (dye) e assorbe le radiazioni solari generando coppie di cariche (e – h).

Successivamente nel tempo le celle organiche si sono sviluppate su due fronti

1- celle FV polimeriche → materiale fotoattivo costituito da polimeri inorganici

2- celle FV organiche → materiale fotoattivo costituito da coloranti organici.

Vantaggi :

- *Moduli flessibili, leggeri e semitrasparenti*
- *Produzione con processi di stampa roll-to-roll*
- *Netta riduzione dei costi*

Componenti base della cella di Gratzel

COLORANTE FOTOSENSIBILE

Sono stati utilizzati sia coloranti naturali come le antocianine, sia coloranti sintetici .
In ogni caso il colorante fotosensibile è a largo spettro.

ELETTRODO DI SEMICONDUCTTORE

Il materiale semiconduttore più utilizzato fin dall'inizio è stato il TiO_2 (biossido di Titanio), perché molto stabile alla corrosione e perché non assorbe la luce nella parte di spettro che eccita il colorante fotosensibile.

Lo spessore di TiO_2 deve essere $<$ di $50 \mu\text{m}$ per ottimizzare la produzione e il trasporto degli elettroni verso il vetro conduttore .

ELETTROLITA

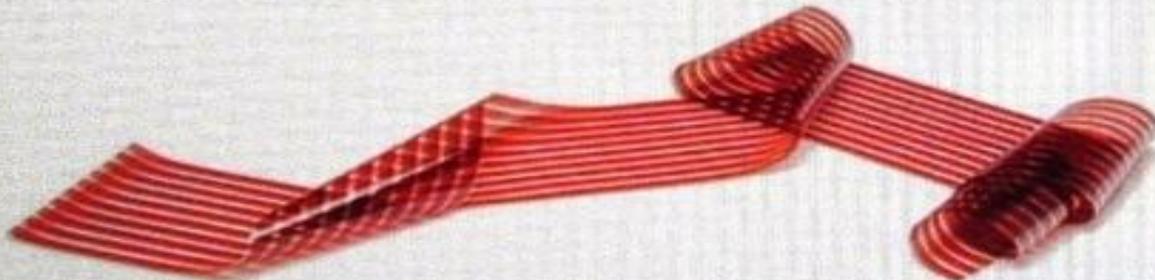
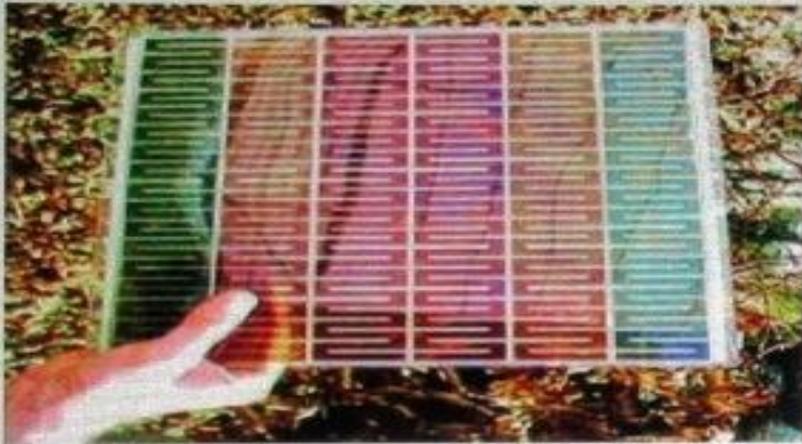
Vengono utilizzati sia elettroliti liquidi, i più diffusi a base di Iodio, sia quelli solidi.

CATALIZZATORE

Il catalizzatore, come il semiconduttore, necessita di una grande superficie per aumentare la resa della cella. Si usano principalmente due materiali: il platino o il carbonio depositato come grafite.

POTENZIALITA' DELLE CELLE POLIMERICHE

- Moduli flessibili, leggeri e semitrasparenti
- Possibilità di produzione con processi di stampa in continuo
- Facile integrazione in diversi dispositivi
- Significativa riduzione dei costi rispetto al PV tradizionale
- Vantaggi economici ed ecologici



Caratteristiche e prospettive delle celle Polimeriche

- **Semplicità e affidabilità dei processi produttivi per i quali si possono impiegare tecnologie simili a quelle della stampa (serigrafia, Roll-to-Roll Coating , stampa a getto di inchiostro)**
- **materiali depositabili in soluzione liquida a bassa temperatura**
- **possibilità di produrre celle e moduli flessibili , molto leggeri e sottili (spessori di ca 100 micron)**
- **opportunità per nuovi prodotti (finestre fotovoltaiche, tetti, pareti, pannelli architettonici, rivestimenti e laminati FV.**
- **alimentazione di dispositivi nella domotica**
- **Sensoristica negli ambienti**
- **Etichette identificatrici di prodotti (esempi presso COOP Expo 2015).**

Caratteristiche e prospettive delle celle Polimeriche

Si ottengono così pellicola flessibile, con vastissimi campi di utilizzo.

Svantaggi attuali:

- **efficienze sono basse (< del 10%)**
- **stabilità nel tempo specie agli esterni e affidabilità molto inferiori al Silicio.**

Conclusione:

Le celle polimeriche avranno significativi sviluppi negli interni ad esempio: .

- **alimentazione di dispositivi nella domotica**
- **sensoristica negli ambienti**
- **etichette identificatrici di prodotti (esempi presso COOP Expo 2015).**

PUNTI CRITICI DELLE CELLE ORGANICHE

- **Efficienze basse (< del 10%)**
- **Stabilità nel tempo dei parametri elettrici**
- **Tempo di vita delle celle**
- **Degradazione dei materiali per effetto della luce, dell'aria e delle condizioni meteo**

Fotovoltaico anche di notte !?



Le ultime ricerche in merito

Non sono ...“fake news “

Negli ultimi anni si sono studiate soluzioni e materiali in grado di sfruttare l'energia solare ricevuta dalla terra di giorno.

A livello universitario e nei centri di ricerca e sviluppo si studiano sostanzialmente due tipi di possibili soluzioni:

- 1- sfruttare indirettamente l'energia solare assorbita dal terreno di giorno e immagazzinata sotto forma di calore (radiazioni infrarosse assorbita da un **sistema di nanoantenne**)
- 2.- utilizzare materiali fotosensibili in grado di assorbire di giorno e rilasciare l'energia accumulata nelle ore diurne quando il sole è coperto oppure di notte (**Fosforo a lunga persistenza LPP**)

Pannelli FV con nanoantenne per infrarossi

Circa il 50% delle radiazioni solari arrivano sulla Terra come fotoni infrarossi che sono riemessi dal terreno sotto forma di calore durante la notte.

Basta raccogliarli e convertirli in energia elettrica.

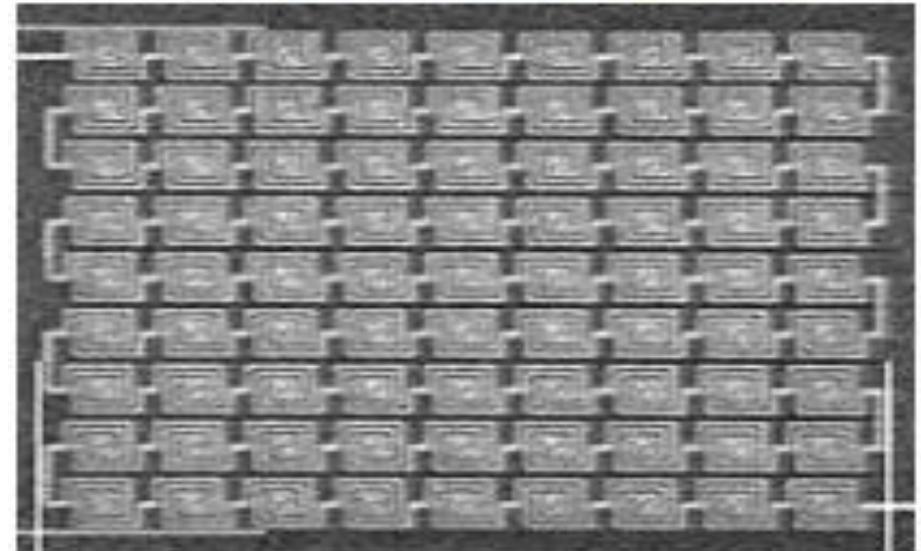
Un team della Idaho University (Steven Novack 2011)

ha dimostrato che oltre l'80% di questi fotoni può essere raccolto con un **sistema di nanoantenne** della stessa lunghezza d'onda degli infrarossi . E' così possibile sfruttare tanto i fotoni infrarossi riemessi verso l'alto dal terreno che quelli riflessi verso il basso dalle nuvole .

Le nanoantenne sono realizzate con spirali di fili sottilissimi disposte su superfici FV sopra fogli flessibili di plastica → funzionano sia di giorno che di notte.

Costi elevati compensati da alta efficienza (circa il 45% dell'energia fotonica raccolta dalle nanoantenne è convertita in energia elettrica.

Limite tecnologico : La lunghezza d'onda dei fotoni infrarossi genera una corrente alternata con una frequenza elevata → necessità di una conversione in corrente continua tipica dei pannelli FV tradizionali.



Pannelli FV con Fosforo LPP

I pannelli FV con il Fosforo a lunga persistenza, assorbono gran parte delle radiazioni solari non visibili anche lo spettro non visibile.

In altre parole i pannelli LPP sono in grado di captare le lunghezze d'onda dello spettro luminoso finora scartate dagli assorbitori fotovoltaici tradizionali.

Nell'aprile 2017 la rivista "American Society Chemistry" ha pubblicato un lavoro sperimentale di due team cinesi (**Tang** della Ocean University of China e **Yang** della Yunnan University) circa la realizzazione di celle solari con fosforo LPP in grado di immagazzinare la radiazione solare di giorno e rilasciarla di notte o nelle ore nuvolose con sole coperto.

L'obiettivo è aumentare l'efficienza di conversione fotovoltaica della radiazione diretta, in modo da immagazzinarne le quantità superiori ai fabbisogni del momento e rilasciare le eccedenze in un secondo momento.

Più precisamente la parte di spettro solare vicina all'infrarosso viene assorbita e "memorizzata" grazie al fosforo LPP che rilascia poi luce monocromatica luminosa di notte a sua volta assimilata da assorbitori che la convertono in energia elettrica.

Ultima frontiera del fotovoltaico

Tra le varie tecnologie innovative e in via di sviluppo quella della **perovskite** e più recentemente **perovskite-grafene**, sono le più promettenti .

Le celle FV a base di perovskite (celle PSC Perovskite Solar Cell) sono state sempre più perfezionate fino a raggiungere efficienze superiori di ca il 22% su area utile molto piccole (ca 1-2 cmq).

Tuttavia, nonostante le promettenti performance dimostrate dalle PSC, la stabilità e durata di questi dispositivi è ancora un grande problema che deve essere risolto .

Segnalo qui i risultati da record ottenuti nell'aprile 2017 dai ricercatori del **Polo Solare Organico** (“Tor Vergata”, Istituto Italiano Tecnologia, Università di Creta) nell'ambito del **progetto Europeo Graphene Flagship** .

Hanno raggiunto il record mondiale di efficienza di conversione su un modulo FV in perovskite + grafene di **area > di 50 cmq → efficienza di 12,65 %**.

Il grafene inoltre conferisce maggior stabilità al modulo.

I ricercatori hanno dimostrato che dopo 1630 ore (circa 68 gg) i moduli mantenevano più del 90% dell'efficienza iniziale.

Cos'è la Perovskite

Il minerale “ Perovskite” fu scoperto in Russia (Urali) nel 1840.

Solo nel recente decennio è stato applicato in campo fotovoltaico grazie soprattutto per la sua altissima conducibilità

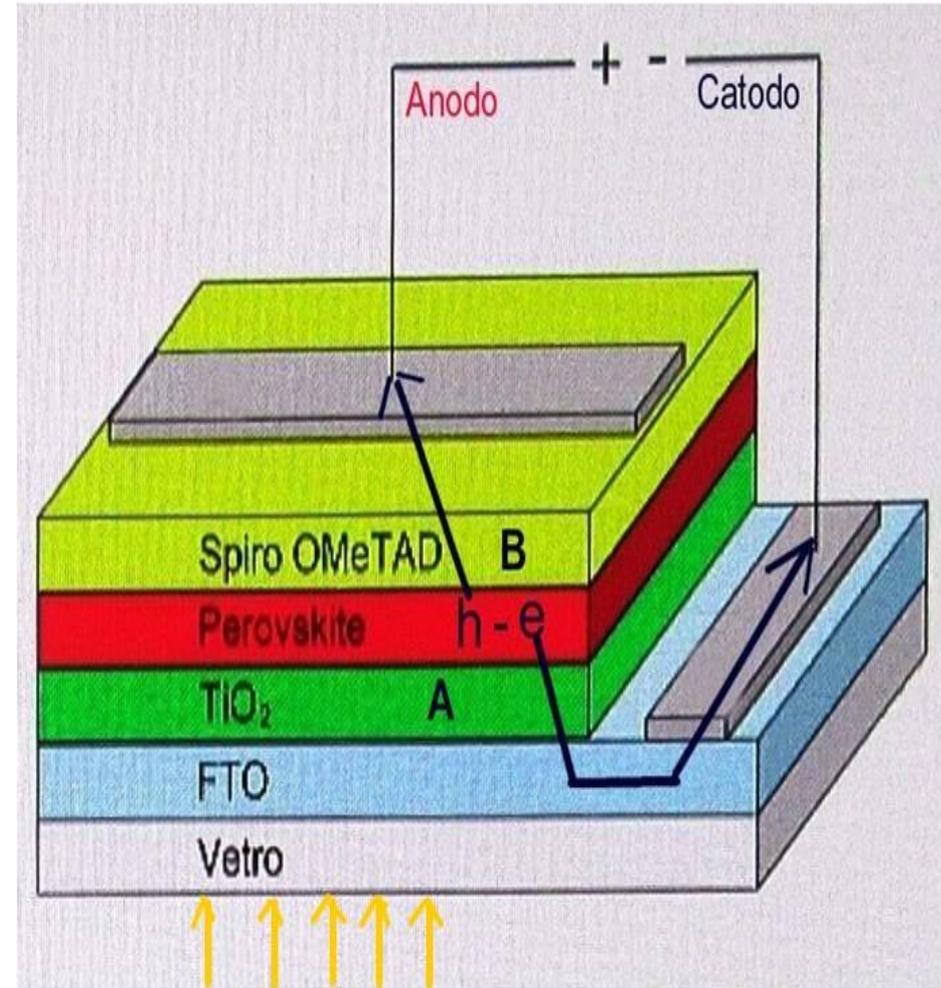
Attualmente le perovskite usate sono materiali ibrido (organico e inorganico,) in grado di assorbire l'intero spettro solare meglio di qualsiasi altro colorante finora sintetizzato nel fotovoltaico di terza generazione e di trasportare sia elettroni che lacune con velocità nettamente superiori.

Le celle solari a perovskite (PSC) hanno nettamente aumentato la loro efficienza negli ultimi anni: **da 3-4 % a circa il 22%**, mediante ingegnerizzazione delle interfacce tra i vari componenti del dispositivo con strutture a strati sovrapposti a sandwich.

Struttura tipo della cella PSC

Esempio tipico di cella PSC .

- Lo strato di **perovskite** è la parte fotosensibile che genera coppie e-h.
- **Lo strato "A"** (TiO_2 biossido di Ttanio) svolge una duplice funzione :
 - 1-trasporto degli elettroni verso il catodo attraverso lo strato FTO (ossido di stagno drogato fluoro)
 - 2-blocco delle lacune
- **Lo strato "B"** trasporta le lacune verso l'anodo.
- **Gli elettrodi** (Catodo e Anodo) sono in genere realizzati in Argento / Oro.



Proprietà del Grafene 2D

La struttura atomica del grafene è composta da atomi di carbonio legati in un reticolo a nido d'ape.

Normalmente realizzato e depositato in fogli sottilissimi (**spessore atomico**) .

1-Proprietà elettriche

È il materiale a più alta mobilità elettronica → le cariche elettriche (elettroni e lacune) si muovono nel reticolo del grafene senza subire interazioni significative alla velocità della luce. Conducibilità ambipolare (e-h) elevatissima.

2-Proprietà termiche

Ottima conducibilità termica nettamente superiore alle temperature ambiente di quelle dei metalli, del Silicio ecc.

3-Proprietà Meccaniche

Altissima flessibilità e resistenza a trazione. Un foglio di grafene è leggerissimo e con resistenza meccanica a trazione circa 200 volte più dell'acciaio.

4-Proprietà Optoelettroniche

Il foglio di grafene è quasi perfettamente trasparente → applicazione come elettrodo trasparente e conduttivo. In particolare il grafene assorbe soltanto 2-2,5% dello spettro luminoso ed è indipendente dalle frequenze delle radiazioni luminose cioè i fotoni → ottimo passaggio di quasi tutto lo spettro luminoso solare.

Concludendo :

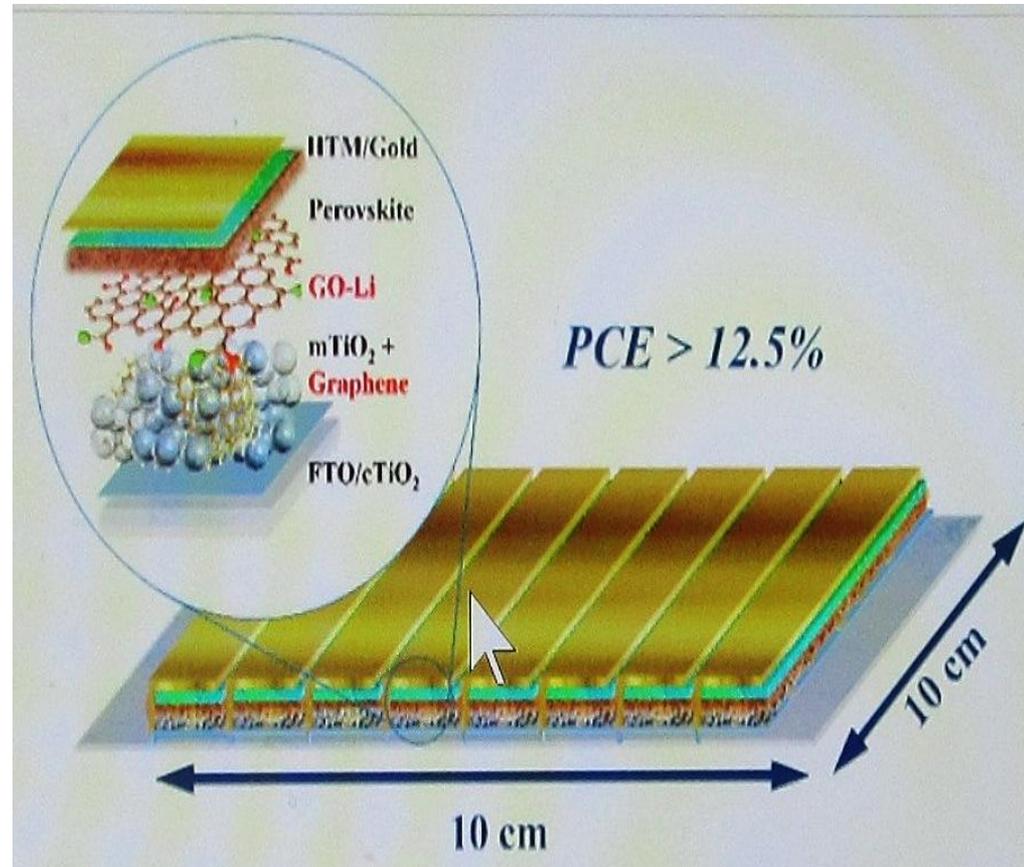
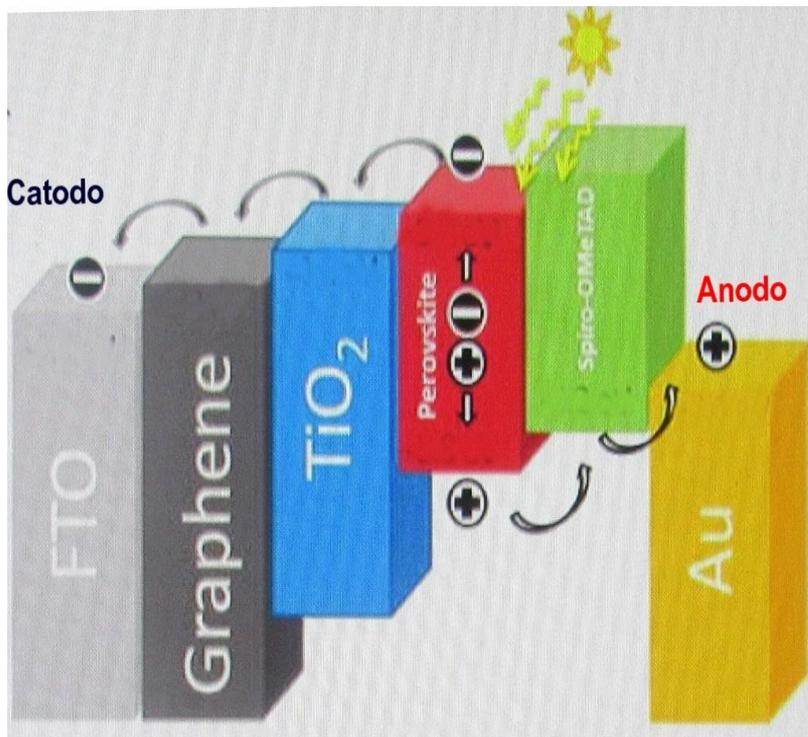
Il grafene, materiale 2D del futuro , ha potenzialmente moltissime applicazioni , specialmente in campo elettrico.-

- Settore Fotovoltaico → celle sia al silicio che soprattutto in perovskite con interposti strati di grafene
- Schermi flessibili e trasparenti → dispositivi PC, Tablet, Smartphone ecc (Sony, Samsung, Nokia ecc)
- Vetri fotosensibili nella domotica residenziale

Celle tipo Perovskite + Grafene

E' il settore FV nuove tecnologie maggiormente in evoluzione e caratterizzato da RS in molti paesi tra cui come già ricordato in Italia con risultati incoraggianti.

Gli strati di grafene vengono interposti tra la perovskite e gli strati di trasporto delle cariche prodotte (e – h) ottenendo così una migliore conducibilità verso gli elettrodi. Il grafene conferisce inoltre maggior stabilità e durata .



Per finire , il tandem Silicio - Perovskite

A Neuchâtel, in Svizzera, i ricercatori del Politecnico di Losanna (fonte energie rinnovabili.it 12-6-2018) e del Centro svizzero di elettronica hanno realizzato celle FV tandem SP **con un'efficienza di conversione del 25,2 per cento (record mondiale).**

Col vantaggio di poter facilmente aggiornare le linee di produzione delle celle al Silicio, con varianti per la Perovskite economicamente competitive.

Nella soluzione tandem la Perovskite converte efficientemente la luce blu e verde, mentre il Silicio è più efficace nella conversione della luce rossa e infrarossa → il tandem massimizza l'uso dello spettro solare e aumentare la quantità di energia generata”

Il punto centrale della RS è di poter impilare i due materiali (P – S) , senza modificare lo strato di Silicio ed evitando i problemi alla sovrapposizione.

Resta il problema di aumentare la stabilità dei film in Perovskite nel tempo.

UTE San Donato 2018 – 2019

waitingman@libero.it

*Grazie per la Tua attenzione,
arrivederci al prossimo Ciclo*

