



1° - Il dilemma energetico

2° - Un tuffo nel passato

3° - Ruolo del Fotovoltaico

CFV Compendio Prima parte

UTE
19 - 20

IL DILEMMA ENERGETICO

*Il nostro Pianeta da tempo
ci invia segnali sul suo stato ...*

*segnali non ancora ascoltati
ma che presto non potranno
più essere ignorati ...*



ENERGIA , BISOGNO PRIMARIO.



CORRELAZIONE STORICA TRA SVILUPPO SOCIO-ECONOMICO E FABBISOGNO DI ENERGIA IN TUTTE LE SUE TIPOLOGIE :

LEGNO → CARBONE → PETROLIO E GAS NATURALE HANNO PERMESSO ALL' UOMO DI SODDISFARE I BISOGNI ENERGETICI SEMPRE CRESCENTI.



DAGLI ATTUALI CIRCA 7,5 MILIARDI DI ABITANTI, SI PREVEDE CHE LA TERRA NE OSPITERÀ OLTRE 9 MILIARDI ENTRO IL 2050.



PROBLEMA BASE DELL'UMANITA' → COME POTER CONTINUARE A SODDISFARE IL PROPRIO FABBISOGNO ENERGETICO CRESCENTE SENZA CONSEGUENZE SE NON PROPRIO CATASTROFICHE CERTAMENTE INVOLUTIVE SULL'AMBIENTE IN CUI VIVERE.

MODELLI DI SVILUPPO INDUSTRIALE



L'ATTUALE MODELLO , SEGUITO DA OLTRE DUE SECOLI , HA PORTATO AD UN USO CRESCENTE DELLE RISORSE ENERGETICHE FOSSILI E PER MOLTI ANNI SI È CREDUTO CHE FOSSE L'UNICO MODELLO DI SVILUPPO POSSIBILE.



MODELLO INSUFFICIENTE PER DUE RAGIONI:

1- LIMITATEZZA DELLE RISORSE ENERGETICHE TRADIZIONALI .

RISERVE PETROLIFERE CON DURATA LIMITATA E IN GRAN PARTE LOCALIZZAZIONE IN AREE DEL PIANETA INSTABILI POLITICAMENTE E SOCIALMENTE

2 - CRESCENTE INQUINAMENTO AMBIENTALE CAUSATO DA PRODUZIONE E CONSUMO DI ENERGIA.

PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA ANCORA AFFIDATA IN MAGGIOR PARTE A FONTI FOSSILI NON RINNOVABILI E INQUINANTI → CO2 → EFFETTO SERRA → DANNO CRESCENTE NELL'ECOSISTEMA MONDIALE.



NUOVI MODELLI DI SVILUPPO ENERGETICO.



NUOVE TECNOLOGIE → UTILIZZO CRESCENTE DI FONTI RINNOVABILI E SOSTENIBILI.

LE FONTI ENERGETICHE

L'UOMO DISPONE DI **DUE MEZZI PER PROCURARSI L'ENERGIA:**



TRASFORMARE IN ENERGIA TUTTO CIÒ CHE LA NATURA HA IMMAGAZZINATO, CONSUMANDO CIOÈ LE RISORSE ESAURIBILI DI ENERGIA NELLA STRAGRANDE MAGGIORANZA DI NATURA FOSSILE (CARBONE, PETROLIO, GAS)

→ economia LINEARE



UTILIZZARE CIÒ CHE LA NATURA FORNISCE LIBERAMENTE COME SOLE, ACQUA E VENTO. QUESTE SONO LE PRINCIPALI RISORSE RINNOVABILI DI ENERGIA. ATTUALMENTE LA MAGGIOR PARTE DELL'ENERGIA PROVIENE DA RISORSE ESAURIBILI , IL RESTO DERIVA DA ENERGIA IDROELETTRICA E NUCLEARE. LE ALTRE RISORSE ENERGETICHE (SOLE E VENTO) CONTRIBUISCONO ANCORA IN PARTE MA SONO IN FORTE CRESCITA, SPECIE QUELLE SOLARI.

→ economia CIRCOLARE

FONTI ENERGETICHE ATTUALI DISPONIBILI



VENTO



SOLE



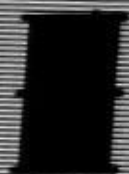
URANIO



CORSI
D'ACQUA



TERRA



PETROLIO
e derivati



MARE



BIOMASSE
e derivati



CARBONE
e derivati



GAS

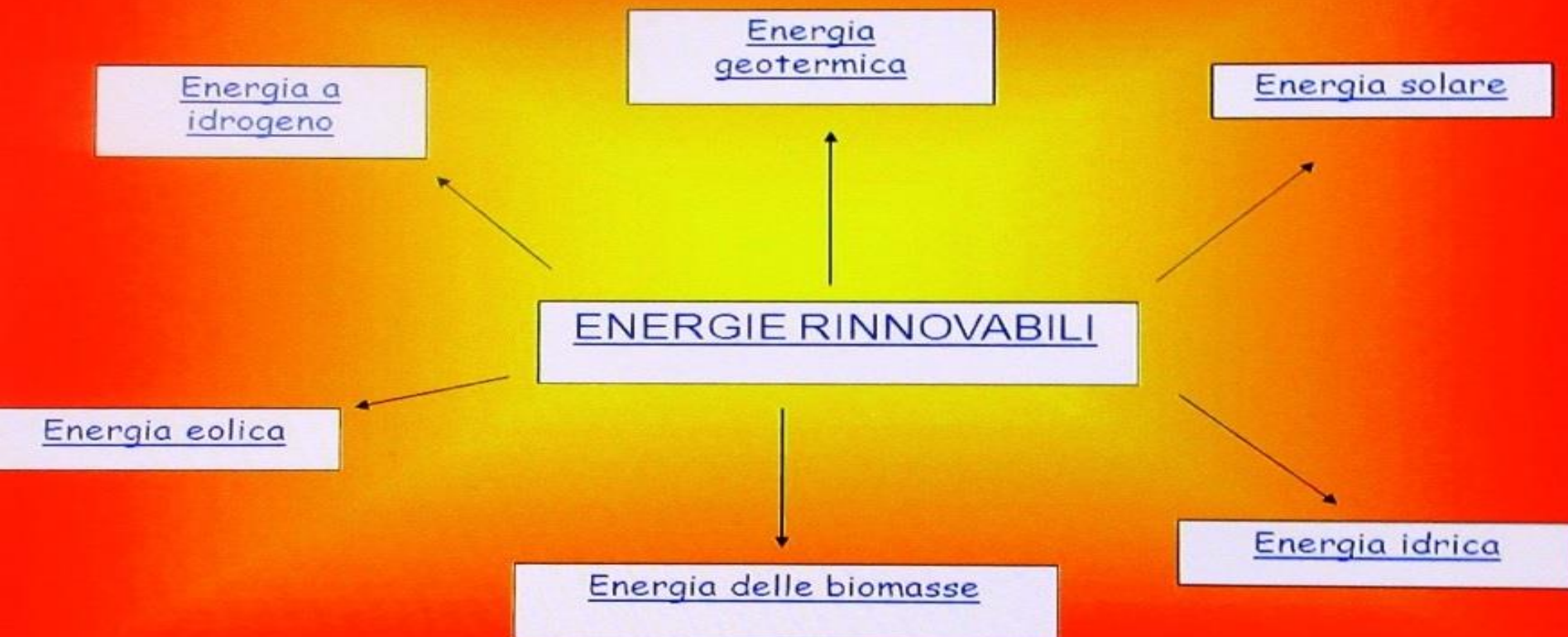


le Rinnovabili



Sono da considerarsi energie rinnovabili quelle forme di energia generate da fonti il cui utilizzo non pregiudica le risorse naturali per le generazioni future o che per loro caratteristica intrinseca si rigenerano o non sono "esauribili" nella scala dei tempi "umani".

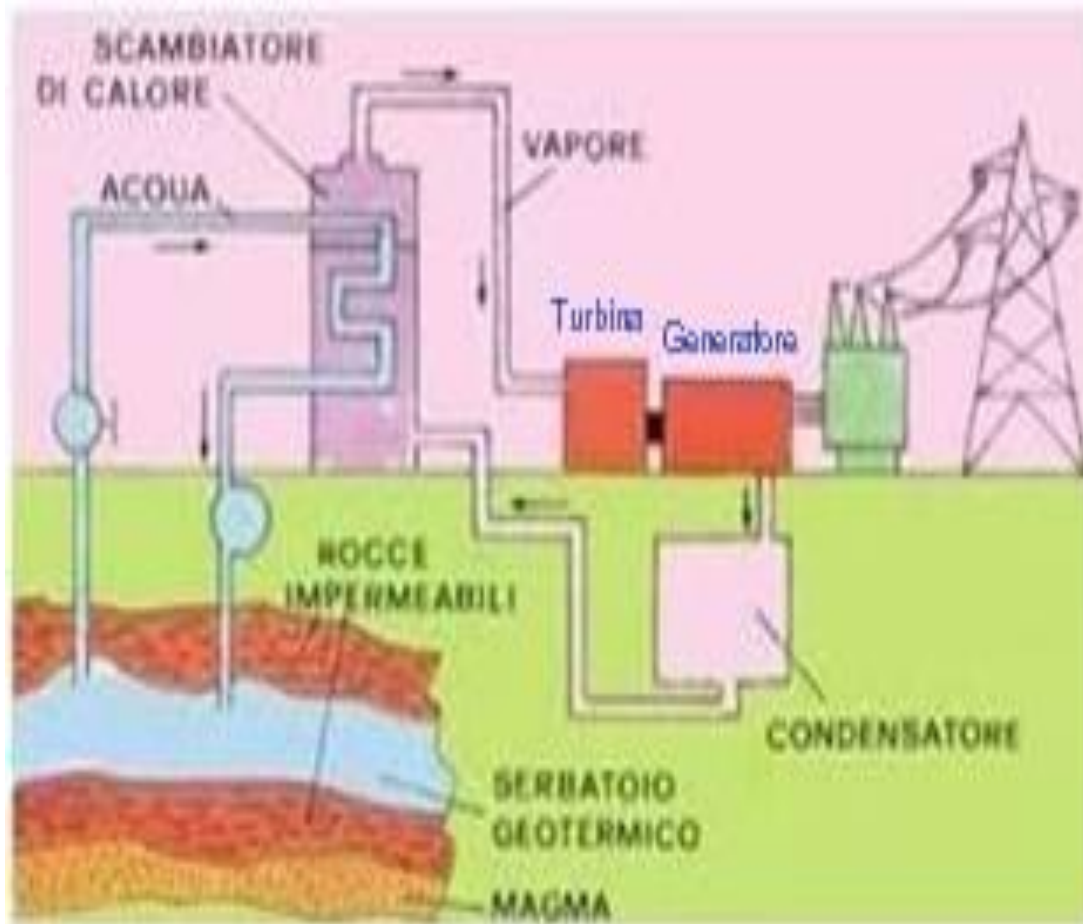
Fonti rinnovabili



ENERGIA GEOTERMICA

Fonti geologiche → energia elettrica .

Il vapore termico del sottosuolo aziona una turbina che aziona il generatore elettrico. Energia geotermica anche per riscaldamento.



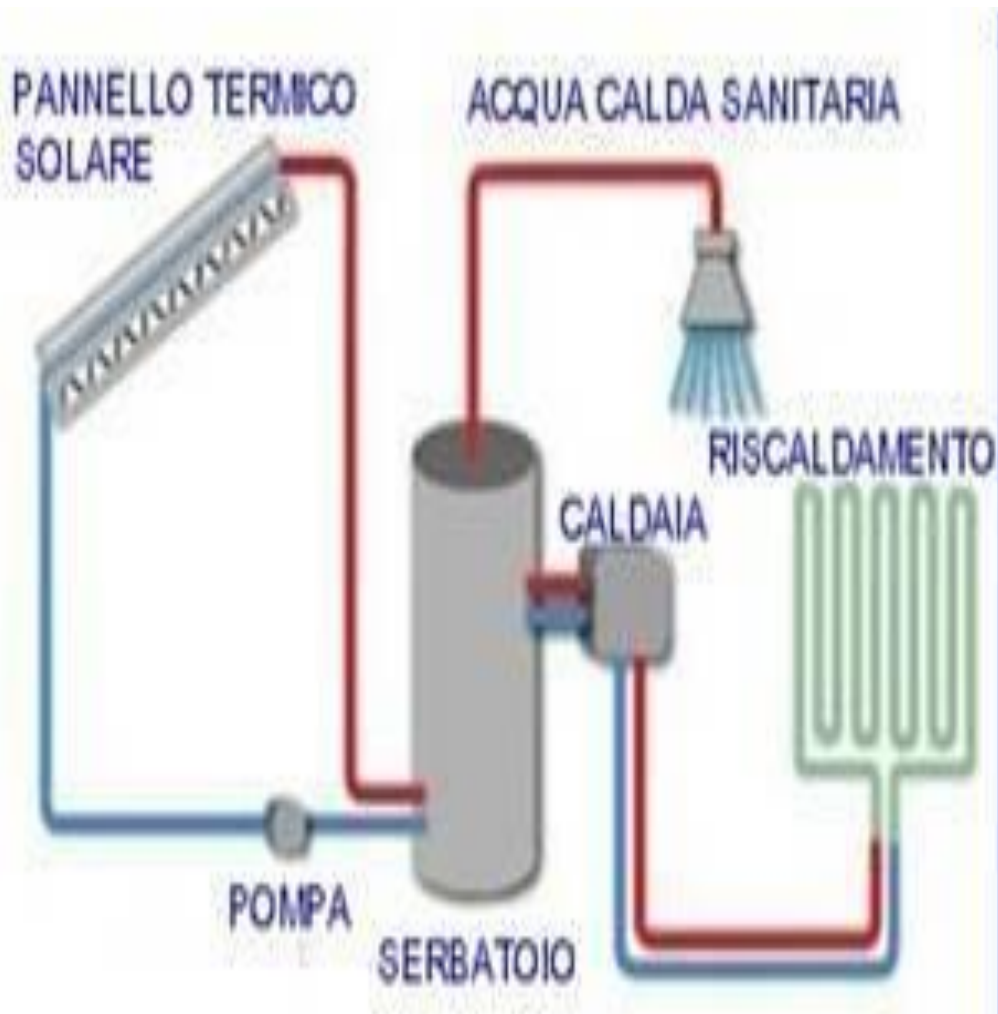
Il terreno contiene un' inesauribile sorgente di calore: i sistemi di riscaldamento e raffreddamento con pompe di calore geotermiche sfruttano il fatto che la temperatura del terreno, già a pochi metri di profondità, si mantiene grossomodo costante durante l'arco dell'anno.

Quella geotermica è una fonte energetica a erogazione continua e indipendente da condizionamenti climatici, ma essendo difficilmente trasportabile, è utilizzata per usi prevalentemente locali. La risorsa geotermica risulta costituita da acque sotterranee che, venendo a contatto con rocce ad alte temperature, si riscaldano e in alcuni casi vaporizzano.

Man mano che si scende in profondità, nel sottosuolo, di circa ogni 100 metri, la temperatura delle rocce aumenta di $+3^{\circ}\text{C}$. In queste zone calde l'energia può essere facilmente recuperata mediante la geotermia convogliando i vapori provenienti dalle sorgenti d'acqua del sottosuolo verso apposite turbine adibite alla produzione di energia elettrica o riutilizzando il vapore acqueo per il riscaldamento, le coltivazioni in serra .

ENERGIA SOLARE (TERMICA - FOTOVOLTAICA)

Acqua calda, riscaldamento, energia elettrica dal Sole.



ENERGIA IDROELETTRICA

Energia potenziale gravitazionale dell'acqua in quota

→ energia cinetica di caduta → generazione di energia elettrica.



VANTAGGI E SVANTAGGI

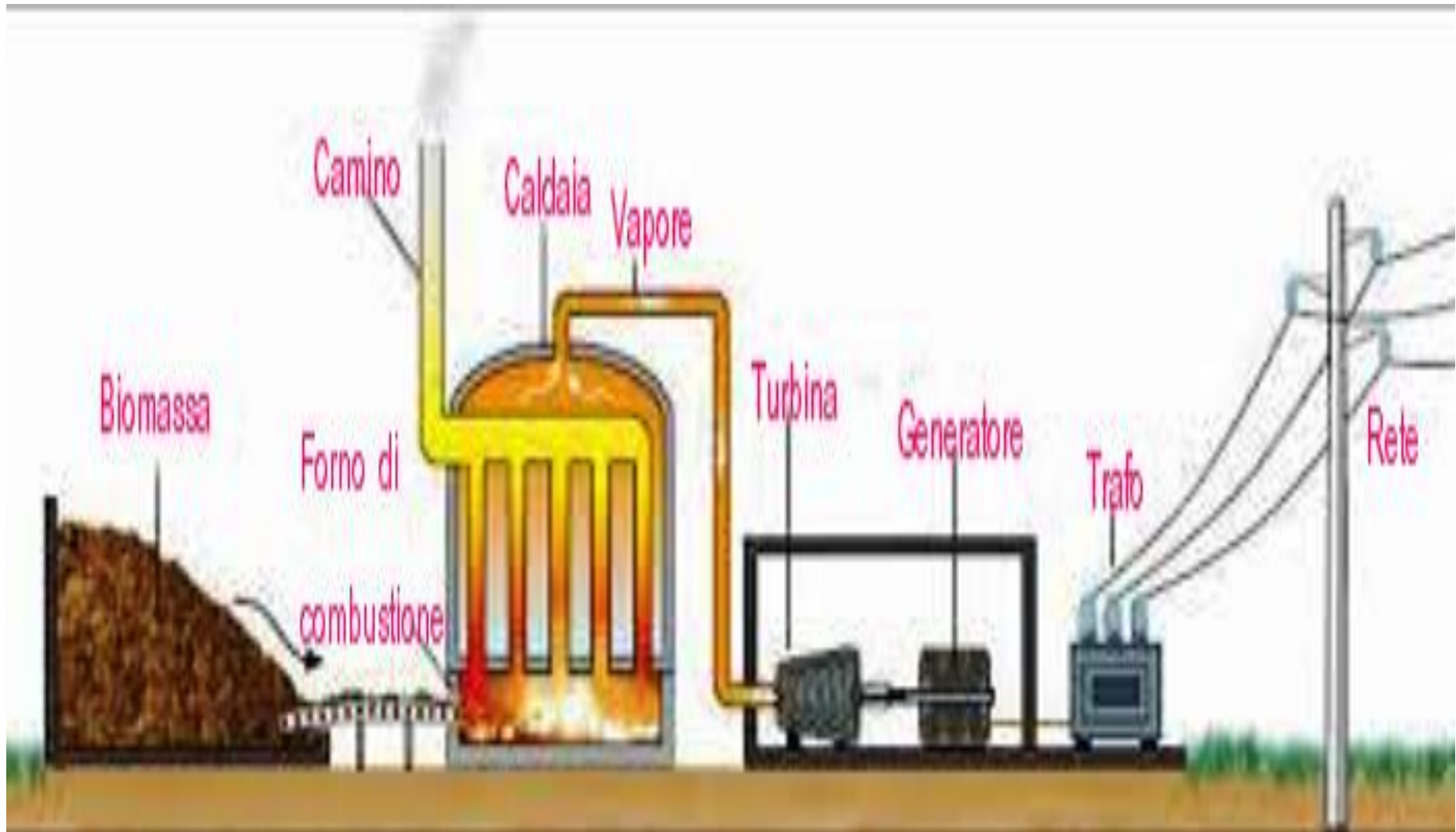
dell' idroelettrico

I vantaggi dell'energia idroelettrica sono principalmente due e uno di questi deriva dal fatto che questa energia è ricavata da una fonte rinnovabile quale l'acqua, che è l'elemento materiale più presente sul nostro pianeta; la seconda dal fatto che per la produzione di tale energia non si sfrutta unicamente l'acqua dolce, ma anche l'acqua del mare; inoltre questo tipo d'energia, a differenza di molte altre è pulita.

Lo svantaggio più evidente riguarda l'impatto ambientale infatti con la costruzione di dighe o di centrali il rischio di un cambiamento dell'habitat è elevato; Inoltre le zone in cui è normalmente presente uno scorrimento continuo d'acqua, possono trasformarsi in zone quasi paludose o con un minore scorrimento d'acqua, come può avvenire ai piedi di bacini.

ENERGIA DA BIOMASSA

**Biomasse (animale o vegetale) → biogas (fermentazione)
→ combustibile per la produzione di energia elettrica.**



Si intende con biomassa tutto il materiale di origine organica sia vegetale sia animale; dal plancton, alle alghe, agli alberi ed ai tessuti organici degli esseri viventi; Sono però da escludere le plastiche ed i materiali fossili.

Le biomasse più utilizzabili per la produzione di energia consistono in tutti quei materiali che possono essere usati come combustibili, per esempio la legna sotto forma di combustibile è la biomassa di gran lunga più importante. La biomassa costituisce una risorsa rinnovabile e inesauribile, a patto che essa venga sfruttata non oltrepassando il ritmo di rinnovamento biologico.

Le biomasse hanno origini differenti:

- Da boschi e foreste naturali.
- Da piante coltivate appositamente per scopi energetici.
- Dai residui altrimenti.
- Da rifiuti organici.
- Tramite la gassificazione.
- Tramite la conversione biologica ad alcoli.
- Tramite la combustione diretta.

I tipi di biomasse maggiormente utilizzati sono 4:

- Legno: viene considerata una fonte di energia pulita, rilascia nell'atmosfera una quantità di anidride carbonica (CO_2) e questa a sua volta viene utilizzata per la crescita di altre piante.
- Cippato: è legna appositamente sminuzzata e ridotta in scaglie grandi dai 3 ai 5cm e proviene dagli scarti legnosi di segherie ed industrie ma anche dagli scarti ottenuti dalle potature boschive, agricole ed urbane.
- Pellets: sono gli scarti di industrie, falegnamerie o segherie prima appositamente sminuzzati e poi sottoposti ad un altissima pressione.
- Mais: mais o granturco è quello in grani facilmente reperibile e ad un costo decisamente basso.

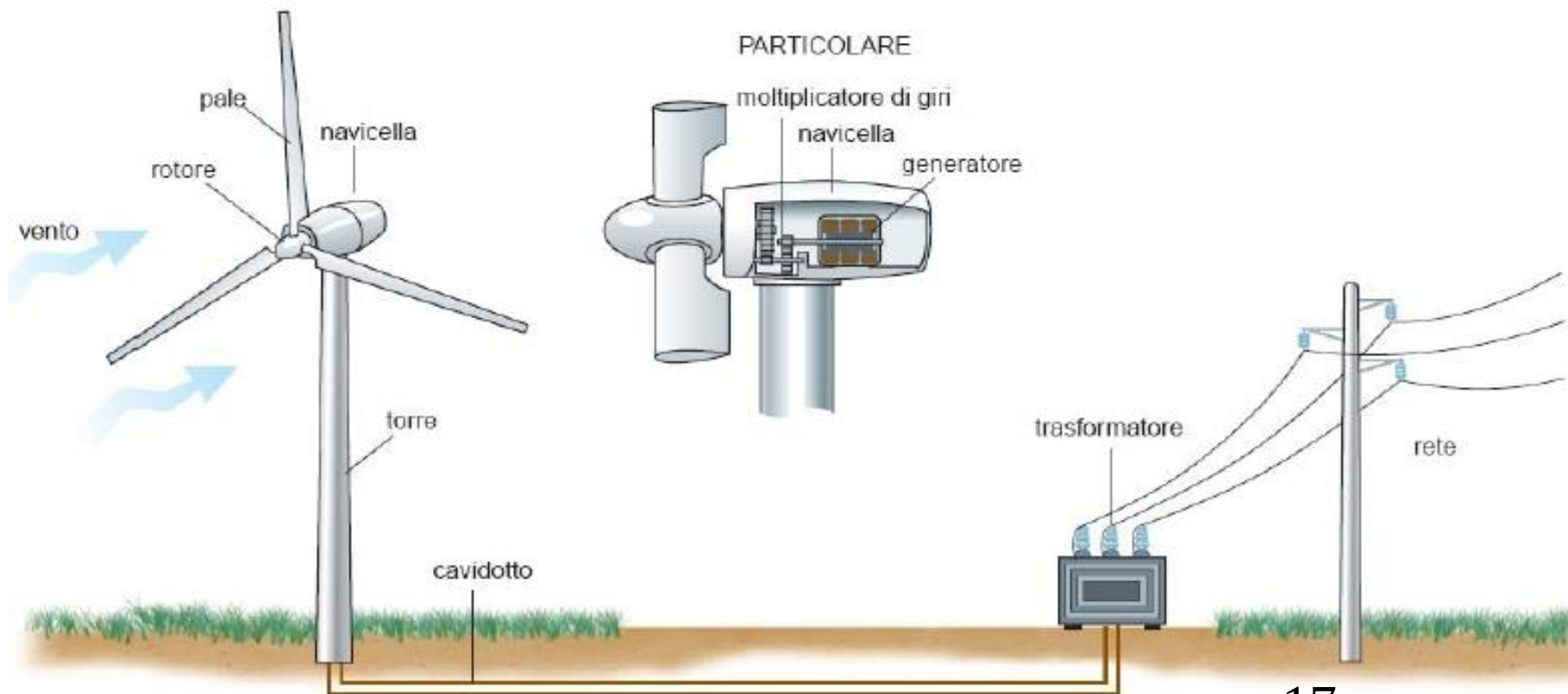
ENERGIA EOLICA

Energia cinetica del vento → energia meccanica → energia elettrica .

Generatori eolici di due tipi: ad asse verticale e ad asse orizzontale.

Prima tra tutte le energie rinnovabili per il rapporto costo/produzione, è stata la prima fonte energetica rinnovabile usata dall'uomo (esempio mulini a vento).

Schema impianto eolico



VANTAGGI E SVANTAGGI

dell' eolico

Gli aspetti positivi sono:

- Impianti semplici, **anche se localmente rumorosi**
- Produzione di energia da immettere direttamente sulla rete locale.
- Disponibilità di potenza direttamente vicino ai centri di carico locali.
- Emissioni inquinanti evitate.

Gli aspetti negativi delle turbine eoliche sono:

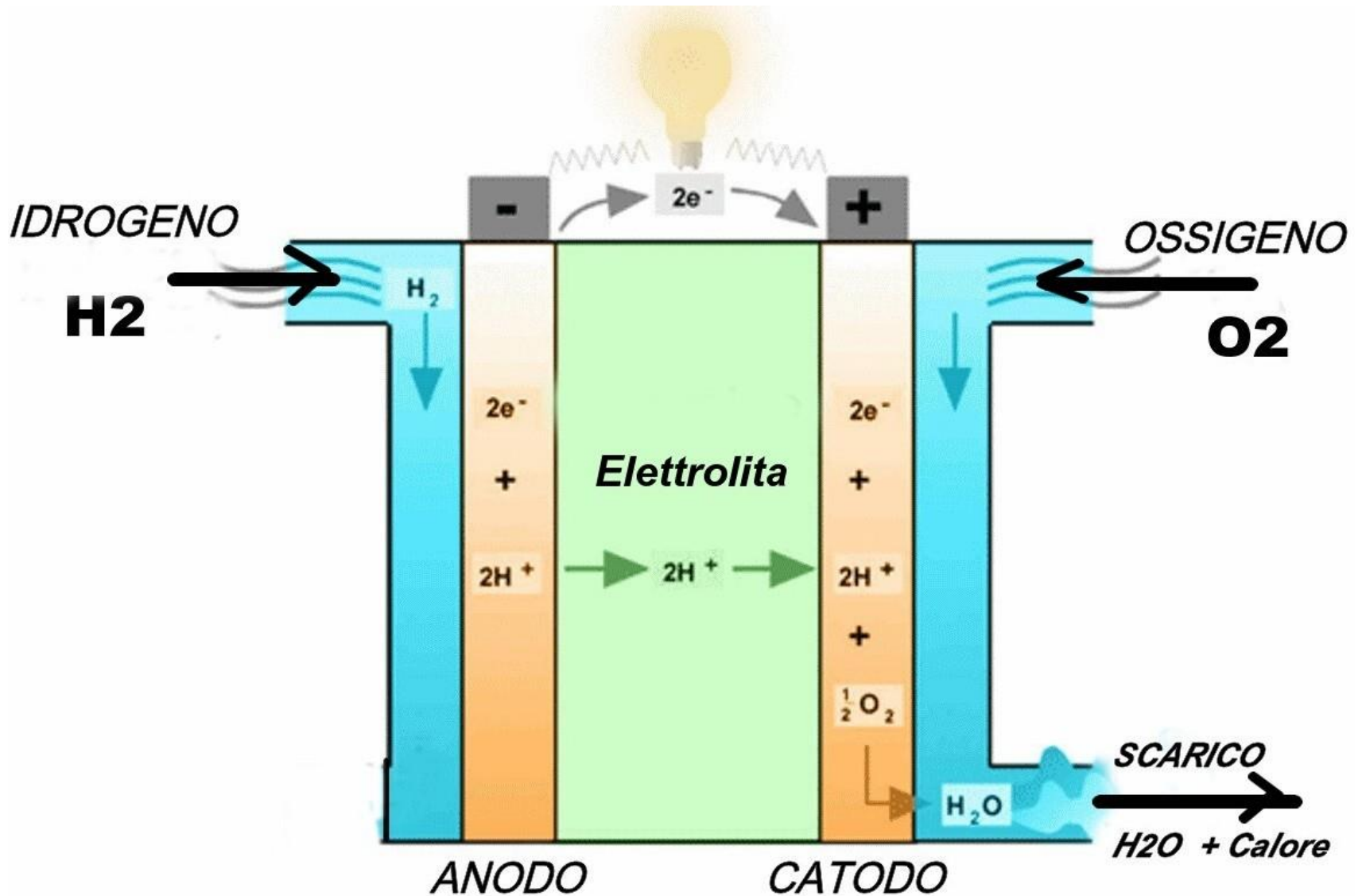
- Irregolarità del vento.
- Impianti ingombranti.
- Il vento presenta una limitata intensità energetica, per tale motivo gli impianti si presentano ingombranti.

CELLE A COMBUSTIONE

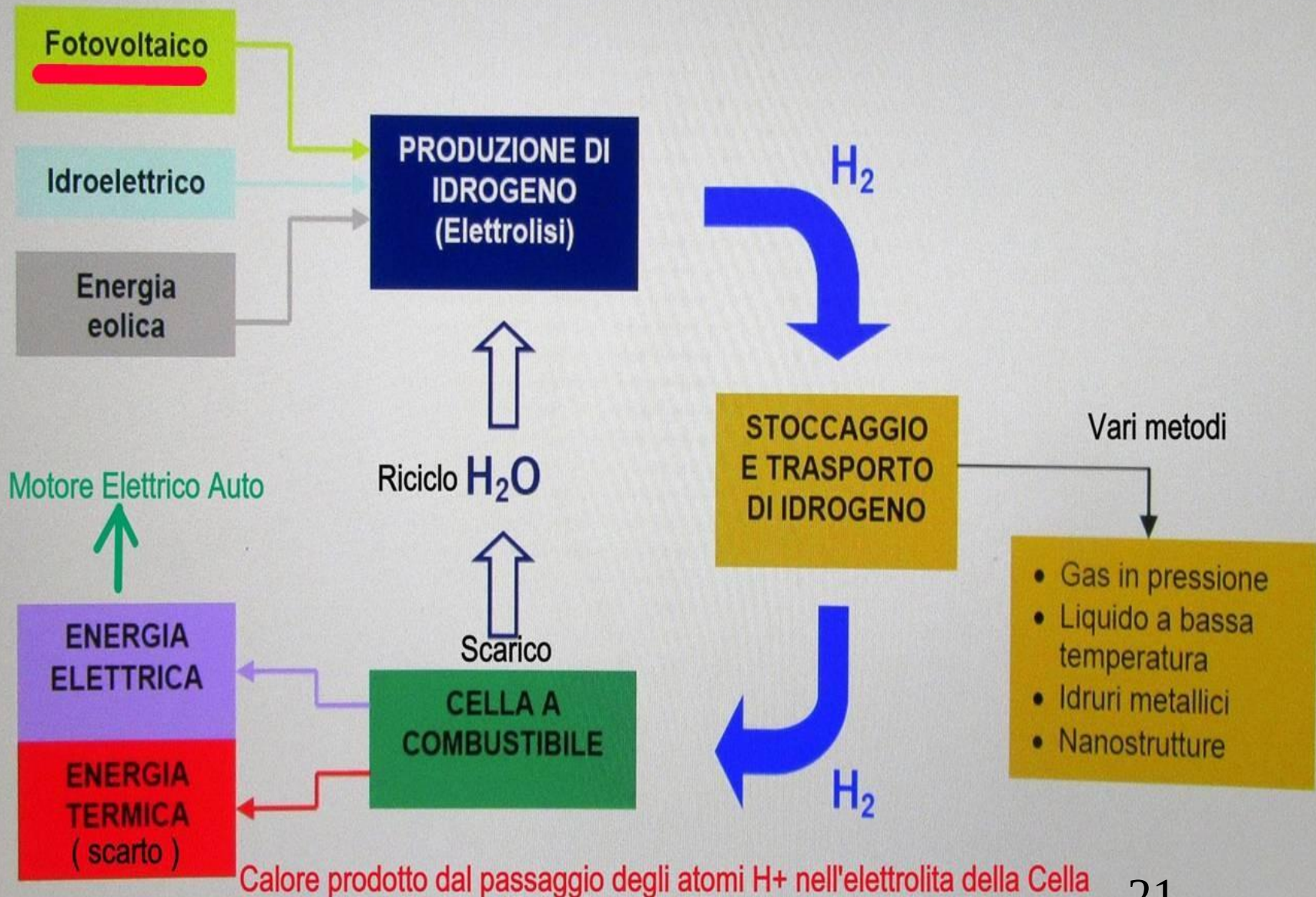
Fuel Cell (H₂)

Le celle a combustibile sono dei sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico e di organi meccanici in movimento, per questo presentano rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

Schema funzionale Fuel Cell



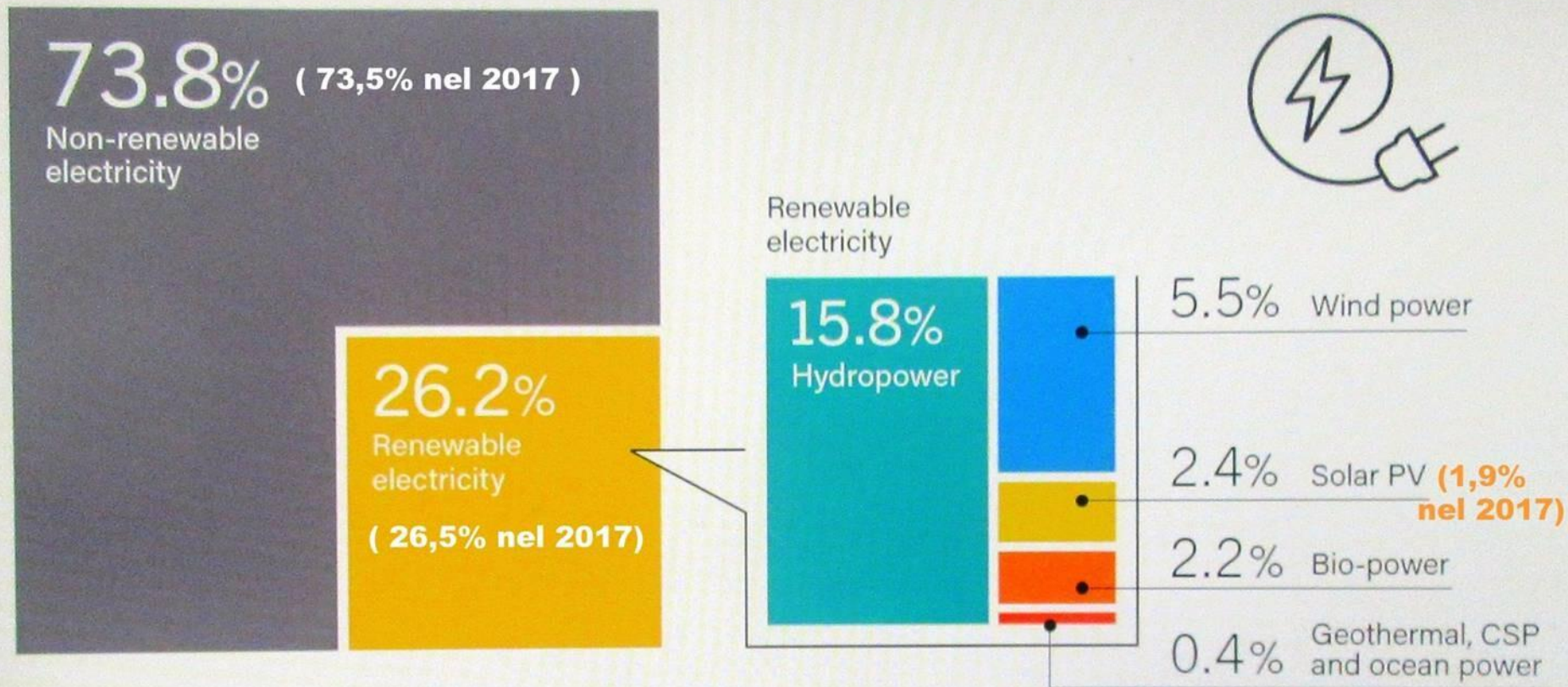
IL CICLO "VIRTUOSO" DELL'IDROGENO



MIX ENERGIA NEL MONDO A FINE 2018

(fonte REN21 2019)

Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production, End-2018



Note: Data should not be compared with previous versions of this figure due to revisions in data and methodology.

Source: See endnote 192 for this chapter.

Potenza mondiale rinnovabile totale 2018

fonte REN21 2019

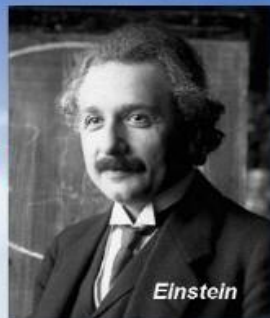
POWER		2017	2018
Renewable power capacity (including hydropower)	GW	2,197	2,378
Renewable power capacity (not including hydropower)	GW	1,081	1,246
 Hydropower capacity ²	GW	1,112	1,132
 Wind power capacity	GW	540	591
 Solar PV capacity ³ + 24.7% sul2017	GW	405	505
 Bio-power capacity	GW	121	130
 Geothermal power capacity	GW	12.8	13.3
 Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	GW	4.9	5.5
 Ocean power capacity	GW	0.5	0.5
 Bioelectricity generation (annual)	TWh	532	581

Top 10 potenza FV nel mondo 2017-2018

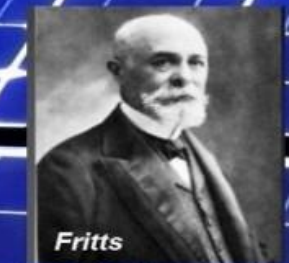
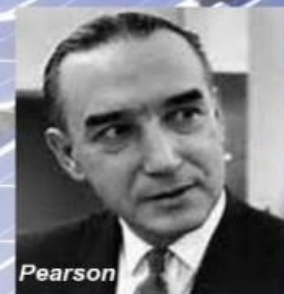
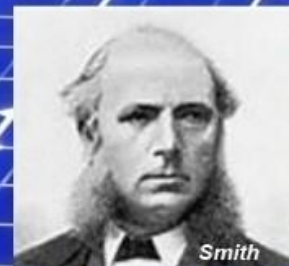
Solar PV Global Capacity and Additions, Top 10 Countries, 2018

	Total End-2017	Added 2018	Total End-2018
	GW		
Top Countries by Additions			
China	131.1	45	176.1
India ¹	22.1	10.8	32.9
United States	51.8	10.6	62.4
Japan	49.5	6.5	56
Australia	7.2	3.8	11.1
Germany	42.3	3	45.3
Mexico	0.7	2.7	3.4
Republic of Korea	5.9	2	7.9
Turkey	3.4	1.6	5.1
Netherlands	2.9	1.4	4.3
Top Countries by Total Capacity			
China	131.1	45	176.1
United States	51.8	10.6	62.4
Japan	49.5	6.5	56
Germany	42.3	3	45.3
India	22.1	10.8	32.9
Italy	19.7	0.4	20.1
United Kingdom	12.7	0.3	13
Australia	7.2	3.8	11.1
France	8.1	0.9	9
Republic of Korea	5.9	2	7.9
World Total	405	100	505

Nobel 1921



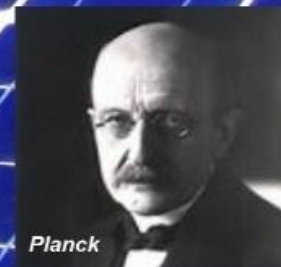
quelli del fotovoltaico



Nobel 1923

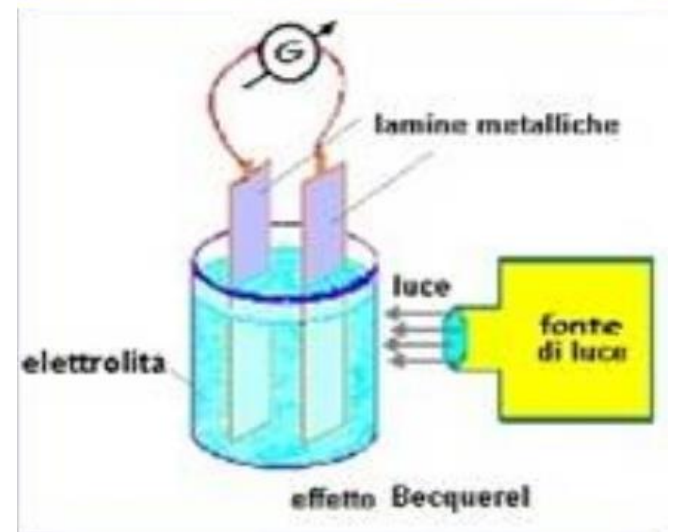
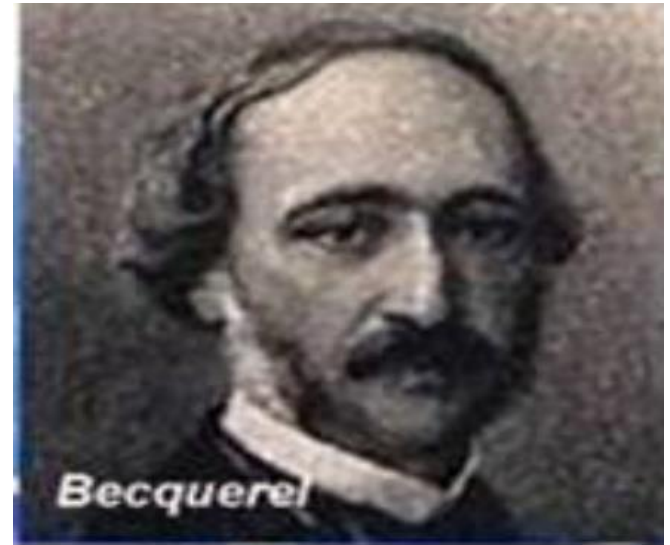


Nobel 1918



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.



1873 - Smith

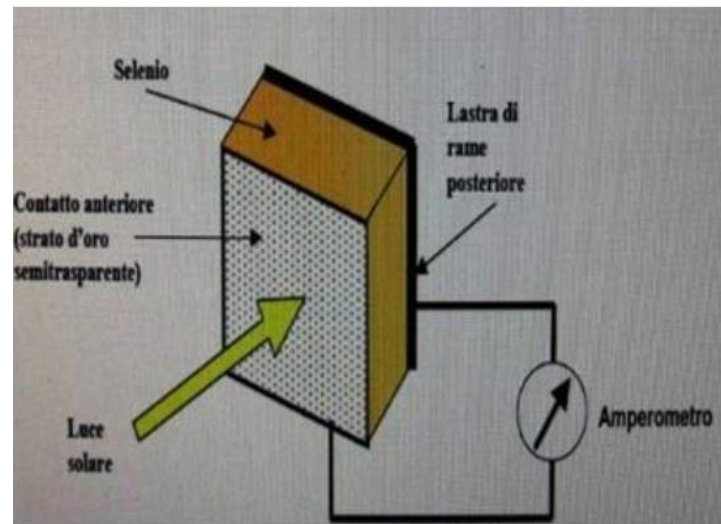
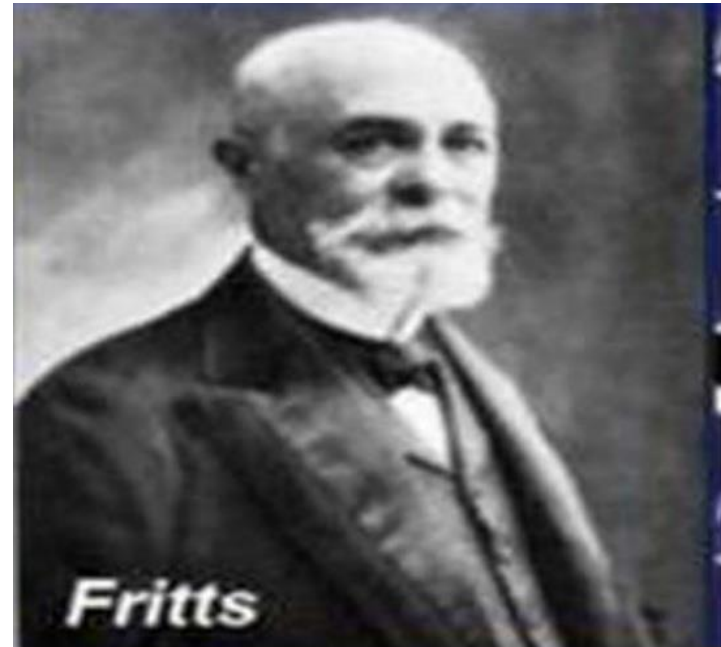
L'ingegnere inglese
Willoughby Smith scopre
che il semiconduttore
Selenio se esposto a raggi
solari , produce una
corrente elettrica
cioè **è fotoconduttivo** .



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)



Dispositivo Fotoelettrico di FRITTS

Brevettato nel 1883 a New York da Charles Fritts.

La radiazione luminosa incide su uno strato sottilissimo di Oro deposto sulla faccia anteriore di una lamina di Selenio, a sua volta deposta su una lastra di Rame.

Lo strato di Oro è semitrasparente, cosicché una parte di luce può penetrare nel Selenio.

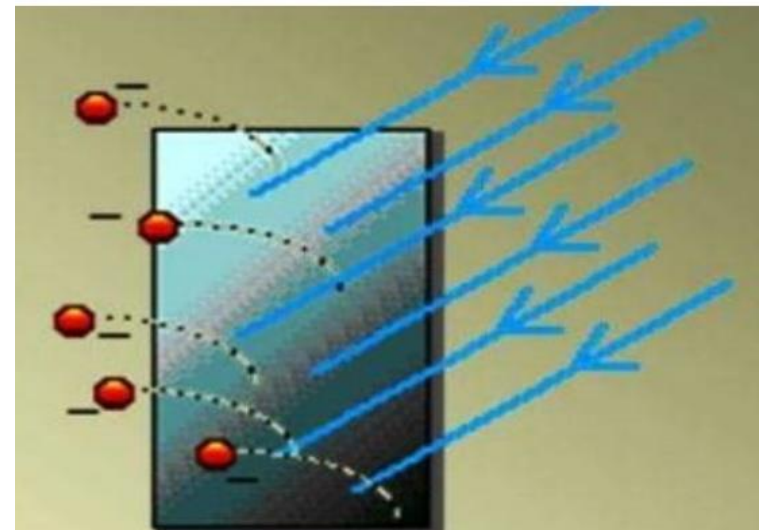
La corrente risulta , proporzionale all'intensità della luce incidente.

L'efficienza di trasformazione era però molto bassa: minore di 1%.

Perciò il tentativo di Fritts di sviluppare commercialmente l'invenzione come generatore elettrico non ebbe successo, **ma trovò applicazione in seguito come fotoesposimetro.**

1887 - Hertz

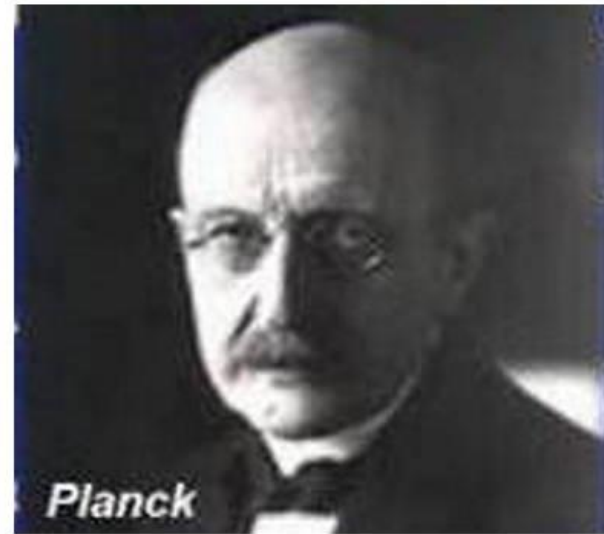
lo scienziato tedesco Heinrich
Hertz nello studio delle proprietà
ottiche delle onde elettromagnetiche
osservò che la luce ultravioletta
favoriva l'innesco delle scintille tra
due scaricatori alimentati da una
bobina ad induzione.
Scoprì così **l'effetto fotoelettrico** cioè
l'emissione di elettroni da una
superficie metallica investita da una
radiazione solare.



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:

$$E = h \nu$$

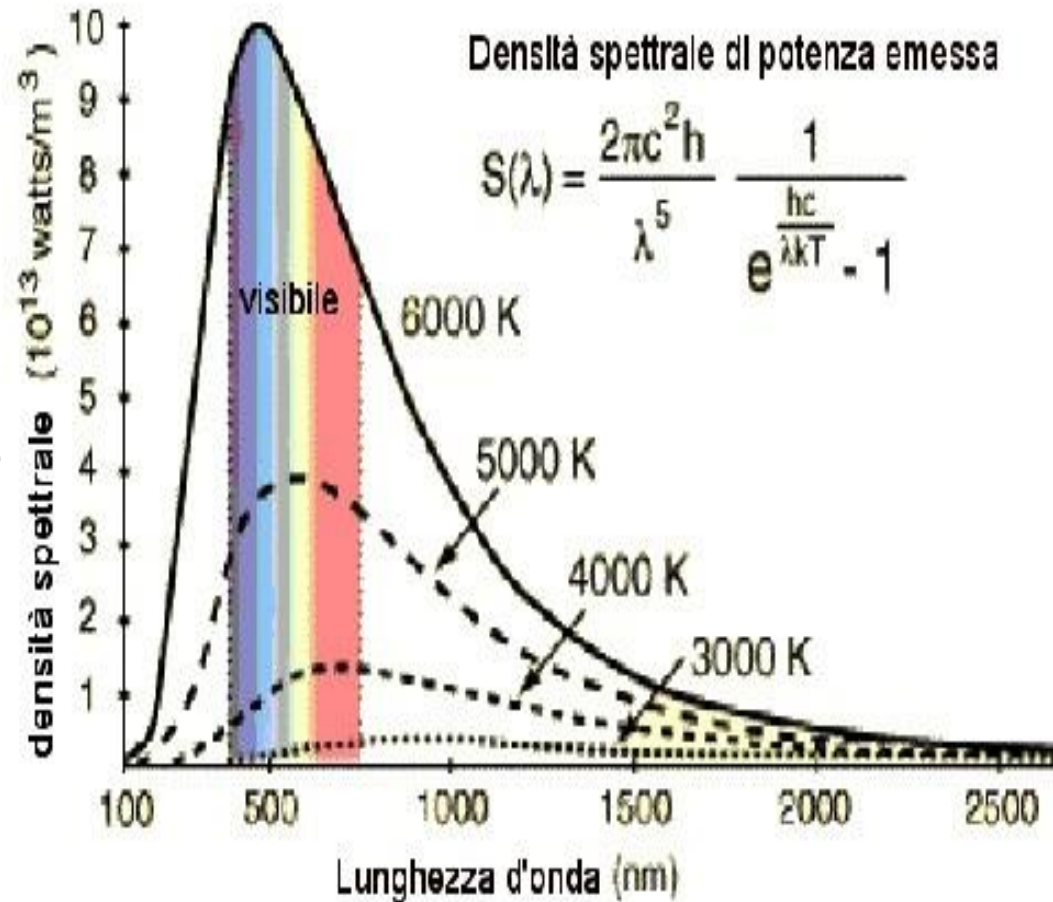
$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ (*costante di Planck*)

- 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:

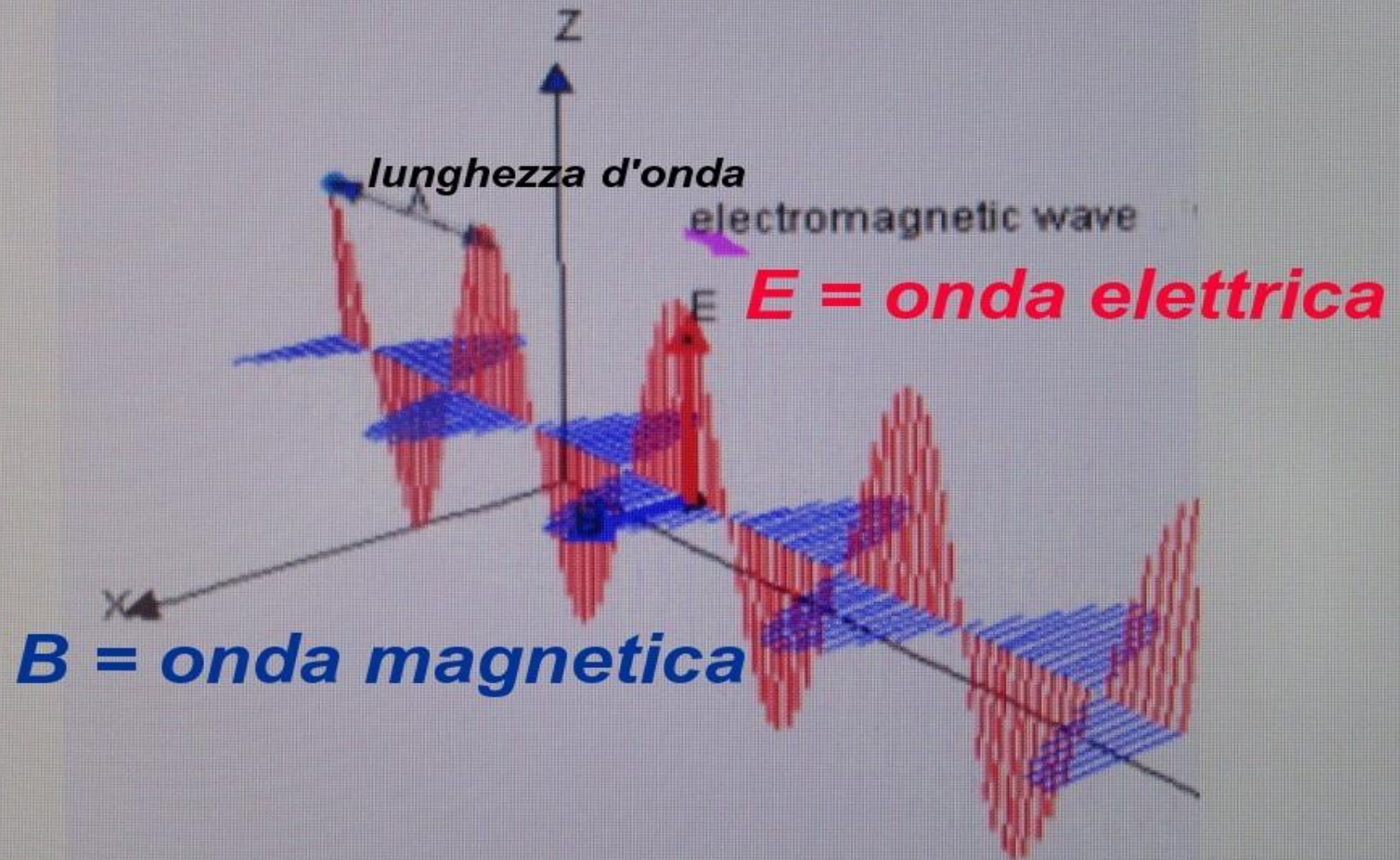
ogni fotone che incide su una superficie, penetra nello strato superficiale e va a colpire **un solo elettrone** trasmettendogli la sua energia.

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.

*Tuttavia la teoria di Einstein non fu immediatamente oggetto di ricerche sperimentali, non solo perché i possibili esperimenti erano oggettivamente difficili, ma **soprattutto** perché la gran parte dei fisici di allora trovava difficile accettare l'ipotesi che le radiazioni, e in particolare quelle luminose, avessero proprietà corpuscolari costituite da “fotoni” cioè particelle energetiche elementari di massa nulla.*

*Per beneficiare delle scoperte e delle ricerche scientifiche di questi grandi scienziati, **il mondo dovrà aspettare ancora per molto tempo, fino alla fine degli anni quaranta quando, grazie allo sviluppo delle prime tecnologie elettroniche al Silicio, ricercatori e tecnologi daranno inizio all'era del fotovoltaico.***

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.



Esperimento Millikan

Dal 1912 al 1915 Millikan si dedicò principalmente alla misura della legge dell'effetto fotoelettrico, teorizzata da Einstein.

Per effettuare le misure Millikan si servì di un apparato che consentiva di raschiare sotto vuoto le superfici di diversi metalli che venivano irradiate da fasci di luce monocromatica.

Gli elettroni emessi per effetto fotoelettrico (fotoelettroni) venivano catturati da un apposito cilindro metallico dando luogo ad una corrente elettrica tra due elettrodi e quindi misurata.

Variando poi la tensione ai capi degli elettrodi, si riusciva a studiare le caratteristiche della corrente fotoelettrica e quindi risalire alle caratteristiche degli elettroni emessi ovvero dei corrispondenti fotoni incidenti.

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.



Sviluppo delle RS Fotovoltaiche

La Ricerca e le realizzazioni tecnologiche nel Fotovoltaico risalgono a partire dagli anni “40” con i primi dispositivi elettronici basati sul Germanio e poi il Silicio.

Ma è solo ai primi degli anni “50 che nei laboratori statunitensi della Bell , parallelamente agli studi sui diodi e sui transistor, nacque l’era del FV al Silicio.

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%**.



25 APRILE 1954 : La prima cella solare al silicio

La prima cella solare al silicio fu creata nel 1954 da un team di scienziati dei laboratori Bell.

Daryl Chapin, stava sviluppando varie fonti di energia per i sistemi telefonici in luoghi umidi, dove le batterie a secco si degradavano troppo in fretta e concluse che l'energia solare era la più promettente. Provò celle solari al selenio, ma le trovò troppo inefficiente.

Calvin Fuller, un chimico, e **Gerald Pearson**, un fisico, stavano lavorando sul controllo delle proprietà dei semiconduttori introducendo impurità (ricerche → il transistor).

Fuller diede a Pearson un pezzo di silicio contenente impurità Gallio. Pearson la immerse nel litio, creando **una giunzione PN che sotto la luce solare produsse una corrente elettrica misurabile con un amperometro**. Dopo miglioramenti vari si arrivò alla prima cella solare da loro chiamata **"batteria solare"** con un'efficienza del 6%.

Bell Labs annunciò l'invenzione il 25 aprile 1954.

Il pannello solare fu utilizzato per alimentare un piccolo giocattolo e un trasmettitore radio.

Il New York Times scrisse della cella solare al silicio (aprile 1954) ...

"potrebbe segnare l'inizio di una nuova era che porta alla realizzazione di uno dei sogni più cari dell'umanità:

lo sfruttamento dell'energia illimitata del sole per gli usi della civiltà. "

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** .

IL RUOLO DEL FOTOVOLTAICO

***Potenziale diffusione
capillare sul territorio***

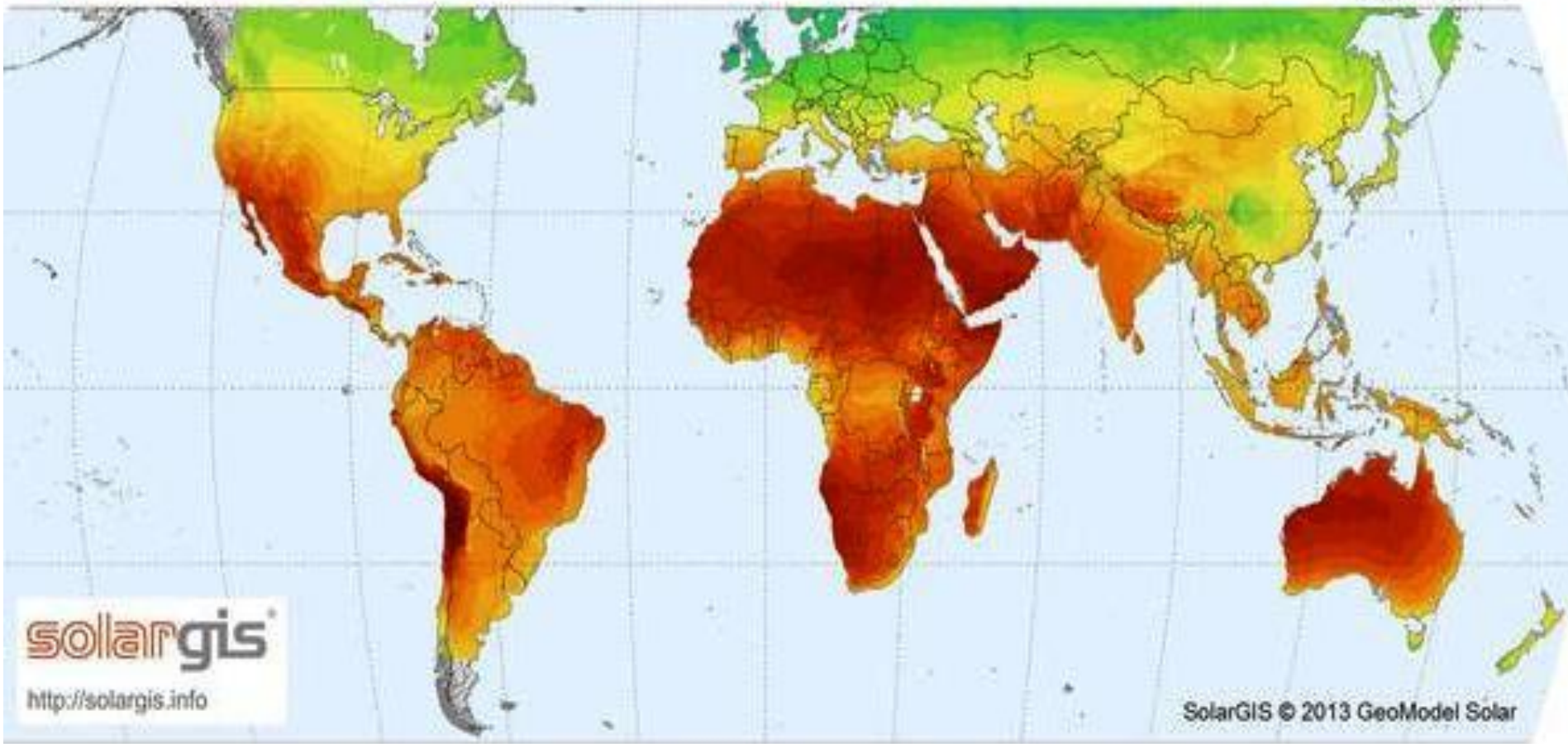
***Energia ricavabile direttamente
dalla luce del Sole
su gran parte del Pianeta***

UTE 19-20

Mappa mondiale della radiazione solare

WORLD MAP OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION

GeoModel
SOLAR



sollargis

<http://sollargis.info>

SolarGIS © 2013 GeoModel Solar

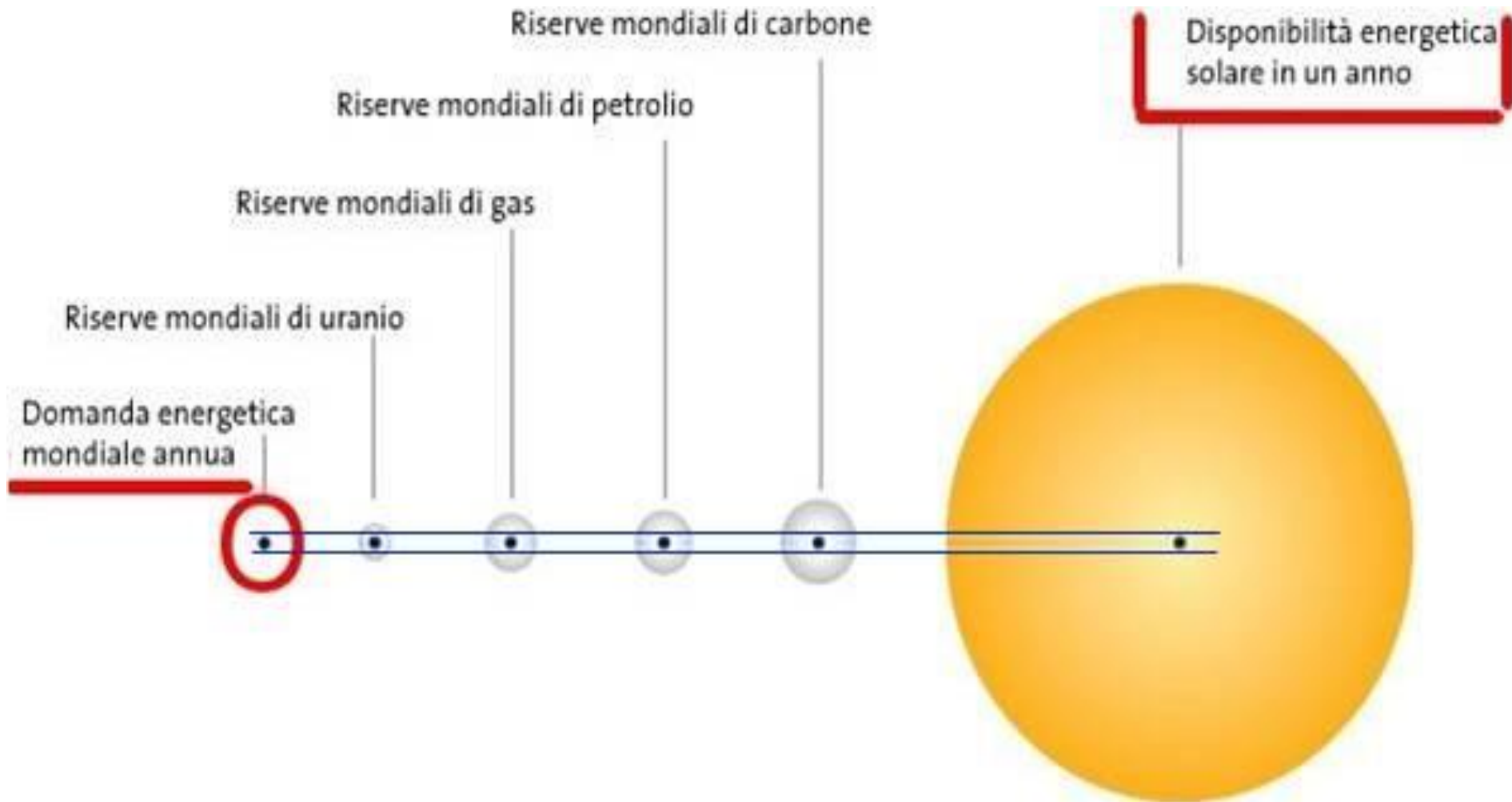
Long-term average of: Annual sum < 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 2100 2300 2500 2700 >



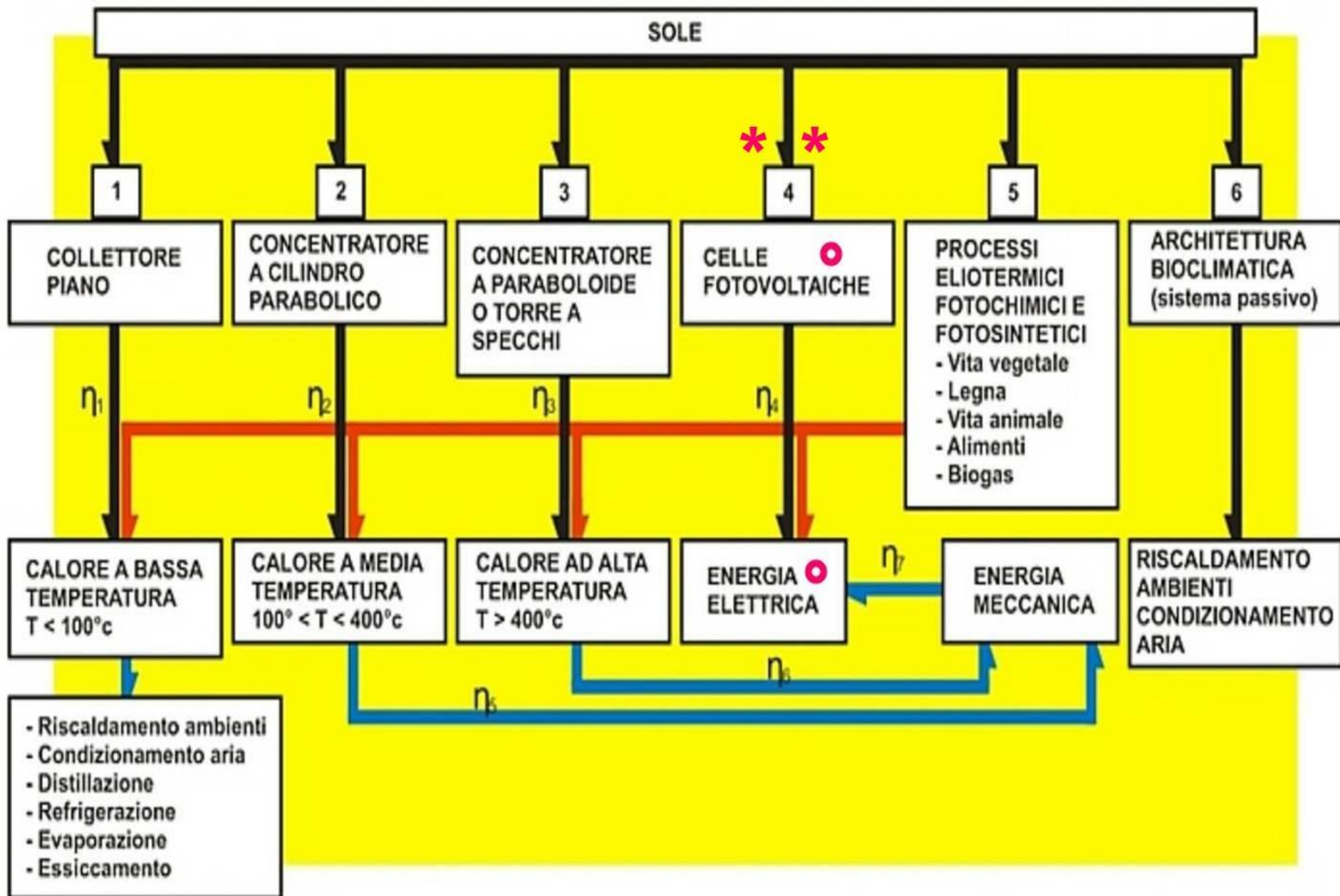
kWh/m²

Daily sum < 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 >

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



TRASFORMAZIONI DELL'ENERGIA SOLARE



IL FOTOVOLTAICO ENERGIA DEL FUTURO ?

La produzione di energia elettrica è **ancora affidata in maggior parte a fonti fossili non rinnovabili e inquinanti** → CO₂ → effetto serra → danno crescente nell'ecosistema mondiale.

Le riserve petrolifere nel mondo hanno una **durata limitata** e sono localizzate in maggior parte in aree del Pianeta instabili politicamente e socialmente.

Per queste ragioni da tempo si stanno studiando **nuove tecnologie** per utilizzare sempre di più le **fonti rinnovabili e sostenibili**.

L'Italia è , tutto sommato , ricca sia di acqua che di Sole e anche di vento in certe zone ed è certo che **le spese in questo settore energetico non vanno considerate solo dei “costi” ma ottimi “investimenti”** sia dal punto imprenditoriale che dal punto di vista **“salvaguardia dell'ambiente”**

Tra tutte le fonti energetiche rinnovabili , la più interessante e in continuo sviluppo è **l'energia solare fotovoltaica** usata ormai su vasta scala per produrre energia elettrica dal residenziale ai grandi impianti.

Campi di utilizzo del Fotovoltaico

Nata alla fine degli anni ‘40, la tecnologia FV trova sempre più vaste applicazioni

- **ricerca e applicazioni spaziali e militari**
 - **alimentazione strumenti**
 - **unità energetiche autonome**
 - **applicazioni civili a partire dal 1963**
 - **impianti energia e parchi solari sempre più potenti**
 - **media e piccola azienda → serre agricole**
 - **edilizia residenziale → IFV con accumulo → domotica**
 - **applicazioni in vari campi grazie anche allo sviluppo delle nuove tecnologie**
- produzione di energia per e-mobility prima e idrogeno poi**

Negli ultimi anni si stanno sviluppando applicazioni del Fotovoltaico

(**paste fotovoltaiche**) nel settore delle tecnologie “**printed electronics**”.

Queste nuove tecnologie utilizzano paste e inchiostri fotosensibili nelle macchine di stampa a ciclo continuo (→ nastri flessibili, ecc....).

Tra i moltissimi settori applicativi vanno qui ricordane alcuni tra i più interessanti :

- **pannelli FV flessibili in continuo e a nastri**
- **pensiline, tegole, tende FV**
- **applicazioni al Tessile**
- **applicazioni a pannelli pubblicitari**
- **vetri solari nell'edilizia**

e in un futuro non lontano ...la centrale fotovoltaica spaziale ?

SPS (Solar Power System)

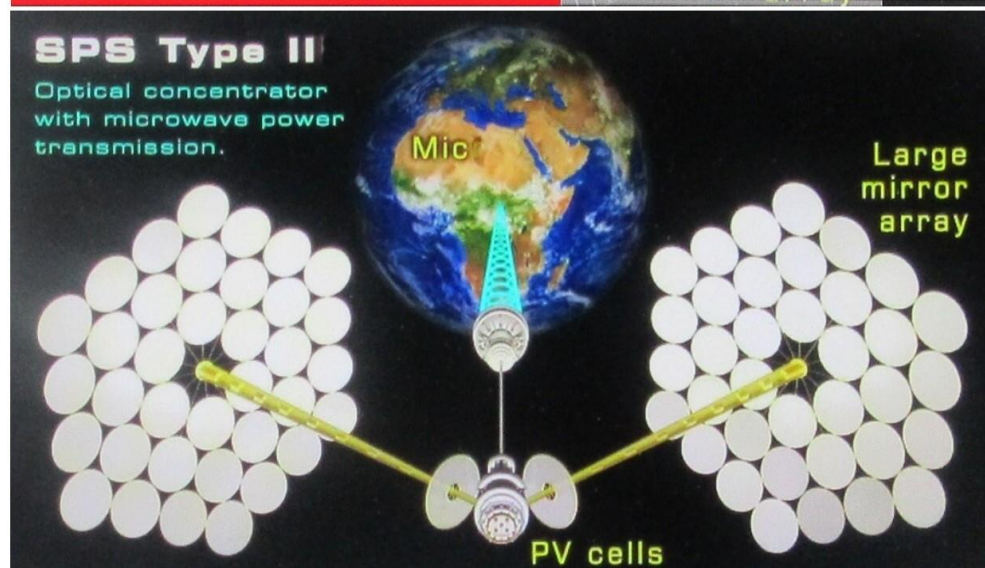
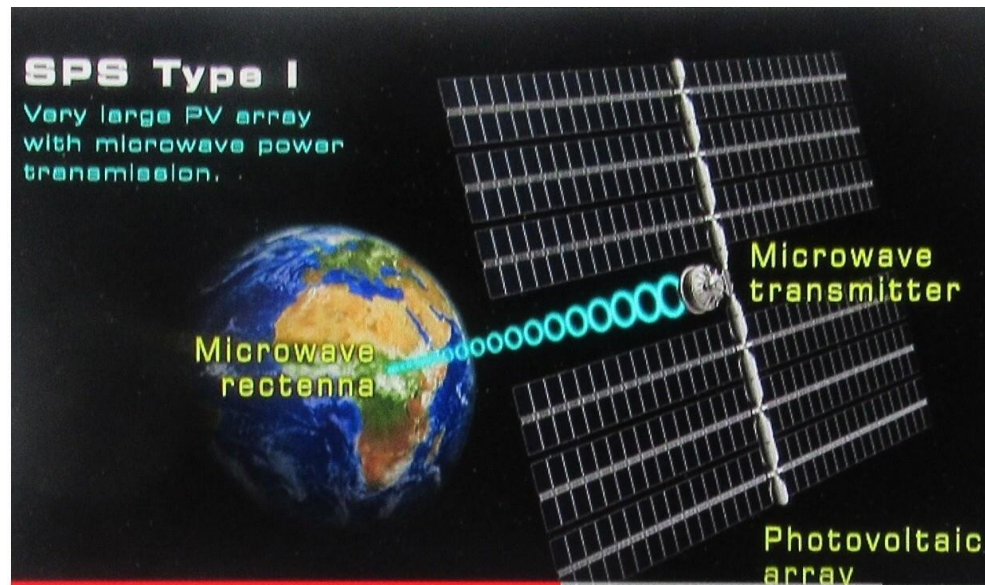
Da anni si sta studiando la fattibilità di progetti per utilizzare in orbita un IFV per produrre energia elettrica da trasmettere sulla Terra attraverso sistemi di trasmissione

a **microonde** (o laser) .

Le microonde vengono inviate da una sistema di antenne emettitrici di fasci di microonde che opportunamente guidate da segnali pilota possono raggiungere la superficie terrestre dove vengono convertite in energia elettrica convenzionale.

Info da

- [www . Focus . It](http://www.Focus.It) (progetto Jaxa)
- Wikidedia



In conclusione il fotovoltaico conviene?

Un investimento è garanzia di ottenere nel tempo più benefici di quelli ottenibili senza investire.

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

A suo tempo faremo una completa Value Analysis dell'intera filiera di un impianto FV.

Ma già ora possiamo dire che , ai costi e incentivi attuali , i rientri dell'investimento per un **IFV di circa 3 kW** (tipico per la 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 + 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.

E IL NUCLEARE ?

L'energia nucleare , anch'essa **tecnicamente pulita salvo i pericoli di sicurezza e delle scorie**, ha tuttora un peso importante nel Mondo e in Europa.

Ma da più parti si pone l'accento sui **problemi della sicurezza, sia a breve che a lungo termine**, che eventuali disfunzioni o guasti nelle centrali nucleari possono provocare, come i recenti disastri giapponesi hanno evidenziato.

Il pericolo potenziale delle centrali nucleari è avvertito da tutte le nazioni europee anche se i numeri e le necessità energetiche farebbero nascere ancora dei dubbi e ripensamenti sulle politiche per il nucleare.

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.).

REATTORI NUCLEARI FISSI NEL MONDO 31-12-2018

TABLE 1 OVERVIEW OF POWER REACTORS AND NUCLEAR SHARE, 31 DEC. 2018

Country	Operational reactors		Reactors in long term shutdown		Reactors under construction		Nuclear electricity supplied in 2018	
	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	TW(e)-h	% of total
ARGENTINA	3	1633			1	25	6.5	4.7
ARMENIA	1	375					1.9	25.6
BANGLADESH					2	2160	NA	NA
BELARUS					2	2220	NA	NA
BELGIUM	7	5918					27.3	39.0
BRAZIL	2	1884			1	1340	14.8	2.7
BULGARIA	2	1966					15.4	34.7
CANADA	19	13554					94.4	14.9
CHINA	46	42858			11	10982	277.1	4.2
CZECH REP.	6	3932					28.3	34.5
FINLAND	4	2784			1	1600	21.9	32.4
FRANCE	58	63130			1	1630	395.9	71.7
GERMANY	7	9515					71.9	11.7
HUNGARY	4	1902					14.9	50.6
INDIA	22	6255			7	4824	35.4	3.1
IRAN, ISL. REP.	1	915					6.3	2.1
JAPAN	39	36974			2	2653	49.3	6.2
KOREA, REP. OF	24	22444			5	6700	127.1	23.7
MEXICO	2	1552					13.2	5.3
NETHERLANDS	1	482					3.3	3.1
PAKISTAN	5	1318			2	2028	9.3	6.8
ROMANIA	2	1300					10.5	17.2
RUSSIA	36	27252			6	4573	191.3	17.9
SLOVAKIA	4	1814			2	880	13.8	55.0
SLOVENIA	1	688					5.5	35.9
SOUTH AFRICA	2	1860					10.6	4.7
SPAIN	7	7121					53.4	20.4
SWEDEN	8	8613					65.9	40.3
SWITZERLAND	5	3333					24.5	37.7
TURKEY					1	1114	NA	NA
UAE					4	5380	NA	NA
UK	15	8923			1	1630	59.1	17.7
UKRAINE	15	13107			2	2070	79.5	53.0
USA	98	99061			2	2234	808.0	19.3
Total	451	396911			55	56643	2562.8	NA

Note:

The total includes the following data from Taiwan, China:

— 5 units, 4448 MW in operation; 2 units, 2600 MW under construction;

— 26.7 TW(e)-h of nuclear electricity generation, representing 11.4% of the total electricity generated there.

FONTE IAEA 2019

Reattori nucleari fissi in Europa al 31-12-2018

NAZIONE	In funzione 31-12-18	Capacità in MW
FRANCIA	58	63.130
RUSSIA	36	27.252
UCRAINA	15	13.107
G.BRETAGNA	15	8.923
GERMANIA	8	9.515
SVEZIA	8	8.613
SPAGNA	7	7.918
BELGIO	7	5.918
REP. CECA	6	3.932
SVIZZERA	5	3.333
FINLANDIA	4	2.764
SLOVACCHIA	4	1.814
UNGHERIA	4	1.902
BULGARIA	2	1.966
ROMANIA	2	1.300
SLOVENIA	1	688
OLANDA	1	482
T O T A L E	183	161.455

La sicurezza delle fonti energetiche



PERICOLO DI RADIAZIONI IN CASO GUASTI

**Tasso di mortalità (vittime per miliardo di kWh)
incluse Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima**

Carbone – media globale	100,000
Carbone - Cina	170,000
Carbone - USA	10,000
Petrolio	36,000
Biocarburanti/Biomasse	24,000
Gas naturale	4,000
Idroelettrico	1,400
Solare	440
Eolico	150
Nucleare *	90

LE CENTRALI NUCLEARI OLTRALPINE



IL TORIO positiva alternativa all' Uranio ?

La tecnologia nucleare col Torio è nata nella seconda metà degli anni '60 (Oak Ridge national Laboratory) Tennessee USA ma è rimasta a livello laboratorio per decenni. E' solo a partire dal 2011 che a livello internazionale è considerata valida e fattibile alternativa alla tecnologia all'Uranio

Vantaggi potenziali principali :

1 – Un moderno reattore al Torio a Sali fusi Molten Salt Reactor (MSR), lavora **solo se bombardato** da un flusso continuo di neutroni costante e quindi **può essere acceso o spento in tempi molto brevi** → **impossibilità di esplosioni radioattive** → **maggior sicurezza rispetto all'Uranio**

2- **la radioattività delle scorie di torio hanno una durata nel tempo di gran lunga minore rispetto all'Uranio (poche centinaia di anni contro le migliaia di anni)**

3 – Maggior disponibilità in natura del Torio (terre rare) in un maggior numero di paesi (Italia compresa) .

Si stima che se fosse utilizzato come unica fonte per la produzione energetica mondiale, il Torio sarebbe sufficiente a soddisfare il fabbisogno energetico mondiale **per oltre mille anni**, un tempo sicuramente più che sufficiente per ricercare e sviluppare energie ancora più efficienti e pulite, come il **nucleare a fusione** .

4 - Maggior efficienza totale → minori costi di gestione.

N.B. *Per alcuni anni il Nobel per la Fisica Carlo Rubbia ha sostenuto la fattibilità di una centrale nucleare basata sulla fissione del Torio, elemento molto più diffuso dell'Uranio, ma meno radioattivo, le cui scorie sarebbero meno pericolose (primo esperimento TARC nel 1996 presso il CERN).*

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**

E che fare delle scorie radioattive (presenti anche in Italia) ?

In alcuni laboratori di RS si stanno studiando tecnologie che consentono di utilizzare

le radiazioni delle scorie radioattive per immagazzinare e quindi produrre elettricità.

I risultati finora ottenuti (ad esempio in Inghilterra) hanno dimostrato la possibilità di

produrre dal **C-14 delle barre di grafite irradiate**, speciali “ **batterie di diamante**”

utilizzabili per alimentare carichi elettrici a bassa potenza (esempio strumenti elettrici di precisione, apparati anche di consumo).

Si avrebbero così minibatterie di durata enorme, basti pensare che le radiazioni dal C-14 hanno tempi di emivita dell'ordine di qualche migliaio di anni !!!

In tal senso si parla di “ Nuclear waste energy “

Dal Sole

alla Terra



***Energia
elettromagnetica***

(Fotonî + Neutrini)

UTE 19 - 20

DAL SOLE ALLA TERRA

- *come e dove si origina l'energia solare*
- *come si propaga sotto forma di energia elettromagnetica (fotoni)*
- *come raggiunge la superficie terrestre*

Il Sole: caratteristiche generali

Diametro	1.392.000 km	Circa 100 volte la Terra
Volume	$1,412 \times 10^{27} \text{ m}^3$	Circa 1.300.000 volte la Terra
Massa	$1,98 \times 10^{30} \text{ kg}$	Circa 330.000 volte la Terra
Accelerazione di gravità	274 m/s^2	Circa 30 volte la Terra
Densità media	$1,41 \text{ kg/dm}^3$	Circa $\frac{1}{4}$ la Terra
Composizione	93% H, 7% He, tracce di tutti gli altri elementi	
Classe spettrale	G2	
Periodo di rotazione	da 25 giorni all'equatore a 34 giorni ai poli	

						
Classe spettrale	O-B	A	F	G	K	M
Colorazione	Bianco azzurra	Bianco	Bianco	Giallo	Arancio	Rosso
				<i>Sole</i>		
Temperatura stimata Kelvin	10.000 60.000	7.500 10.000	6.000 7.500	5.000 6.000	3.000 5.000	Meno di 3.000

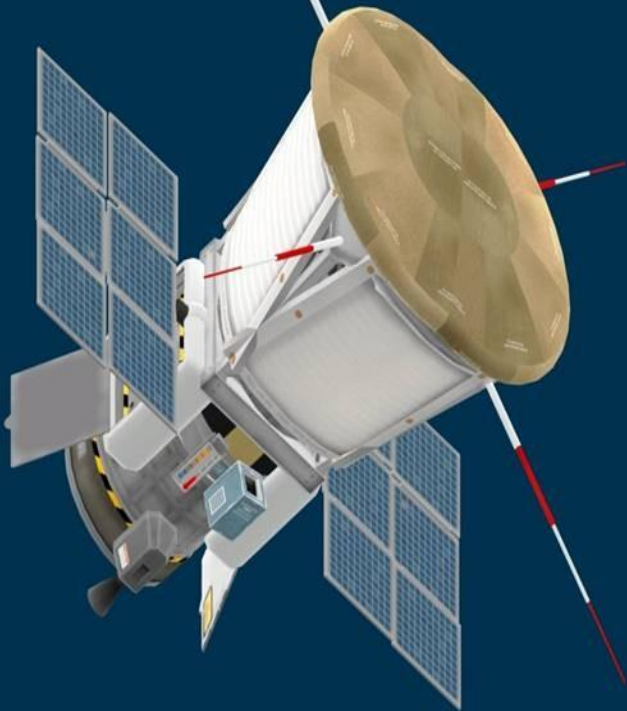
LA PRIMA MISSIONE ESPLORATIVA VERSO IL SOLE

La NASA ha lanciato il 12 agosto 2018 la Parker Solar Probe.

La missione durerà 7 anni e la sonda percorrerà una serie di 24 orbite ellittiche (perieli).

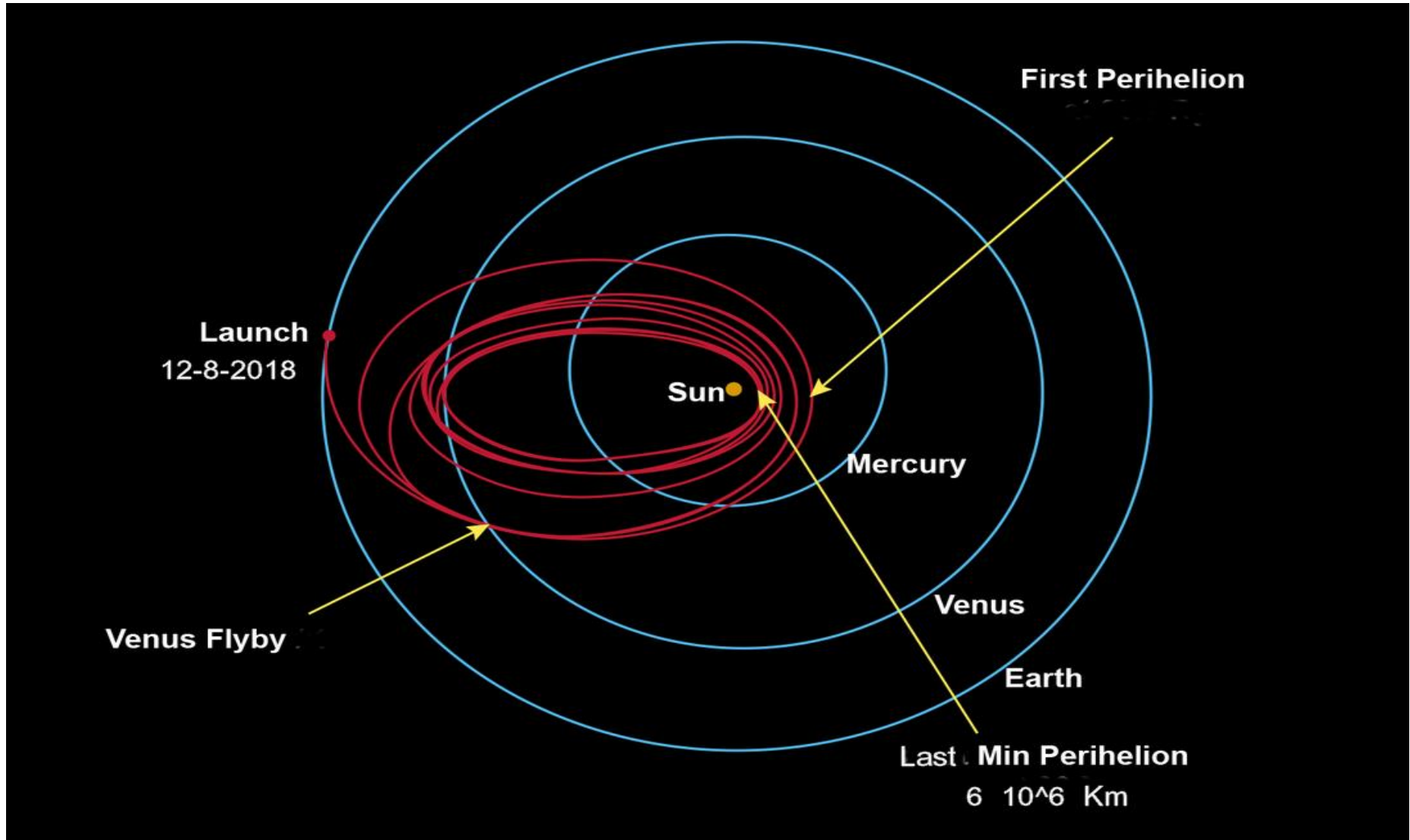
Le ultime tre la porteranno a circa 6 milioni di Km dalla superficie solare.

Peso al decollo 685 Kg

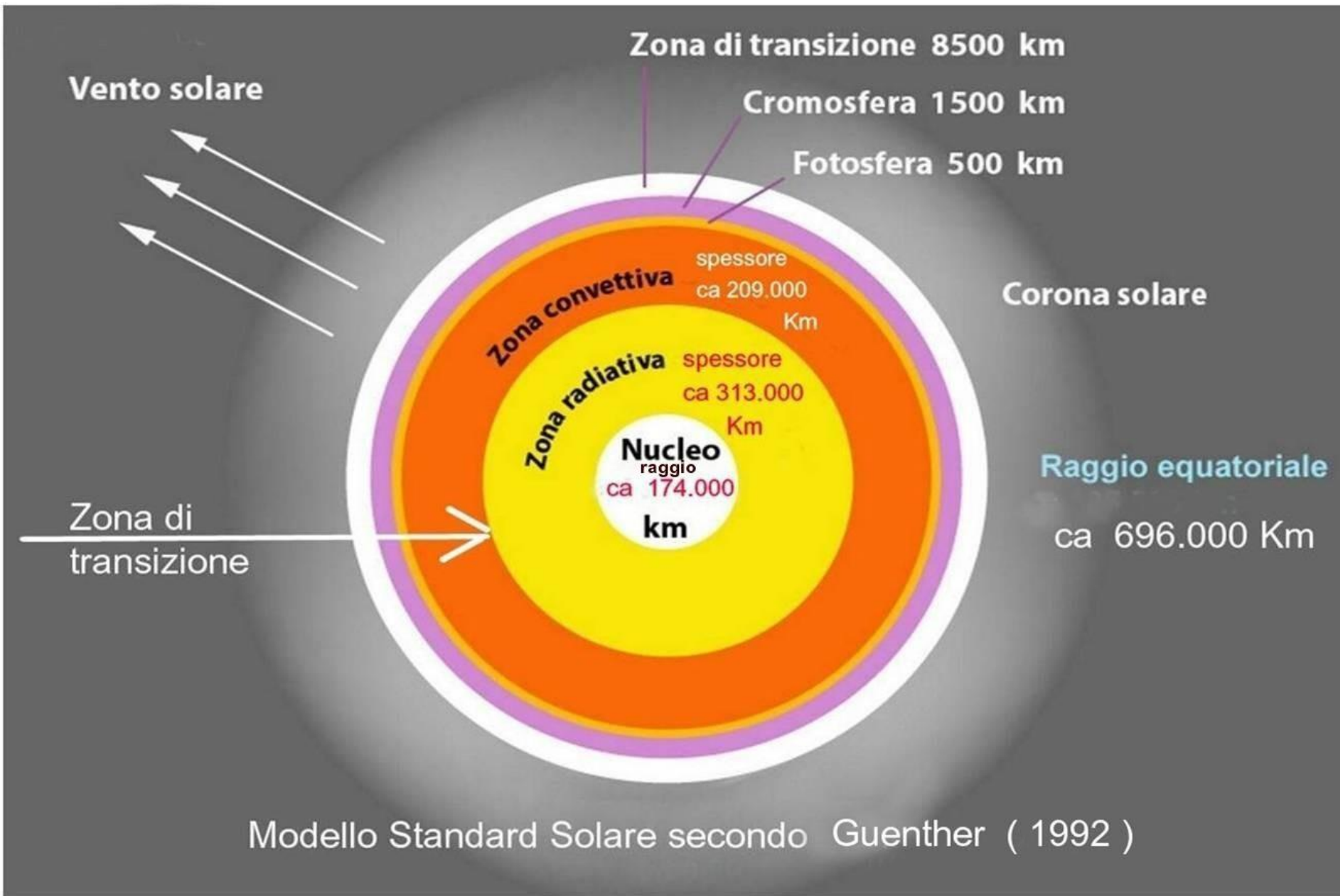


Velocità max 692.000 Km/h

Programmazione orbitale del viaggio della sonda verso il Sole



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



Il Nucleo del Sole → la culla dei Fotoni

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

Senza entrare nella descrizione scientifica della della fusione, tra l'altro reperibile dalla letteratura scientifica disponibile in RETE , è qui interessante riassumerne le proprietà e le fasi fondamentali.

Condizioni fisiche nel nucleo del Sole (secondo il MSS di Guenther 1992) :

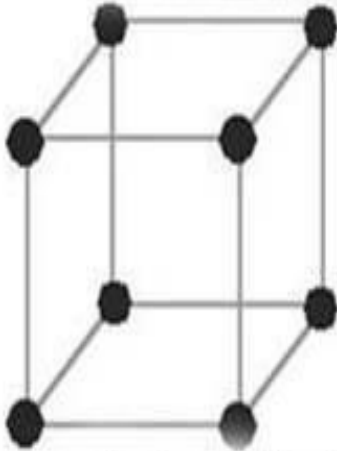
- **Temperatura :** ca 15,6 milioni di gradi Kelvin
- **Pressione :** ca 235 miliardi di atmosfere
- **Densità :** ca 156 gr/cmc

In queste condizioni la materia è allo stato di PLASMA
1 atomo idrogeno si scompone in 1 protone e 1 elettrone.



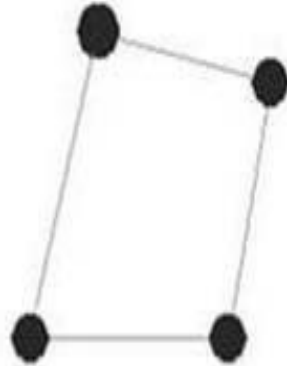
Che cos'è il plasma?

Solido



Legami atomici forti

Liquido



Legami atomici deboli

Gas



Nessun legame



Lo stato di aggregazione della materia varia al crescere della temperatura.

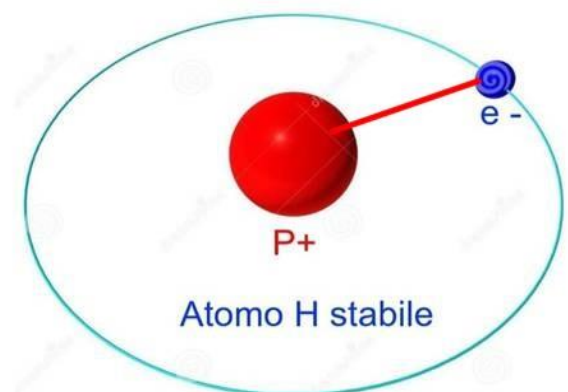
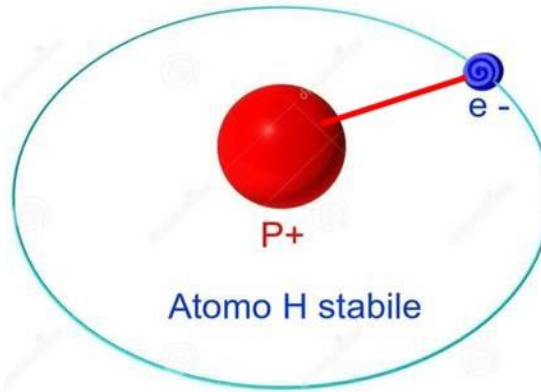
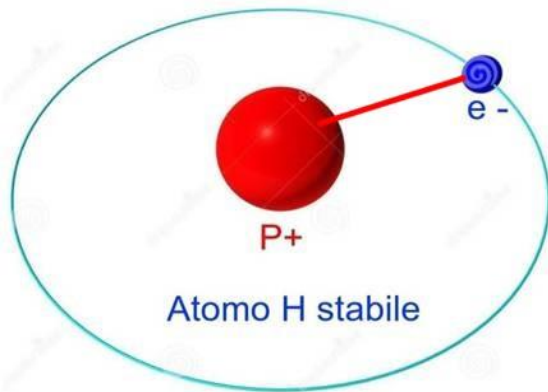
Solido → Liquido → Gas → Plasma

Nel plasma le molecole sono dissociate in atomi e questi sono in massima parte ionizzati, ovvero i nuclei sono separati dagli elettroni.

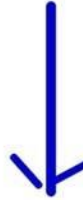
Plasma → miscela di ioni e elettroni liberi, elettricamente neutra.

Contrariamente ai gas, il plasma è sensibile all'applicazione di campi elettromagnetici.

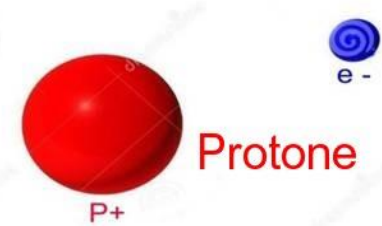
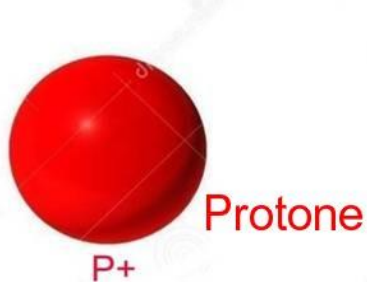
Passaggio Idrogeno al livello plasma



strutture stabili



plasma



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) →



Energia rilasciata in un ciclo p-p → 26,7 milioni di eV

→ 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.

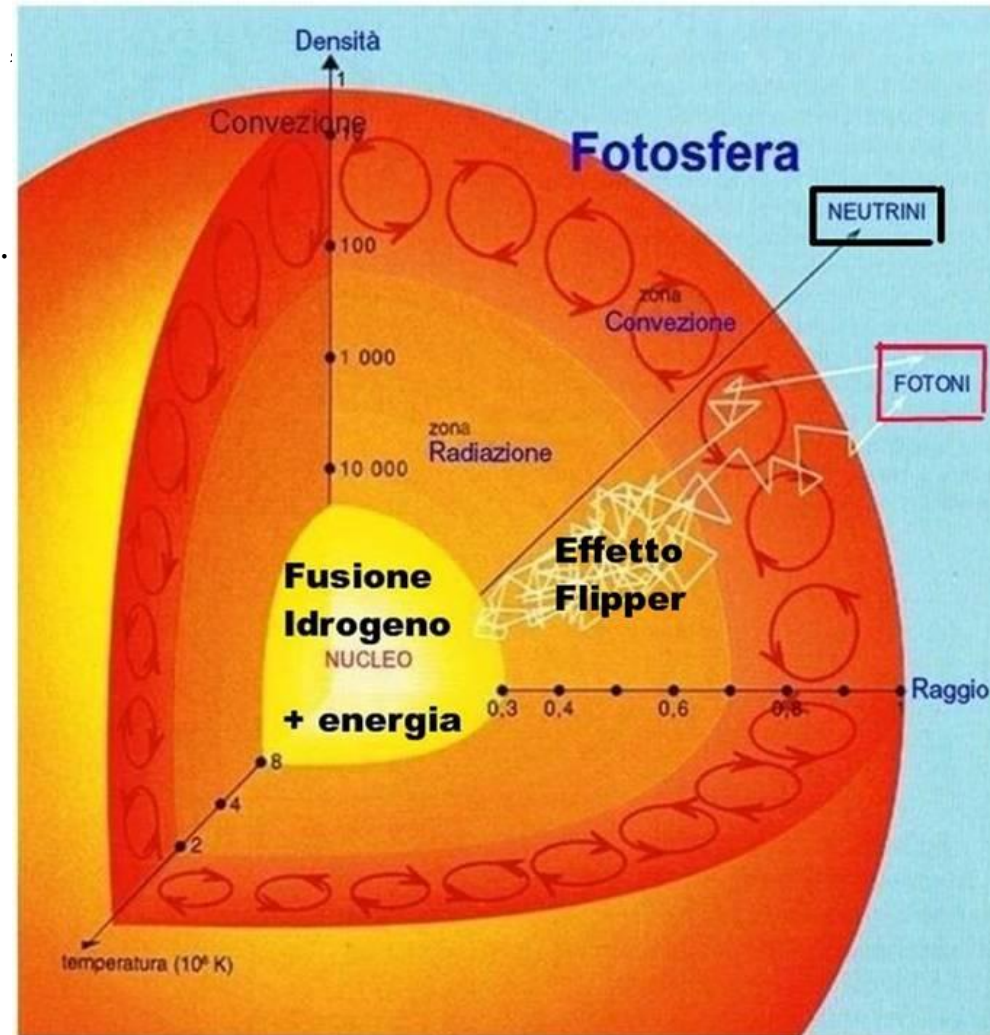
La massa del Sole è costituita per circa il 74% da Idrogeno e il 24% da Elio.

LA LUNGA STRADA DEI FOTONI VERSO LA FOTOSFERA

I **fotoni gamma** generati dalla fusione nel nucleo interagiscono (urtano) contro le particelle circostanti (protoni ed elettroni), che a loro volta riemettono nuovi fotoni con diverse direzioni, energie e frequenze. Si ha così 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.

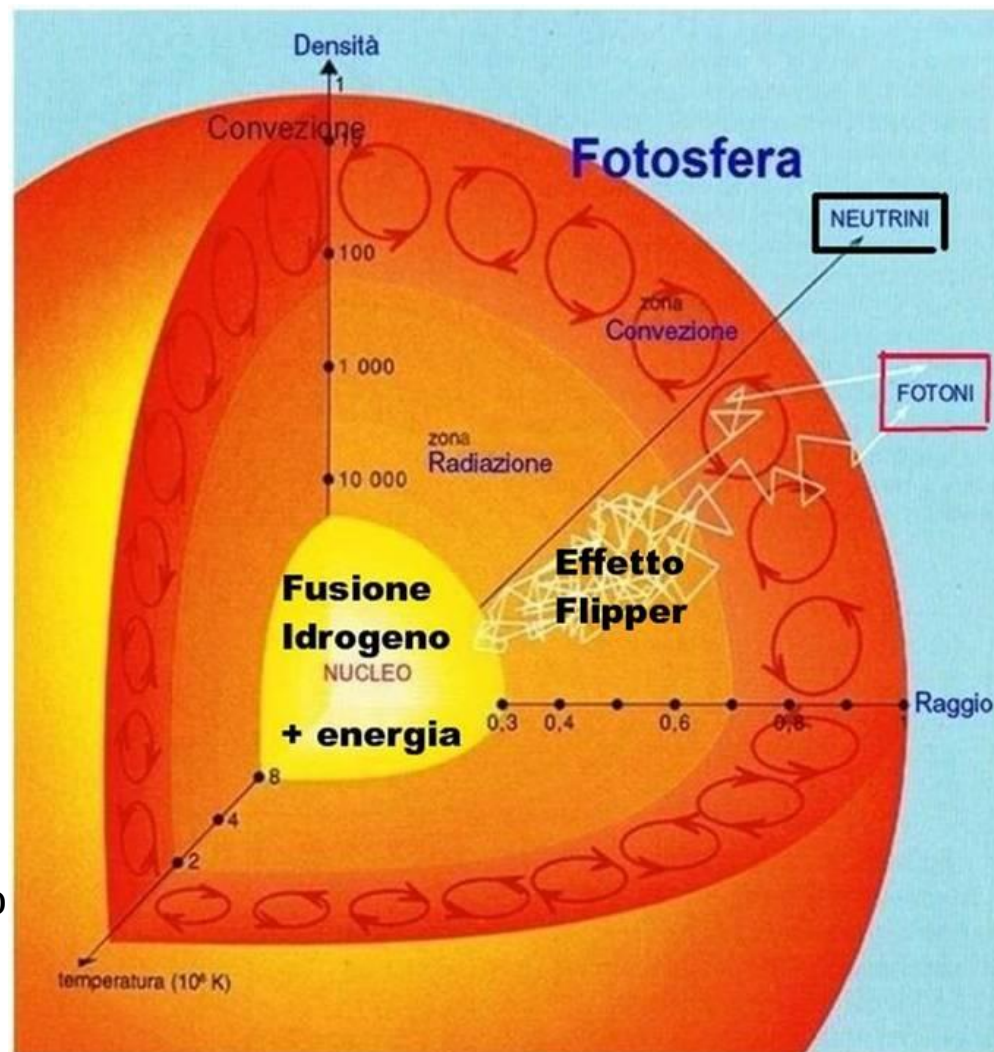
Questa catena di scambi fotonici, assimilabile ad una sorta di **staffetta energetica**, è in stato di equilibrio cioè per ogni fotone assorbito ne viene emesso uno nuovo.



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 :

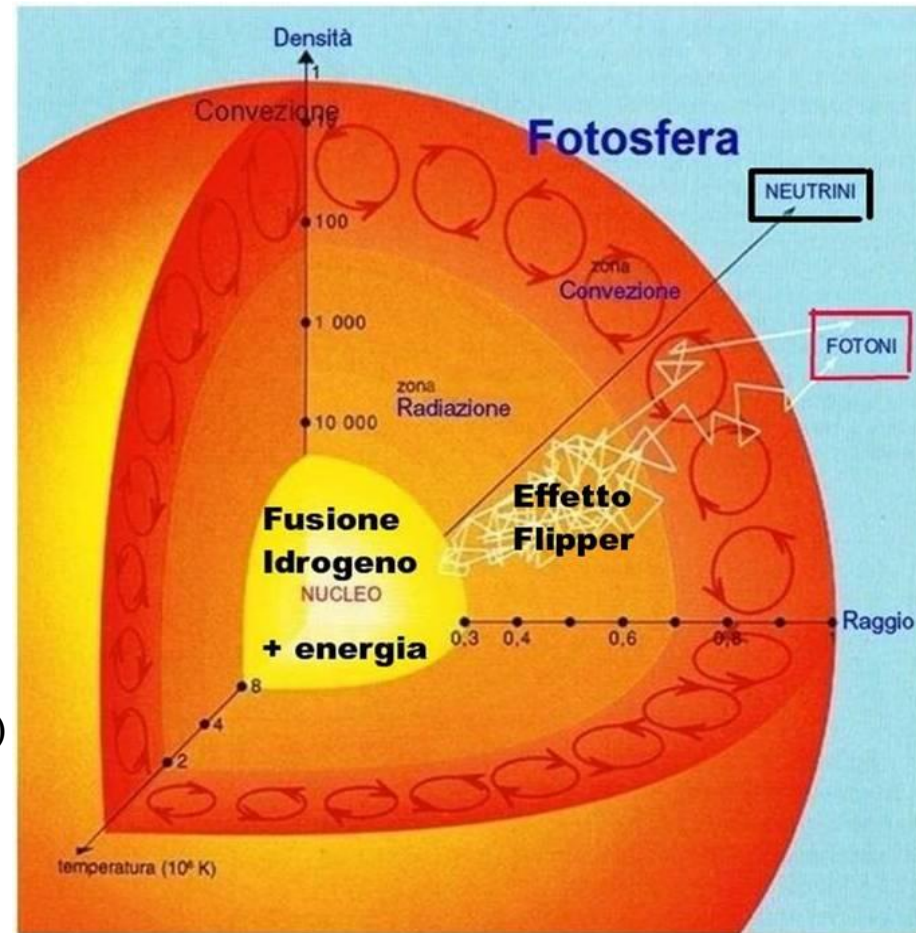
- 1- prima per “**radiazione**” fino a circa 209.000 Km sotto la fotosfera ,
- 2- poi per “**convezione**” negli strati meno densi sino alla fotosfera esterna.



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) (**effetto Compton**) 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

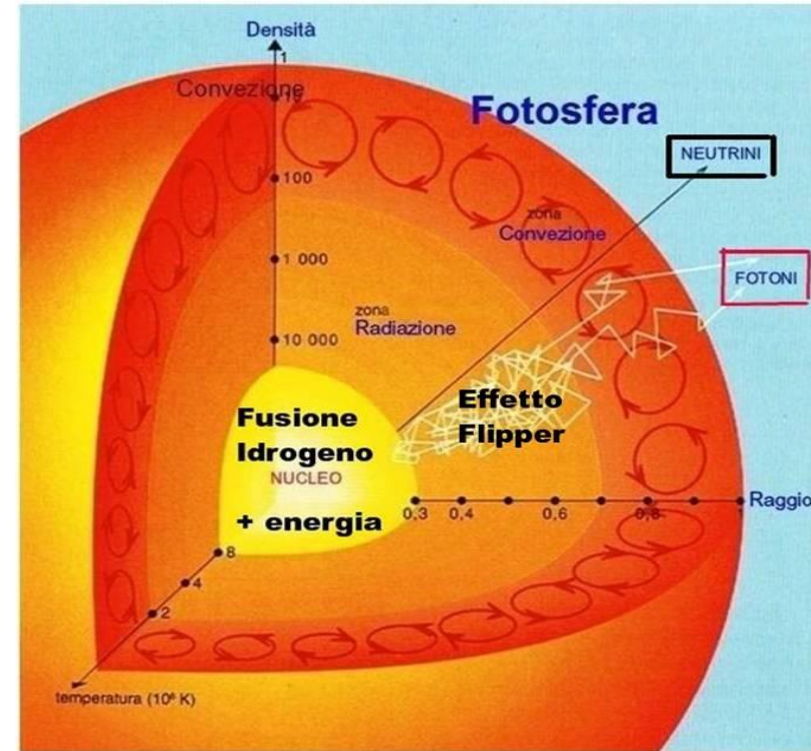
Il **tempo di attraversamento** dei fotoni nel Sole è oggetto di studi teorico-sperimentali sulla base del modello di Gunther:

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

Ma secondo gli studi più accurati pubblicati nel 1992 da “The Astrophysical Journal” il tempo medio di attraversamento è di 170.000 anni

(valore sostanzialmente confermato dallo esperimento Borexino 2014 del Gran Sasso (> 100.000 anni)).

2-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.

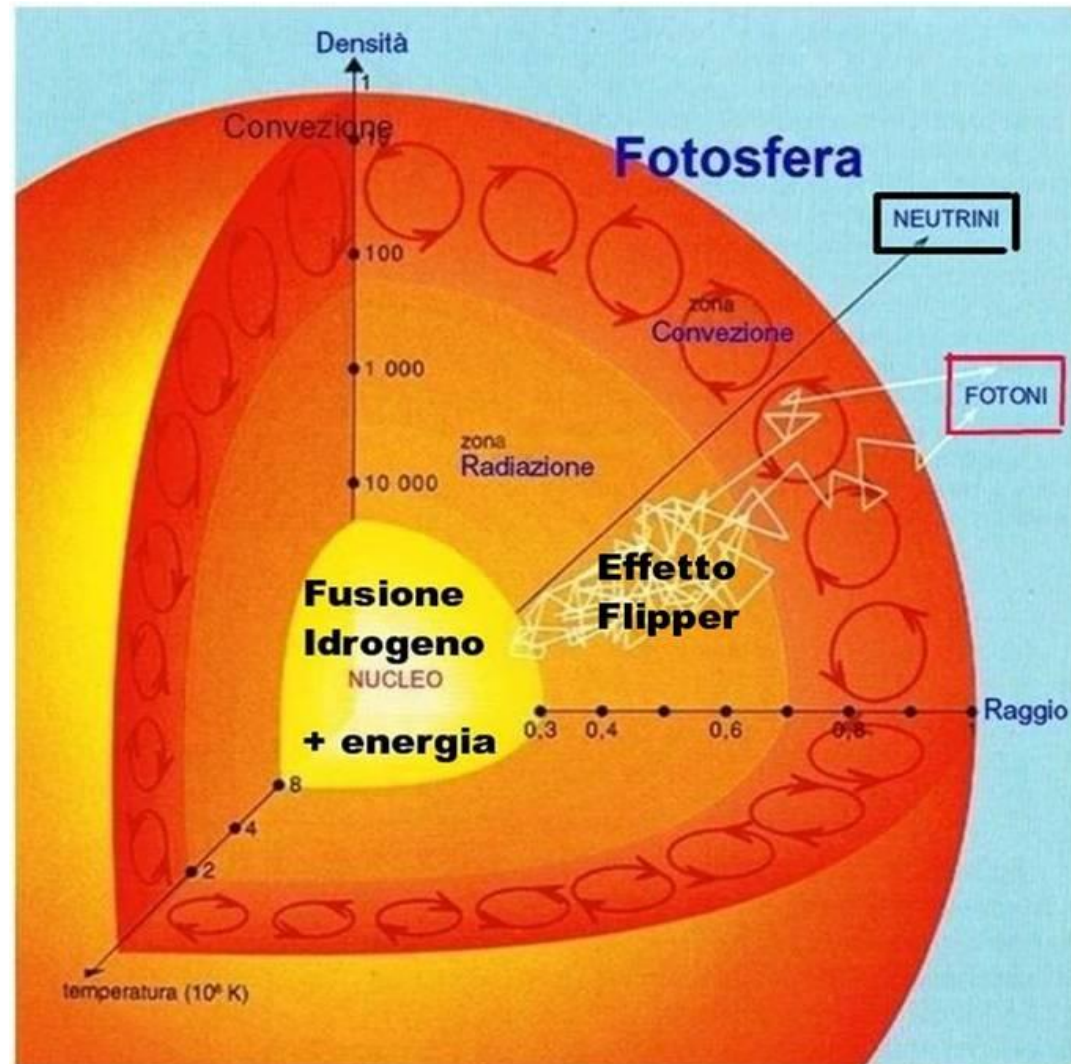


TEMPI DI DIFFUSIONE DEI NEUTRINI

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*).

Ogni secondo nel nucleo del Sole:

- 1- circa 600.000.000 di tonnellate di Idrogeno H vengono convertite in 595.740.000 tonnellate di Elio He
- 2- Il difetto di massa (4.260.000 tonnellate) , in base alla legge di Einstein, si trasforma in energia ($E = m \cdot c^2$) .
- 3- il ciclo di fusione P-P genera quindi una energia radiante

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

pari ad una **potenza radiante (irradiazione)** di $3,83 \cdot 10^{26}$ Watt

che , grazie al sostanziale bilancio energetico del Sole, corrisponde anche **alla potenza radiante superficiale emessa dalla fotosfera solare** pari a circa :

$$PR = 63.000 \text{ kW/mq}$$

(valore che si ottiene dividendo la potenza radiante per la superficie sferica media della fotosfera).

Riassumendo

Il Sole è un **reattore a fusione nucleare naturale**, che brucia Idrogeno producendo Elio ed energia secondo la catena P-P. Abbiamo poi visto che dalla fusione nucleare, si originano neutrini e fotoni energetici e che questi fuoriescono dalla superficie solare con meccanismi e cammini nettamente diversi.

Ma quali sono i tempi di questi cammini ?

I neutrini prodotti nel nucleo praticamente non interagiscono con le particelle circostanti e quindi attraversano il sole in circa **2 secondi alla velocità della luce** con traiettorie radiali rettilinee e dopo poco più di **8 minuti** sono sulla Terra.

I fotoni originati nel nucleo del Sole , annichilendosi e rinnovandosi ad ogni interazione, impiegano invece circa **170.000 anni** per percorrere i circa 690.000 Kilometri dal centro del Sole fino alla fotosfera, quindi coprono i rimanenti 150 milioni di chilometri fino alla Terra con la normale velocità della luce, arrivando sulla nostra superficie dopo poco più di **otto minuti** (valore standard 8,34 min).

Il processo di fusione nel nucleo del Sole è analogo a quello che avviene nelle altre stelle dell'Universo, per quanto oggi la nostra scienza conosce.

Questa fondamentale conoscenza scientifica, fece dire a **Margherita Hack** , una delle nostre più eminenti astrofisiche scomparsa nel 2013, in una sua famosa intervista, che in fondo a ben guardare le stelle non sono altro che ... **enormi palloni di gas** .

CONCLUSIONE

Lo studio di quanto avviene nel nostro Sole ci porta a concludere che :

**UTILIZZARE LA LUCE DEL SOLE
PER GENERARE ENERGIA VUOL DIRE
SFRUTTARE QUELLO CHE LA NATURA DA SEMPRE
CI HA MESSO A DISPOSIZIONE**

RADIAZIONE SOLARE SULLA TERRA

La radiazione solare emessa dalla fotosfera decresce via via che aumenta la distanza dal Sole, poiché aumenta via via la superficie sferica di attraversamento → dopo 150.000.000 Km raggiunge la nostra atmosfera ma il suo valore è notevolmente diminuito. Di quanto?

Per valutarlo consideriamo che **la Terra intercetta una piccolissima frazione della potenza irradiata dal Sole (circa mezzo miliardesimo di quella emessa dal Sole)**, 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 intercettata dalla radiazione solare equivale circa ad un cerchio di raggio 6.370 Km con la superficie **perpendicolare** ai raggi solari che si possono considerare paralleli all'asse Sole-Terra, data l'enorme distanza Sole-Terra.

In base a questi dati , si può calcolare **il valore standard S_0 dell'irraggiamento solare** incidente sulla superficie captante terrestre (area del cerchio di prima)
fuori dall'atmosfera terrestre,

COSTANTE SOLARE $S_0 = 1.366 \text{ W/m}^2$

Le misure più recenti compiute dai satelliti confermano il valore di $S_0 = 1.366 \text{ W/m}^2$. Questo valore varia di $\pm 3,3\%$ nell'anno, per la variazione della distanza Terra-Sole.

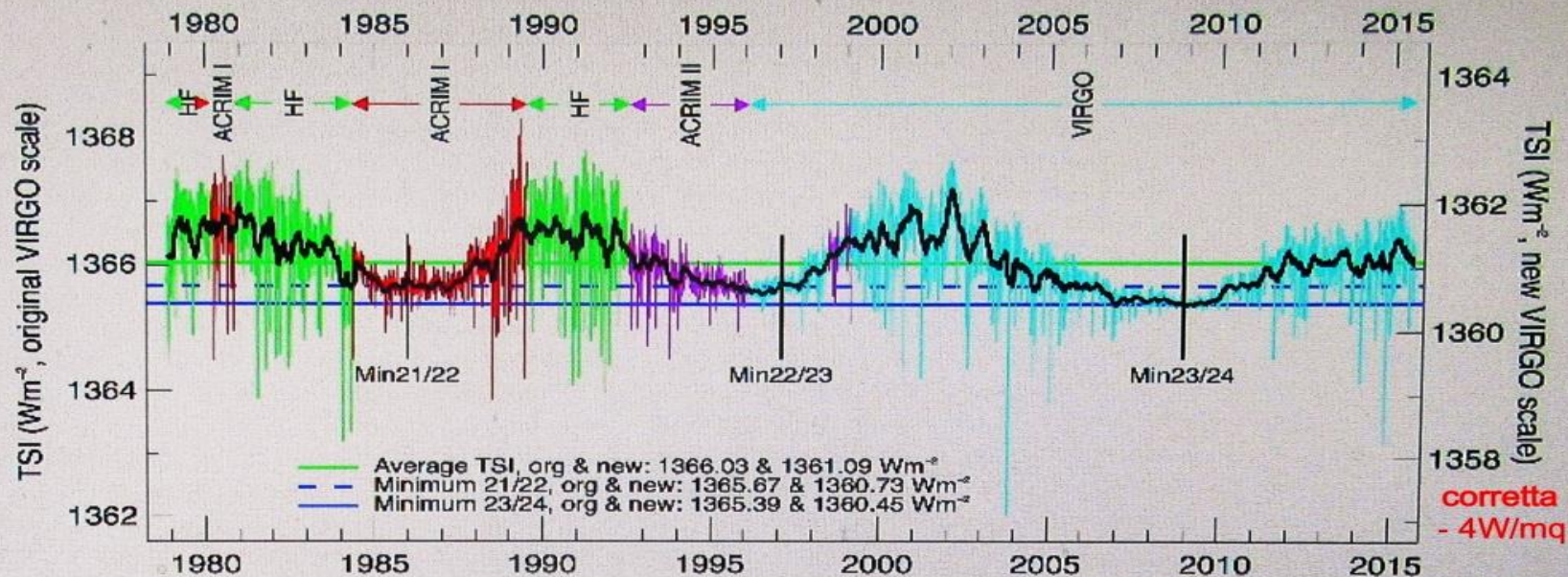
Nel nostro emisfero Boreale S_0 varia da circa 1.410 W/m^2 nel solstizio invernale quando la Terra è più vicina al Sole , al valore di 1.320 W/m^2 nel solstizio estivo quando la Terra è più lontana (valori riferiti alla superficie perpendicolare ai raggi del solari).

A questo proposito sorge spontanea una domanda: **perché nel solstizio invernale con maggior irraggiamento, si hanno temperature più basse?**

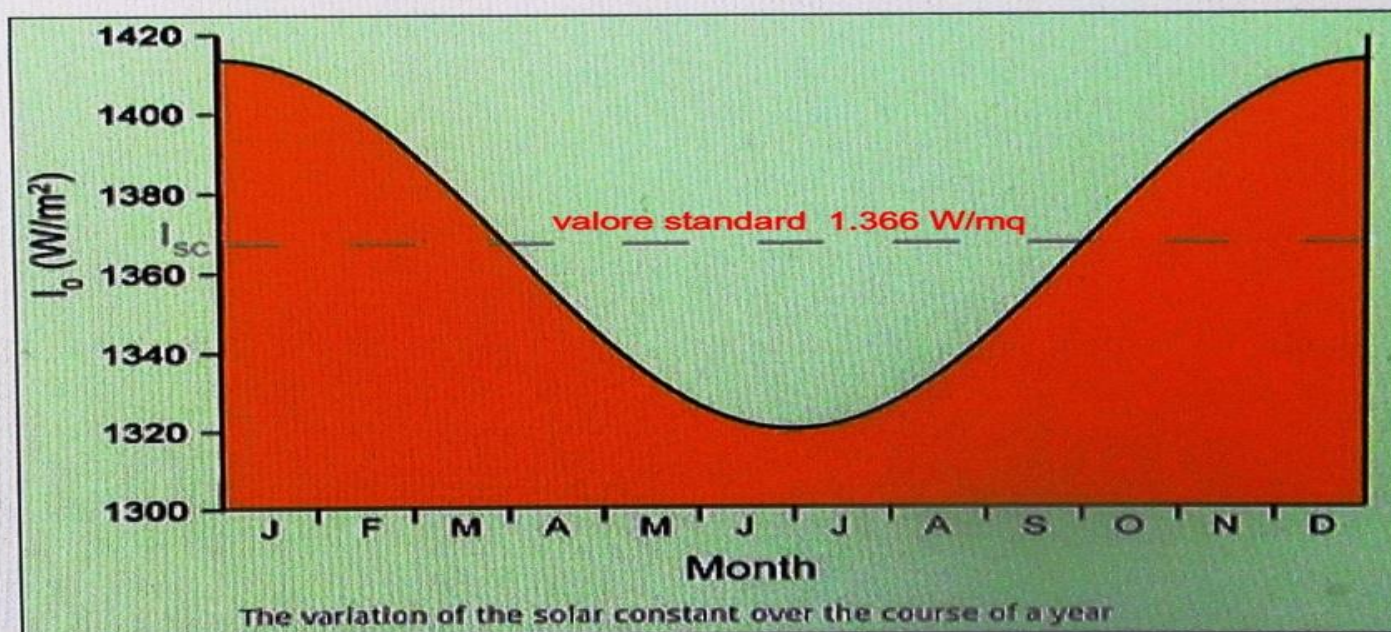
Perché **nel periodo invernale il Sole è molto basso sull'orizzonte** cioè l'incidenza dei raggi solari è sfavorevole ossia l'angolo d'inclinazione rispetto alla verticale nel sito è molto grande.

Viceversa succede d'estate quando l'angolo d'incidenza è molto piccolo.

Variazione costante solare 1978 - 2016



Variazione media annuale della costante solare



CONCLUSIONE

L'energia solare, che investe la terra sotto forma di radiazioni elettromagnetiche,

- è **rinnovabile ed inesauribile** nella scala dei tempi dell'umanità; la scienza e l'astrofisica attuale prevedono che il nostro Sole continuerà a brillare per altri 5 Mldi di anni.
- è la **"madre" di tutte le fonti energetiche sulla Terra**

Infatti direttamente o indirettamente, tutte le fonti energetiche e i relativi processi nel nostro pianeta , derivano e dipendono dal Sole.

Tuttavia, l'energia solare è una **fonte intermittente** (giorno/notte) e, pur essendo equamente distribuita su tutta la superficie terrestre, è poco concentrata.

Queste due caratteristiche, **intermittenza e bassa concentrazione**, la penalizzano in parte per lo sfruttamento su vasta scala .

N.B.

Chi è interessato ad uno studio completo ed esaustivo sia sulla fusione nucleare che sulla costante solare ecc, può consultare in RETE la memoria

“ IL SOLE DA’ I NUMERI ” ED. OTT. 2015 “ dello studioso Michele Diodati

.

Caratteristiche dei protoni e elettroni

	MASSA in Kg	Carica elettrica in Coulomb
PROTONE	$1,67 \cdot 10^{-27}$	+ $1,602 \cdot 10^{-19}$
ELETTRONE	$9,11 \cdot 10^{-31}$ Circa 1800 volte più piccolo	- $1,602 \cdot 10^{-19}$

FOTONE – NEUTRINO

FOTONE

- Particella quantica di ENERGIA
- **Energia:** dipende dalla frequenza f

$$E_f = h \times f$$

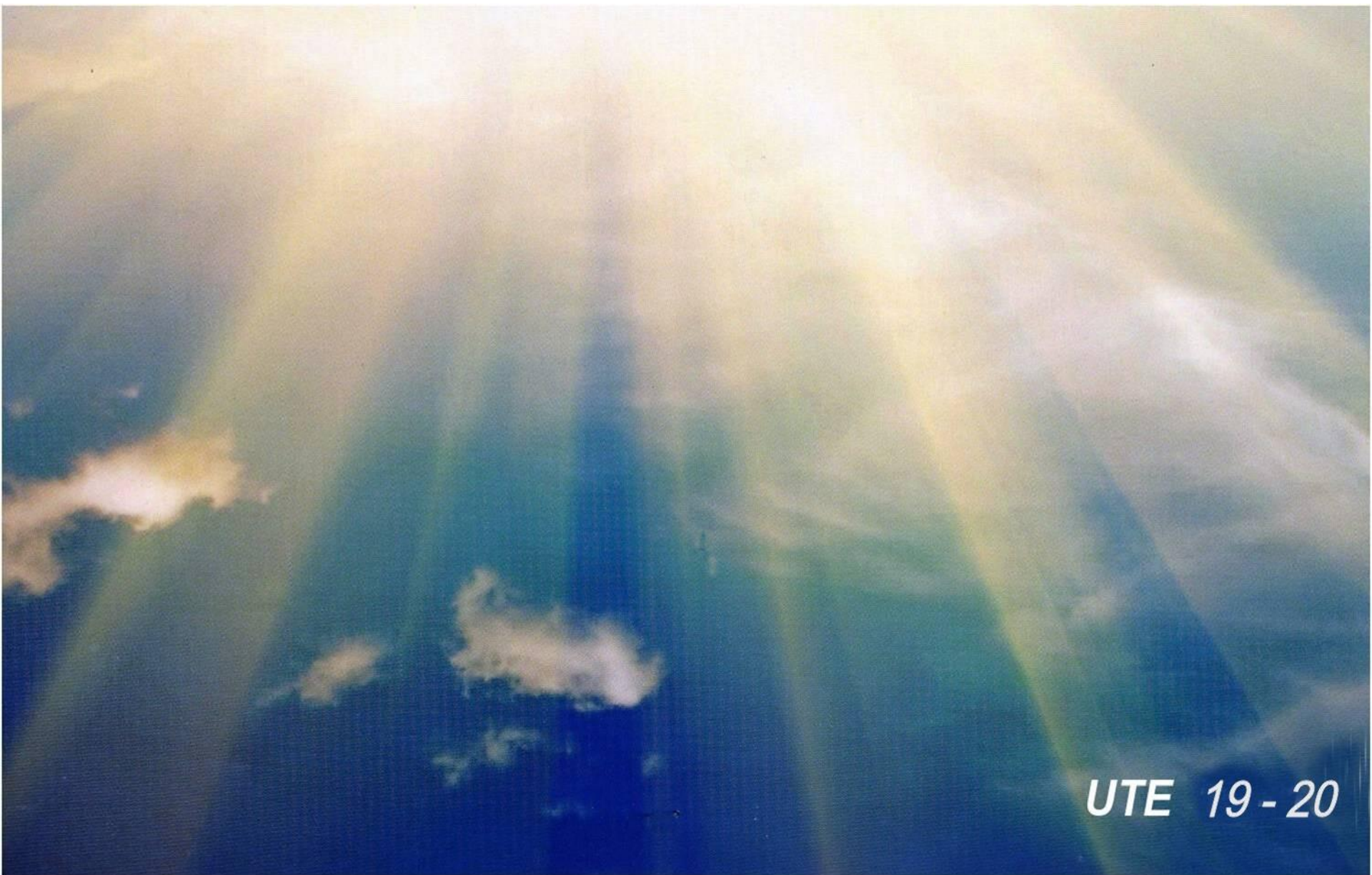
(h è la costante di Plank)

- **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

RADIAZIONE SOLARE SULLA SUPERFICIE TERRESTRE



UTE 19 - 20

La radiazione solare raggiunge la superficie terrestre in **maniera non omogenea**.

Ciò dipende dalla sua interazione con l'atmosfera che attraversa e, soprattutto, **dall'angolo d'incidenza** dei raggi solari.

A sua volta l'angolo d'incidenza varia in base a **due fattori**:

- **rotazione della Terra** intorno al proprio asse, (→ giorno - notte)
- **inclinazione dell'asse terrestre** rispetto al piano dell'orbita, che provoca una variazione stagionale dell'altezza massima del Sole sull'orizzonte.

Quando il Sole è alla **massima culminazione locale** (detta **zenit locale**)

(ore 12 del sito considerato con l'ora solare, ore 13 con l'ora legale) allora si ha la massima concentrazione dei suoi raggi sul suolo perché la loro direzione è la più alta raggiunta nel giorno considerato, rispetto alla verticale.

Invece, se i raggi solari raggiungono la superficie terrestre con maggiore inclinazione, la stessa quantità di energia si disperde su una superficie più grande.

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 1366 W/m²).

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

Per quali ragioni ?

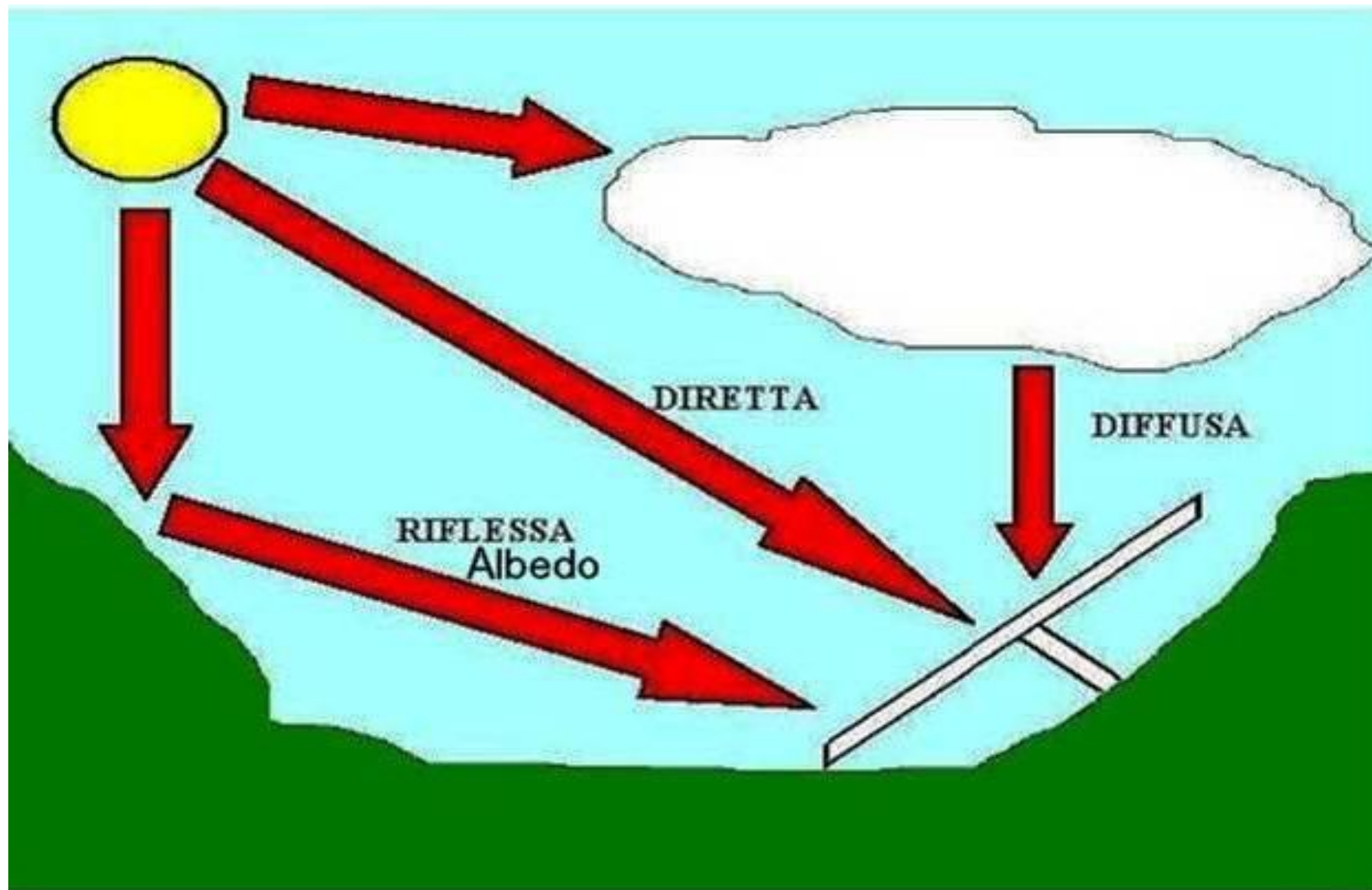
- 1-L'atmosfera terrestre è **spessa circa 100 km** (limite della mesosfera) lungo la verticale ma la radiazione solare arriva al suolo con direzione quasi sempre inclinata, la quale cambia durante il giorno in quanto dipende dalla posizione del Sole e cambia durante le stagioni nell'arco dell'anno → 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.

La parte più esterna dell'atmosfera (stratosfera), grazie all'ozono O₃ **assorbe i raggi ultravioletti** che sono pericolosi e a volte **letali per gli organismi viventi**, mentre negli strati più bassi, cioè la troposfera, una parte delle radiazioni infrarosso viene assorbita, principalmente a causa del vapor d'acqua e dell'anidride carbonica.

Infine i vari componenti dell'atmosfera determinano **un'attenuazione** della energia solare che interessa tutte le componenti della radiazione solare, però in maniera differenziata, come vedremo più avanti analizzando lo spettro solare.

Quindi la radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre e in particolare quella di un pannello FV è in generale composta da **tre componenti**: la radiazione **diretta**, la radiazione **diffusa** (detta anche indiretta) e la radiazione **riflessa (albedo)**.

RADIAZIONE SOLARE SU UN PANNELLO FV

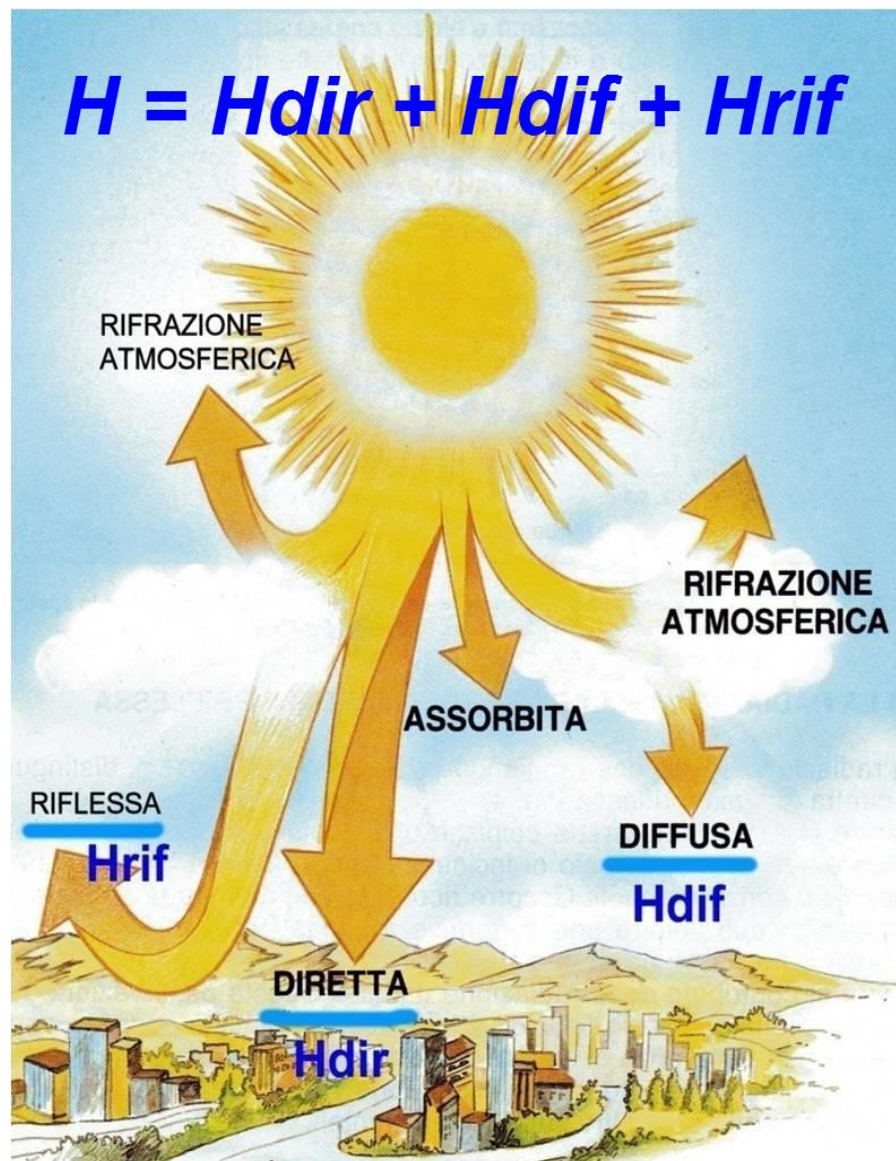


La radiazione solare totale H è la somma di tre componenti

- **1- H_{dir} (diretta)** sulla superficie con un solo angolo preciso e arriva sino al 90% nelle giornate serene e secche.
- **2- H_{dif} (diffusa)** sulla superficie in modo diffuso e predomina nelle giornate nuvolose.
- **3- H_{rif} (riflessa) (albedo)** interessa solo le superfici inclinate e dipende dal tipo di terreno circostante.

N.B. La % preponderante della radiazione solare è data dalla **somma delle due componenti diretta e diffusa**.

La componente riflessa è molto piccola e spesso trascurabile.



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.

Le % delle componenti diretta e diffusa della radiazione globale (esclusa la riflessa) , dipendono dalle condizioni meteo.

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
								
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Il valore della radiazione solare totale sulla superficie terrestre è circa **1.000 W/m²** **in condizioni ottimali** cioè in una giornata serena, con condizioni meteo tranquille, Sole allo zenit, a livello del mare e a 25° C.

IN REALTÀ I VALORI SFRUTTABILI NEI PANNELLI SOLARI SONO MOLTO VARIABILI DURANTE IL CORSO DELL'ANNO E IN PRATICA SEMPRE MINORI DI 1.000 W/M².

Ciononostante :

Il valore di 1.000 W/m² è internazionalmente assunto come riferimento per le prove di qualificazione dei pannelli solari secondo il protocollo Internazionale STC (Standard Test Condition) , seguito da tutti i produttori fotovoltaici. Tale valore è stato scelto anche perché, essendo oggettivo e indipendente dalle condizioni meteo variabili, può essere facilmente riprodotto in laboratorio nelle prove di certificazione .

Quando quindi un produttore indica per un dato pannello FV una certa potenza elettrica (detta **potenza di picco e misurata in Wp**) , certifica che quel pannello FV è in grado di generare tale potenza solo se irradiato da 1.000 W/m² nelle condizioni standard STC .

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 MEDIA → ENERGIA ANNUA MEDIA SFRUTTABILE

1- Pianura Padana circa 160 W/m²	→ 160*8760 h = circa 1.400 kWh/m²/ anno
2- Italia Centrale circa 170 W/m²	→ 170*8760 h = circa 1.490 kWh/m² /anno
3- Sud e Isole oltre 180 → 200 W/m²	→ 180*8760 h = circa 1.577 kWh/m² /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 per l'analisi FV di un sito.

ANALISI DELLE RADIAZIONI

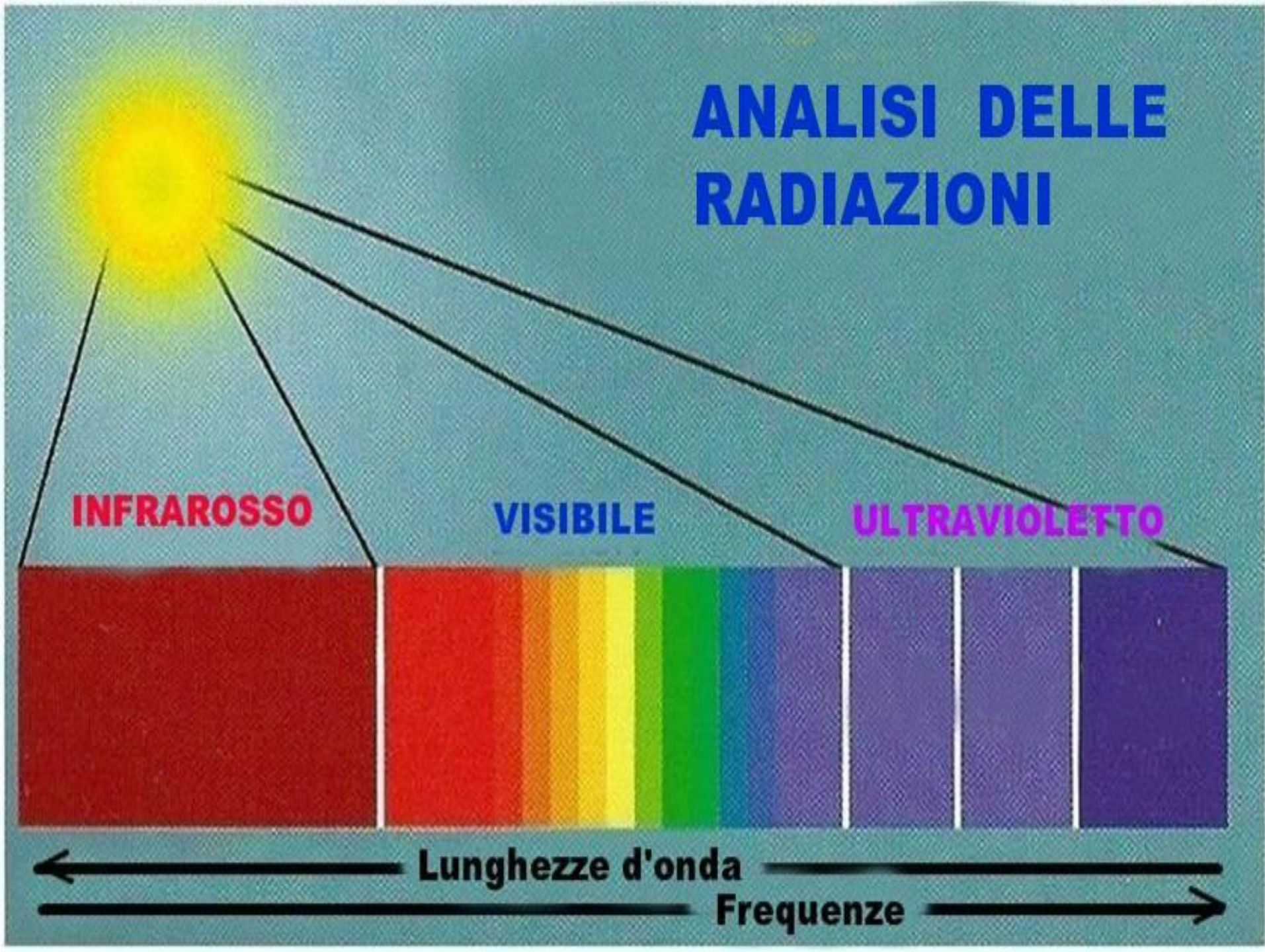
INFRAROSSO

VISIBILE

ULTRAVIOioletto

Lunghezze d'onda

Frequenze



**Vediamo ora le caratteristiche fisiche della
radiazione solare sulla Terra.**

Come si studiano e si rappresentano

Perché ci serve la loro conoscenza

SPETTRO SOLARE

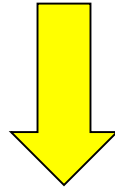
Rappresentazione fisica delle radiazioni solari che, come in una radiografia, consente di analizzare la consistenza e il comportamento delle varie componenti elettromagnetiche della radiazione emanata dal Sole.

→ **Contenuto energetico** della radiazione solare cioè dei fotoni

- **Chiave di lettura** di quanta energia fotonica possiamo trasformare in energia elettrica con il fotovoltaico.
- **Strumenti :**
 - Solarimetri - Piranometri sulla Terra
 - Tecnologia satellitare fuori dell'atmosfera

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).

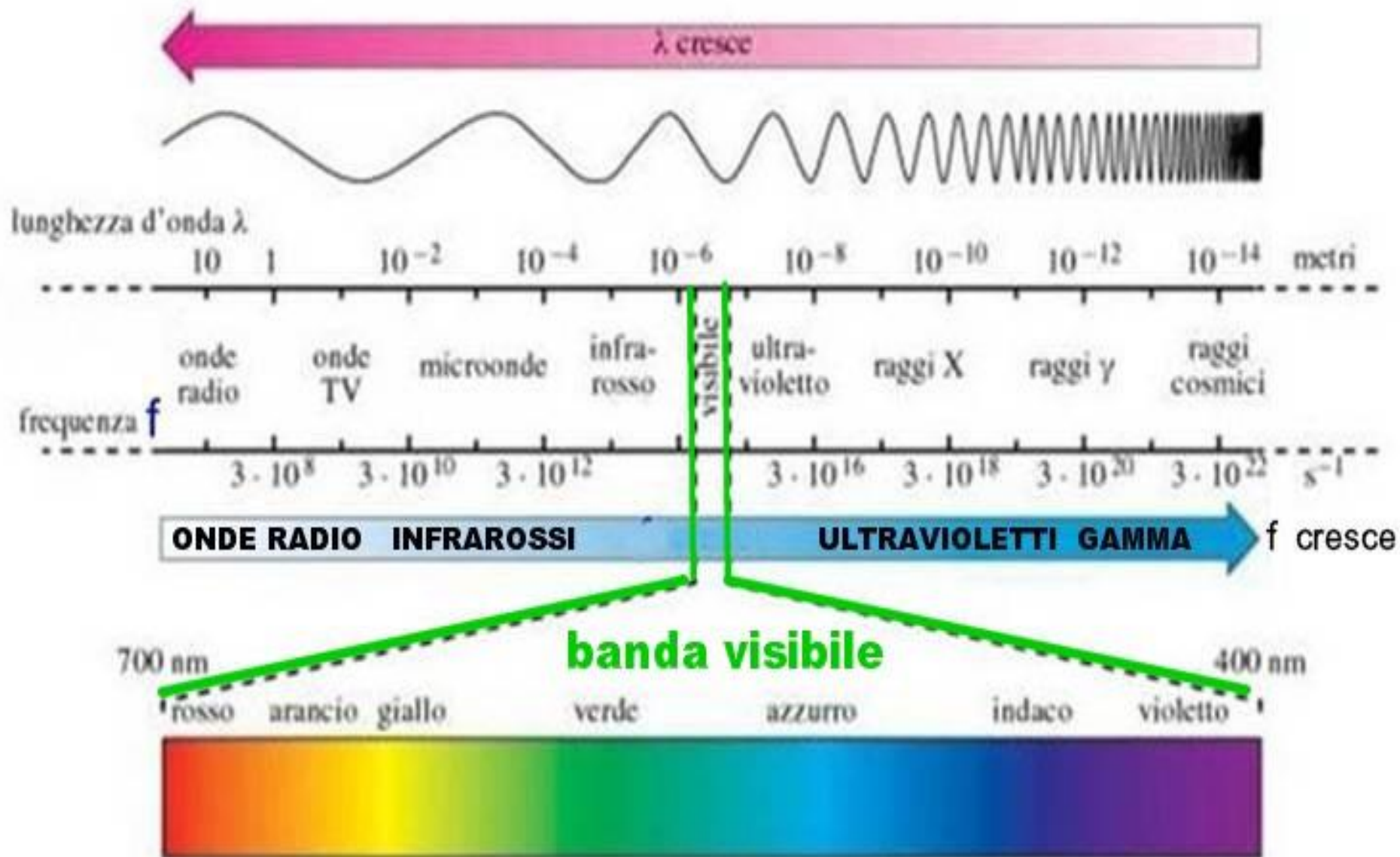
Lunghezze d'onda molto piccole e quindi elevate frequenze.

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



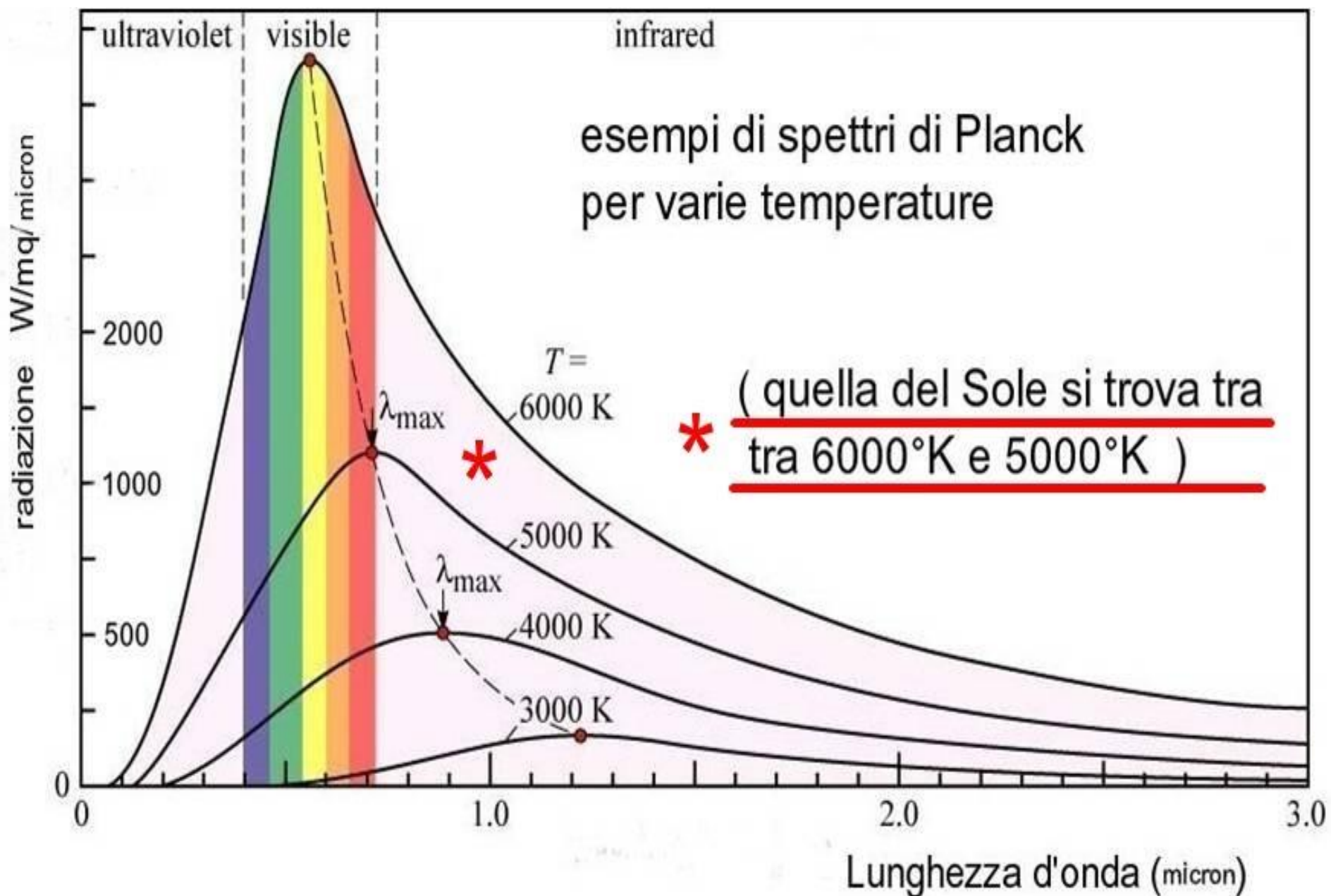
LEGGE DI PLANK CORPO NERO

Dal punto di vista radiativo il Sole è un **emettitore perfetto**, cioè si comporta come un corpo che **assorbe tutta la radiazione incidente** senza alcuna riflessione (**corpo nero**).

La distribuzione dell'intensità energetica della radiazione in funzione della lunghezza d'onda si chiama in fisica **SPETTRO SOLARE** ed è stata studiata anche matematicamente dal fisico tedesco **Max Planck** (Nobel 1918).

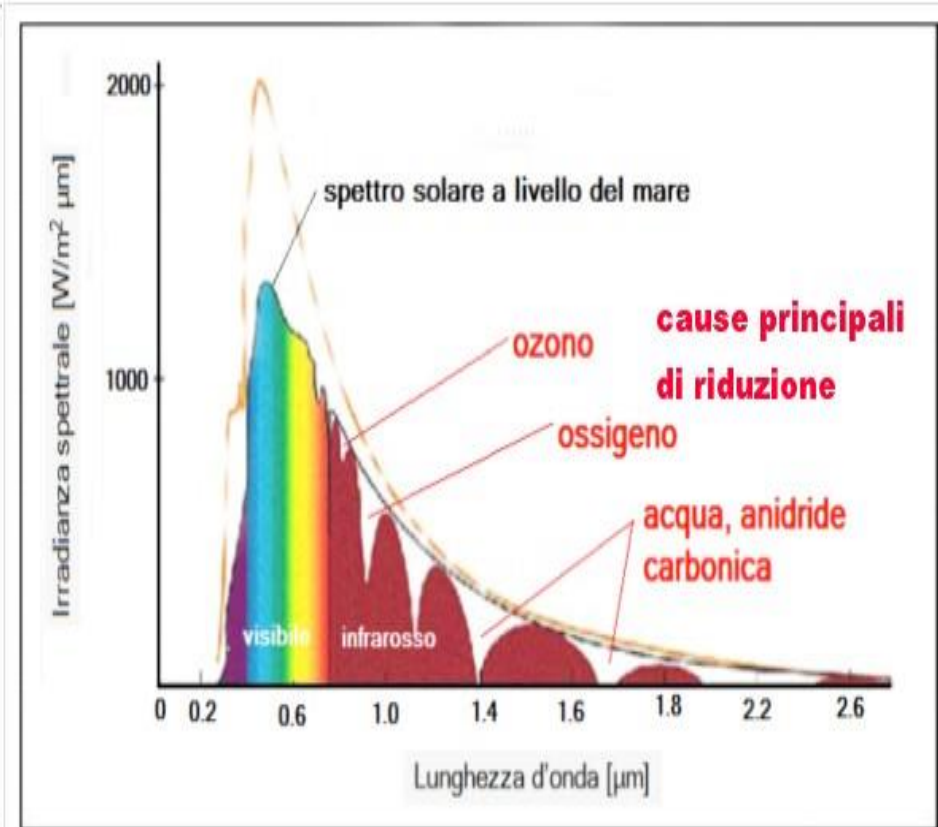
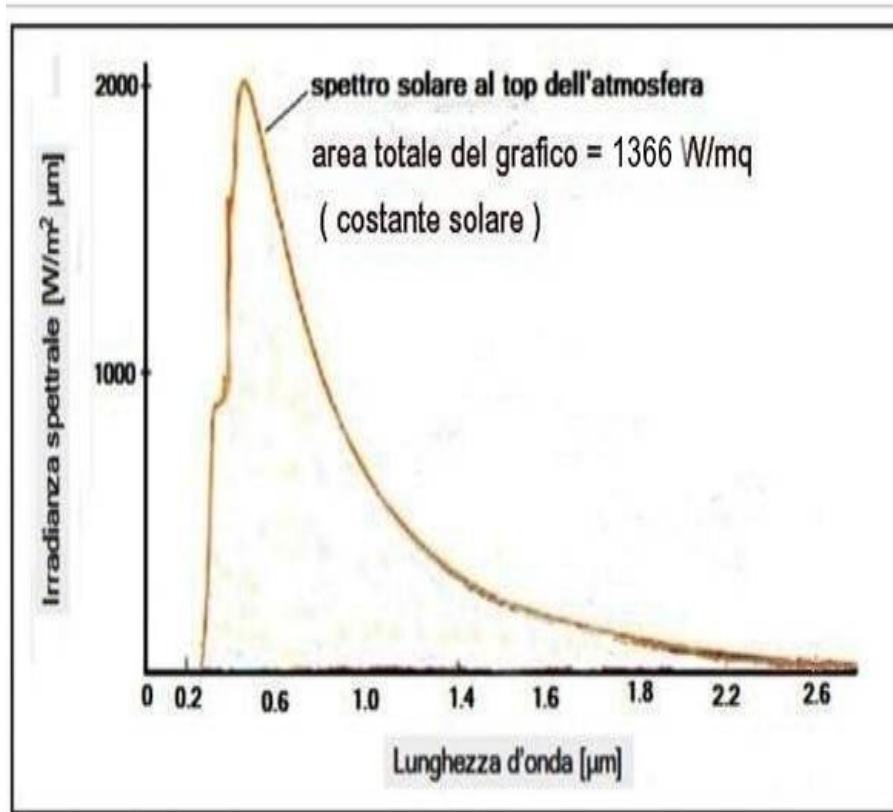
Tale spettro di emissione dipende **solo dalla temperatura** che per la fotosfera solare è di circa 5780° K (gradi Kelvin) pari a $5780 - 273 = 5507^{\circ} \text{ C}$

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.



Ricordiamo le caratteristiche fisiche del Fotone

- Particella quantica di ENERGIA

- **Energia:** dipende dalla frequenza f

$$E_f = h \times f \quad (h \text{ è la costante di Plank})$$

- **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 ($\lambda = 1/f$)

Ma quanti sono questi fotoni ?

Nessuno li potrà mai contare ma un **calcolo statistico indicativo** possiamo farlo:

1 - L'energia media dei fotoni che colpiscono la superficie terrestre è di circa

$$2,18 \text{ eV} \text{ cioè } 2,18 \times 1,602 \times 10^{-19} = \mathbf{3,563 \times 10^{-19} \text{ Joule.}}$$

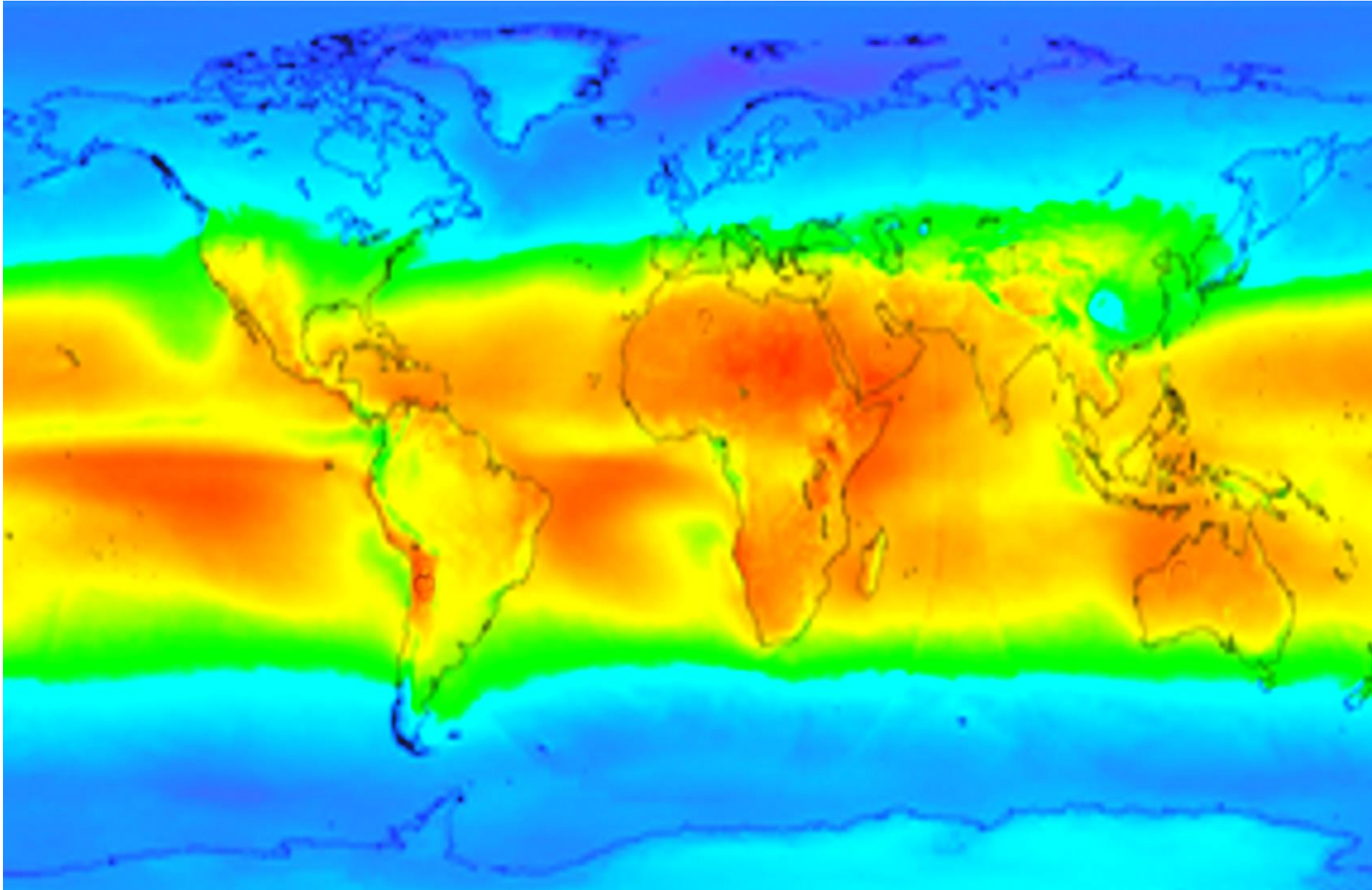
2 – La radiazione solare max allo Zenith locale di un sito è di **1000 W/ m²**

$$= 1000 \text{ Joule/s / m}^2$$

3 – **Quindi in un m² di superficie terrestre arrivano fino a circa
(1000 / 3,563) x 10¹⁹ = circa 2.800 x 10¹⁸ Fotoni ogni secondo.**

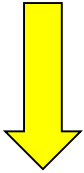
che si legge ... 2.800 miliardi di miliardi di fotoni al secondo

Mappe di radiazione solare



Radiazione solare sul pannello

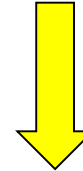
Dipende da vari fattori



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.**



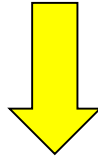
Imprevedibili ed aleatori

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

**Fattori difficilmente calcolabili
→ esperienza e coefficienti
sperimentali**

Il calcolo fondamentale è quello della radiazione solare sul pannello FV inclinato per sfruttare al meglio la energia solare.

- Per il calcolo è necessario conoscere il valore della radiazione sul piano orizzontale.**
- Necessarie indagini e misure sperimentali continue.**
- Rilievi sperimentali da Enti Internazionali con tecnologie a terra (stazioni di rilevamento solari) e con satelliti meteo.**
- Raccolta dei dati sperimentali in valori medi a livello giornaliero, mensile, annuale , per periodi di 5-10 anni .**



MAPPE DI RADIAZIONE SOLARE

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/m²** (MegaJoule al m²)
il valore va diviso per 3,6 per averlo in **kWh/m²** .



**Le seguenti grafiche riportano esempi
di mappe isoradiative, a livello**

- mondiale,**
- continentale (Europa)**
- nazionale (Italia).**

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

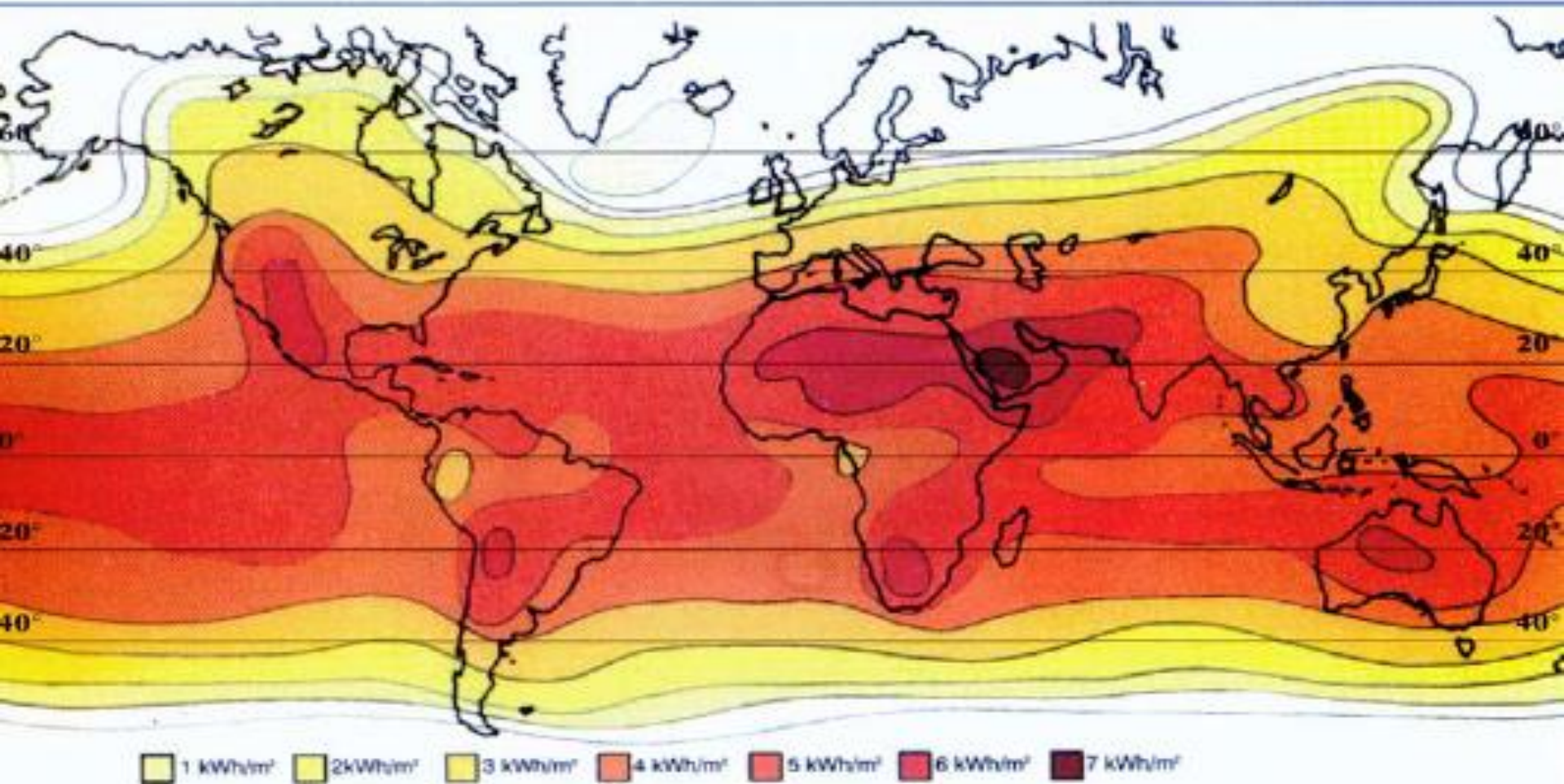


Dipartimento di
Energetica "S. Stecco"

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Ingegneria



Insolazione quotidiana del globo terrestre (media annuale).



Mappa della potenza solare media giornaliera (W/mq) nelle varie aree della Terra nel periodo 2006 - 2019

**Nel sito della NASA “earthobservatory.nasa.gov” si possono trovare,
tra l’altro, tutte le mappe mondiali mensili dal luglio 2006 a sett. 2019.**

Per farlo, procedere come segue:

1 - entrare nel sito con l’indirizzo

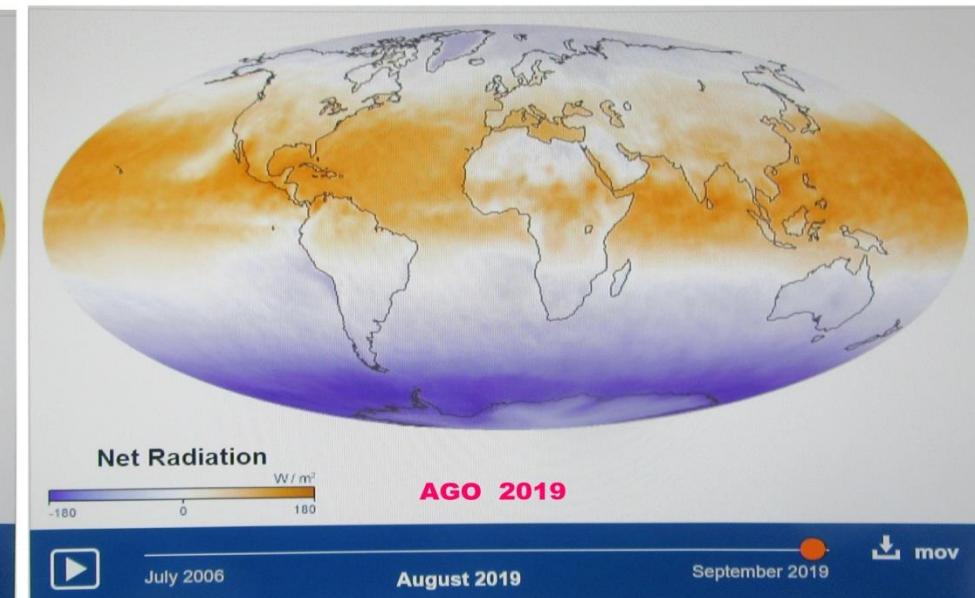
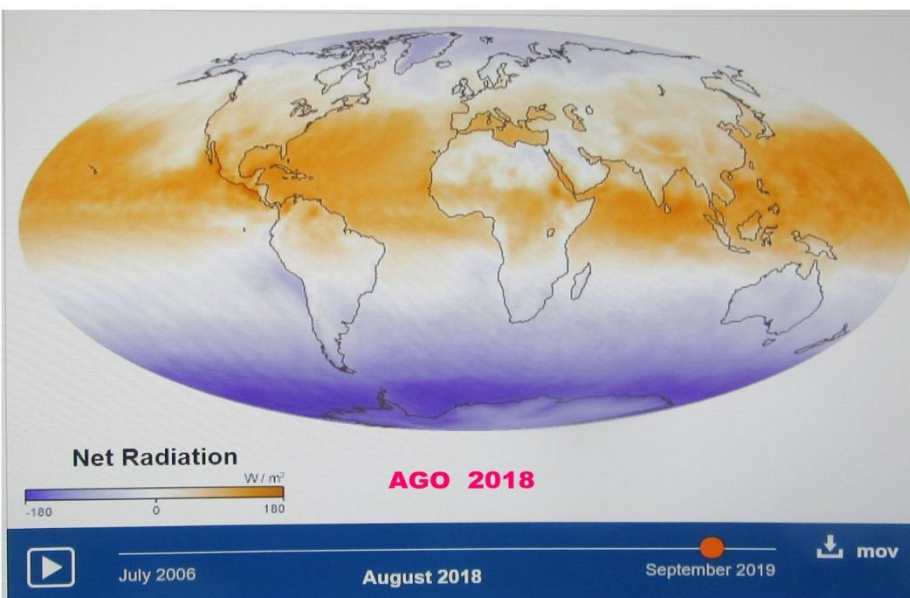
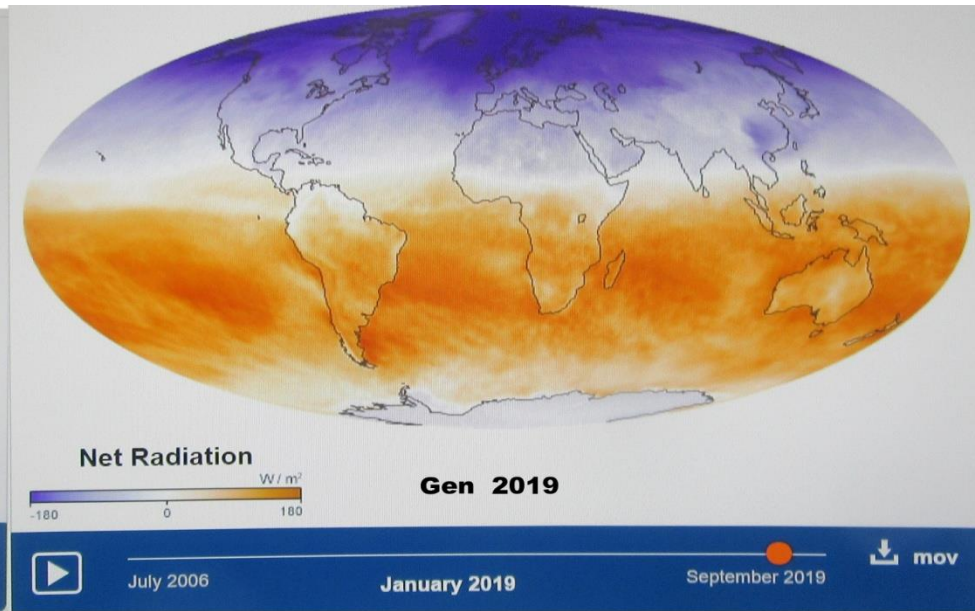
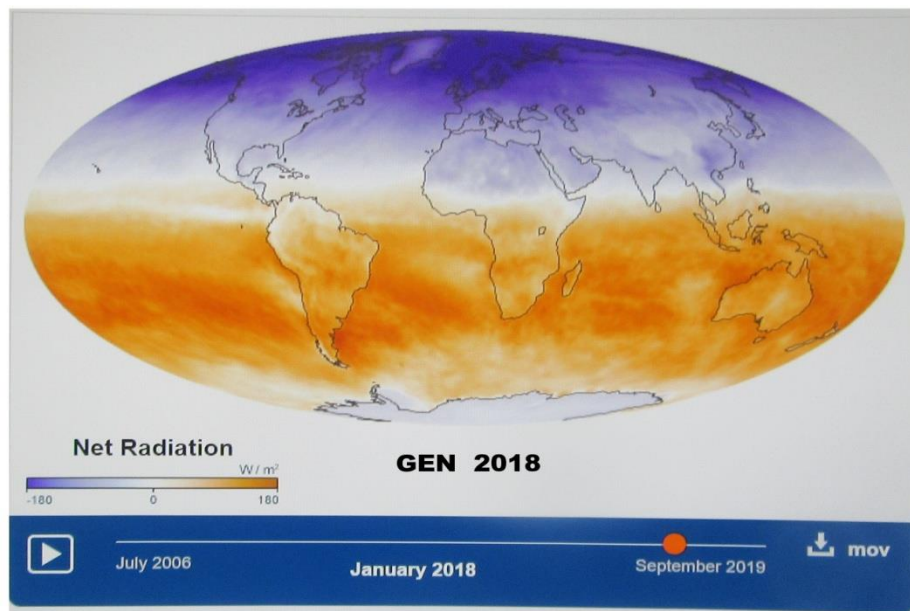
<http://earthobservatory.nasa.gov>

2 - cliccare, sul sottomenu , la voce “ [Global Maps](#) “

si apre una pagina con varie mappe mondiali visualizzate per righe.

**3 - cliccare sulla mappa [Net Radiation](#) → si apre la pagina web
contenente il filmato delle radiazioni dal 2006 a sept 2019 cliccando
su “ [download an animation of this dataset](#)” in basso a sinistra.**

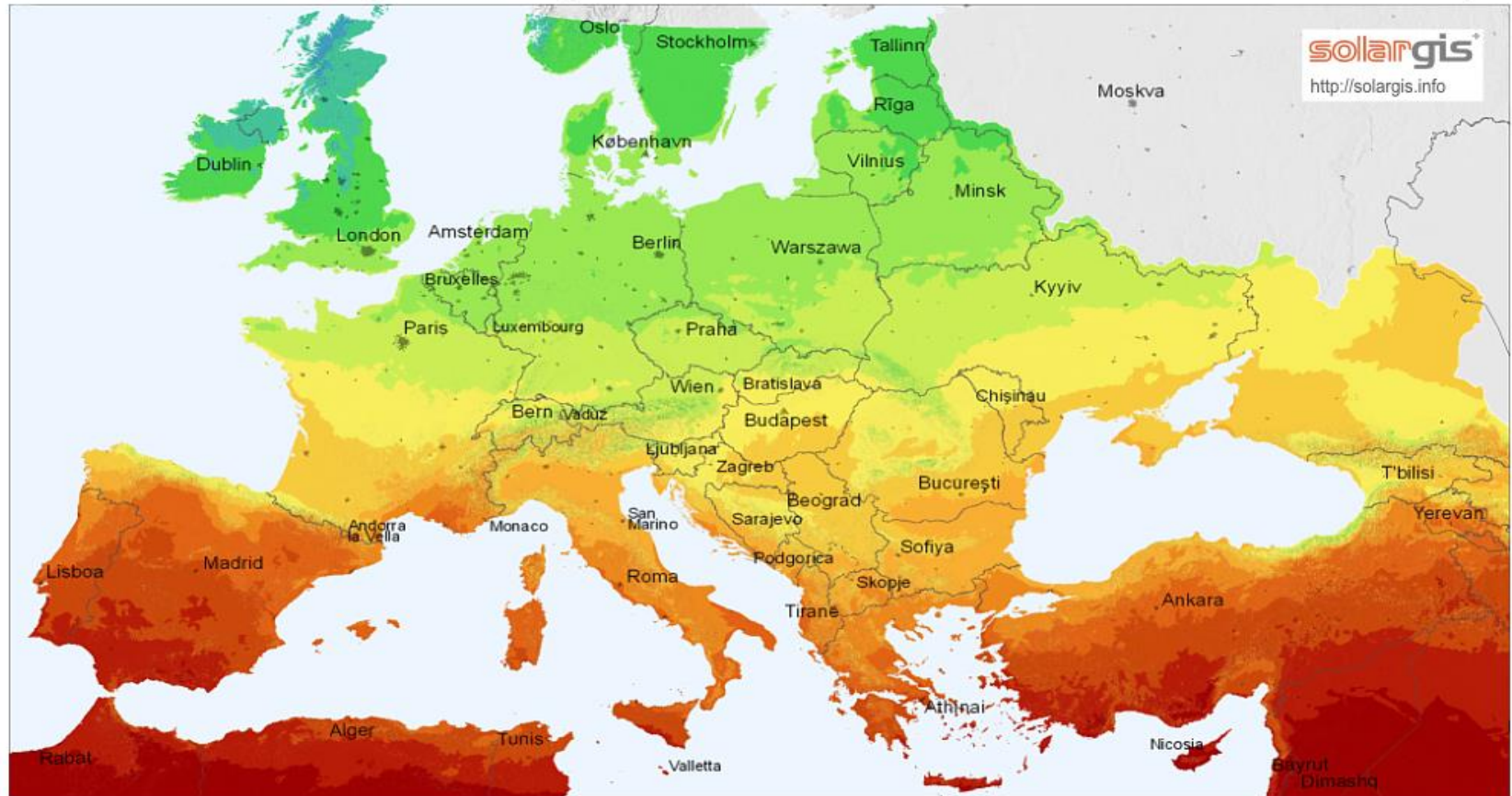
Esempio di mappe dal “earthobservatory.nasa.gov” confronto gen. – ago. 2018 - 2019



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**



Uso delle mappe solari ENEA

ENEA ente italiano per elaborazione e gestione delle mappe solari del territorio nazionale (Ministero Ambiente).



Mappe della Radiazione Globale Giornaliera Media Mensile (energia /mq di superficie orizzontale) Nord Cento Sud Isole

RGGM₀ (H₀) (kWh/m²/giorno) per le varie località

Riferimenti normativi e strumenti di calcolo Software.

Dati satellitari Eumetsat periodo 1994-1999 (agg.ti 2002).

www.solaritaly.enea.it

Ottenere le mappe solari cercando nella sezione “archivio”

Calcolare i valori per una determinata località entrando nella sezione “Calcoli” e seguendo le istruzioni.

Dal sito ENEA → In Italia si hanno valori molto variabili :

- minimo 1256 kWh/m² /anno (Merano)

- massimo 1665 kWh/m² /anno (Siracusa) (Nord→Sud +32,5%)



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



UTE 19 - 20

**Conversione
fotovoltaica**

INTRODUZIONE

Un impianto fotovoltaico (FV) converte direttamente la luce solare in energia elettrica mediante celle solari FV.

Il funzionamento di una cella FV si basa sull' **effetto fotoelettrico tra la radiazione solare (fotoni) e gli elettroni di valenza di una giunzione P-N di un semiconduttore.**

Anche se le nuove tecnologie del fotovoltaico usano materiali diversi che si vanno sempre più diffondendo, il Silicio è , ancora oggi , il materiale maggiormente utilizzato.

Perciò la conoscenza delle caratteristiche del Silicio e di una giunzione P-N sono la base necessaria per capire il funzionamento della cella FV.

Fonti dei dati , là dove necessarie, :

- documentazioni tecniche e data base reperibili nel WEB**
- reports e algoritmi vari di primarie società e istituzioni**
- Wikipedia enciclopedia online libera**

FOTONI – ELETTRONI

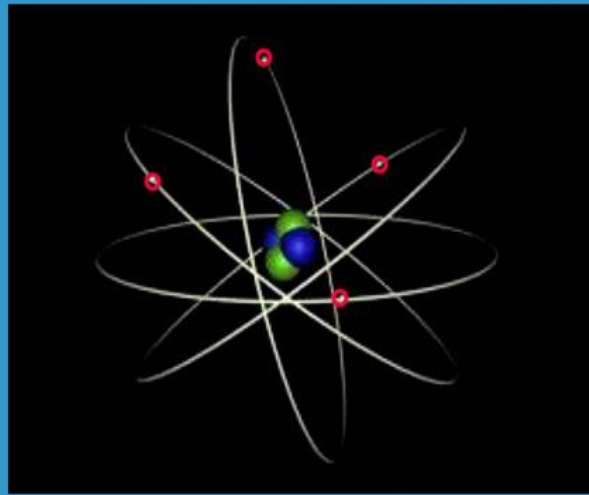
gli attori principali del fotovoltaico

FOTONE

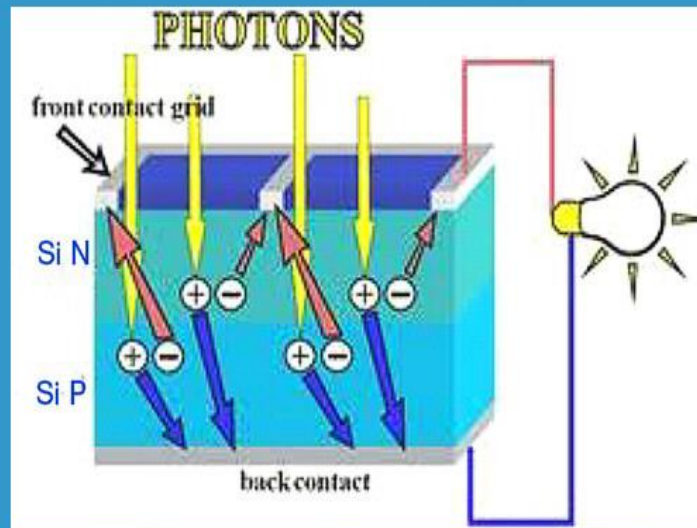
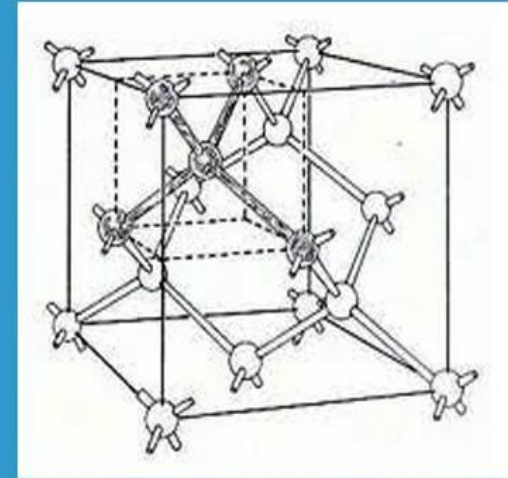
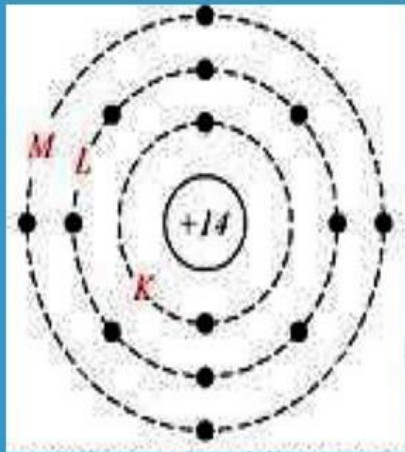
- **Particella quantica di Energia**
- **Energia:** dipende dalla frequenza f
 $E_f = h \times f$ (h = costante di Plank)
- **Massa:** nulla
- **Carica elettrica:** nulla
- Nella radiazione solare i fotoni assumono varie frequenze
→ spettro solare
- **La luce visibile** contiene fotoni con frequenze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

ELETTRONE

- **Particella subatomica elementare**
- **Energia:** dipende cinematicamente dalla velocità → $\frac{1}{2} mv^2$
- **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.**



II Silicio



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

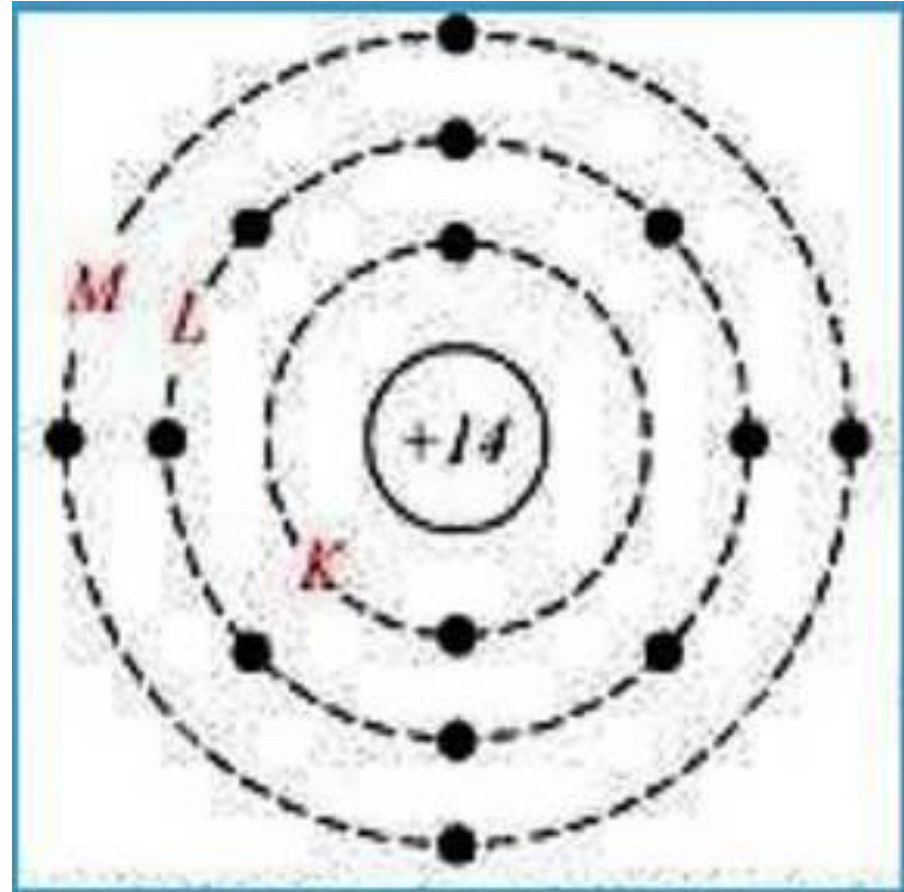
Densità (g/cm³) 2,33

Nr. elettroni di valenza 4
(orbitale esterno M)

Energia d'estrazione di Gap

E_g = 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 .

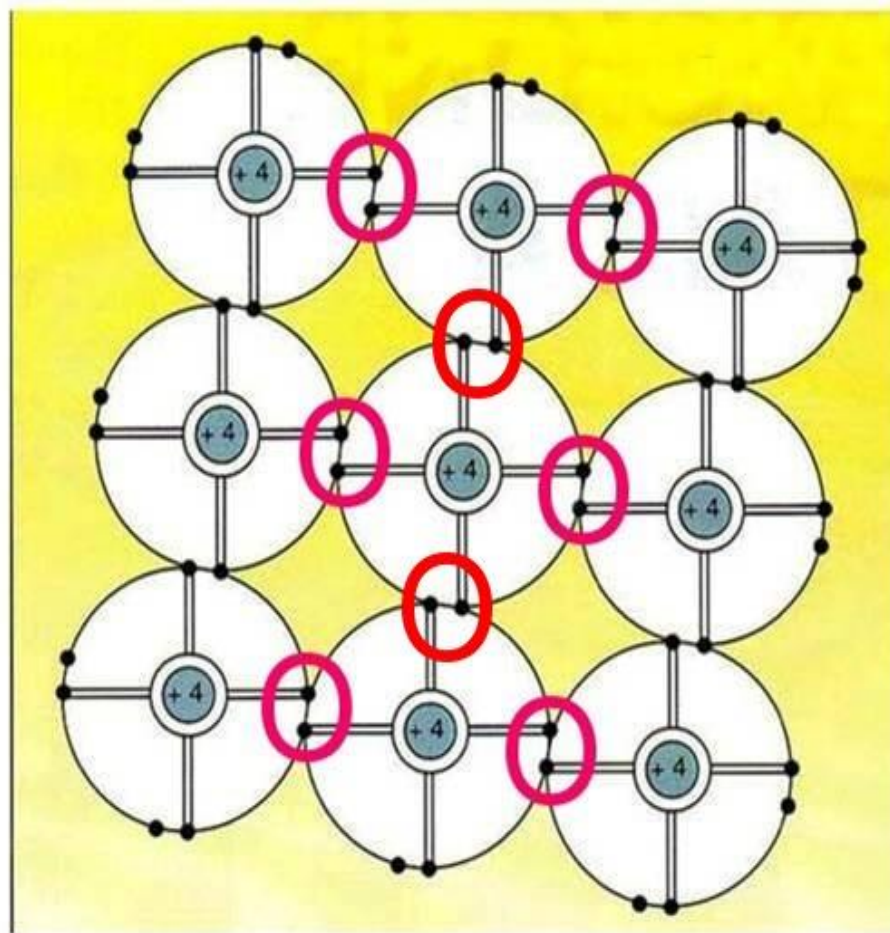
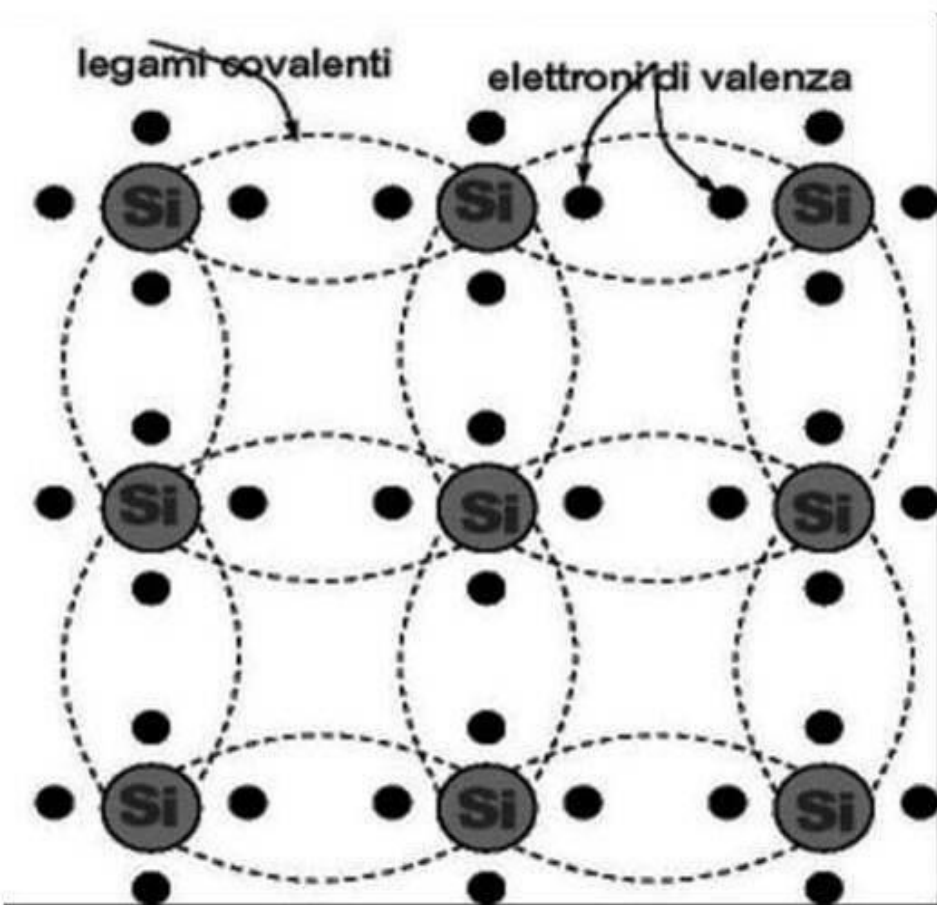
- **Amorfa**

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.



STABILITA' ENERGETICA

Regola empirica dell'ottetto

Nel reticolo cristallino del Si, ogni atomo è collegato ad altri 4 atomi contigui e presenta quindi sull'orbitale esterno $4+4 = 8$ elettroni (4 suoi + 4 condivisi con gli atomi circostanti).

Si ha così una situazione di equilibrio energetico stabile detta appunto ottetto.

La regola dell'ottetto è una regola empirica formulata nel 1916 dal fisico-chimico statunitense **Gilbert Newton Lewis**, per spiegare la formazione dei legami chimici tra gli atomi.

REGOLA DELL'OTTETTO

“ Quando in un atomo il livello elettronico esterno (orbitale esterno di valenza) è completo cioè è costituito da otto elettroni, tale atomo è in una condizione di stabilità energetica e quindi non tende a formare ulteriori legami “.

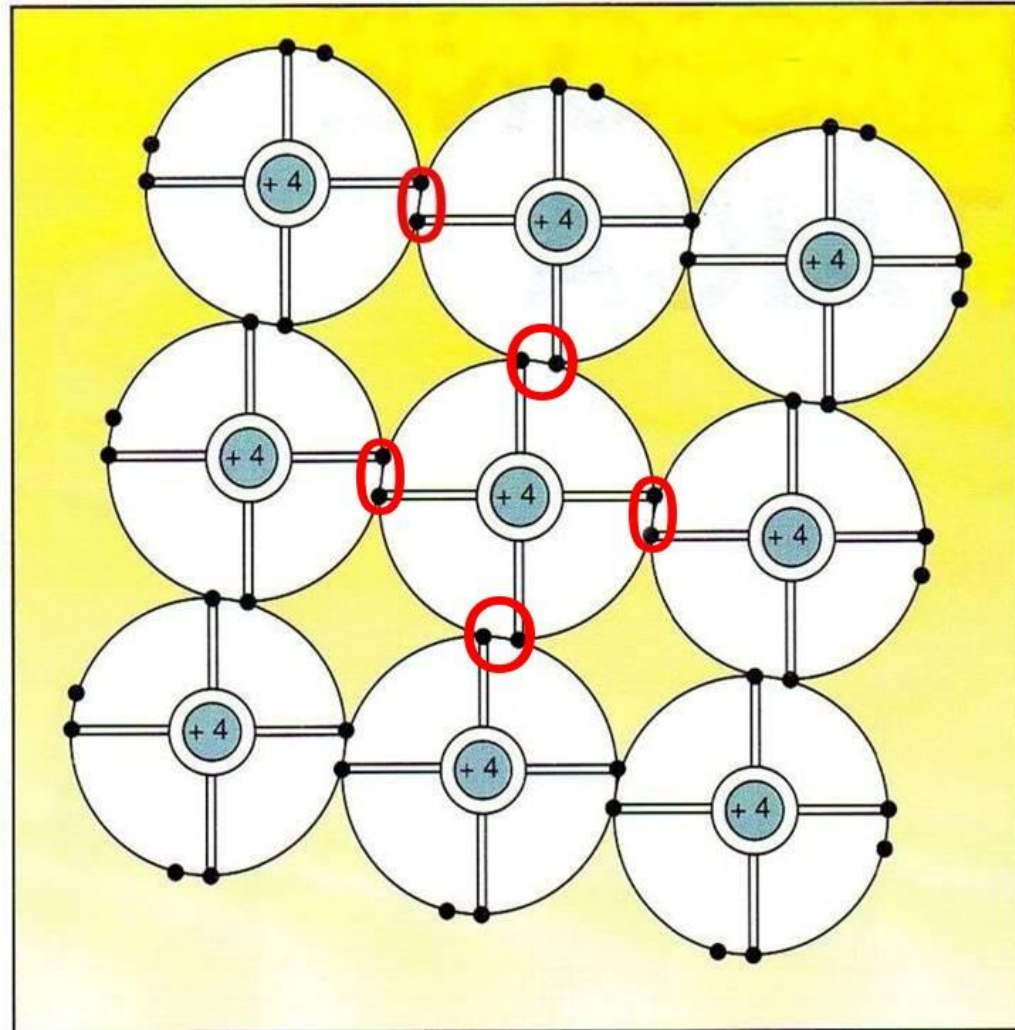
Quindi → ogni atomo , con la formazione di legami chimici, **tende** ad acquistare, o a perdere elettroni fino a raggiungere la configurazione elettronica esterna di massimo equilibrio energetico cioè appunto **otto elettroni**.

CONCLUDENDO

Nella struttura atomica del Silicio
l'orbitale esterno di ciascun atomo, ha
in comune con gli altri quattro atomi
attorno a sè, “4+4” elettroni.

**Si ha così un totale di “ 8 “ elettroni cioè
una situazione di equilibrio
energetico molto stabile**

(→ “ottetto di stabilità”).



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)** del V gruppo chimico con 5 elettroni esterni di valenza.
- In grado di togliere un elettrone virtuale (→ **zona P**),
tipico usato nell'industria il **Boro (accettore)** del III gruppo chimico con 3 elettroni esterni di valenza.

SILICIO DROGATO DI TIPO N

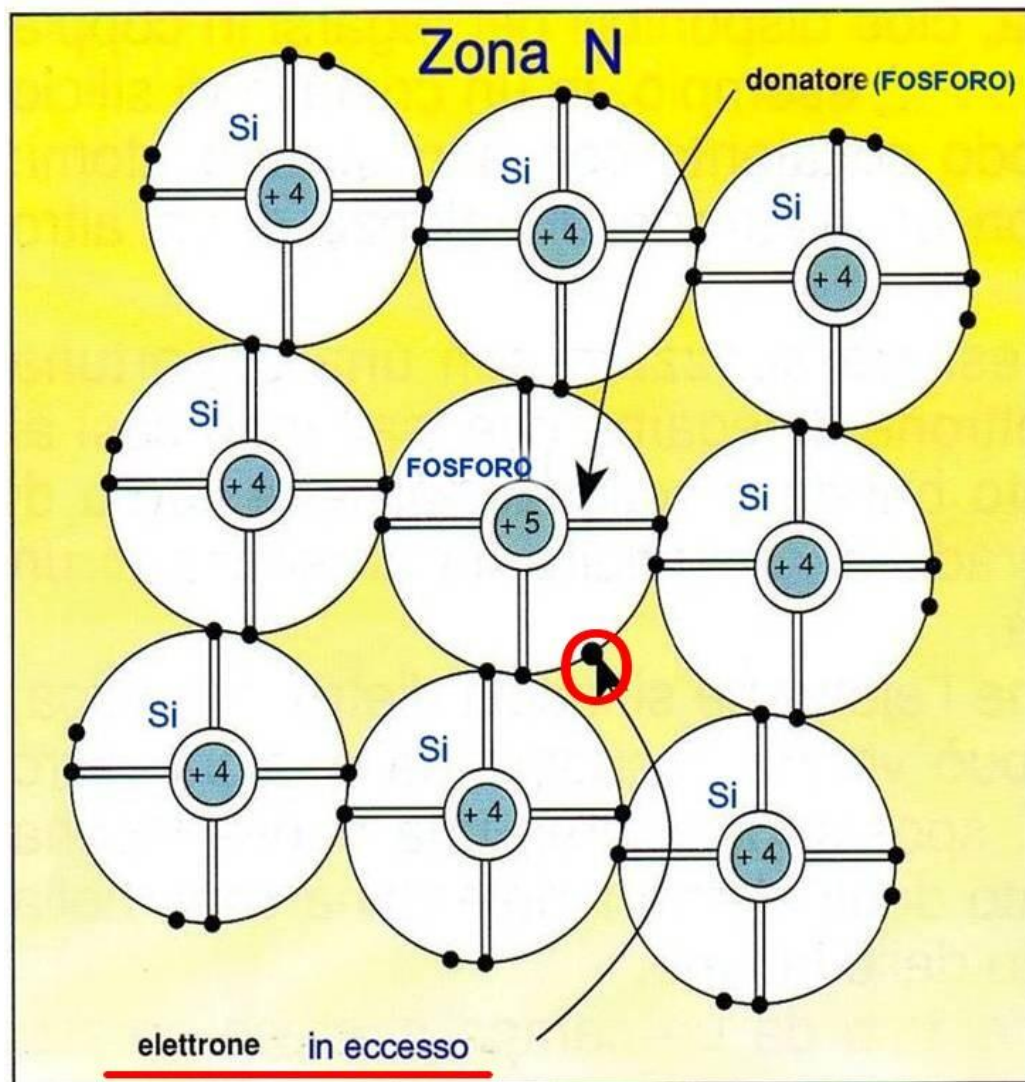
Silicio cristallino drogato con Fosforo (5 elettroni esterni)

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

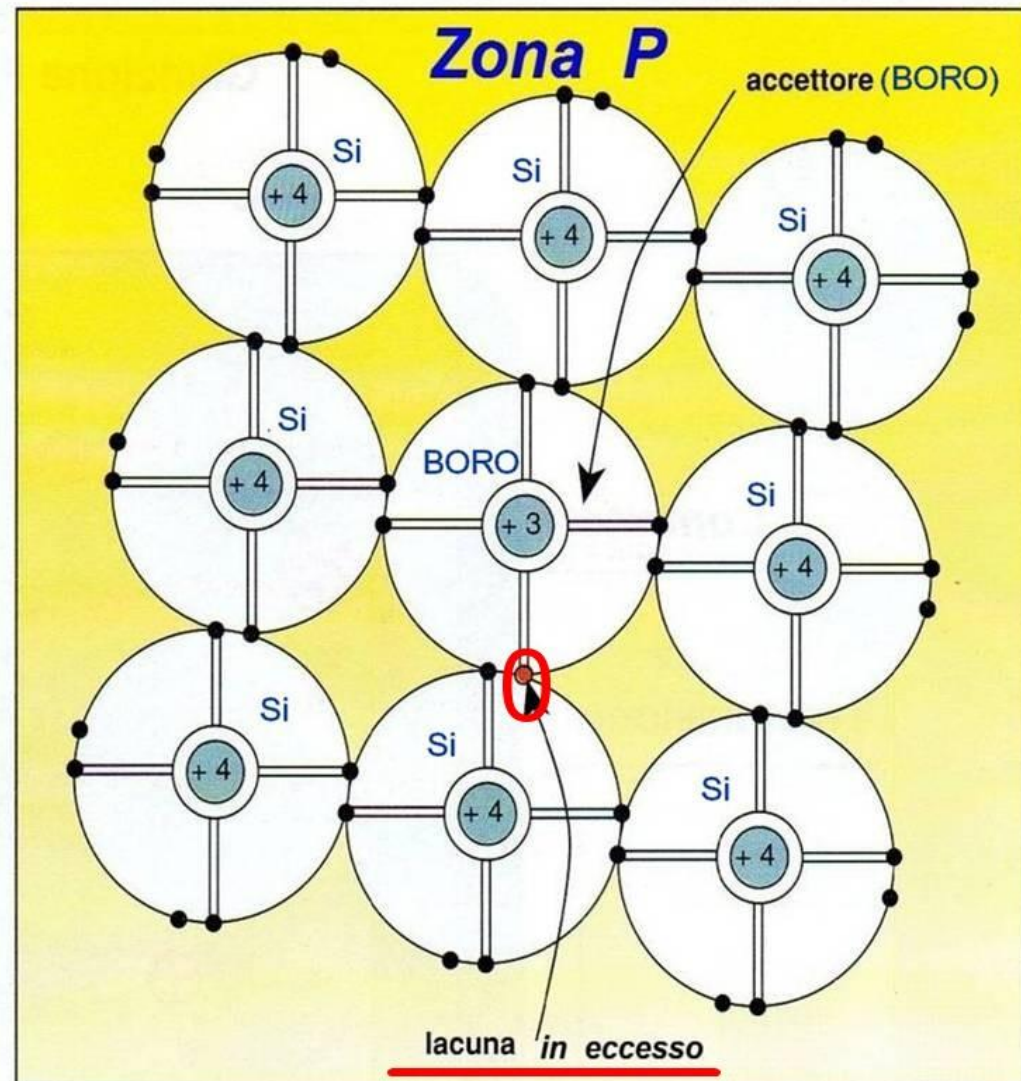
Silicio cristallino drogato con Boro (3 elettroni esterni)

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) .



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.

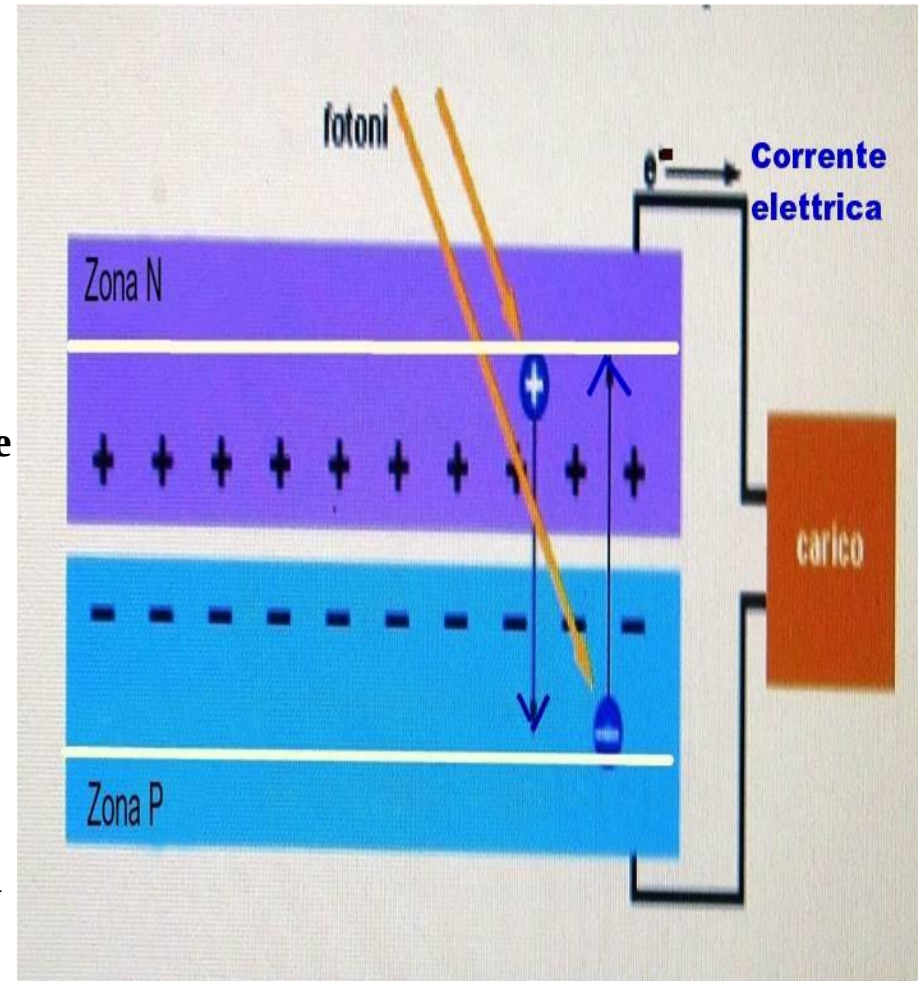
CORRENTE FV NELLA GIUNZIONE

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 libere di muoversi nella giunzione.

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

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

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 di elettroni cioè una corrente elettrica continua .



PRECISAZIONI SULL'EFFETTO FV

Quando un fotone di energia E_f colpisce una cella FV si possono verificare **tre situazioni**:

- 1- E_f è $<$ dell'energia di Gap $\rightarrow$ l'elettrone colpito dal fotone rimane nella banda di valenza e l'energia del fotone si dissipa in calore.
- 2- **E_f è = all'energia di Gap $\rightarrow$ l'elettrone colpito supera la sua banda di valenza ed entra nella banda di conduzione $\rightarrow$ elettrone libero
 $\rightarrow$ **effetto utile per la corrente FV****
- 3- E_f è $>$ dell'energia di Gap $\rightarrow$ l'elettrone colpito viene comunque liberato ma l'eccesso di energia ($E_f - E_g$) si dissipa in calore.

L'energia E_f del fotone di frequenza f è data dalla relazione di Plank $E_f = h \cdot f$
(h =costante di Plank).

L'energia fotonica è dunque proporzionale alla frequenza della corrispondente radiazione luminosa ed è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda λ della radiazione stessa.

QUINDI: non tutte le lunghezze d'onda dello spettro solare sono sfruttabili per l'effetto FV ma solo quelle con energia uguale o superiore all'energia di Gap del Silicio.

PRECISAZIONI SU ENERGIA DI SOGLIA FOTONICA

La corrente FV è prodotta solo da un flusso di fotoni con energia sufficiente ad eccitare l'elettrone facendolo passare dalla banda di valenza a quella di conduzione.

Questo valore è noto come Energia di soglia fotonica e corrisponde all'energia di gap E_g pari alla differenza tra E_v (energia di valenza) ed E_c (energia di conduzione) $\rightarrow E_g = E_v - E_c$.

E_g assume il suo valore massimo in corrispondenza dello zero assoluto ($0^\circ \text{ K} = -273^\circ \text{ C}$) e diminuisce con l'aumentare della temperatura.

In campo tecnico ci si riferisce alla temperatura standard di 300° K (27° C).

Per il Silicio l'energia di gap a 300° K vale $E_g = 1,12 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$)

La relazione di Plank $E = h \cdot c / \lambda = h \cdot f$ consente di calcolare la lunghezza d'onda della radiazione fotonica necessaria per raggiungere l'energia di soglia fotonica E_g .

Nel Silicio, solo i fotoni con lunghezza d'onda $\leq$ a $1,1 \mu\text{m}$ ovvero frequenze $\geq$ a 270 THz , sono in grado di eccitare gli elettroni di valenza e quindi innescare l'effetto fotovoltaico.

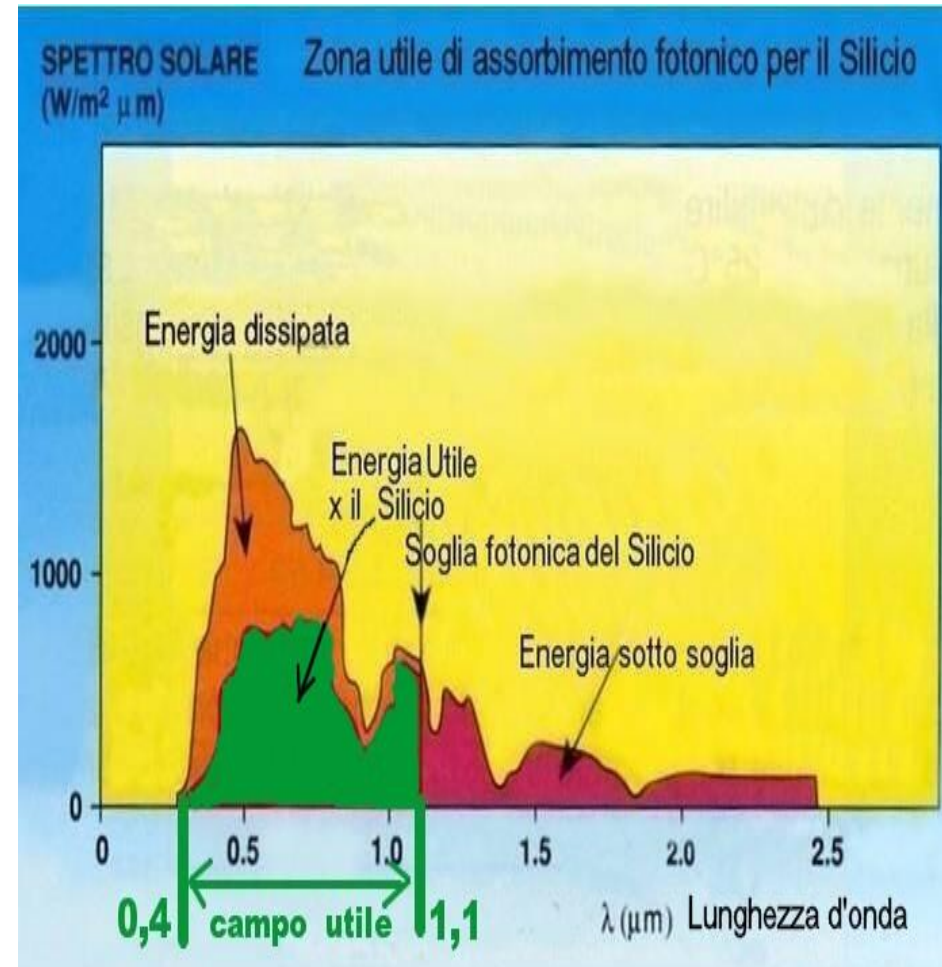
CONCLUSIONE

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

**l'energia utile è data dall'area verde, con un campo utile :
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**).

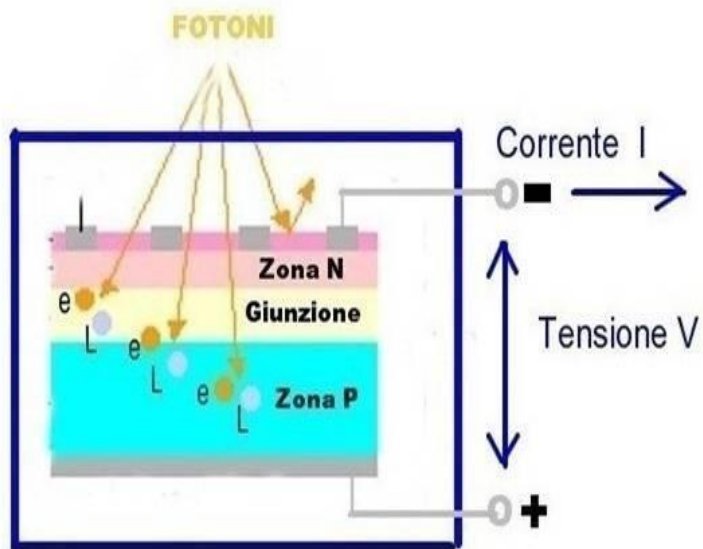
L'energia sotto soglia non concorre alla formazione delle coppie elettrone-lacuna (**zona rosa**).



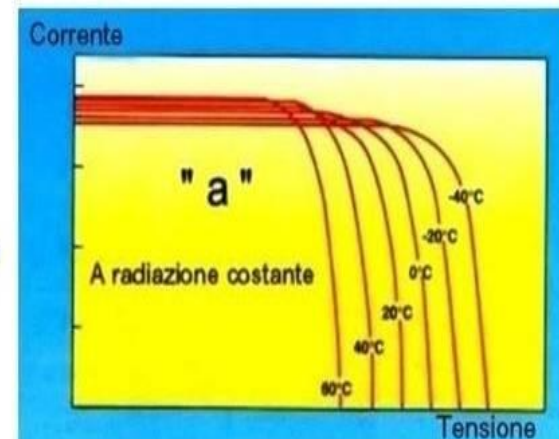
CARATTERISTICHE ELETTRICHE FOTOVOLTAICHE

La tensione generata e la corrente erogata dipendono da:

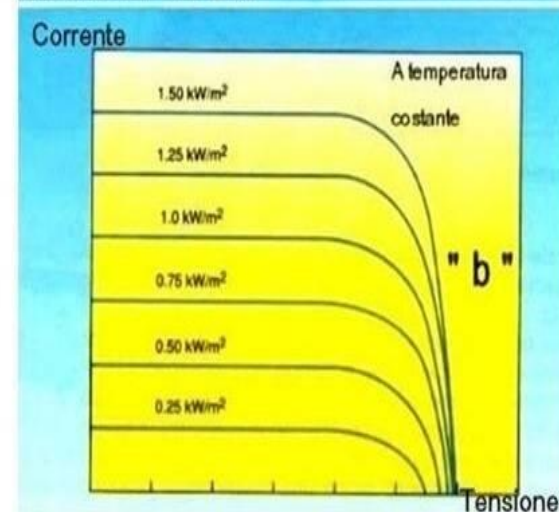
- Radiazione solare - Temperatura



Con radiazione standard massima (1 kW/m^2 a 25°C)
una cella di Monosilicio di 100 cm^2 fornisce circa :
 3 A con una tensione di $0,6 \text{ V} \rightarrow 1,8 \text{ Watt}$



Elaborato da Fonte Enel

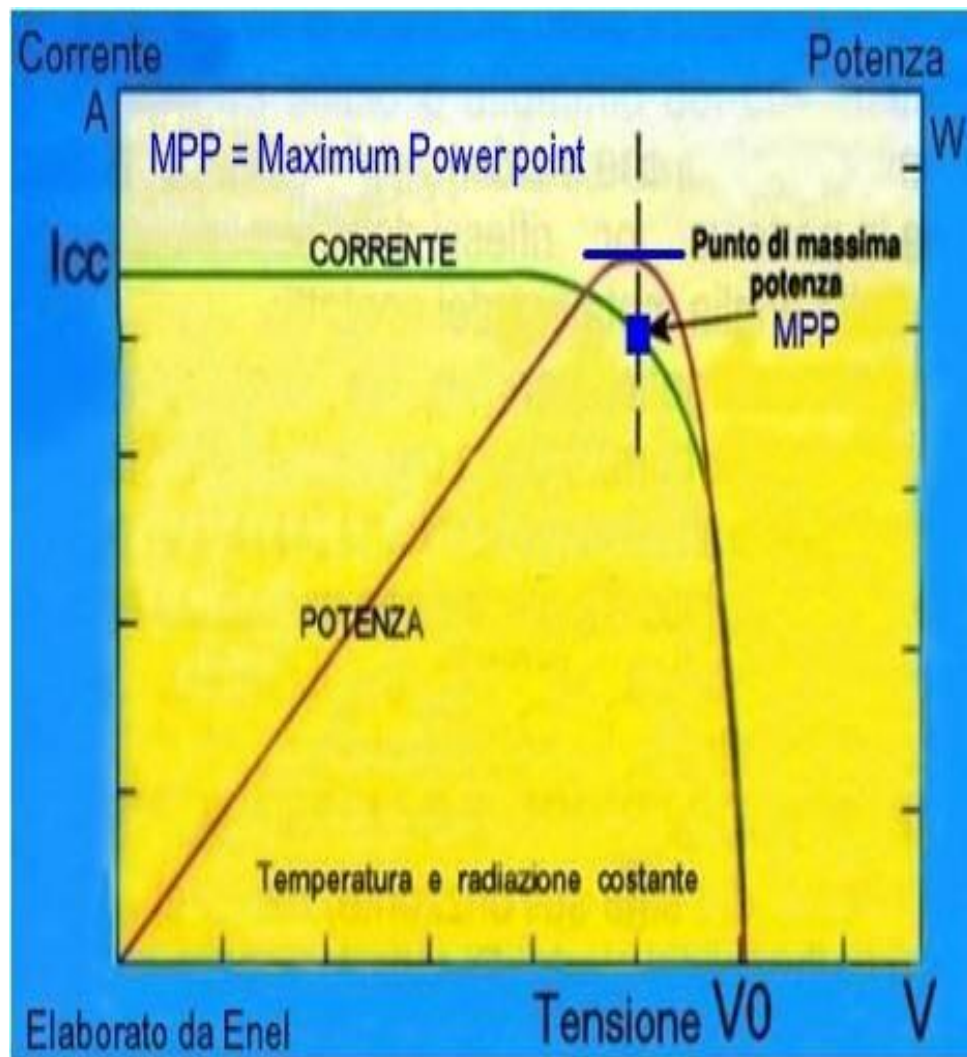


Condizione di massima potenza erogata (MPP)

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.



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:

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

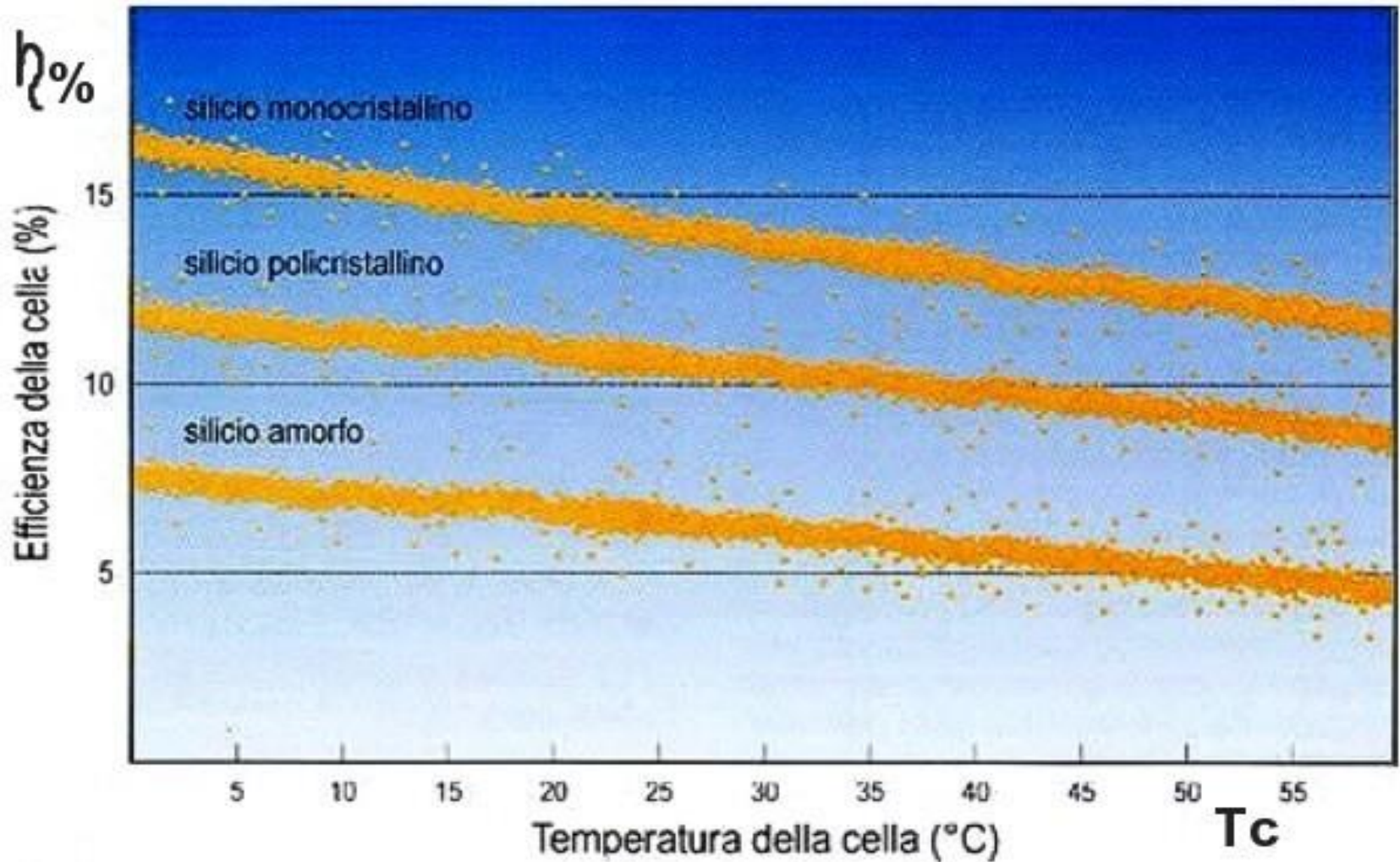
$P_{\max}$ = potenza massima erogata dal modulo FV (W/m^2),

S_c = superficie captante del modulo (m^2)

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

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

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



DALLA CELLA AL PANNELLO

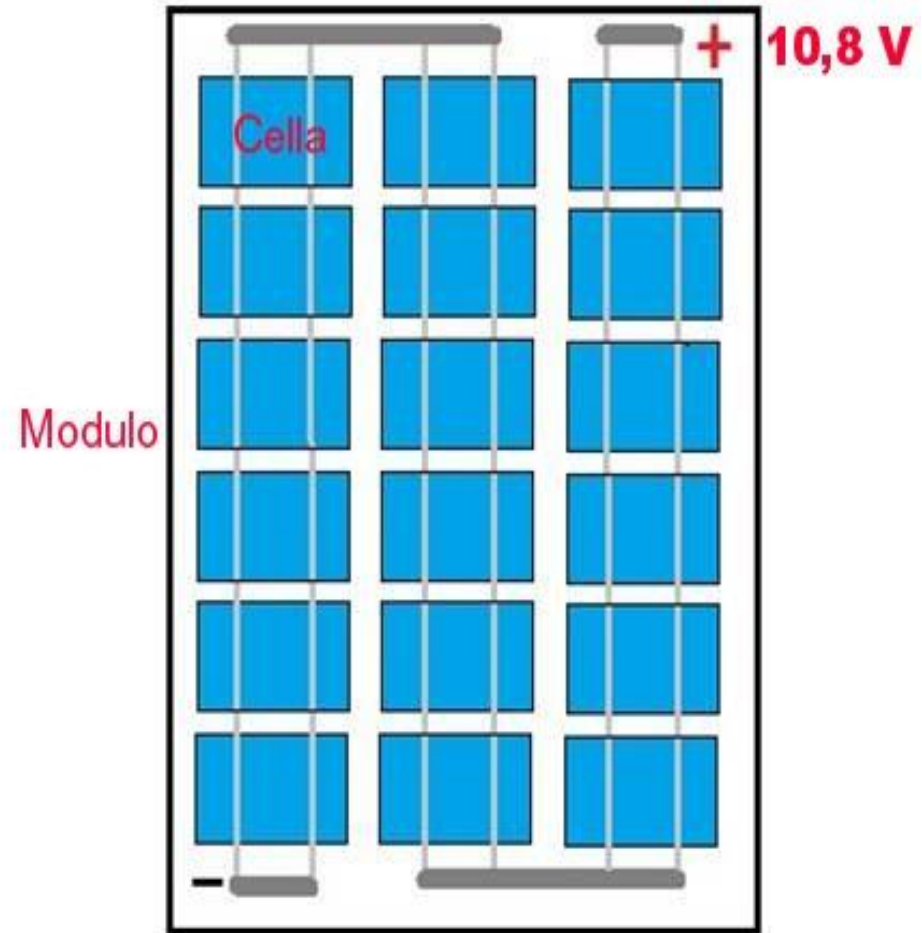
Una tipica cella solare al silicio ha una tensione nominale di ca 0,6 Volt.

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 $18 \times 0,6 = 10,8 \text{ V}$.**

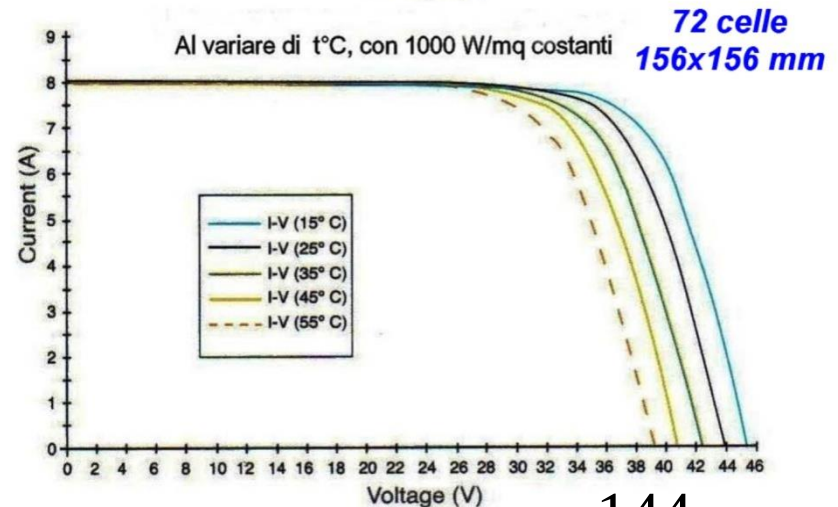
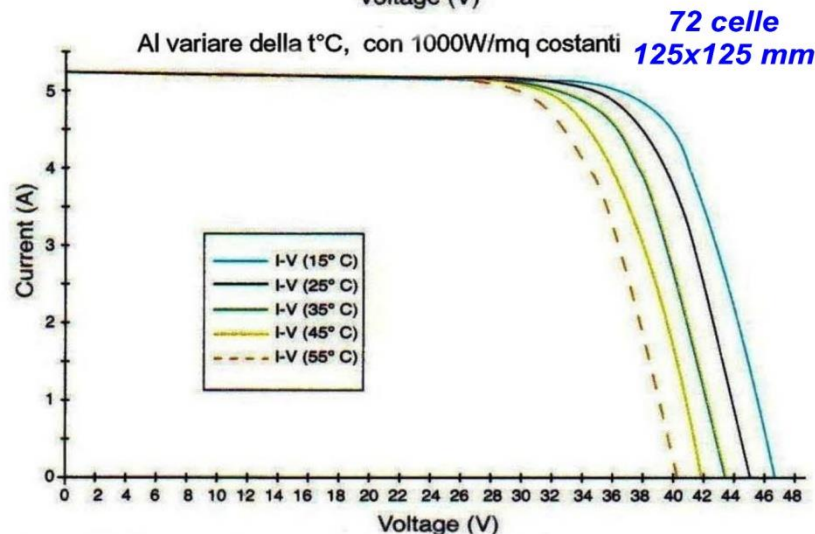
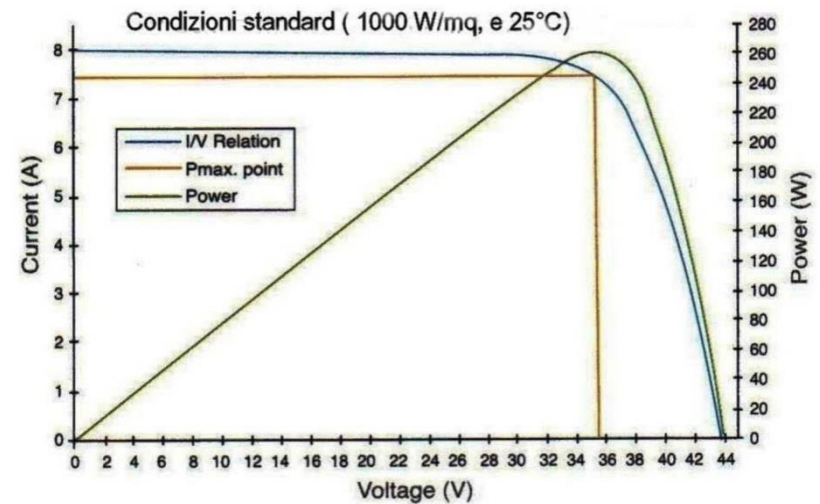
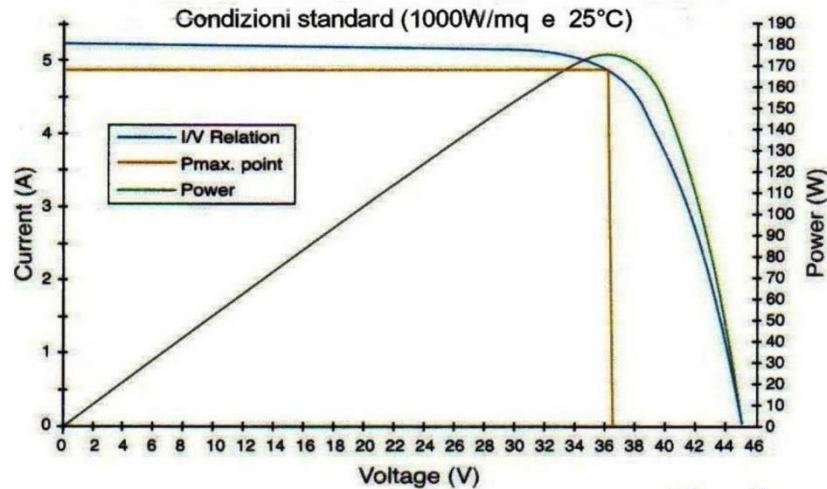
L'efficienza dei moduli è minore di quella delle celle di circa il 5-6 %



Pannelli (Moduli) FV

Le **caratteristiche elettriche** dei pannelli FV sono simili a quelle delle celle e si ricavano tenendo conto dell'area, del numero e collegamento delle celle .

Esempio per pannelli in Si Monocristallino con 72 celle (125x125mm, e 156x156 mm).



TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

Prima parte IL SILICIO

UTE
19 - 20

IL FOTOVOLTAICO : IERI OGGI DOMANI

Nonostante il periodo di recessione dell'economia occidentale, nell'ultimo decennio (2008-2018) il fotovoltaico ha registrato un notevole sviluppo in tutte le regioni mondiali e in special modo in Cina.

In Europa sul podio abbiamo la Germania, l'Italia e la Gran Bretagna tallonate da Francia e Spagna.

Costante aumento della potenza FV installata annualmente

→ conferma della tecnologia fotovoltaica come la forma di energia rinnovabile prioritaria anche a supporto crescente nella e-mobility.

→ tutte le più recenti previsioni confermano una continua crescita nei prossimi anni.

Il Silicio è il materiale tuttora predominante :

circa il 95% secondo i dati resi disponibili dal Fraunhofer Institute di Monaco (Ge) nel suo ultimo report del 2019.

TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

FAMIGLIE TECNOLOGICHE

in funzione dei materiali usati:

- 1- **Tecnologie tradizionali al Silicio**
consolidate da decenni
- 2 - **Nuove tecnologie** con materiali inorganici ed organici in continuo sviluppo per migliorare le efficienze, la durata e i costi di fabbricazione.

TECNICHE REALIZZATIVE

In funzione delle tecniche di captazione delle radiazione solare :

- **Monogiunzioni** (Monosilicio, Polisilicio)
- **Multigiunzioni** (Silicio, materiali inorganici, materiali organici)
- **Film sottili** (Silicio amorfo, nanocristallino, materiali inorganici, materiali organici)
- **Concentratori FV**

IL SILICIO E GLI ALTRI

Le Tecnologie al SILICIO nate per prime (la prima cella commerciale è del 1963 con Sharp, a parte le applicazioni spaziali) sono da tempo sostanzialmente consolidate . Attualmente in corso studi e investimenti per ridurre sempre di più i costi e migliorare i parametri funzionali (efficienze- affidabilità e durata).

Il Silicio è la materia base dell'elettronica in tutti i campi compreso Informatica, telematica e Fotovoltaico.

Domina di gran lunga il panorama produttivo a livello mondiale e le sue caratteristiche sono prese come riferimento di confronto e qualificazione in tutte le tecnologie alternative.

NUOVE TECNOLOGIE

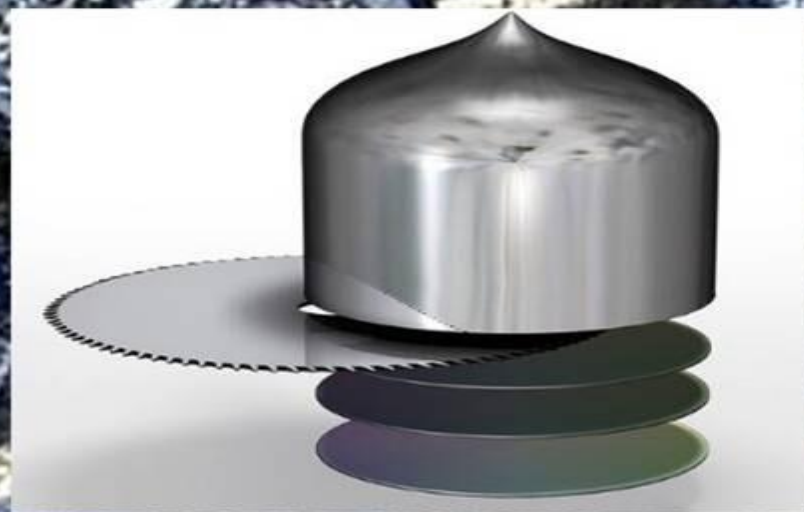
- RS continua e diversificata di nuovi materiali con parametri funzionali sempre più vicini a quelli del Silicio
- contenere i costi di fabbricazione e utilizzo del FV in sempre più ampi settori .

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			

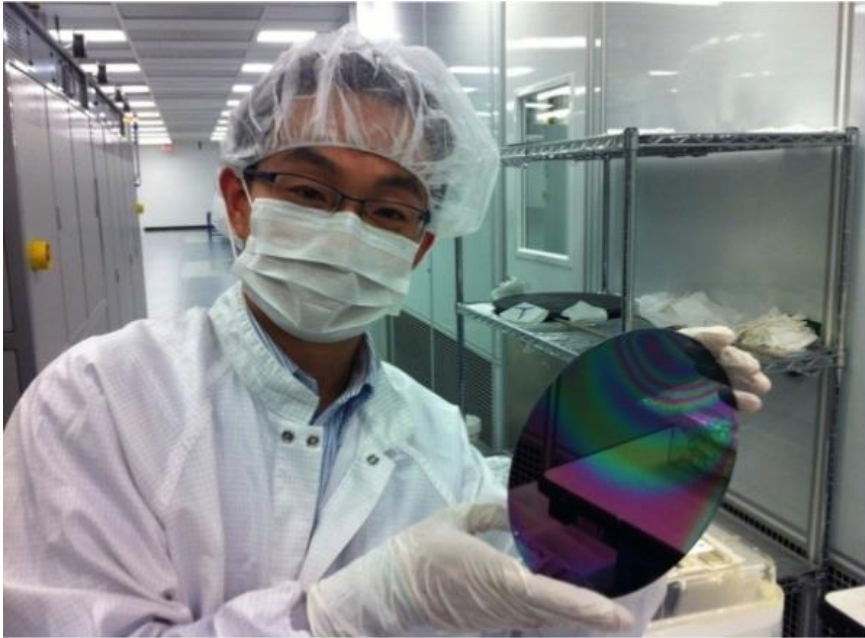
**TARGET DI EFFICIENZA RAGGIUNTI A LIVELLO RS
DALLE CELLE FV NEL 2018
(fonte Fraunhofer report 11-19)**

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	→ 47,1 %
Film sottile Polimeriche	13 %
Film sottile Perovskite + Grafene	20,9 % → 25,2 %



TECNOLOGIA DEL SILICIO

Massimi livelli di pulizia e sterilizzazione degli ambienti



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.

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

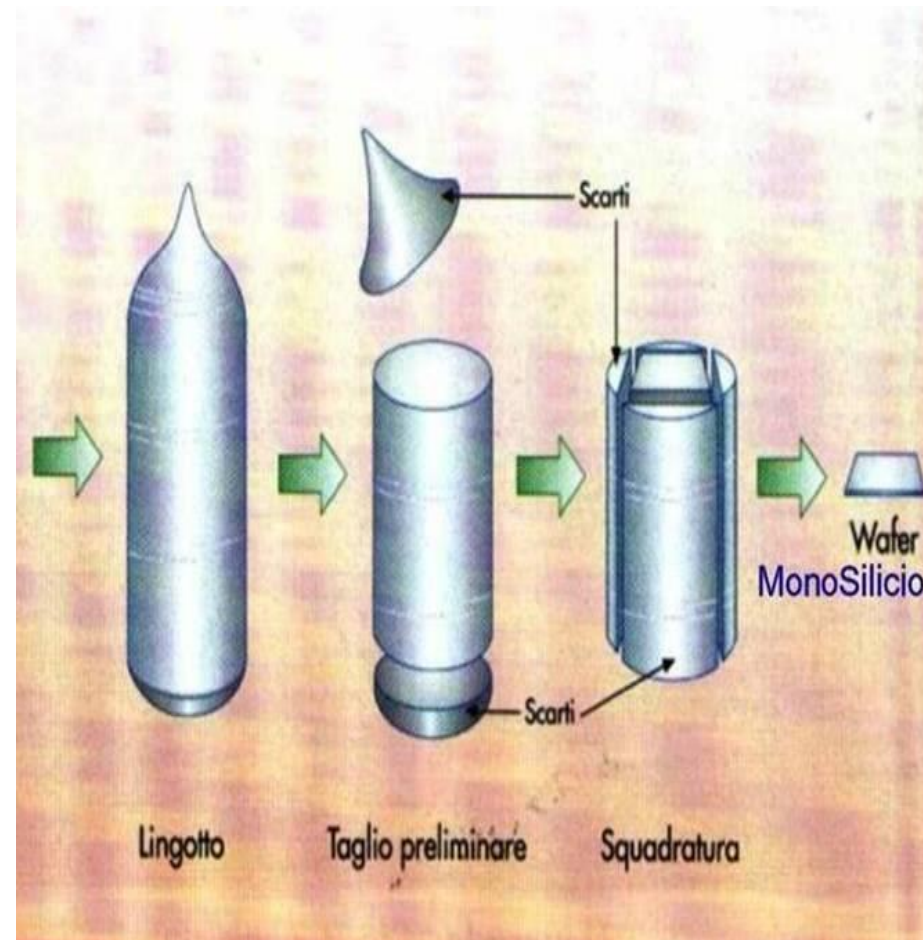
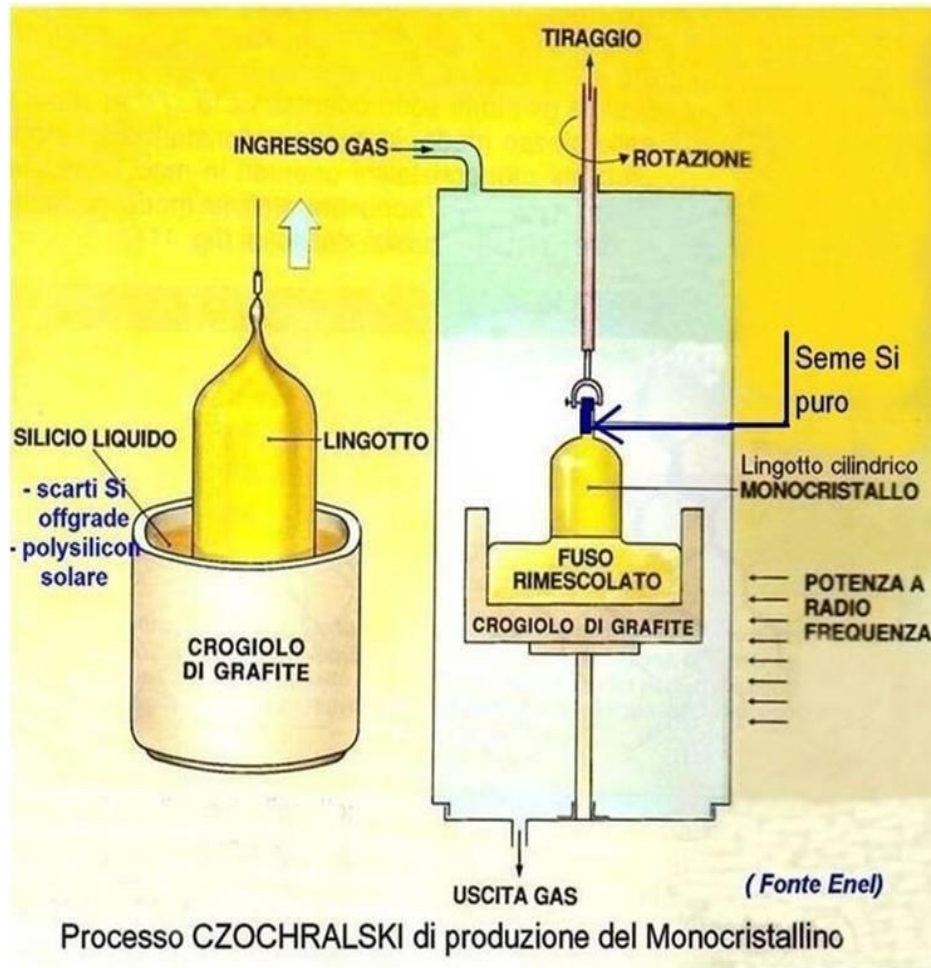
3A- Monocristallino :

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

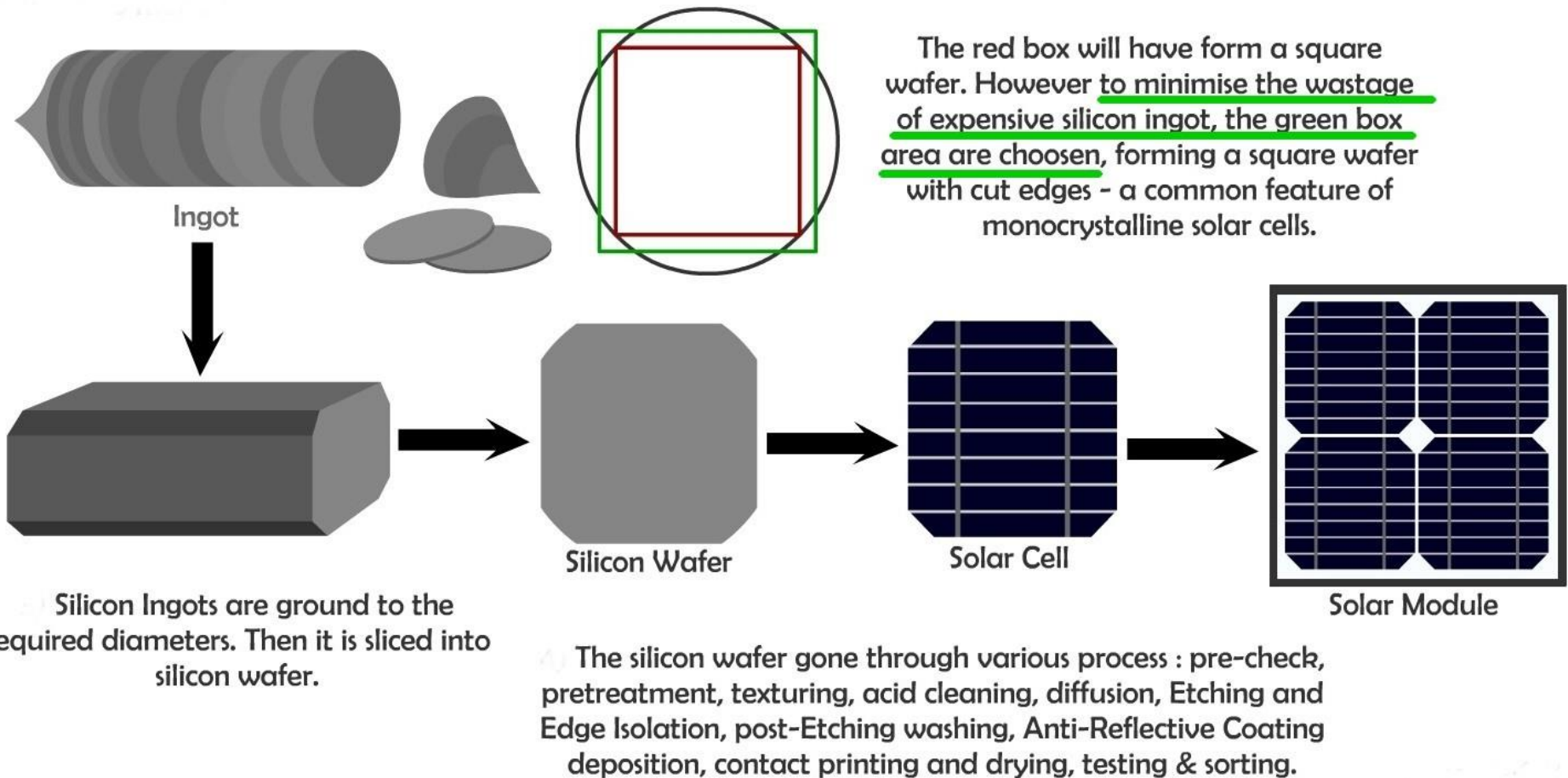
3B-Policristallino :

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

PRODUZIONE di Wafer MonoSilicio



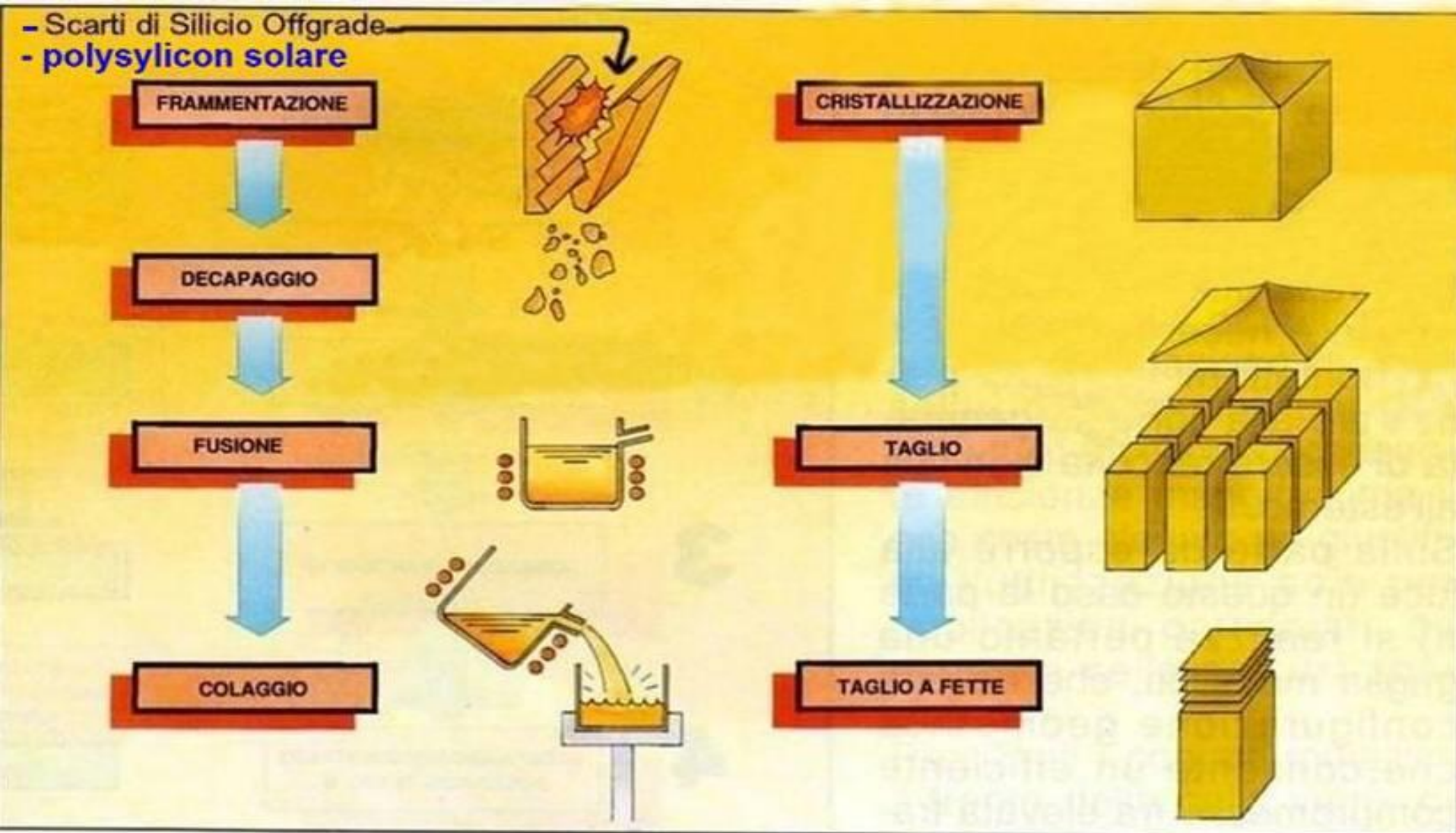
Ottimizzazione wafer MonoSilicio



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



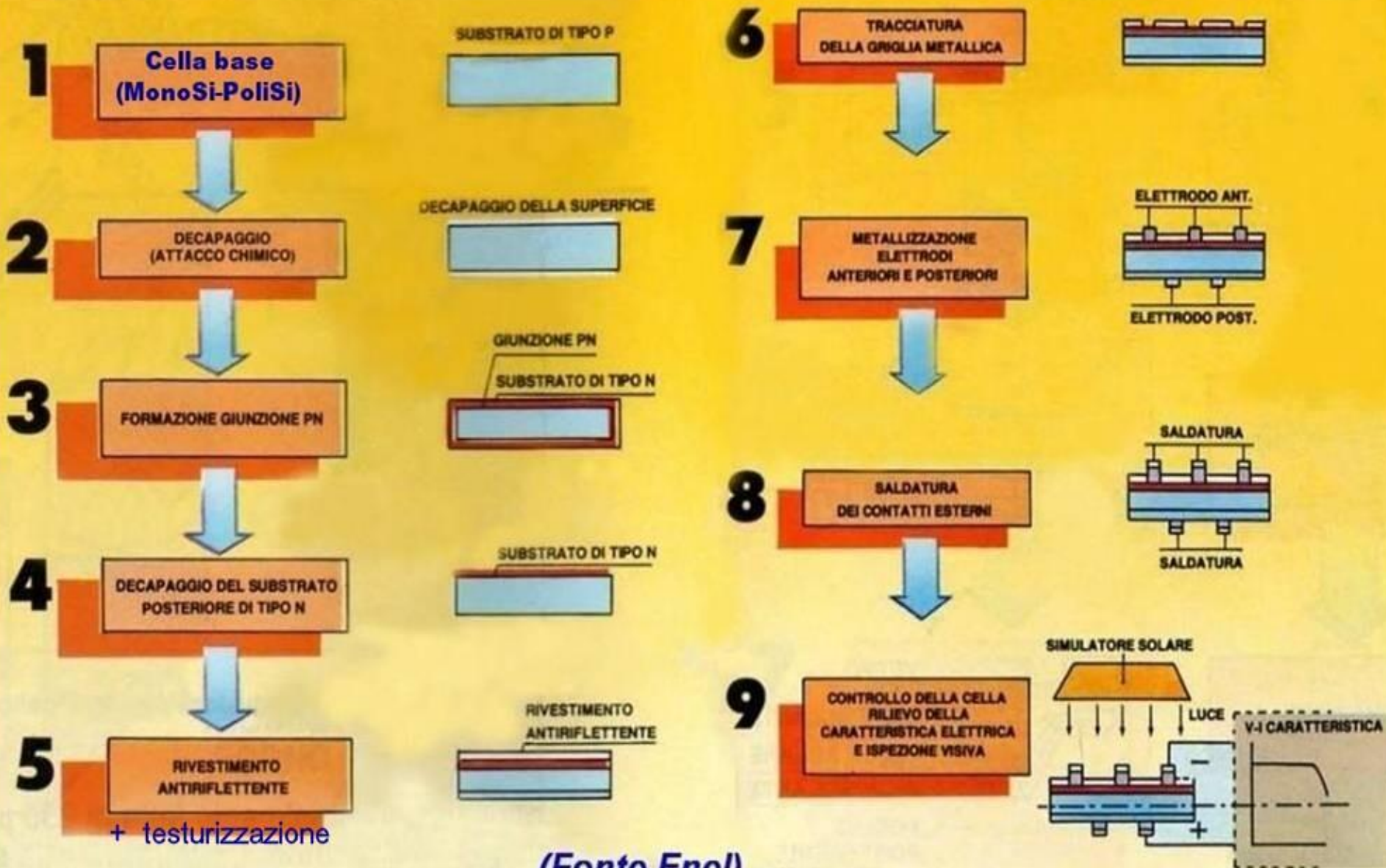
Processo di produzione del silicio policristallino: metodo Casting

(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

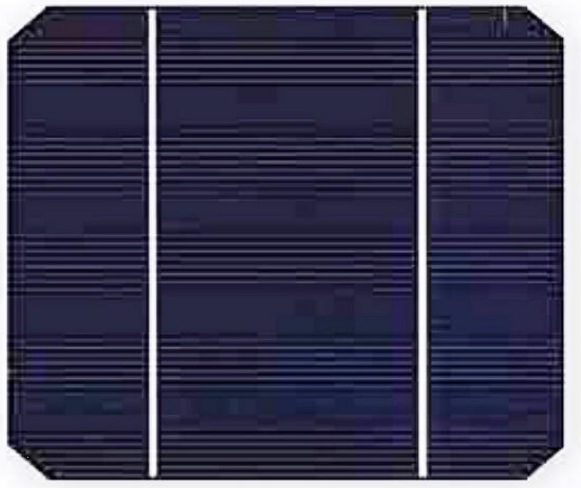


(Fonte Enel)

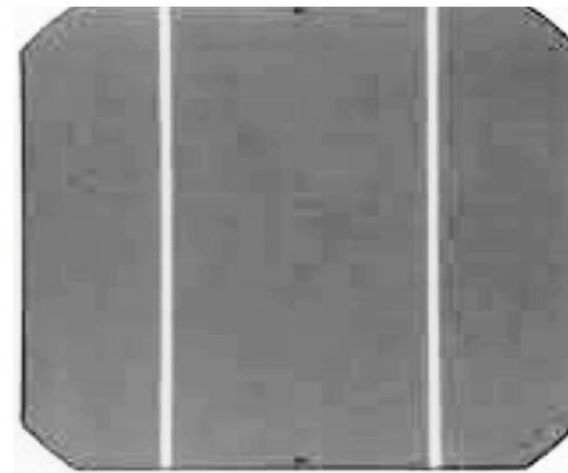
POLARITÀ DEI CONTATTI

1-Il lato frontale (scuro o blu) è quello **negativo** e deve essere illuminato dal Sole

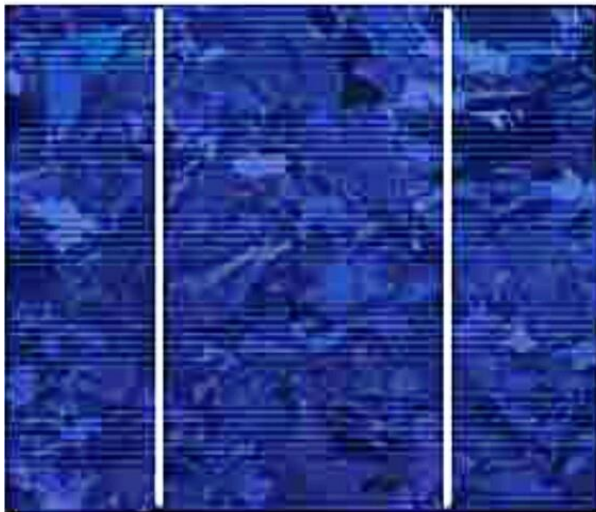
2- Il lato posteriore (argenteo chiaro) è quello **positivo** e deve essere oscurato



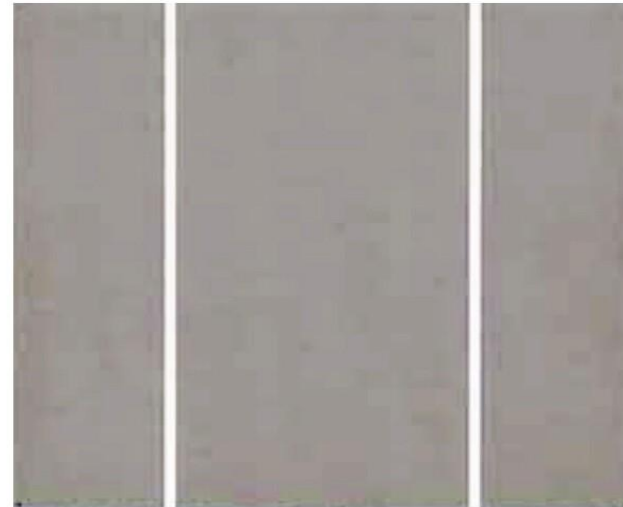
FRONTE (Polo Negativo)

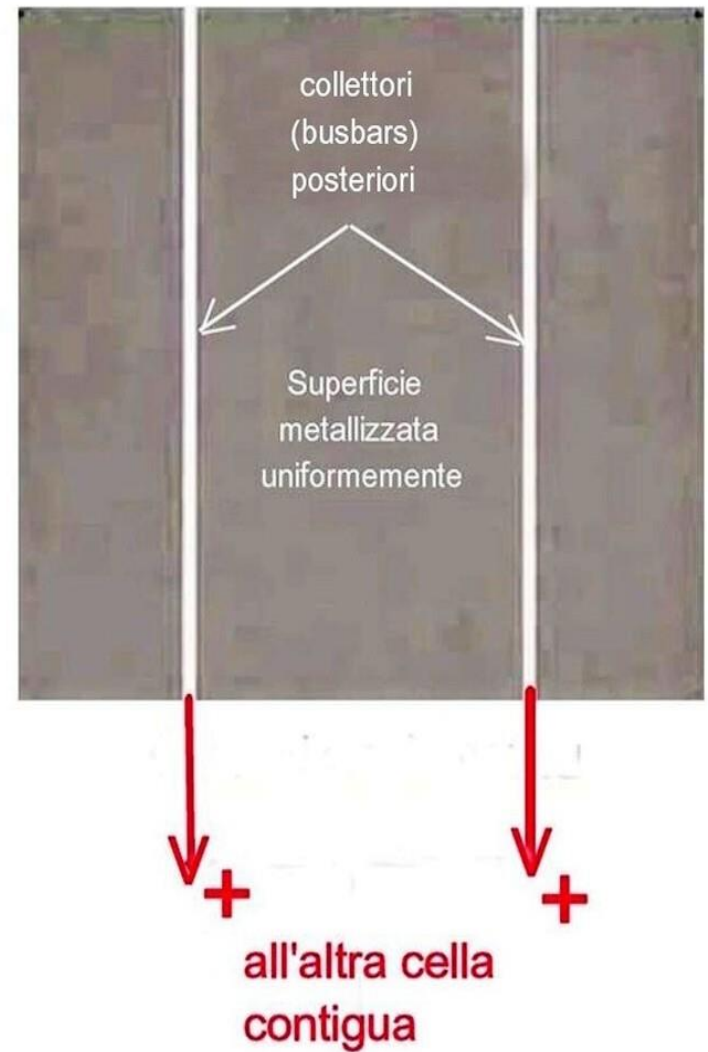
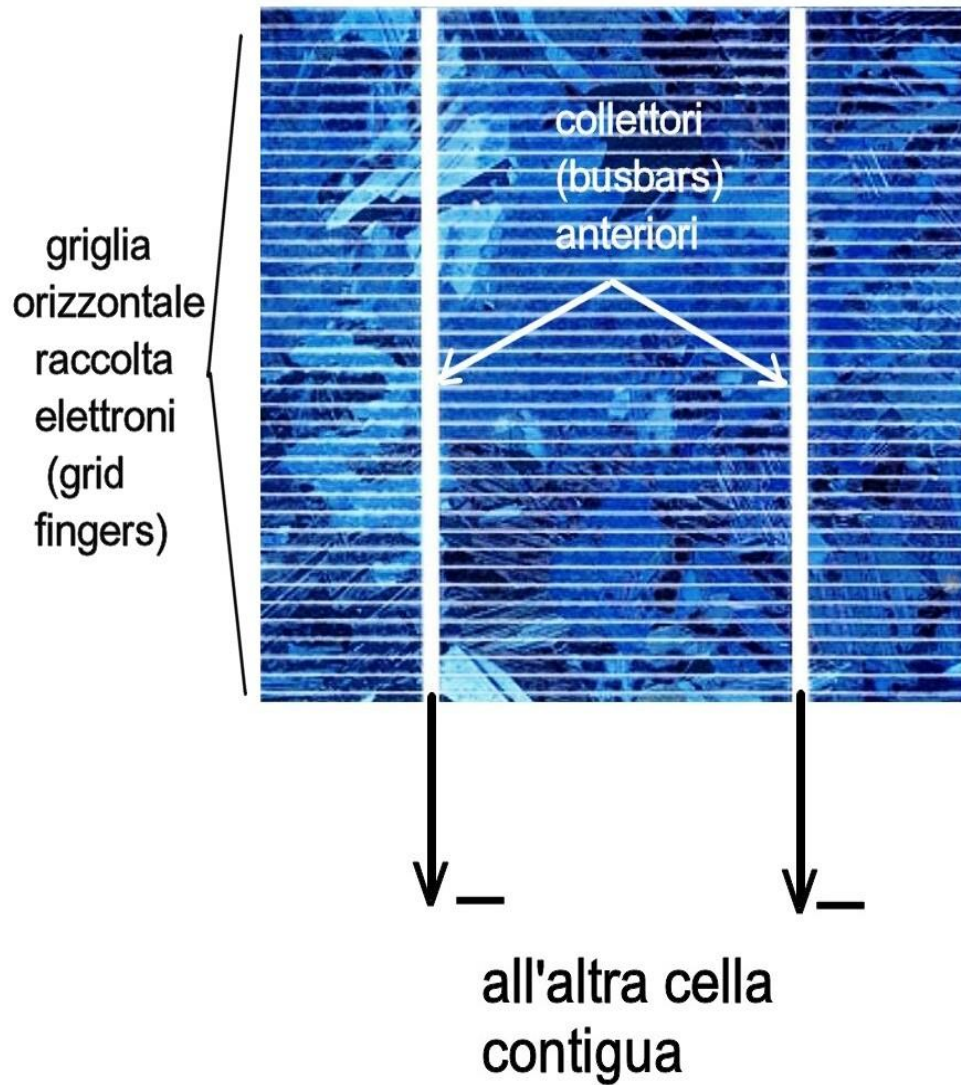


RETRO (Polo positivo)



CELLA
POLISI





MODULI DI SILICIO

Cella
MonoSi

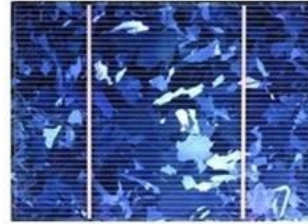


Lingotto cilindrico --> spigoli arrotondati



Modulo MonoSi

Cella
PoliSi



Parallelepipedo --> spigoli vivi



Modulo PoliSi



Modulo Silicio Amorfo

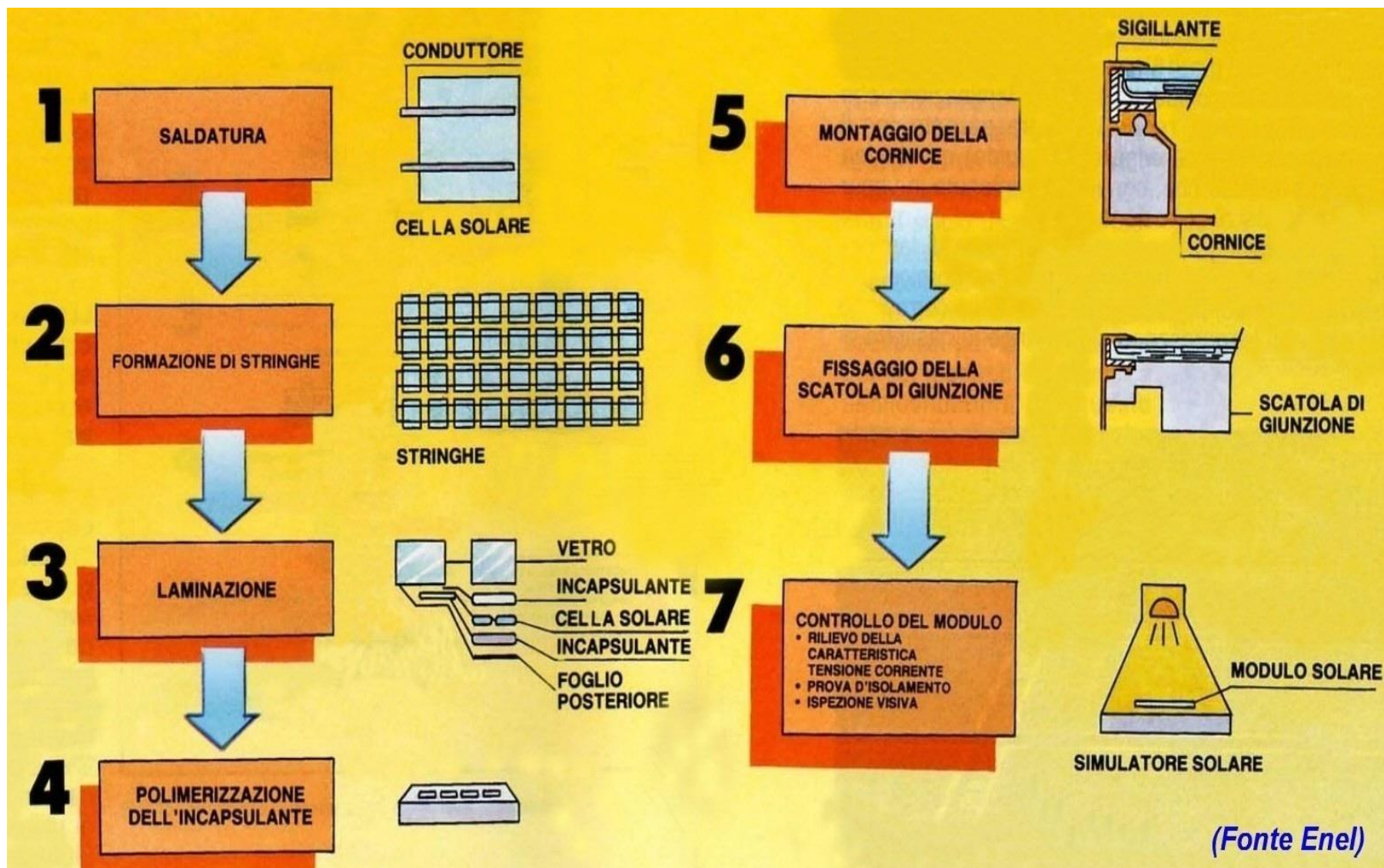


Nastro Si Film sottile

COME E' FATTO IL MODULO FV

- Assemblaggio delle celle FV in una struttura modulare impiegata negli IFV
modulo FV (chiamato anche “ **pannello**” nella pratica degli impianti)
- **Struttura base del Modulo FV** : pannello piano costituito da due lastre in materiale plastico nel quale sono incapsulate le celle FV.
Celle collegate **in serie** con sottili **strisce metalliche (ribbon)** che vengono raccolte , sul retro del pannello, in scatole di connessione (**connection box**) dove sono inseriti i **diodi di protezione** che servono ad evitare che l'energia elettrica vada nelle eventuali celle in ombra le quali si comportano come semplici resistenze e quindi si surriscalderebbero → riaschio di danni irreversibili per il modulo FV.
Superiormente il modulo viene ricoperto da una **lastra di vetro temperato** e perfettamente trasparente alle radiazioni .
- Esternamente** vi è una cornice in metallo (alluminio) con lo scopo di proteggere e rinforzare il modulo e di permetterne il fissaggio attraverso le staffe.

FLUSSO TIPO PRODUZIONE MODULO FV



POTENZA DI PICCO DEL MODULO FV

- Misure in condizioni di funzionamento standardizzate a livello mondiale, che prevedono un irraggiamento di 1.000 watt al metro quadrato sul piano dei moduli in **condizioni di radiazione solare STC** (livello del mare, zenit locale, 25 ° C).
- In **Laboratorio** s'impiega un **simulatore solare** che soddisfa tutti i requisiti richiesti dall'irraggiamento standard.
- Dai risultati si ottiene la curva caratteristica I-V corrente/tensione, da cui si ricava quella della potenza che fornisce **l'effettiva potenza massima del modulo da** confrontata col **valore di picco Wp** dichiarato dal Costruttore nelle specifiche tecniche.

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.

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 - G
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

Top-10 Module Suppliers in 2018

Ranking	Producer	
1	JinkoSolar	Cina
2	JA Solar	Cina
3	Trina Solar	Cina
4	LONGi	Cina
5	Canadian Solar	Canada
6	Hanwha Q-Cells	S.Korea + Ge
7	Risen Energy	Cina
8	GCL-SI	Hong Kong
9	Talesun	Cina
10	First Solar	USA

TOP 200 Costruttori mondiali pannelli FV

fonte Every Solar Thing

Nazione	Produttori	% sul totale
CINA	108	54,5
GERMANIA	17	8,6
USA	11	5,6
GIAPPONE	8	4
INDIA	8	4
KOREA	5	2,5
TAIWAN	5	2,5
CANADA	4	2
ITALIA	4	2
FRANCIA	3	1,5
SPAGNA	3	1,5
ALTRI	22	11,1
TOTALE	198	

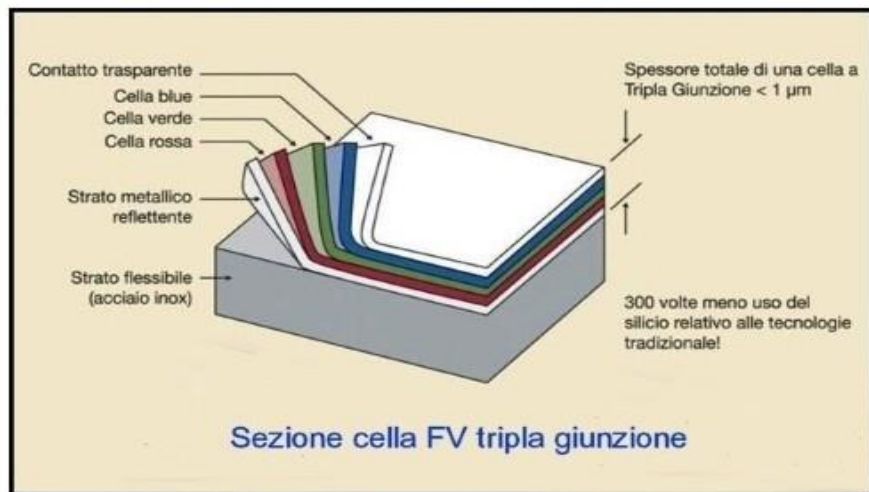
TECNOLOGIE FOTOVOLTAICHE

*Seconda parte
le nuove Tecnologie*

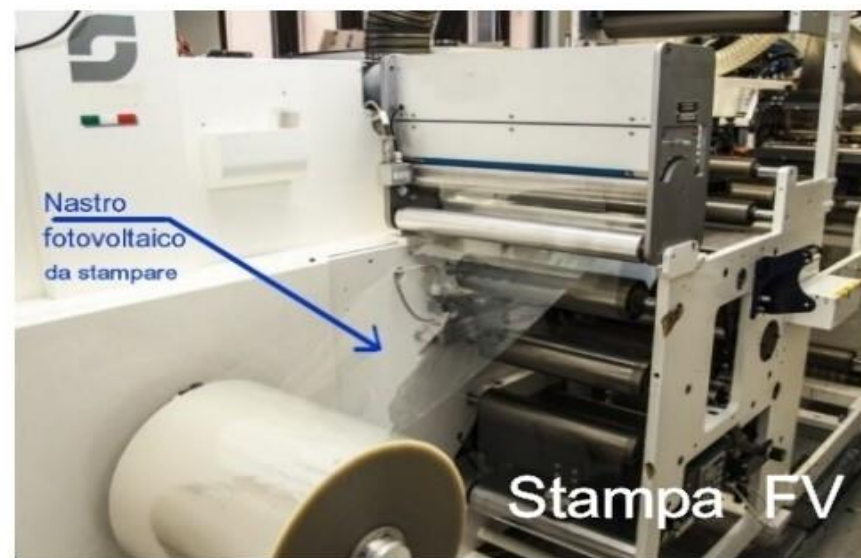
UTE
19 - 20

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	Poli meriche	Pigmenti Colo ranti	Perovskite + Grafene
Polisilicio monogiunzione	CdTE Cadmio-Tellurio			
Silicio Amorfo Film sottile	CIS Rame Indio Selenio			
Concentrazione Ibrido FV+Termico	CIGS Rame Indio Gallio Selenio			



NUOVE TECNOLOGIE FV



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

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

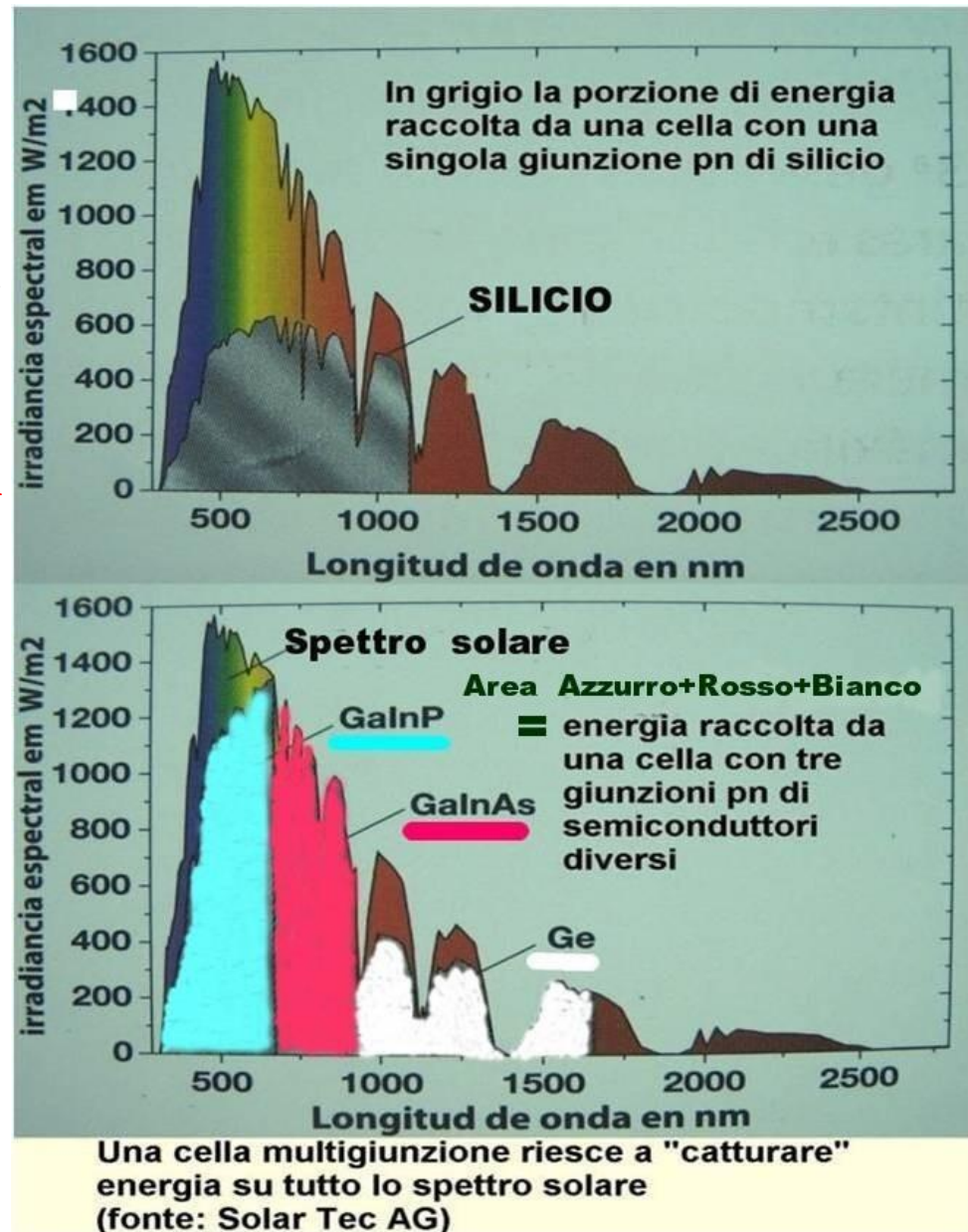
CELLE FV MULTIGIUNZIONE

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



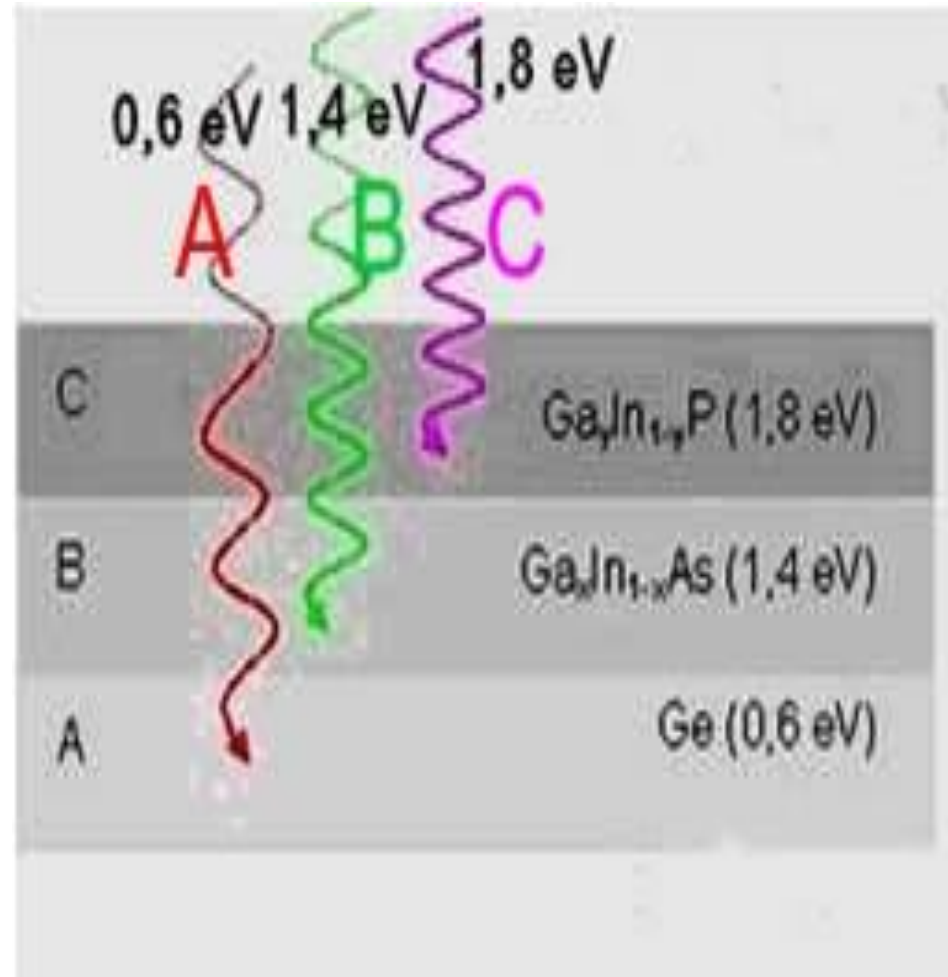
Principio di funzionamento della tripla giunzione

- **strato A** Germanio (A) (GAP 0,6 eV)
- **strato B** Arseniuro di Gallio e Indio (GAP 1,4 eV)
- **strato C** Fosfuro di Gallio e Indio (GAP 1,8 eV)

I fotoni con **energia 0,6 eV** attraversano gli strati B e C e vengono assorbiti solo dallo strato A dove generano elettroni/lacune.

In modo analogo, i fotoni con **energia 1,4 eV** attraversano C e vengono assorbiti da B.

I fotoni con **energia 1,8 eV** vengono invece direttamente fermati e assorbiti dallo strato C.



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)

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 prima 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

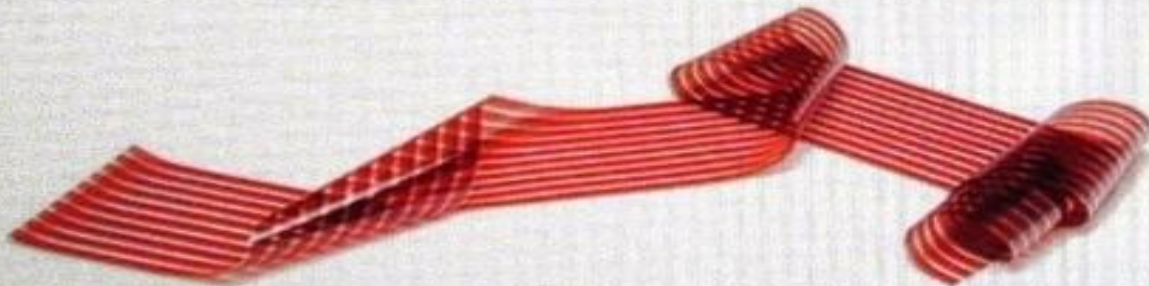
2- celle FV organiche → materiale fotoattivo costituito da coloranti organici.

Vantaggi :

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

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**

Printed Electronics nel Fotovoltaico (tecnologia PEPV)

In questi ultimi anni si sta sviluppando una tecnologia mista che vede notevoli sviluppi ed applicazioni .

Si tratta della elettronica stampata che utilizza inchiostri paste fotovoltaiche per realizzare pannelli FV flessibili e altri dispositivi fotovoltaici.

Dunque **connubio** tecnologico tra **paste fotovoltaiche** (→ inchiostri) che utilizzano materiali a nanoparticelle e le tecnologie consolidate delle **macchine di stampaggio**.

Le nuove tecnologie PEPV

Le nuove tecnologie PVPE (Photovoltaic Printed Electronics) utilizzano paste e inchiostri fotosensibili che vengono impiegati nelle macchine di stampa a ciclo continuo (nastri flessibili, ecc....).

Si aprono così nuovi campi applicativi in parallelo a quello tradizionale FV (produzione di energia elettrica).

Fermo restando che tali tecnologie potranno essere impiegate anche per la produzione dei tradizionali pannelli FV.

I settori applicativi della PEPV

Tra i moltissimi settori applicativi possiamo qui ricordarne alcuni tra i più interessanti come potenziali sviluppi di mercato:

- Pannelli FV flessibili in continuo e a nastri
- Pensiline, tegole, tende FV
- Serre FV che garantiscono traspirazione
- Applicazioni al Tessile
- Applicazioni a pannelli pubblicitari
- Domotica residenziale

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 come fotoni infrarossi che sono riemessi dal terreno sotto forma di calore durante la notte.

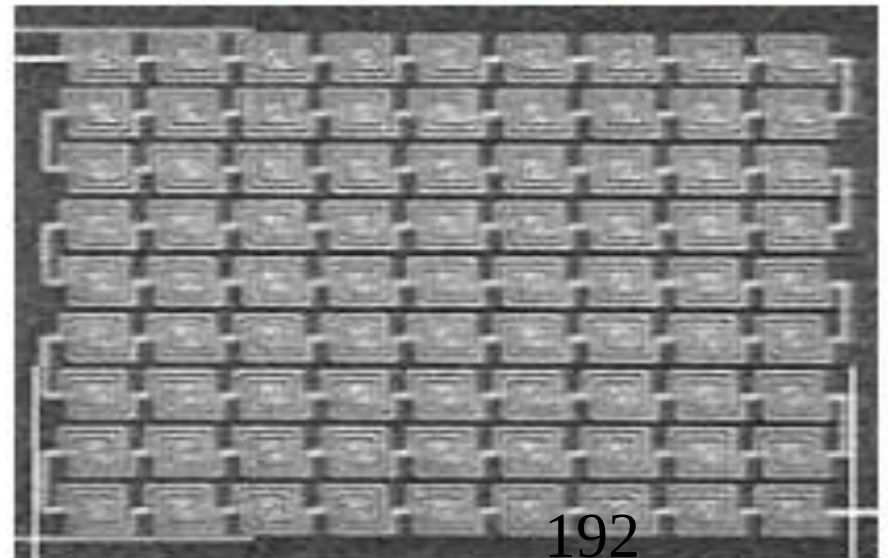
Basta raccogliervi e convertirli in energia elettrica.

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 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 sopra fogli flessibili di plastica → funzionano sia di giorno che di notte.

Costi elevati compensati da alta efficienza (circa il 45% dell'energia fotonica infrarossa è convertita in energia elettrica). **Limite tecnologico** : La lunghezza d'onda dei fotoni infrarossi genera una corrente alternata con 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.

Pannello ibrido fotoelettrosintetico

Un IFV può funzionare **anche di notte** simulando il processo naturale della **fotosintesi** delle Piante → ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{energia solare} \rightarrow \text{glucosio} + \text{ossigeno}$).

Un risultato sperimentale è stato raggiunto da un **team della University of North Carolina (2014)** con celle solari in grado di produrre energia anche di notte → conversione di parte della luce solare in combustibile (idrogeno) .

La speciale cella **fotoelettrosintetica colorante sensibilizzata** :

- in parte funziona come una normale cella FV
- in parte viene utilizzata per creare una reazione chimica nell'acqua con conseguente produzione di **idrogeno** da utilizzare in un secondo tempo come combustibile.

Ogni cella è formata da due componenti:

- **molecole** che assorbono la **luce solare** in entrata e avviano un processo di assorbimento degli elettroni dall'**acqua**
- **nanoparticelle** che prendono gli elettroni e li utilizzano per produrre idrogeno.

L'ossigeno contenuto nell'acqua evapora, mentre l'idrogeno rimane immagazzinato e utilizzabile come combustibile per produrre energia anche di sera o con il cielo nuvoloso.

Pannelli FV Ibridi

Da anni si stanno sviluppando tecnologie alternative al FV tradizionale con l'obiettivo di sfruttare al meglio tutta la radiazione solare.

Riporto , tra le tante, due tipologie tipiche e molto interessanti:

1 - Tecnologia del solare “FV-termico ” (TPV) già consolidata.

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 si riscalda acqua contenuta in uno scambiatore di calore interno al pannello.

2 – Tecnologia del solare con cella fotoelettrosintetica in fase di sviluppo

Si tratta di un sistema che di giorno, oltre a produrre elettricità, riesce a produrre anche **gas idrogeno** che ricarica le celle FV in modo da farle funzionare anche di notte.

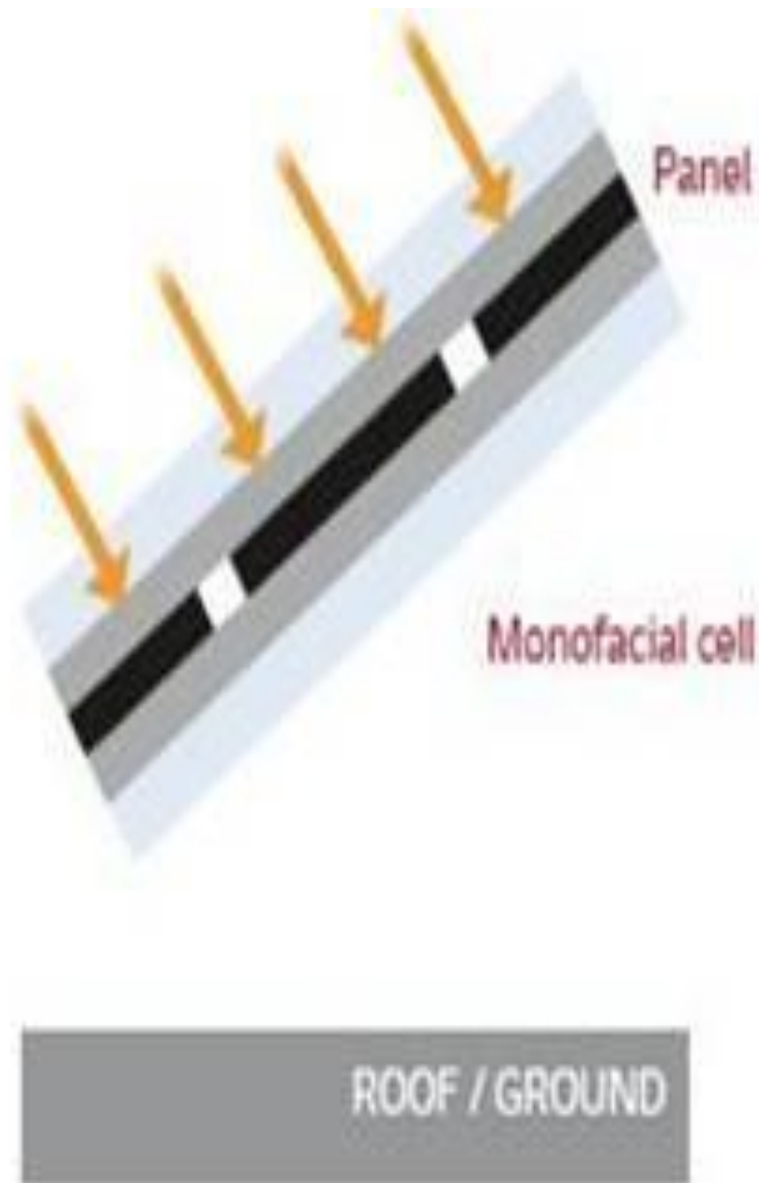
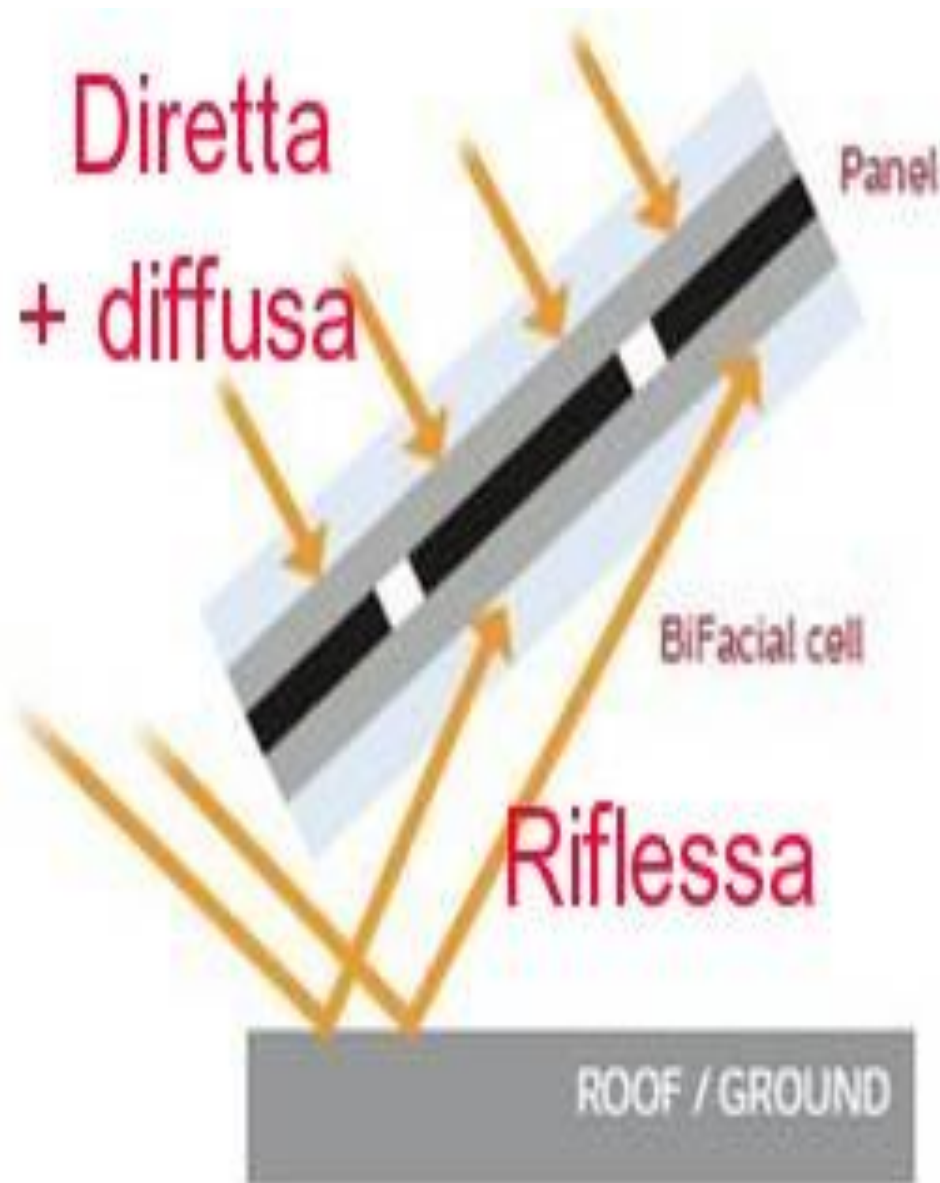
Pannello TPV

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*



Pannelli bifaccia



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.

Il progetto RS europeo sul Graphene (da Wikipedia)

Graphene Flagship è un progetto di ricerca sul Grafene dell'Unione Europea avviato nel 2013 con un budget di 1 miliardo di euro distribuito Su 10 anni. (→ 2023).

→ Unione e coordinamento delle attività di RS a livello europeo.

Attraverso un consorzio accademico-aziendale, la ricerca coprirà l'intera catena del valore dai materiali di produzione , ai componenti e alla integrazione di sistema e ponendosi obiettivi specifici e mirati per esplorare tutte le molteplici proprietà del grafene.

Questo materiale a 2D con potenziali applicazioni in molti campi tra cui il fotovoltaico di terza generazione con la perovskite.

Struttura del Graphene Flagship Project

Grazie alle nuove partnership il consorzio comprende dal 2014 oltre 140 organizzazioni di 23 Paesi, riuniti nell'impresa collettiva di trasferire il grafene e i relativi materiali compositi dai laboratori accademici alle applicazioni di uso quotidiano.

L'Italia è già capofila nello sviluppo di aree importanti del progetto Flagship Grafene tra cui le ricerche sui materiali compositi e le applicazioni in campo energetico .

Tutti i partecipanti italiani sono 23 tra università , aziende, istituti di ricerca tra cui L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

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 :

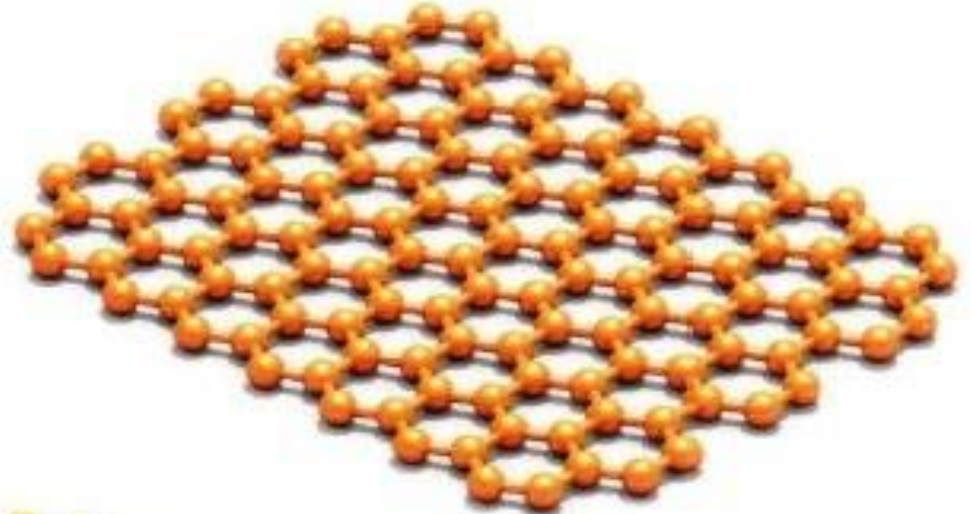
Il grafene, materiale 2D del futuro, ha potenzialmente moltissime applicazioni, specialmente in campo elettrico.-

- 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

Strutture allotropiche del Grafene



Nanotube



Graphene



Diamond



Graphite



Fullerene

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 2019 – 2020

waitingman@libero.it

