

ENERGIA FOTOVOLTAICA - Elementi e notizie

Energia solare del deserto per illuminare il mondo, la soluzione ai disastri ambientali. Il progetto si chiama Desertec. Un'idea che promette di dare luce al pianeta sfruttando una porzione desertica grande come la Lombardia.

Gerhard Knies, il presidente del Consiglio di vigilanza del consorzio:

"In meno di sei ore i deserti ricevono più energia dal sole di quanto l'umanità ne consuma in un anno".

(n.d.r.: con le tecnologie attuali non siamo in grado di sfruttarle al 100% ma con un rendimento del 15%)



Si parla di 20-40 anni per portare a termine l'intero progetto – ma fattibile anche se serviranno ingenti capitali per poterla percorrere.

Il principio cardine di Desertec si fonda sullo sfruttamento dei raggi solari nelle zone desertiche che verranno trasformati, grazie all'uso di grandi impianti, in vapore che, a sua volta, attiverà una turbina che genererà elettricità come una comune centrale. I numeri prospettati dal consorzio Desertec, responsabile del progetto e formato da 12 aziende, sono davvero impressionanti:

basterebbe coprire con campi collettori tre millesimi di area desertica, per soddisfare la domanda energetica mondiale equivalente a c.a. 18 mila TWh/anno (n.d.r.: di energia elettrica).

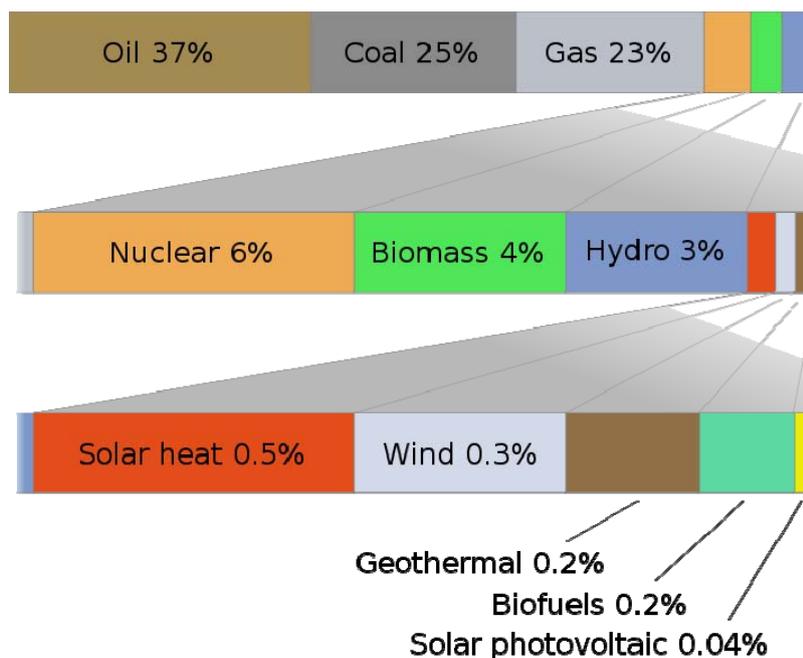
Con un lavoro costante volto alla costruzione della rete di collegamento sottomarina destinata al trasporto di tutte le forme di energia non inquinante, la rete Desertec potrebbe, con un'area di impianti estesa quanto la Lombardia (23.900 Km². n.d.r.), dare accesso sufficiente all'energia (elettrica) al 90 per cento della popolazione mondiale. Nessun problema neanche per quanto riguarda le distanze dal momento che le linee moderne di alta tensione che si useranno manterranno il livello delle perdite di energia sotto il 3% per ogni 1000 km.



Sin dall'inizio della rivoluzione industriale, il consumo di energia nel mondo è cresciuto ad un ritmo sostenuto. Nel 1890 il consumo di carburanti fossili eguagliava approssimativamente la quantità di combustibile da biomassa che veniva bruciato nelle case e dall'industria. Nel 1900, il consumo di potenza globale ammontava a 0,7 Terawatt.

Secondo stime del 2006 fatte dall'agenzia americana EIA (Energy information Administration del governo USA), i 15 TW stimati come potenza totale erogata nel 2004 (divenuti 16,4 nel 2008, 17,2 nel 2010 e previsti in 18 TW nel 2012) si dividono come indica la tabella sottostante, con i combustibili fossili che forniscono 86% dell'energia consumata dal mondo:

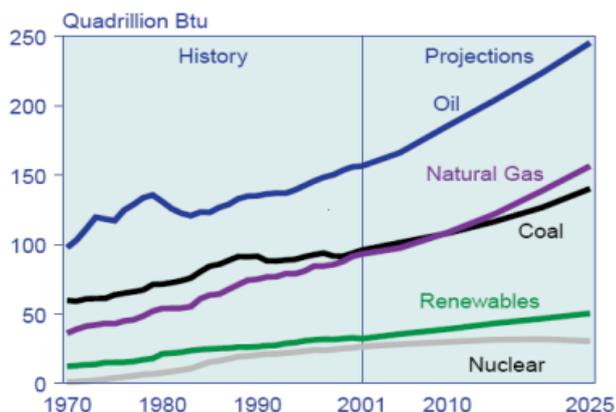
| Tipo combustibile | TW |
|----------------------------------|-----------|
| Petrolio | 5,6 |
| Gas naturale | 3,5 |
| Carbone | 3,8 |
| Idroelettrico | 0,9 |
| Nucleare | 0,9 |
| Geotermia, eolico, solare, legno | 0,13 |
| Totale | 15 |



Utilizzo dell'energia nel mondo, con tre bande di magnitudine crescente per rendere visibili alcune fonti molto esigue

NB: la misura dei consumi in Terawatt si riferisce al consumo istantaneo mentre quella in Terawatt/ora si riferisce al consumo complessivo nel periodo di riferimento.

Ad esempio 1 TW equivale ad un consumo annuale di 8760 TWh ($1 \times 24 \times 365 = 8760$)



Consumo di energia mondiale, 1970-2025
Fonte: International Energy Outlook 2004



Energia rinnovabile disponibile. Il volume dei cubi rappresenta la quantità di energia geotermica, eolica e solare disponibile in TW, ricordando che soltanto una piccola parte può essere recuperata. Il piccolo cubo rosso mostra proporzionalmente il consumo energetico globale

> [International](#) > International Energy Statistics

International Energy Statistics

| Petroleum | Natural Gas | Coal | Electricity | Renewables | Total Energy | Indicators | Country |
|--|-------------|-------------------------|-------------|--|--------------|--|---------|
| | | | | Total Primary Energy Production | | Total Primary Energy Consumption | |
| Country: World ▾ | | Start Year: 2008 ▾ | | End Year: 2008 ▾ | | Update | |
| Product: Total Primary Energy Consumption ▾ | | Unit: Quadrillion Btu ▾ | | | | | |
| Total Primary Energy Consumption (Quadrillion Btu) | | | | Units Conversion  | | Download Excel  | |
| | | | | 2008 | | | |
| World | | | | | | 493.014 | |

Questa tabella sempre dall'agenzia americana EIA indica in 493.014 GigaBTU (o Quadrillion) il consumo di energia totale mondiale (elettrica e termica o altro) anno 2008.

1 BTU (British Thermal Unit) corrisponde alla quantità di calore richiesta per alzare la temperatura di 454 grammi di acqua da 60 a 61 gradi Fahrenheit (da 15,56 a 16,11 C°) ed è pari a 253 calorie o 1055 Joule.

1 Quadrillion BTU = 10^{15} BTU (100.000.000.000.000) centomila miliardi

1 TOE = 41,868 Giga Joule

1 Giga Joule = 0,278 MWh termici = 0,00095 Giga BTU

1 MWh elettrico è pari al 39% dei MWh termici, dato dall'efficienza di conversione dell'energia termica in energia elettrica.

GigaBTU in TWh termici → $1 \text{ GigaBTU} / 0,00095 \times 0,278 / 1.000.000 \rightarrow 0,000292632 \text{ TWh termici}$ 

493,014 → 144.271,5 TWh termici

Il **consumo mondiale complessivo di energia** nel 2008 è stato pari a 493.014×10^6 Giga BTU

Considerando che ogni 0,00095 GigaBTU ottengo 0,278MWh termici → 493.014×10^6

GigaBTU / 0,00095 x 0,278 = $144.271,5 \times 10^6$ MWh termici → 144.271,5 TWh termici.

144.271,5 TWh termici, considerando Elettricità, riscaldamento, trasporto → 518.962.230 Tera Joule → 12.395 MTOE

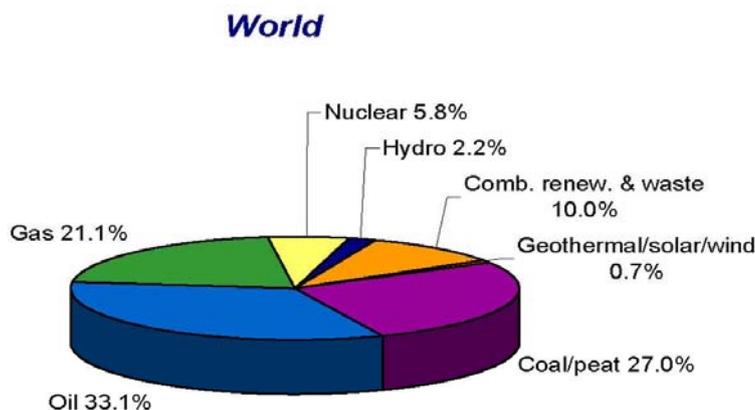
Il **consumo mondiale di energia elettrica** nel 2008 è stato pari a 17.444,762 TWh elettrici (vedi schema Desertec), per i quali si sono consumati 44.730,2 TWh termici → 160.900.000 Tera Joule → 3.843 MTOE o TEP (il 31% del totale)

Con DESERTEC si eviterebbero 3.843 MTOE (o 17.444 TWh elettrici) relativi alla parte elettrica, per trasporto e riscaldamento servono altre fonti quali ad esempio biogas, solare termico, solare termico dinamico, biomasse.

La tabella seguente della IEA (International Energy Agency) indica la domanda di energia mondiale 2008 pari a 12.267 Mtoe "milione di Toe" (o Mtep) considerando 1 Toe=12,56 MWh -> 154.073 TWh
 NB: 1 Toe = rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una "tonnellata equivalente di petrolio" (c.a. 42 GJoule, miliardi di Joule)



Share of total primary energy supply* in 2008



12,267 Mtoe

* Share of TPES excludes electricity trade.

Note: For presentational purposes, shares of under 0.1% are not included and consequently the total may not add up to 100%.

Di seguito alcuni riferimenti per comprendere la capacità di ricavare energia da vari materiali:

1 litro benzina = 9,7 KWh o 34,8 MJoule (o 13 kWh/Kg)

1 litro gasolio = 10,73 KWh o 38,6 MJoule

1 litro idrogeno = 2,80 KWh o 10,1 MJoule (a 20 Kelvin, cioè -253,15 C°)

1 m³ GPL = 94 MJoule (es: compresso a 200 bar = in volume 40 litri ne contiene c.a. 20 Kg., quindi 40 litri x 200 = 8 m³ x 94 MJ = 752 MJ, cioè la stessa energia contenuta in 21,60 litri di benzina)

1 m³ Metano = 38 MJoule (es: compresso a 200 bar = in volume 40 litri ne contiene c.a. 6 Kg., quindi 40 litri x 200 = 8 m³ x 38 MJ = 304 MJ, cioè la stessa energia contenuta in 8,73 litri di benzina)

1 Joule = lavoro per esercitare il lavoro di 1 Newton per la distanza di 1 metro (oppure più chiaramente, il joule è il lavoro richiesto per sollevare una massa di 102 gr, una piccola mela per un metro, opponendosi alla forza di gravità terrestre.

Il Joule è l'unità di misura dell'energia, del lavoro e del calore (per quest'ultimo è più frequente la caloria). 1 MJoule=0,278 KWh termici

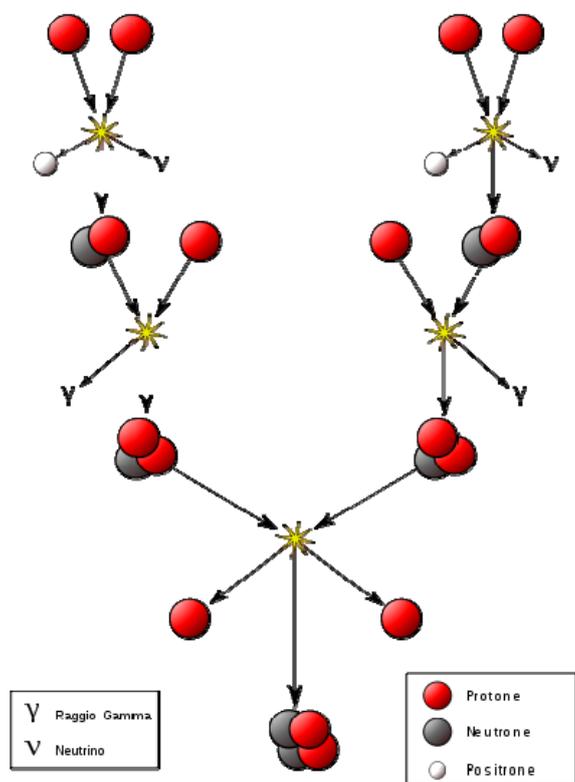
In fisica atomica seguendo la formula relativistica $E = mc^2$, un solo grammo di materia equivale a 90.000 miliardi di joule ($9 \times 10^{13} \text{ J} = 90.000.000 \text{ MJ} = 90.000 \text{ GJ} = 90 \text{ TJ}$). Poiché 1 kWh = $3,6 \times 10^6$ joule = 3.600.000 joule, un grammo di materia equivale a 25.000.000 kWh (= 25.000 MWh = 25 GWh), quindi (se fosse possibile convertire per intero la massa in energia), un Kg di materia = 25.000 GWh o 25 TWh, e 10 Kg.=250 TWh e 100=2.500 TWh e 1.000=25.000 TWh allora **5.770 Kg.= 144.271,5 TWh cioè l'intero fabbisogno energetico del nostro pianeta del 2008....** ad esempio 1 m³ di Uranio pesa 19.050 Kg (calcolo puramente teorico, fatto solo per riflettere)

IL SOLE – energia della fusione nucleare

Il sole ha la sua fonte di energia nel suo interno, dove la temperatura raggiunge i 16 milioni di gradi e dove quattro atomi di idrogeno si fondono per formare un atomo di elio.

Nel primo passaggio due nuclei di idrogeno 1H (protoni) si fondono per formare deuterio 2H , rilasciando un positrone (poiché un protone è diventato un neutrone) ed un neutrino.

Il positrone si annichila immediatamente con un elettrone, e le loro energie di massa sono trasformate in due raggi gamma.



Dopo la produzione di deuterio nel primo passaggio esso si può fondere con un altro nucleo di idrogeno per produrre un isotopo leggero dell'elio, l' 3He .

Da qui tre differenti rami portano alla formazione dell'isotopo dell'elio 4He .

Confrontando la massa dell'elio-4 finale con le masse dei quattro protoni si ottiene che lo 0,7% della massa originaria è persa. Questa massa è convertita in energia, sotto forma di raggi gamma e di neutrini rilasciati durante le reazioni individuali. L'energia totale che si ottiene da un ramo intero è di 26,73 MeV.

Solo l'energia rilasciata sotto forma di raggi gamma può interagire con gli elettroni e i protoni e scaldare l'interno del Sole, impedendo che il Sole non collassi sotto il suo peso.

In questa reazione ogni secondo il sole trasforma 600.000.000 di tonnellate di idrogeno in 595.500.000.000 kg di elio e i 4.500.000.000 Kg mancanti sono di radiazione elettromagnetica che il sole emette in ogni direzione.

Quindi 4.500.000.000 kg (4,5 milioni di tonnellate) è la massa che il sole perde **ogni secondo** a causa della reazione termonucleare.

La sua massa però è tale (circa due quintilioni di chilogrammi, pari a 332.946 masse terrestri) che pur avendo già 4,57 miliardi di anni di vita, il processo descritto continuerà per altri 7,8 miliardi di anni, dopodiché il Sole rilascerà gli strati più esterni, che verranno spazzati via dal vento della stella morente formando una nebulosa planetaria; le parti più interne collasseranno e daranno origine ad una nana bianca, che lentamente si raffredderà sino a diventare, nel corso di centinaia di miliardi di anni, una nana nera. Nonostante le ridotte dimensioni, paragonabili a quelle della Terra, la massa dell'astro è simile o lievemente superiore a quella del Sole; è quindi un oggetto molto compatto, dotato di un'elevatissima densità e gravità superficiale. Le nane bianche racchiudono una massa simile a quella del Sole in un volume che è normalmente un milione di volte più piccolo; ne consegue che la densità della materia in una nana bianca sia almeno un milione di volte più alta di quella all'interno del Sole (circa 10^9 kg m^{-3} , ovvero 1 tonnellata per cm^3). Le nane bianche sono costituite, infatti, da una delle forme di materia più dense conosciute: un gas "degenero" di elettroni, superato soltanto da oggetti compatti con densità ancora più estreme, come le stelle di neutroni (la densità della materia arriva a 1 miliardo di tonnellate a cm^3) a titolo esemplificativo, per riprodurre una densità pari a quella dell'oggetto in questione occorrerebbe comprimere una portiere nello spazio occupato da un granello di sabbia; seguono i buchi neri e le ipotetiche stelle di quark. Tale aumento di densità è possibile poiché il nucleo di un atomo rappresenta solamente il 99,9% della sua area (delimitata dagli elettroni).

La massa di una nana bianca varia da un minimo di 0,17 fino ad un massimo, seppur con alcune eccezioni, di 1,44 masse solari (limite di Chandrasekhar). Nel corso di miliardi di anni, raffreddandosi, disperde tutto il suo calore nell'universo finendo per non emettere più luce propria, diventando perciò non più visibile ad occhio nudo. Questo ammasso di plasma condensato vagherà nello spazio all'infinito. Per raggiungere tale stadio, una stella ha bisogno di parecchie decine di miliardi di anni e, avendo il nostro universo circa 13,7 miliardi di anni, si suppone che non si sia ancora formata una nana nera.

Energia pulita dalla fusione nucleare

Riprodurre la reazione nucleare di fusione per ottenere energia è uno dei sogni dell'umanità. I problemi tecnici da superare sono enormi, primo tra tutti il contenimento del "combustibile" nucleare (si parte dal deuterio presente nell'acqua marina) a temperature di milioni di gradi che vaporizzerebbero all'istante qualsiasi lega o materiale presente sulla terra.

L'idea è quella di realizzare delle linee di campo magnetico, che si chiudano ad anello intorno a una forma geometrica a ciambella: in termini tecnici, questa configurazione si chiama in geometria toro. In questo modo, le particelle sono costrette a fluire lungo le linee del campo magnetico, percorrendo delle orbite ad anello intorno al buco del toro, e rimanendo pertanto confinate.

Il campo magnetico ad anello viene chiamato in linguaggio tecnico campo toroidale.

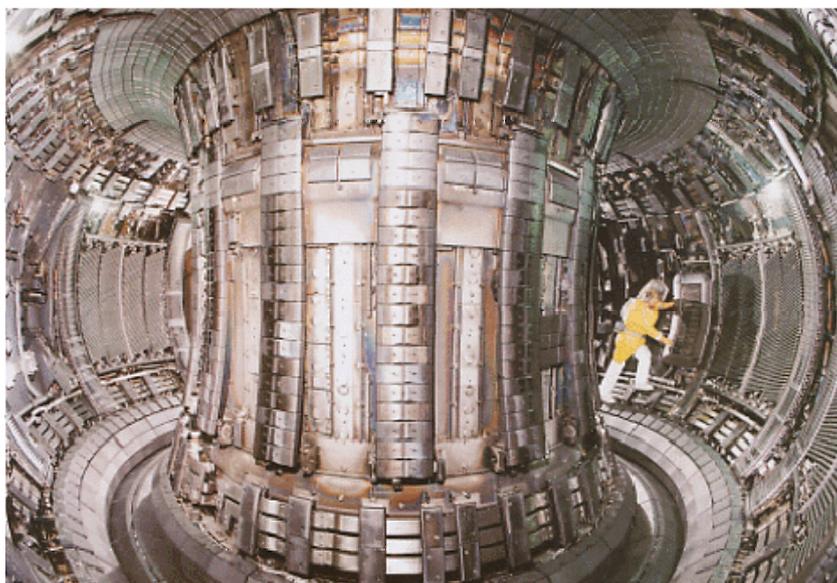
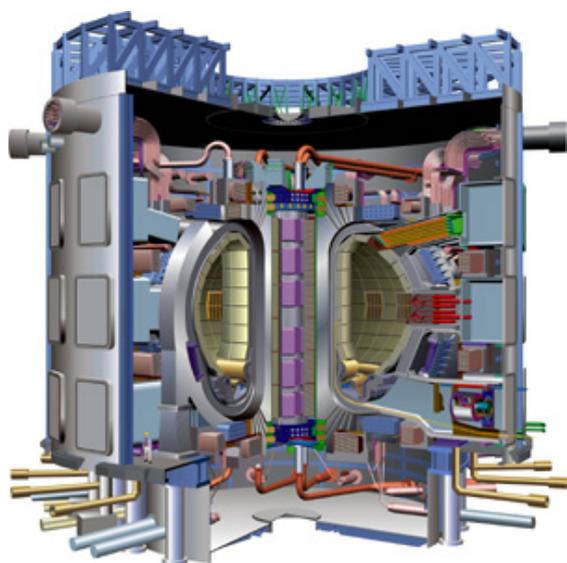
Attualmente sono in sperimentazione varie macchine "tokamak" basate sulla forma toroidale che, attraverso il confinamento magnetico di isotopi di idrogeno allo stato di plasma, creano le condizioni affinché si verifichi, al loro interno, la fusione termonucleare allo scopo di estrarne l'energia prodotta.

Non si hanno ancora notizie su quante decine di anni di ricerche occorreranno per un suo eventuale utilizzo in grande scala..

La speranza è quella di ottenere l'ignizione del plasma, un fenomeno che si autososterrebbe, per poter estrarre energia da fusione nucleare, un'energia che non lascia scorie radioattive né è passibile di esplosioni o fughe di radiazione e in tal senso è un'energia completamente "pulita".

Nei laboratori di *Frascati* - *il più grande polo europeo della scienza* per numero di ricercatori – si stanno conducendo ricerche di punta sulla fusione nucleare nel centro Enea dove in particolare si sta sviluppando il progetto FAST (estratto dal comunicato stampa del 24/9/09)

"La fusione – ricorda Mazzitelli – risolve in buona parte anche il problema del combustibile necessario per far andare una centrale. È infatti possibile ottenere reazioni di fusione con atomi leggeri, il deuterio e il trizio. Il primo è presente nell'ambiente: in ogni metro cubo di acqua se ne trovano 35 grammi. In meno di 3000 tonnellate di acqua di mare è presente, quindi, una quantità di questo combustibile sufficiente a far funzionare una centrale a fusione da 1 GW per un anno. Al contrario il trizio è un elemento raro in natura, ma offre il vantaggio di poter essere prodotto artificialmente in una centrale a fusione partendo dal litio, uno dei metalli leggeri più abbondanti sulla crosta terrestre. Con 150 chili di trizio (corrispondenti a 10 tonnellate di litio) si potrebbe alimentare per 365 giorni una centrale da 1 GW".



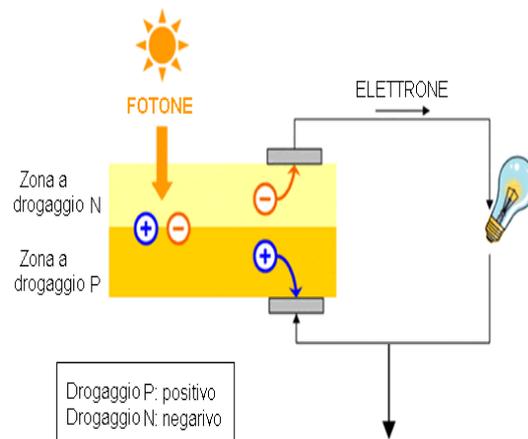
A sinistra lo schema della macchina, a destra il solenoide centrale e la camera toroidale.

L'effetto fotovoltaico, osservato per la prima volta da Alexandre Edmond Becquerel nel 1839, costituisce una delle prove indirette della natura corpuscolare delle onde elettromagnetiche. La teoria fisica che spiega l'effetto fotoelettrico, del quale l'effetto fotovoltaico rappresenta una sottocategoria, fu pubblicata nel 1905 da Albert Einstein che per questo ricevette il premio Nobel nel 1921 (ndr: NON per la teoria della relatività speciale o ristretta pubblicata nello stesso anno, o per quella generale pubblicata nel 1915).

Quando una radiazione elettromagnetica investe un materiale può, in certe condizioni, cedere energia agli elettroni più esterni degli atomi del materiale e, se questa è sufficiente, l'elettrone risulta libero di allontanarsi dall'atomo di origine. L'assenza dell'elettrone viene chiamata in questo caso lacuna. L'energia minima necessaria all'elettrone per allontanarsi dall'atomo (passare quindi dalla banda di valenza che corrisponde allo stato legato più esterno alla banda di conduzione ove non è più legato) deve essere superiore alla banda proibita del materiale.

Questo fenomeno viene usualmente utilizzato nella produzione elettrica nelle celle fotovoltaiche. Il meccanismo di funzionamento si basa sull'utilizzo di materiali semiconduttori. Infatti, nel caso di materiali isolanti, il band gap risulta troppo elevato per poter essere eguagliato dall'energia del fotone incidente, mentre per i materiali conduttori l'energia del band gap è piccolissima, quindi a temperatura ambiente c'è una continua creazione e distruzione di coppie elettrone-lacuna e l'energia necessaria alla creazione viene fornita direttamente dalle fluttuazioni termiche.

Quando un flusso luminoso investe invece il reticolo cristallino di un semiconduttore, si verifica la transizione in banda di conduzione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune che passa in banda di valenza. Si rendono pertanto disponibili portatori di carica, che possono essere sfruttati per generare una corrente. Per realizzare ciò è necessario creare un campo elettrico interno alla cella, stabilendo un eccesso di atomi caricati negativamente (anioni) in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati positivamente (cationi) nell'altro.



Questo meccanismo si ottiene mediante drogaggio del semiconduttore che generalmente viene realizzato inserendo atomi del terzo gruppo come ad esempio il boro e del quinto gruppo (fosforo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo p (con un eccesso di lacune) ed una di tipo n (con un eccesso di elettroni).

Lo strato drogato con elementi del quinto gruppo, che hanno cinque elettroni esterni (o di valenza) contro i tre di quelli del terzo gruppo, presenta una carica negativa debolmente legata, costituita da un elettrone in eccesso per ogni atomo drogante. Nello stesso modo, nello strato drogato con elementi del terzo gruppo, che hanno invece tre elettroni esterni, si ottiene un eccesso di carica positiva, data dalle lacune degli atomi droganti. Il primo strato, a carica negativa, viene generalmente chiamato strato n, l'altro, a carica positiva, strato p, la zona di separazione è detta giunzione p-n.

Effetto fotovoltaico - Approfondimento

La conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica utilizza il fenomeno fisico dell'interazione della radiazione luminosa con gli elettroni nei materiali semiconduttori, denominato **effetto fotovoltaico**.

L'oggetto fisico in cui tale fenomeno avviene è la cella solare, la quale altro non è che un diodo con la caratteristica essenziale di avere una superficie molto estesa (alcune decine di cm²).

Per analizzare in modo più approfondito l'effetto fotovoltaico è necessario quindi descrivere, almeno concettualmente, il funzionamento del diodo (**giunzione p-n**).

Inoltre visto che fino ad oggi il materiale più usato per la realizzazione delle celle solari è il silicio cristallino, si prenderà in considerazione il **diodo al silicio**.

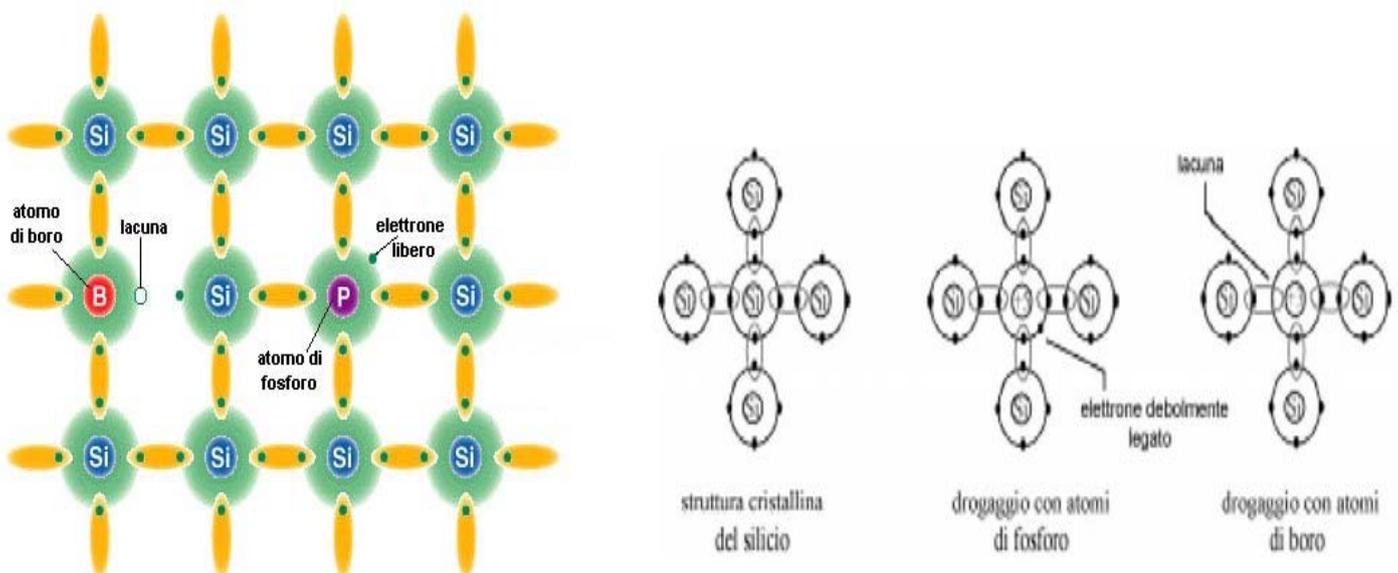
Il **silicio(14)** ha 14 elettroni di cui **4** sono di valenza, cioè disponibili a legarsi in coppia con elettroni di valenza di altri atomi.

In un cristallo di silicio chimicamente puro ogni atomo è legato in modo covalente con altri 4 atomi cosicché all'interno del cristallo non vi sono, in conseguenza del legame chimico, elettroni liberi.

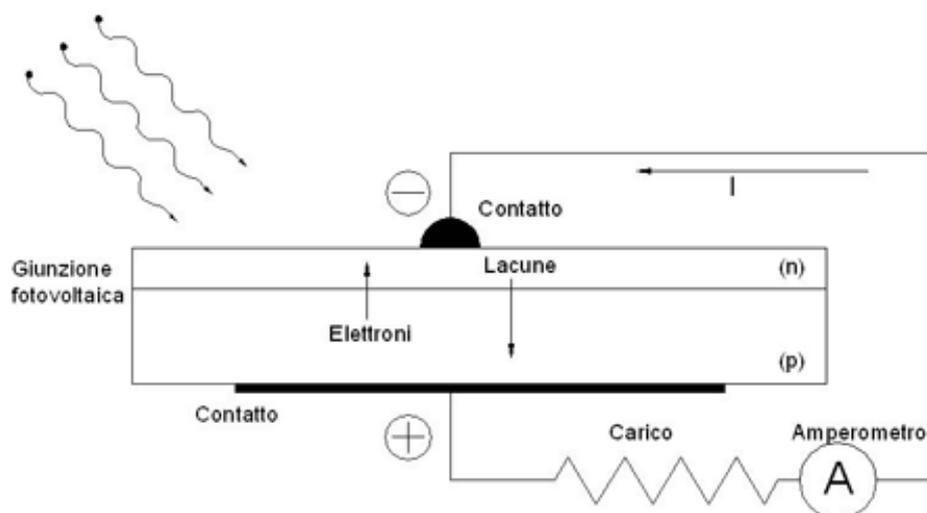
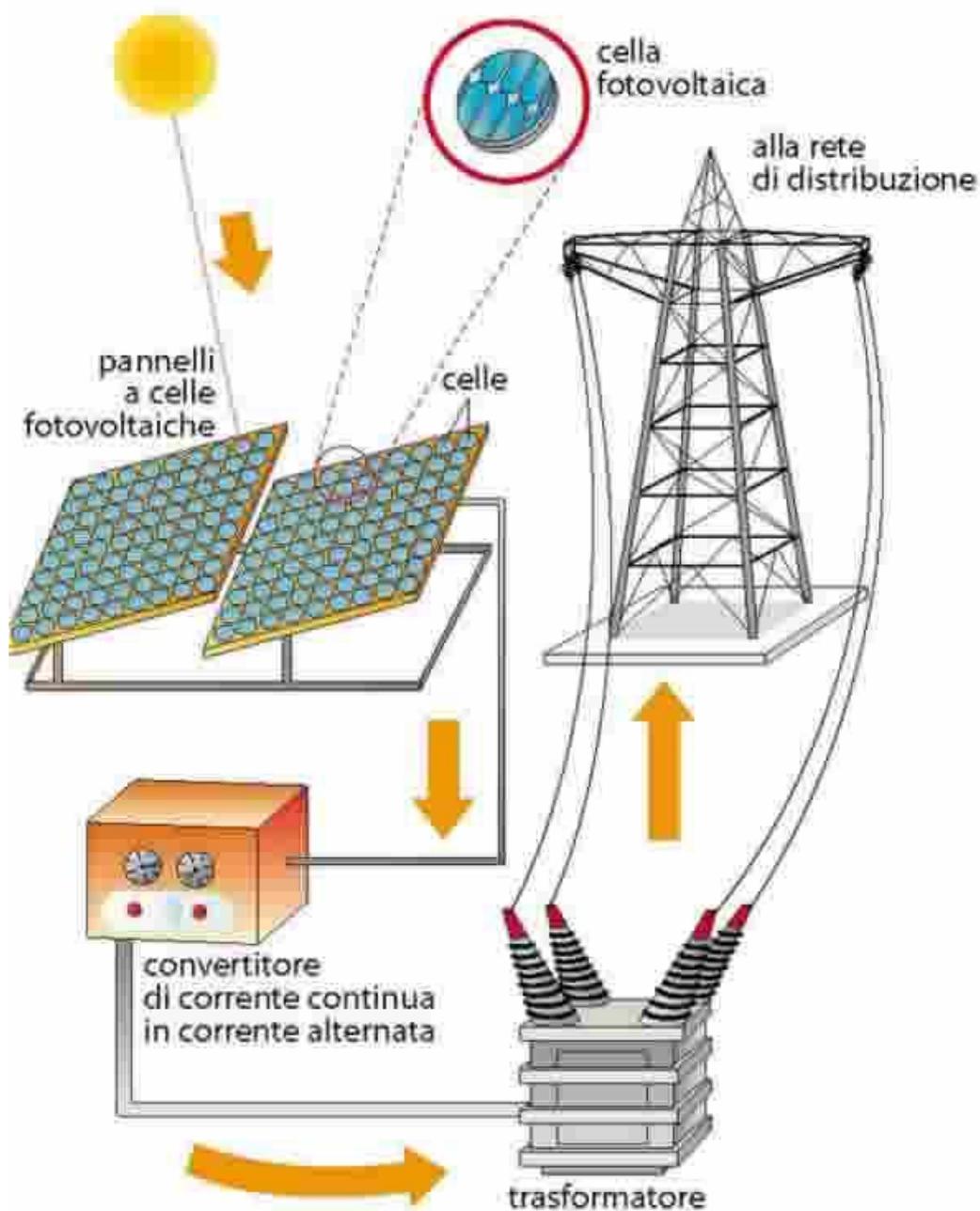
Se però alcuni atomi di silicio del cristallo vengono sostituiti con atomi di **fosforo(15)** che ha **5** elettroni di valenza, di questi elettroni 4 verranno usati per legami chimici con atomi adiacenti di silicio, mentre il quinto può essere separato dall'atomo di fosforo mediante energia termica e diventa libero di muoversi nel reticolo del cristallo.

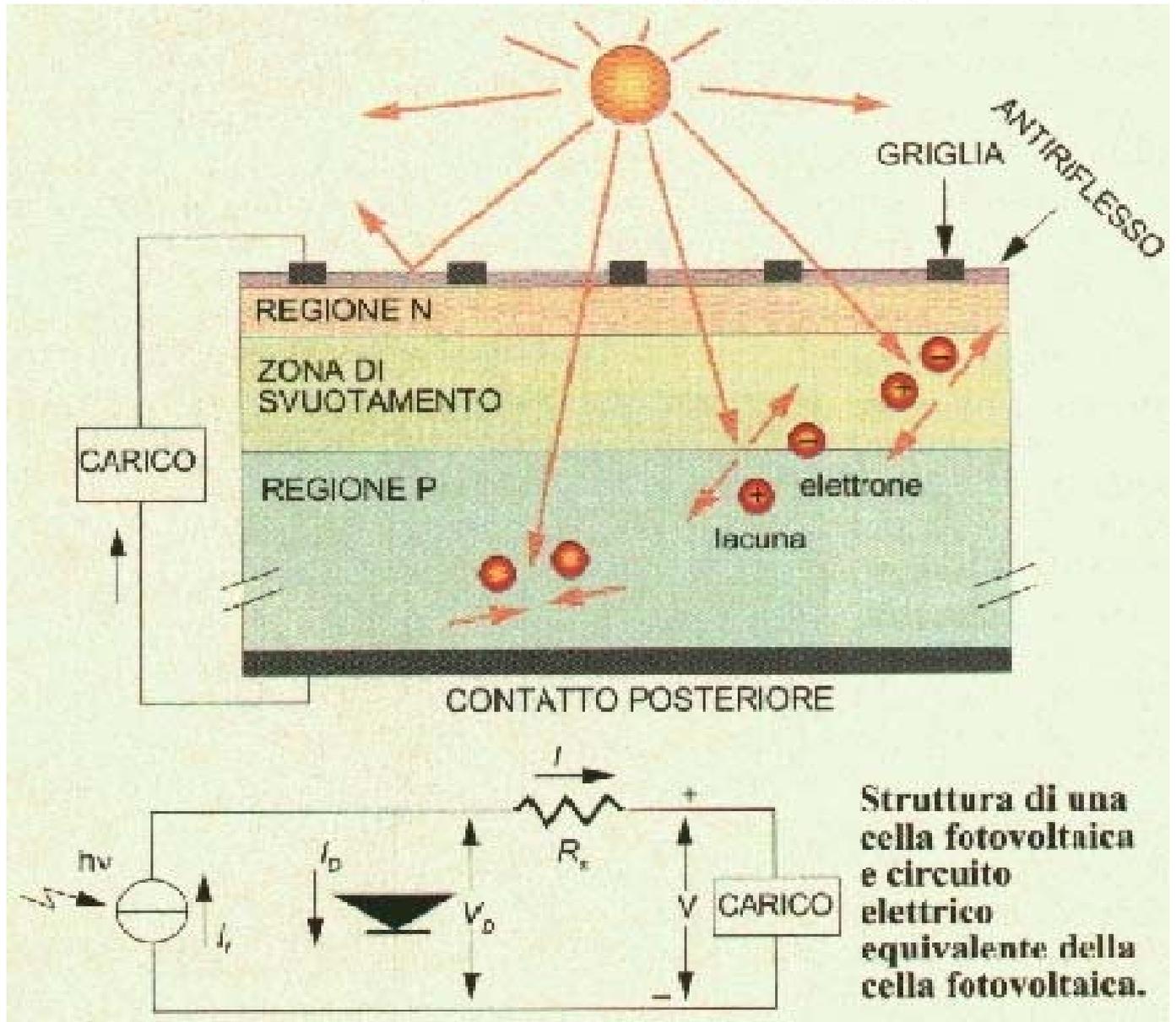
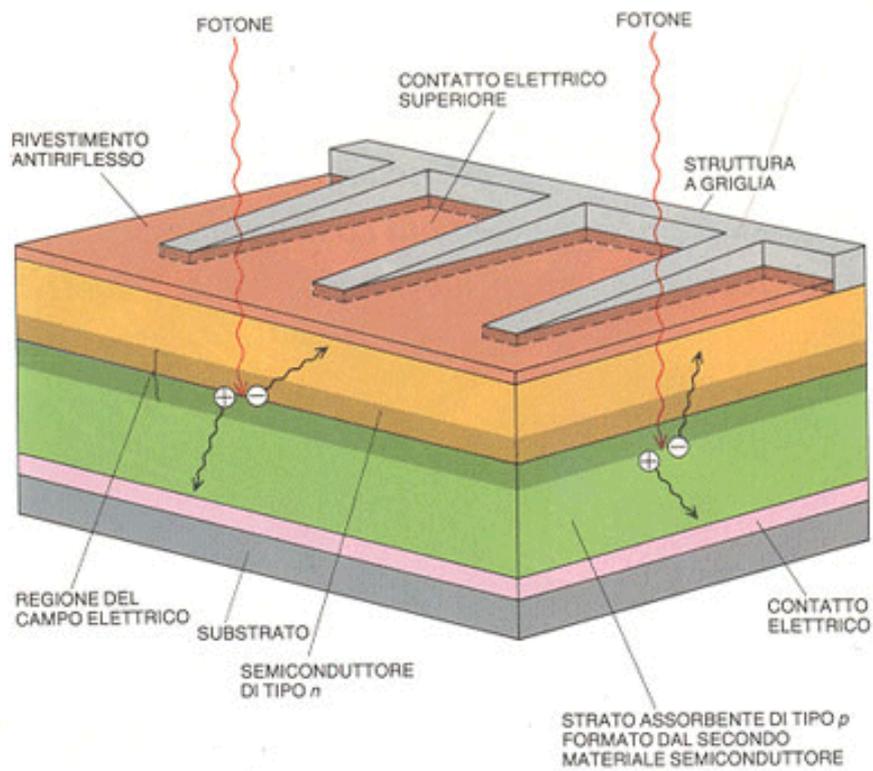
Analogamente se la sostituzione avviene con atomi di **boro(5)**, che ha solo **3** elettroni di valenza, ci sarà un elettrone mancante per completare i legami chimici con gli atomi adiacenti di silicio. Tale elettrone mancante agisce come se fosse un elettrone "positivo" e viene chiamato **lacuna**.

La figure seguenti, mostrano graficamente la situazione descritta, in particolare nella prima si mostra la struttura del reticolo cristallino del silicio, la variazione della struttura quando si effettua un drogaggio con atomi di fosforo ed infine viene mostrato il reticolo cristallino nel caso di drogaggio con atomi di boro.



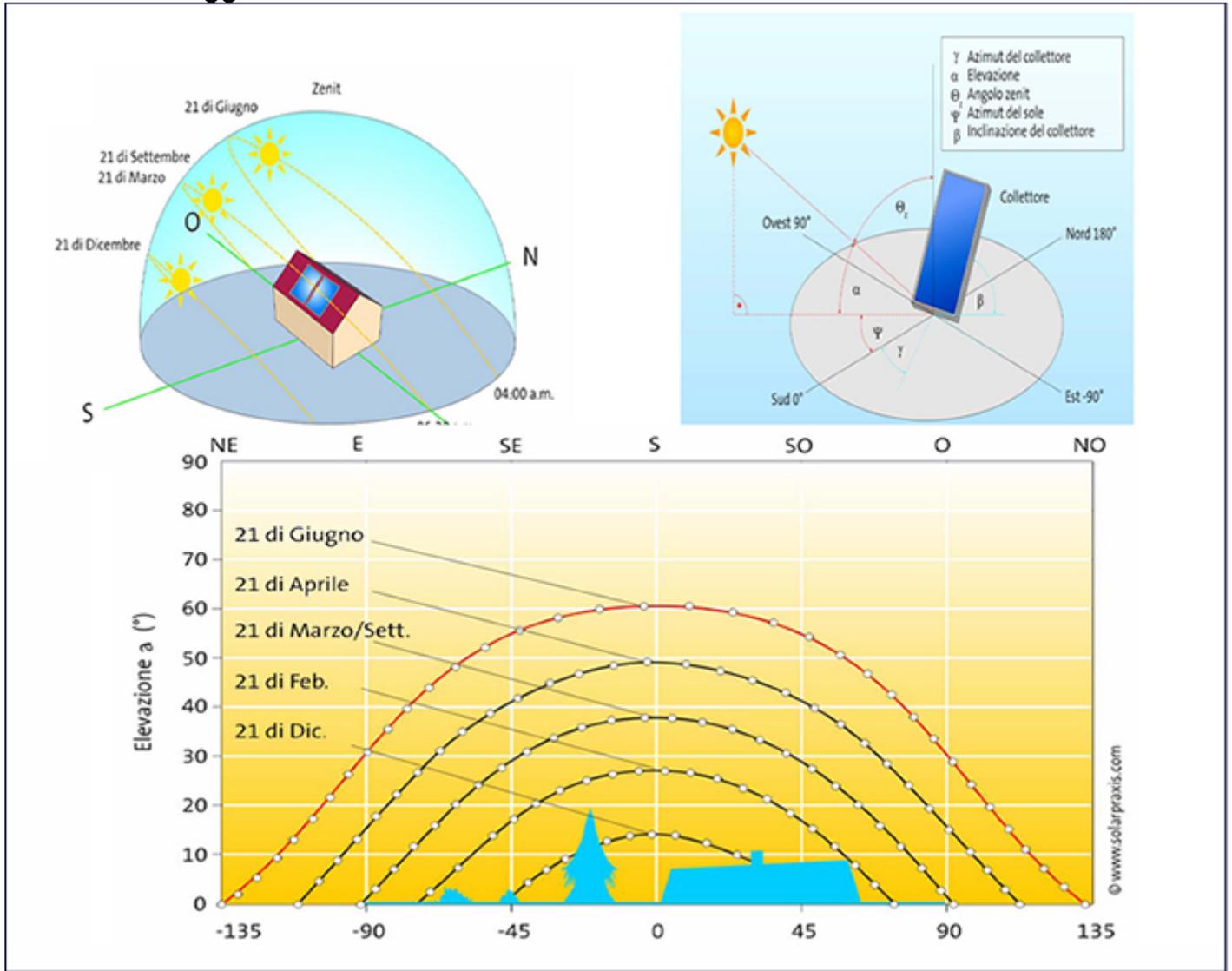
Energia da fotovoltaico: figure esemplificative:



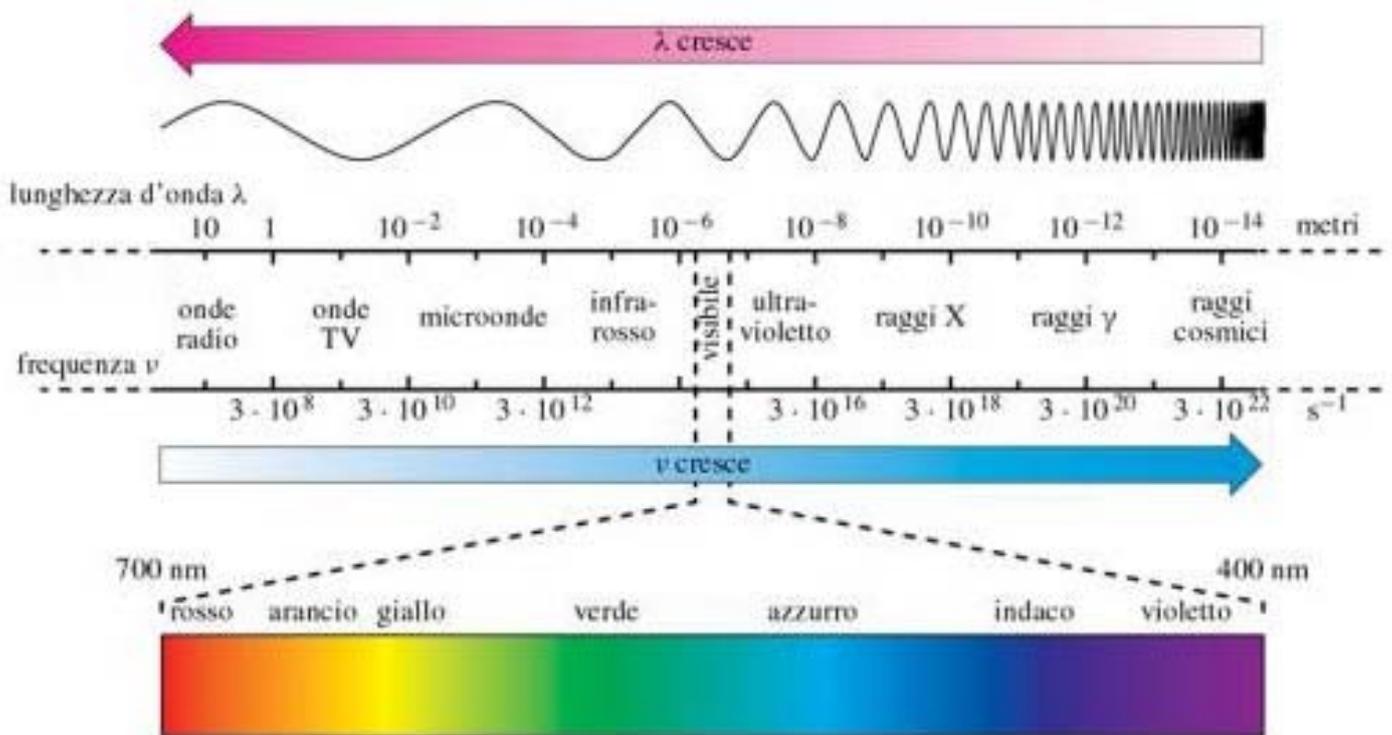


Struttura di una cella fotovoltaica e circuito elettrico equivalente della cella fotovoltaica.

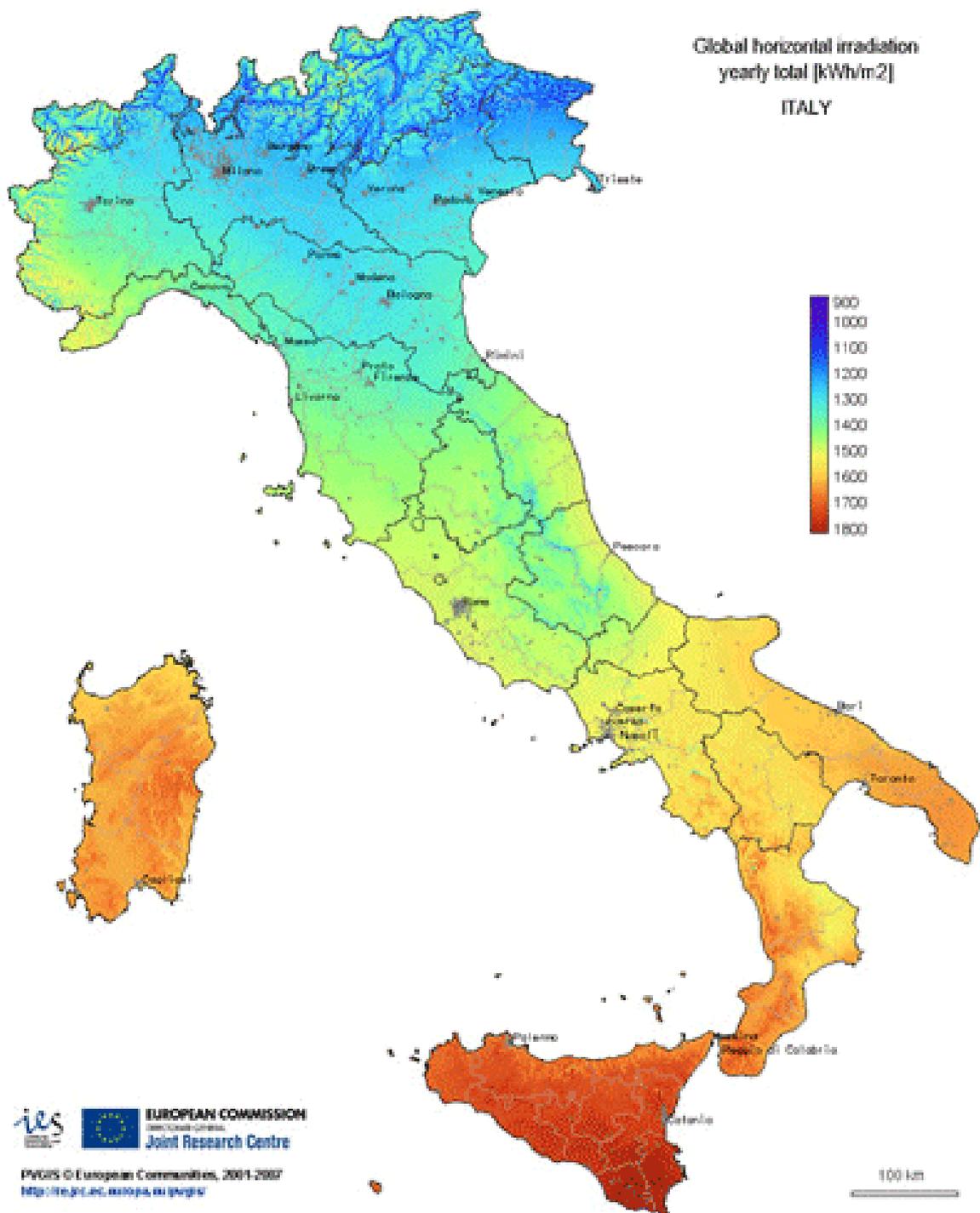
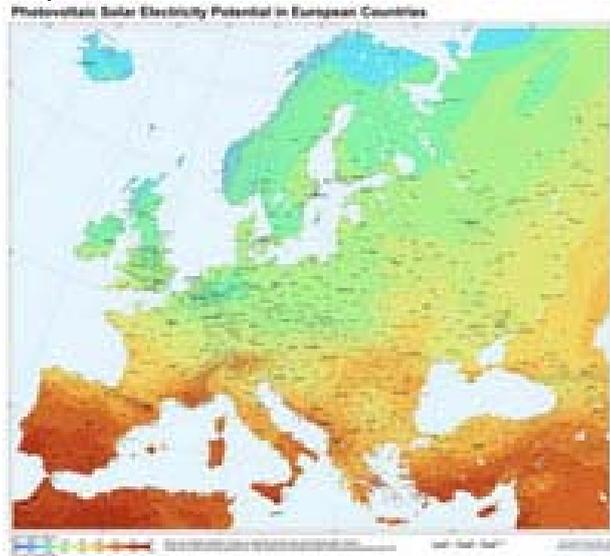
Variazione irraggiamento solare durante l'anno:



Le frequenze elettromagnetiche:



Irraggiamento luminoso Europa / Italia:



Tipi di celle fotovoltaiche:

L'uso del silicio nei semiconduttori richiede una purezza più elevata di quella fornita dal silicio di grado metallurgico. Nell'industria solare sono due le tipologie di silicio maggiormente utilizzate:

- **Silicio monocristallino**, in cui ogni cella è realizzata a partire da un wafer la cui struttura cristallina è omogenea (monocristallo), opportunamente drogato in modo da realizzare una giunzione p-n. Hanno efficienza dell'ordine del 16-17%. Sono tendenzialmente costosi, dato che vengono tagliati da lingotti cilindrici, è difficile ricoprire con essi superfici stese senza sprecare materiale o spazio.
- **Silicio policristallino**, in cui il wafer di cui sopra non è strutturalmente omogeneo ma organizzato in grani localmente ordinati (policristallo). Con il policristallino si possono produrre celle più economiche, ma meno efficienti (15-16%), il cui vantaggio risiede nella facilità con cui è possibile tagliarli in forme adatte ad essere unite in moduli.

Esiste una terza tipologia di **silicio denominato ribbon** dal quale si possono ricavare celle preparate da silicio fuso colato in strati piani. Queste celle sono ancora meno efficienti (13.5-15%), ma hanno l'ulteriore vantaggio di ridurre al minimo lo spreco di materiali, non necessitando alcun taglio.

