

reazioni nucleari: fusione



Il confinamento magnetico in genere fornisce:

basse densità ($n \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$) e tempi di confinamento alti ($\tau_E \approx 1 \text{ s}$) per un volume di plasma di circa 1000 m^3)

Il confinamento inerziale in genere fornisce:

alte densità ($n \approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$) e tempi di confinamento piccoli ($\tau_E \approx 10^{-10} \text{ s}$) per un volume plasma attorno ai 10^{-12} m^3)

In Europa (progetto **ITER**) si preferisce la via del confinamento magnetico, mentre negli Stati Uniti si studia maggiormente i sistemi a confinamento inerziale, nella **National Ignition Facility**.

reazioni nucleari: fusione



Come si scalda il plasma?

- 1) Riscaldamento ohmico: viene ottenuto tramite il **solenoid** che produce il campo toroidale, mediante l'incremento del flusso di corrente nel solenoide stesso. Il plasma si comporta come il secondario di un **trasformatore**. Questo sistema introduce però una limitazione: le fasi di riscaldamento devono essere impulsive.
- 2) Riscaldamento a radio-frequenza: si irradia il plasma con **onde** elettromagnetiche della **frequenza propria** di rotazione degli ioni all'interno del toro. Questo sistema introduce instabilità all'interno del plasma e ha richiesto studi approfonditi per il suo utilizzo in Tokamak sempre più grandi e vicini all'ignizione.
- 3) Iniezione di atomi neutri ad alta energia: **atomi** vengono ionizzati e accelerati da un campo elettrico, se ne ripristina poi la carica elettrica neutra e li si lascia entrare nel flusso del plasma. Qui vengono nuovamente ionizzati per urto con il plasma ed entrano a far parte del sistema stesso. Il plasma si scalda in seguito agli **urti** con questi ioni, che trasferiscono il loro eccesso di energia.

reazioni nucleari: fusione nel Sole



All'interno del Sole (nana gialla), composto, in massa, per il 75% da **H** ed il 25% da **He**, più elementi più pesanti in tracce, si trovano le seguenti condizioni:

temperatura ~ **$15.7 \cdot 10^6 \text{ K}$** , densità ~ **$1.5 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$**

dovute alla forza gravitazionale esercitata dalla enorme massa del Sole ($M_S \sim 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$)

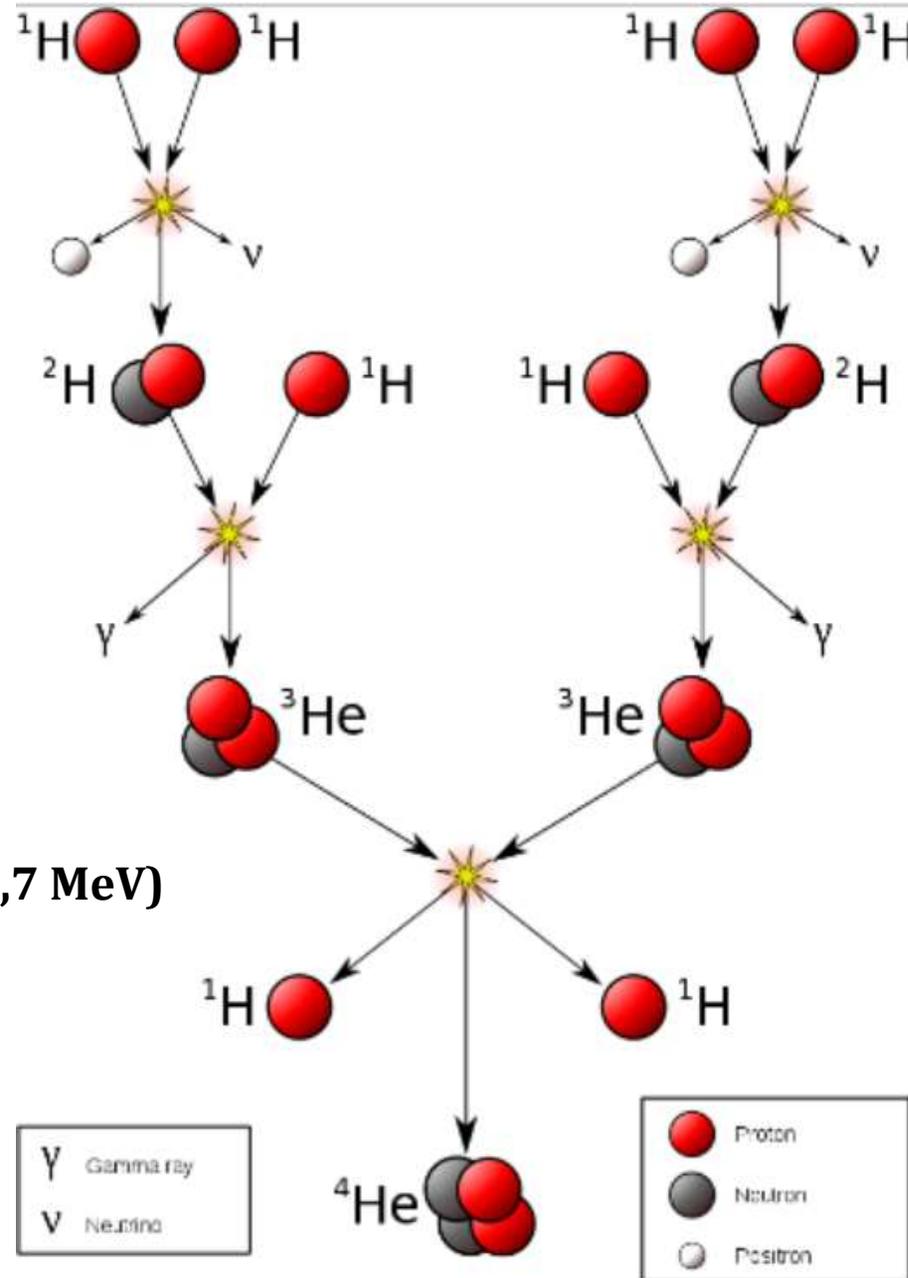
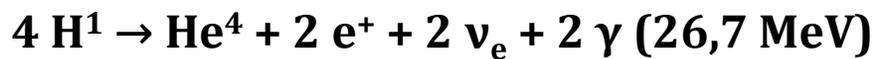
Ciò rende possibile la fusione di circa **$3.5 \cdot 10^{38}$** protoni al secondo

In 1 secondo l'energia emessa dal Sole è **$3,83 \times 10^{26} \text{ J} \sim 106.4 \cdot 10^9 \text{ TWh}$** circa uguale a tutta l'energia producibile sulla terra (con tassi attuali) per $4.5 \cdot 10^6$ anni.

reazioni nucleari: fusione nel Sole



Una delle reazioni nucleari presenti nel Sole è la catena protone-protone, che avviene attraverso stadi intermedi e si può riassumere come:



Federico Porcù, Dip. di Fisica ed Astronomia,
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
federico.porcu@unibo.it



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

25.05 Energia I

problema energetico, struttura atomica,
fusione nucleare

28.05 Energia II **ore 15:15**

fissione nucleare, centrali nucleari, energie
rinnovabili

04.06 Clima **ore 15:15**

sistema climatico, osservazione, modellazione
e tendenze

riassunto della lezione del 25.05



La fornitura di **energia** in modo **equo, sicuro e sostenibile** a chiunque serva è un problema fondamentale per l'umanità, che richiede la sinergia tra diverse ambiti di ricerca.

Classificazione delle fonti energetiche e **LCSA** sono necessarie per le scelte.

E' possibile ottenere più energia per unità di massa di combustibile utilizzando **reazione nucleari** invece che reazioni chimiche.

Modificando il nucleo dell'atomo, dove agiscono **forze** molto intense, si può liberare una grande quantità di energia grazie alla perdita di una piccola quantità di massa legando diversamente i **nucleoni** tra di loro.

Fusione di nuclei leggeri e **fissione** di nuclei pesanti.

La **fusione**, che avviene naturalmente nelle **stelle**, richiede che il combustibile venga **riscaldato** (10^8 K) e **confinato** per tempi tali da innescare la reazione, comportando un elevato **investimento** di energia.

I prodotti della **fusione** (nuclei di He) hanno **impatto trascurabile** sull'ambiente.

La costruzione di una **centrale a fusione** non è prevista a breve tempo, viste le difficoltà di tipo tecnologico per soddisfare il **criterio di ignizione**.

indice della lezione di oggi



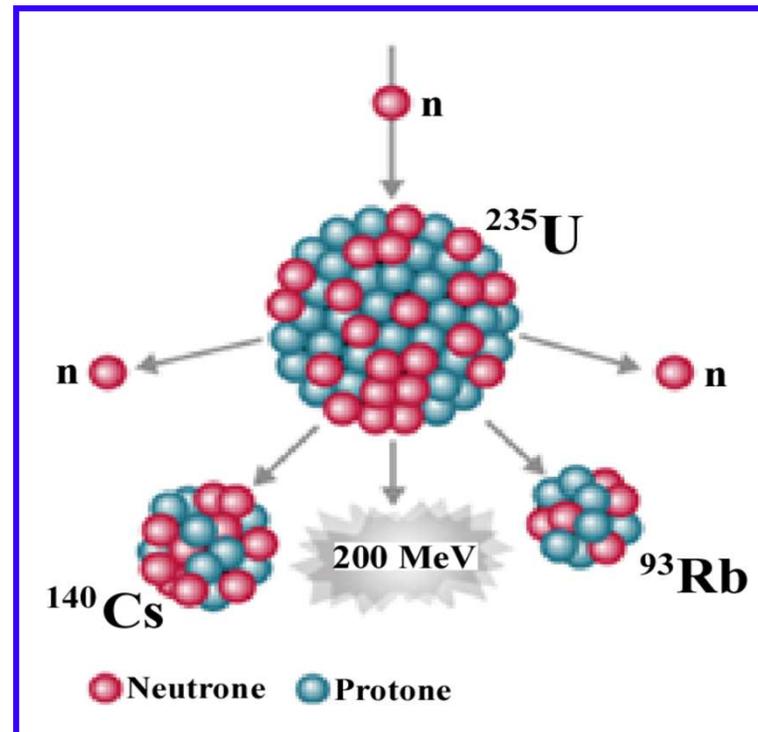
**fissione nucleare,
centrali nucleari a fissione,
un reattore sperimentale a fusione,
centrali a combustibili fossili,
energie rinnovabili.**

reazioni nucleari: fissione



Affinché avvenga una reazione di fissione nucleare è necessario che un **nucleo pesante** (più del Fe) si scinda in due nuclei più **leggeri**: questo avviene se il nucleo viene **colpito** da una particella di opportuna energia.

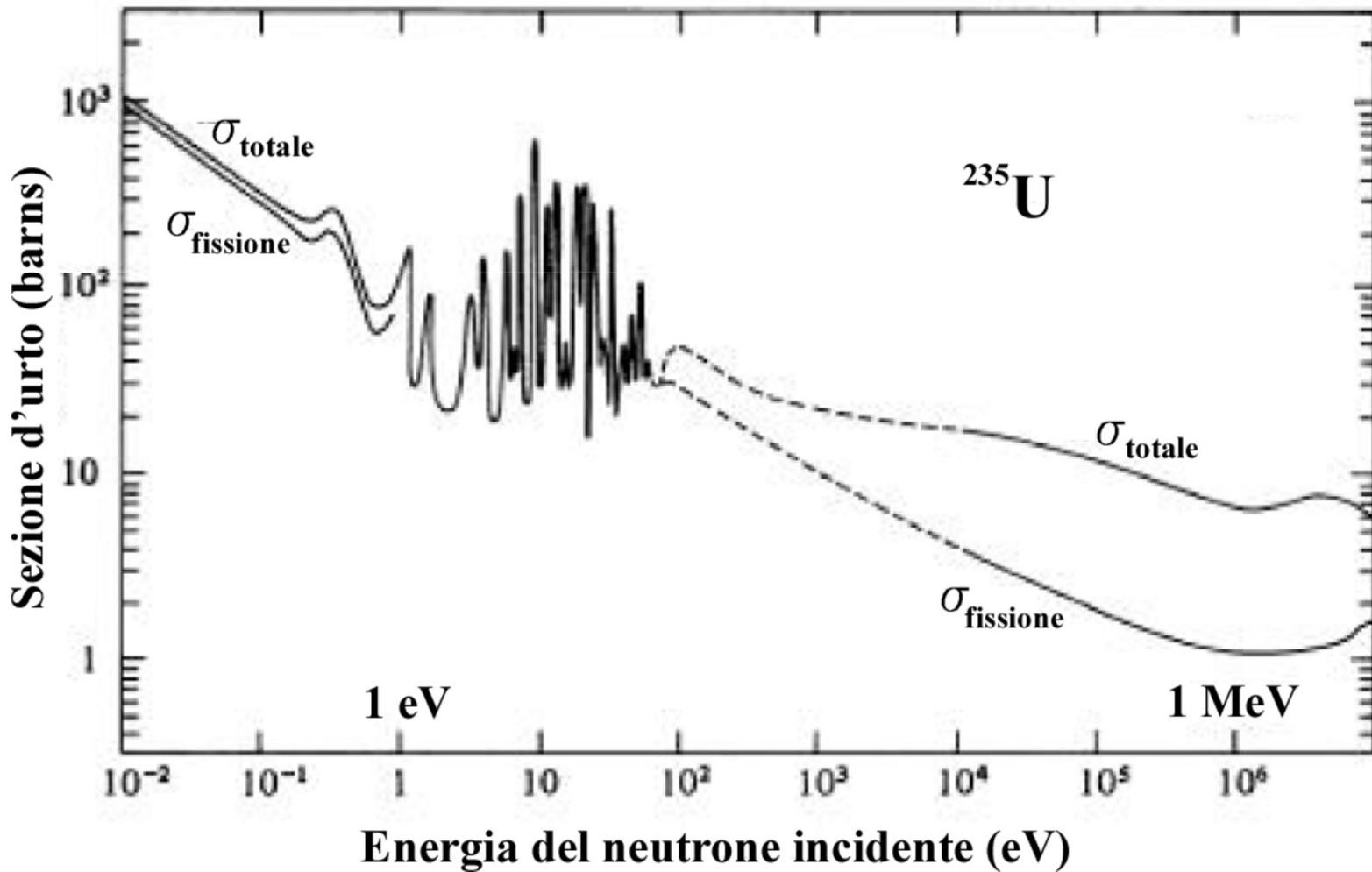
Il **difetto di massa** porta alla liberazione di energia. Ad esempio, nella fissione dell'isotopo 235 dell'uranio (U^{235}) mediante un neutrone lento (o termico) si libera una energia di circa 200 MeV (cioè 3.2×10^{-11} J).



reazioni nucleari: fissione



Sezione d'urto per un neutrone dell' U^{235} $E_n = \frac{1}{2} m_n v_n^2$



reazioni nucleari: fissione

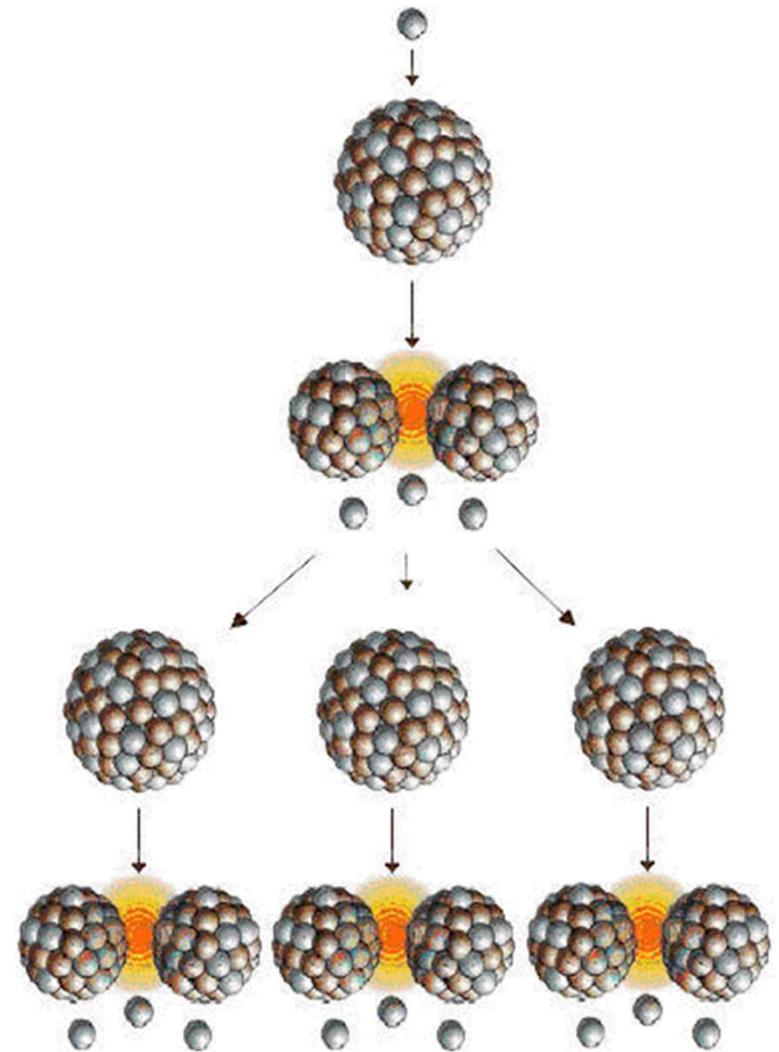


I neutroni prodotti in una reazione di fissione possono poi, a loro volta, colpire altri nuclei fissili dando quindi luogo ad una **reazione a catena**, in grado di proseguire fino a quando sia disponibili materiale fissile.

I **neutroni** non avendo carica elettrica sono particolarmente idonei per la fissione perché non vengono respinti dalle cariche positive del nucleo.

I neutroni usciti dalla fissione sono però molto energetici (200 MeV) e vanno **rallentati** perché possano produrre altre reazioni.

L'energia tolta ai neutroni viene utilizzata dai reattori per **scaldare** acqua.



reazioni nucleari: fissione



La produzione di energia da reazioni nucleari di fissione può essere realizzata utilizzando come “combustibile” vari elementi chimici quali, ad esempio, **Uranio** U e **Torio** Th (che esistono in natura) e **Plutonio** Pu (prodotto artificialmente da reazioni nucleari). Di ognuno di tali elementi esistono diversi isotopi.

Alcuni isotopi sono **fissili**: se i loro nuclei sono colpiti da neutroni di energia opportuna possono subire la reazione di fissione del nucleo. In questo caso, si producono due nuclei più leggeri del nucleo bersaglio e alcuni (solitamente 2 o 3) neutroni (veloci). La massa totale dei “prodotti” risulta leggermente inferiore alla massa dei “reagenti” (nucleo bersaglio più neutrone incidente). La differenza di massa si trasforma in energia (convertita quasi completamente in calore).

Altri isotopi, detti **fertili**, possono (mediante reazioni nucleari) produrre nuclidi fissili. Ad esempio:



reazioni nucleari: fissione



Tra gli elementi utilizzati come combustibile nei reattori nucleari quello largamente più usato è l'**Uranio**. Esso esiste in natura fondamentalmente sotto forma di due diversi isotopi: uno **fissile** mediante neutroni termici (U^{235}) ed uno non-fissile con neutroni termici (U^{238}) ma solo con neutroni veloci. Quest'ultimo isotopo (**fertile**) mediante una reazione nucleare può trasformarsi nell'isotopo 239 del Plutonio (Pu^{239}), anch'esso fissionabile, anche mediante neutroni termici.

Il processo di produzione di Pu^{239} è particolarmente rilevante nei reattori nucleari **veloci** nei quali non è richiesta la moderazione dei neutroni prodotti nella fissione. Inoltre, il numero di neutroni prodotti nella fissione del Pu^{239} è sensibilmente più elevato con neutroni veloci.

Dei due isotopi naturali dell'Uranio, quello fissile è presente in piccola percentuale, pari a **0.7%** circa. In molti tipi di impianti nucleari ad uranio è necessario, per poter mantenere la reazione a catena, **umentare** la percentuale di ^{235}U presente nel combustibile nucleare: ciò è ottenuto mediante un processo di **arricchimento** isotopico.

reattori nucleari a fissione



Poiché l'energia dei neutroni prodotti dalla fissione di un nucleo fissile è troppo elevata per poter dare luogo con probabilità non trascurabile a nuove fissioni e quindi a consentire la **reazione a catena**, si rende necessario diminuire l'energia cinetica dei neutroni (cioè rallentarli, o moderarli) fino a che essa non raggiunga un valore per la quale la **sezione d'urto** di fissione dei nuclei fissili è sufficientemente elevata.

Attualmente gli impianti nucleari nei quali si sfrutta questo fenomeno per la produzione di energia (termica, come energia primaria, ed elettrica, come energia secondaria) sono i **reattori nucleari termici**.

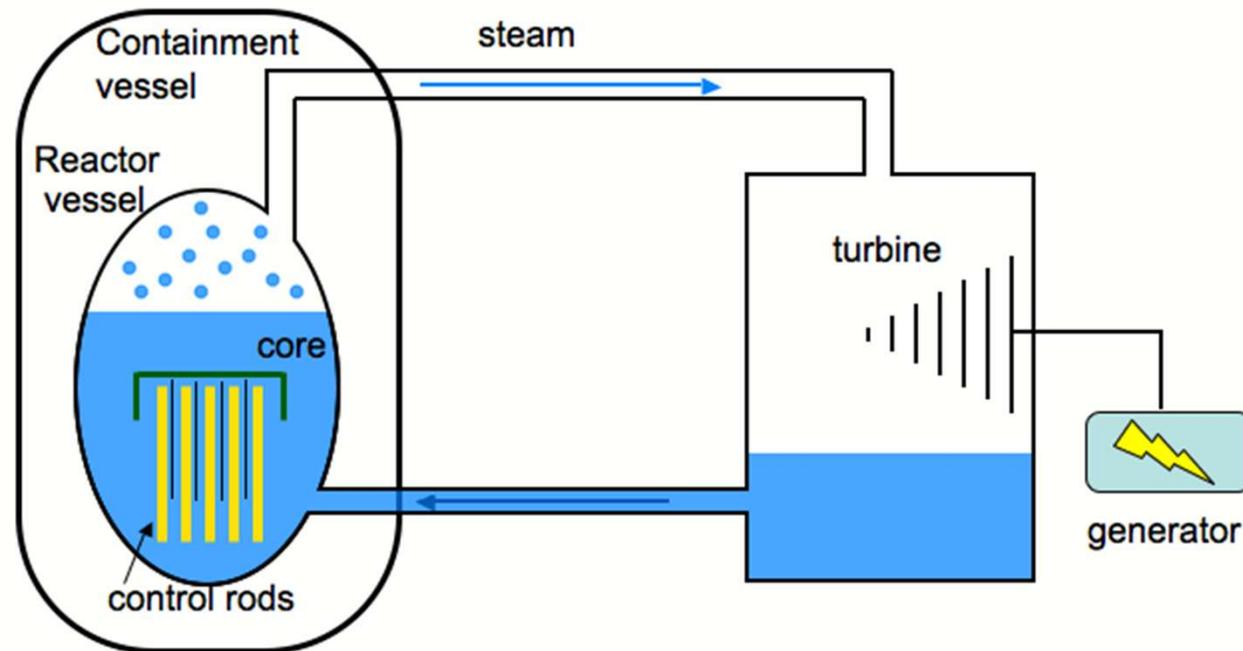
Indipendentemente dal tipo di reattore nucleare utilizzato per la produzione di energia elettrica, il calore prodotto dalle reazioni di fissione riscalda un fluido refrigerante che viene poi utilizzato per produrre vapore che entra in una turbina collegata ad un generatore di corrente elettrica.

energia chimica → termica → cinetica → meccanica → elettrica
energia nucleare → termica → cinetica → meccanica → elettrica

reattori nucleari a fissione



Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione Boiling Water Reactor (BWR) simile agli impianti coinvolti nell'incidente di Fukushima. Il calore sviluppato dalla reazione di fissione nel reattore viene trasferito all'acqua che si trasforma in vapore all'interno del contenitore (vessel) del reattore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente.

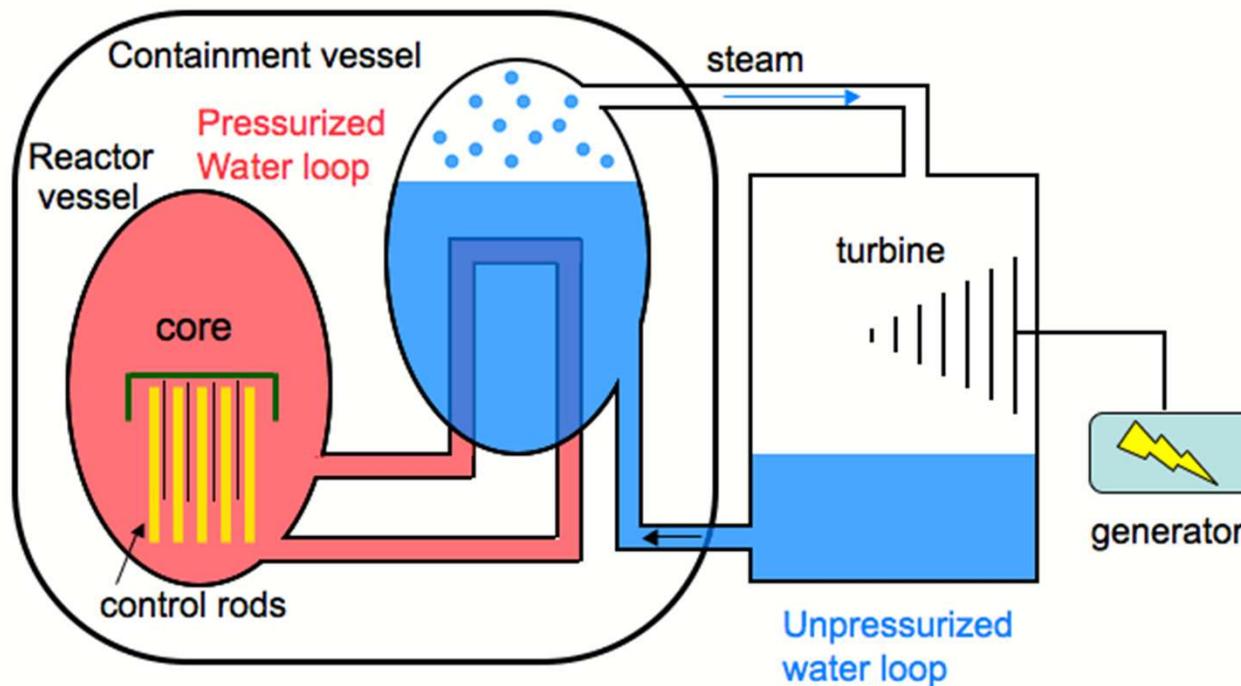


Boiling Water Reactor

reattori nucleari a fissione



Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione Pressurized Water Reactor (PWR). Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito tramite un fluido refrigerante a un flusso di acqua che genera vapore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente che alimenterà la rete elettrica.



Pressurized Water Reactor

reattori nucleari a fissione

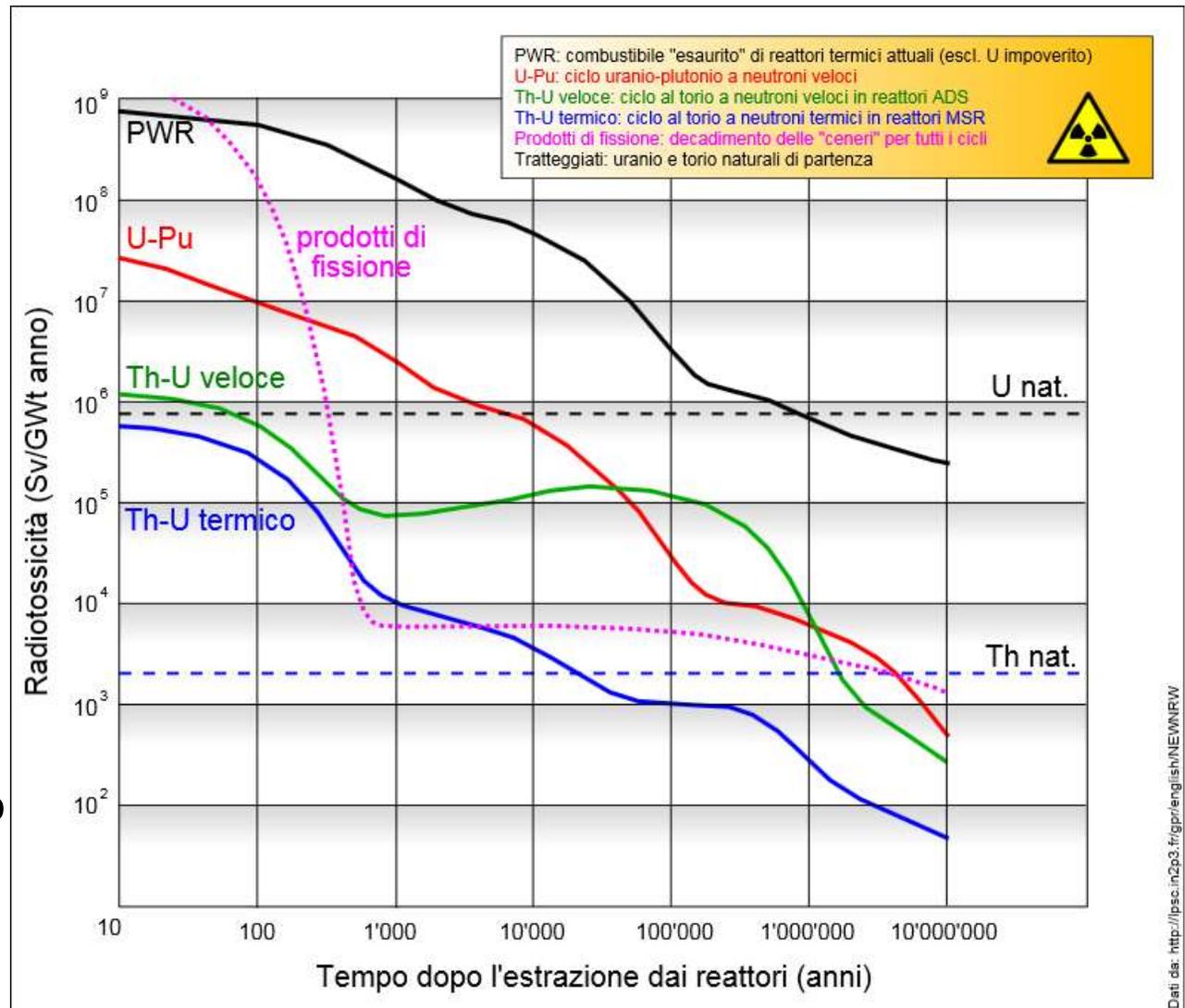


La dose di energia assorbita si misura in Sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} / 1 \text{ Kg}$$

Radiotossicità (in Sv per GWt all'anno) del combustibile esausto scaricato dai reattori nucleari per diversi cicli del combustibile, in funzione del tempo.

Prodotti della fissione
Materiale contaminato
Incidenti



reattori nucleari a fissione



Ia generazione (1950-1960): costruzione e sperimentazione di molti **prototipi** delle più varie concezioni.

Ila generazione (1970-1980): costruzione di un **gran numero** di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio ed acqua naturale. È dai reattori di questa generazione che proviene la maggior parte di energia elettronucleare prodotta **attualmente** nel mondo. Circa **440 reattori** nucleari (PWR, o BWR) sono operativi in più di 30 paesi. La potenza elettrica di ciascuno di tali impianti è di circa 600-900 MWe.

IIla generazione (>2000): reattori già certificati e **disponibili** sul mercato. Comprende innanzi tutto i reattori avanzati ad acqua naturale, alcuni già in funzione in Advanced Boiling Water Reactor (ABWR da 1400 MWe) altri, come lo European Pressurized Water Reactor (EPR da 1.600 MWe), in fase di costruzione: il primo esemplare di EPR (Olkiluoto 3, III+, originalmente previsto per il **2009**) entrerà in funzione in Finlandia nel febbraio **2022**, altri sono in fase di approntamento o di trattativa commerciale in Europa, Asia e Medio Oriente.

reattori nucleari a fissione



IV generazione (2030-2040?): allo stato concettuale. una iniziativa avviata nel gennaio 2000, allorquando dieci Paesi si sono uniti per sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, operativi **fra 20 o 30 anni**.

Requisiti: a) **sostenibilità** (massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi); b) **economicità** (rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici); c) **sicurezza** e affidabilità (bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore, tolleranza a gravi errori umani) non dovranno richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito; d) resistenza alla proliferazione e **protezione fisica** contro attacchi terroristici.

reattori nucleari a fissione



Incidente di Chernobyl (1986)

Due ipotesi: 1) errore umano nella gestione di un test (disattivazione di sistemi di sicurezza); 2) errore di progettazione dell'impianto.

Un incontrollato aumento della potenza del reattore portò ad una scissione dell'acqua di raffreddamento in O ed H, aumentando grandemente la pressione all'interno del reattore, che giunse a far saltare il coperchio del reattore con conseguenti fuoriuscite di materiale radioattivo.

Incidente di Fukushima (2011)

La causa principale fu un terremoto con conseguente tsunami che allagò la centrale, non sufficientemente protetta dal mare.

In caso di terremoto, la centrale sospende automaticamente le reazioni inserendo barre di controllo, attivate da generatori dedicati. L'onda di tsunami, alta 13 metri, ha superato la diga di protezione (alta 10 metri) allagando i motori ed interrompendone il funzionamento, ed il pompaggio di liquido di raffreddamento delle barre. Ciò ha generato numerosi incendi ed esplosioni.

reattori nucleari a fusione



Sia nel caso di impianti a confinamento magnetico che a confinamento inerziale basati sulla reazione deuterio-trizio viene utilizzato come combustibile una miscela di deuterio (esistente in natura, ed estraibile dall'acqua del mare) e di trizio (isotopo radioattivo, non esistente in natura ma prodotto artificialmente mediante reazioni nucleari).

Il trizio T può essere anche prodotto nella stessa macchina a fusione, sfruttando reazioni nucleari prodotte dai neutroni originati dalla fusione stessa.

Ad esempio $\text{Li}^6 + \text{n} = \text{He}^4 + \text{T} + 4.86 \text{ MeV}$

Il Li^6 è presente (7.5%) nel litio naturale che abbonda nelle rocce della crosta terrestre (30 parti su un milione per unità di peso) ed è presente, in concentrazione minore, anche negli oceani.

Il combustibile per la fusione nucleare è pertanto costituito da Deuterio e Litio entrambi presenti in natura in quantità significative.

reattori nucleari a fusione

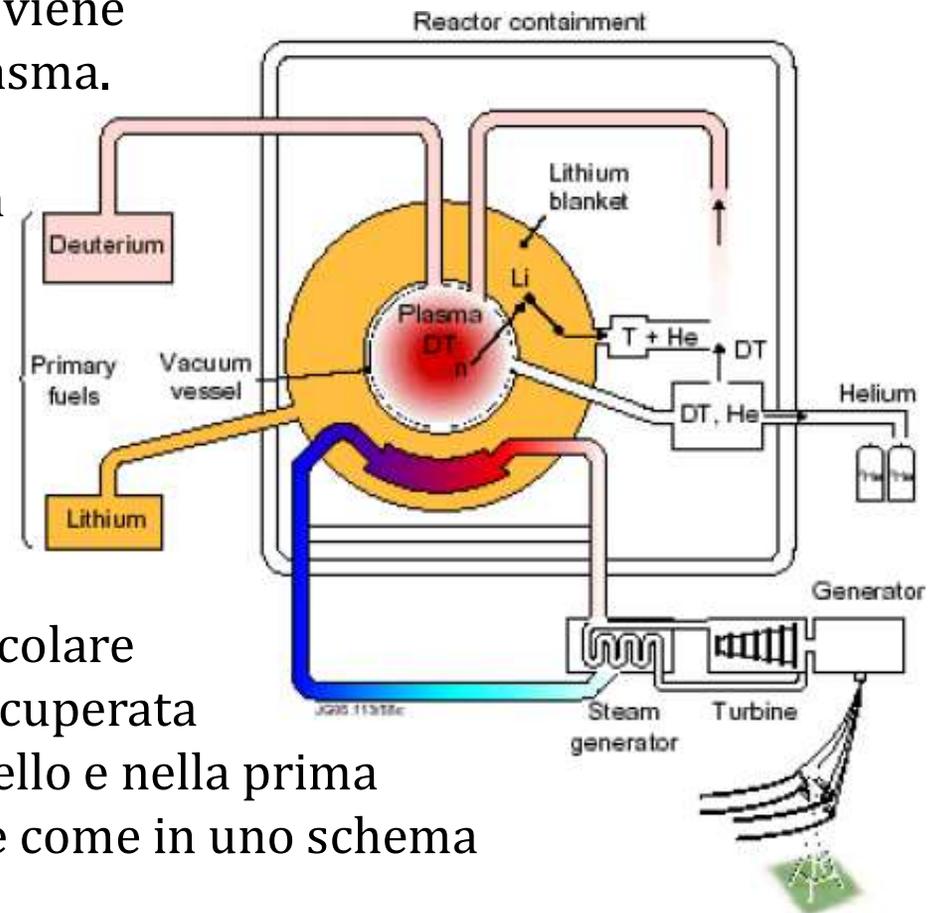


Schema di un impianto nucleare a fusione

Il plasma confinato a $100\text{-}200 \cdot 10^6 \text{ K}$ deve essere rifornito di combustibile (D e T). I neutroni, non confinati, reagiscono con il mantello di Li che circonda la camera toroidale, dando origine a T che viene quindi estratto e riciclato per fornire plasma.

I prodotti della reazione trasferiscono la loro energia al plasma per sostenere i nuovi processi e vengono pompati fuori dal toro insieme a parte del plasma per recuperare le particelle di D e T che non hanno reagito.

L'energia liberata dalle reazioni, in particolare quella trasportata dai neutroni, viene recuperata sotto forma di calore generato nel mantello e nella prima parete ed utilizzata per produrre vapore come in uno schema convenzionale di centrale elettrica.



reattori nucleari a fusione



Per dimostrare la **fattibilità tecnologica** di un impianto nucleare a fusione e prima di dare il via alla costruzione di impianti prototipi **pre-commerciali**, si è costituita una impresa raggruppante sette grandi partners mondiali (Comunità Europea, USA, Russia, Giappone, Cina, India, Corea del Sud) al fine di costruire un impianto **sperimentale** a fusione di tipo **tokamak**, di taglia paragonabile a quella di un futuro impianto commerciale. Tale impianto, denominato **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor), è in costruzione congiuntamente dai sette partners presso il centro nucleare francese di Cadarache (in Provenza, Francia).

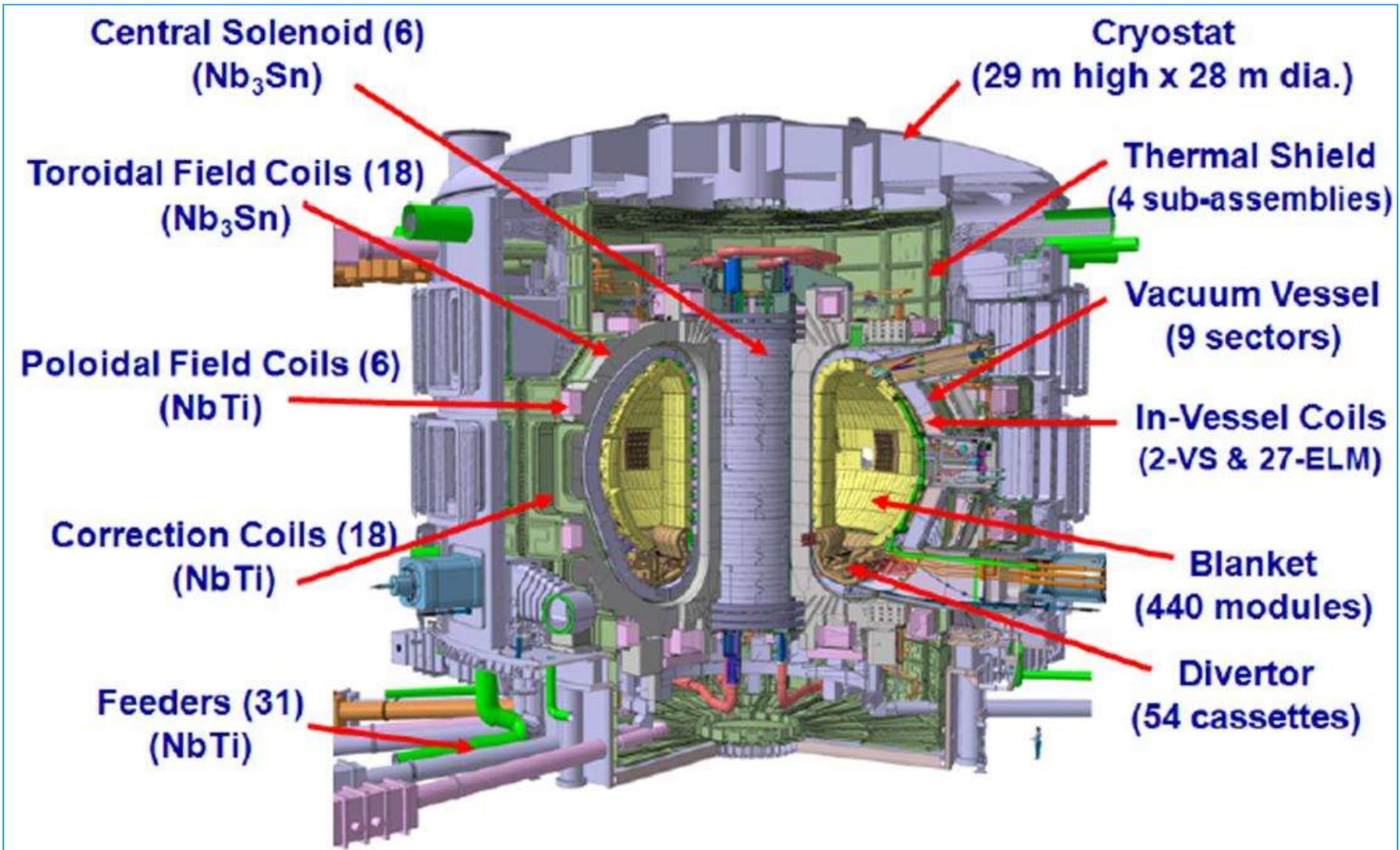
La costruzione e la messa in esercizio dell'impianto richiederanno circa **N** anni. La vita utile di ITER è prevista in circa 30 anni. Il costo stimato per ITER (progettazione, costruzione ed esercizio per 20-30 anni) è di circa **10 miliardi di euro** (costi 2008) rivisti a 15, con un costo di gestione di **290 milioni all'anno**.

Il primo plasma è atteso per il 2025 mentre l'inizio dell'operatività sarà nel **2035**.

reattori nucleari a fusione



Il tokamak di ITER: 29 m di altezza, 28 m diametro e circa 23000 t di massa



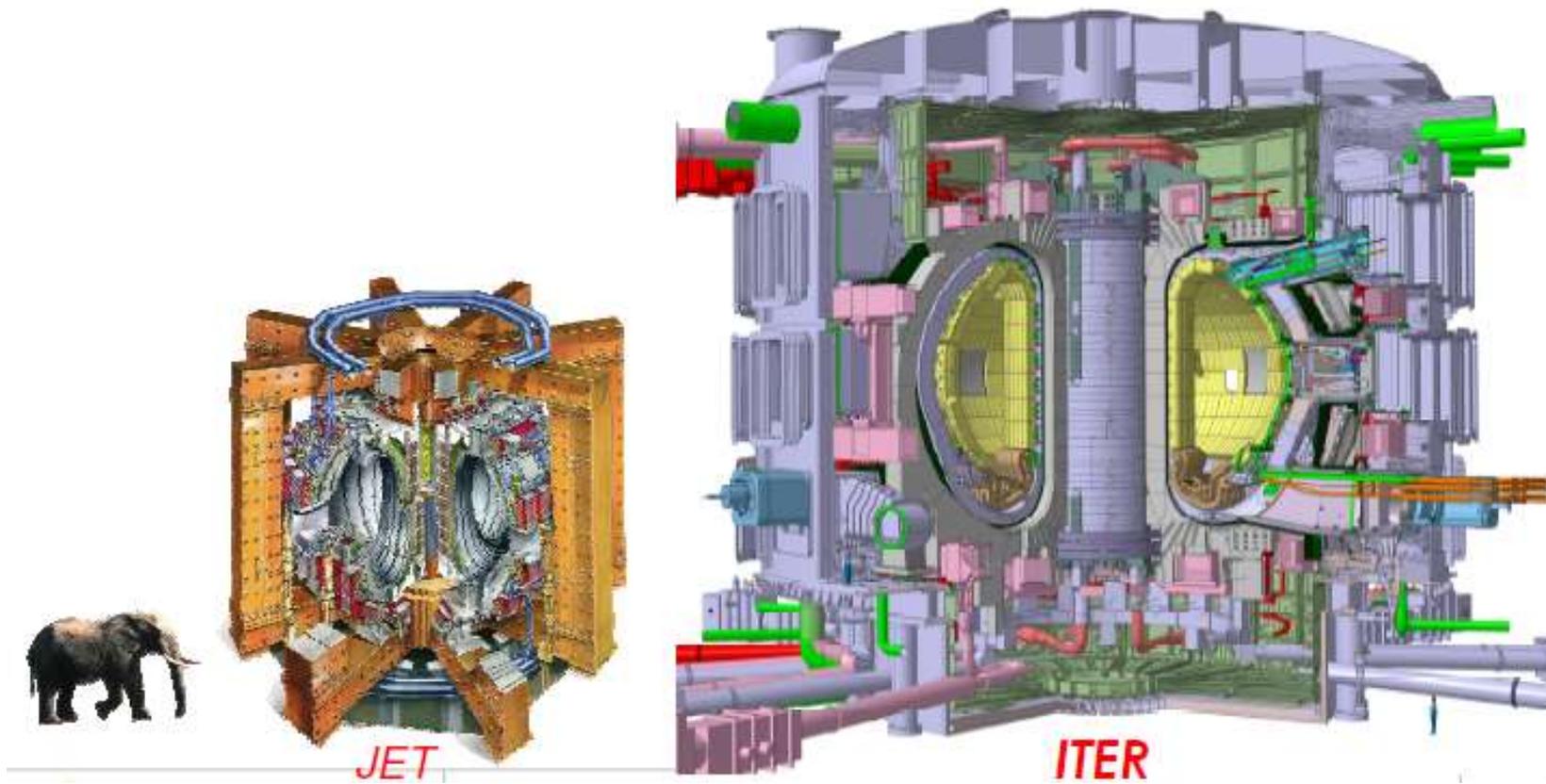
reattori nucleari a fusione



Confronto tra ITER e il Joint European Torus (JET, 1973)

$Q(\text{JET-1991}) = 0.15$

$Q(\text{JET-1997}) = 0.65$

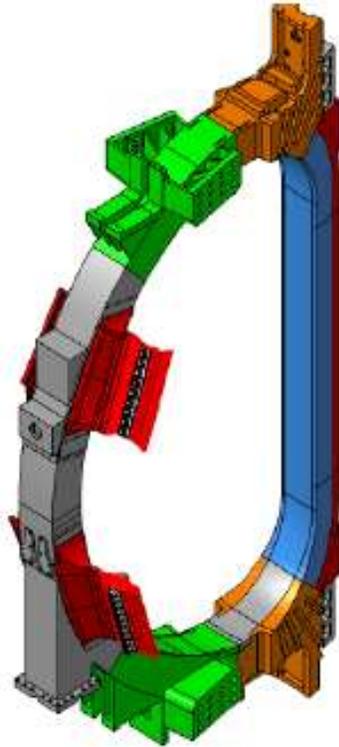


reattori nucleari a fusione



Massa di un elemento superconduttore per produrre il campo toroidale

TF Coil – Mass Comparison



Mass of (1) TF Coil:

~360 t

16 m Tall x 9 m Wide



**Boeing 747-300
(Maximum Takeoff Weight)**

~377 t

reattori nucleari a fusione



2018/04



reattori nucleari a fusione



reattori nucleari a fusione



Caratteristiche di ITER:

Volume del plasma	840 m³
B	5.3 T
i	15 MA
T	8.7 keV = 100 10⁶ K
N	1.3 10²⁰ m⁻³
P_{in}	50 MW
τ_E	3.4 s
P_{out}	500 MW
Q	10

riassunto



1. reazione di fusione **$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n (+17.6 \text{ MeV})$** :

- richiede molta energia per l'innesco,
- richiede soluzioni tecnologiche superiori (confinamento),
- combustibile disponibile,
- assenza di rifiuti/emissioni,
- ancora non disponibile (40/50 anni?);

2. reazioni di fissione **${}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}^{93}\text{Rb} + {}^{140}\text{Cs} + 3n (+200 \text{ MeV})$** :

- tecnologia acquisita,
- combustibile disponibile,
- assenza di emissioni,
- combustibile e scorie radioattivi,
- incidenti potenzialmente catastrofici.



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Energie rinnovabili

*Federico Porcù (federico.porcu@unibo.it)
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Bologna*

sommario



combustibili fossili (effetto serra);

energia solare fotovoltaica;

energia solare termica;

energia eolica,

bio-combustibili,

energia marina.

energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



Caratteristiche della generazione di energia da combustibili fossili

aspetti positivi:

- alto rapporto energia prodotta/volume combustibile,
- sono facilmente trasportabili (solidi e liquidi),
- sono immagazzinabili con sicurezza,
- sono utilizzabili con tecnologia relativamente semplice,
- costano relativamente poco.

aspetti negativi:

- sono inquinanti, anche se con l'utilizzo di macchine moderne questo problema si è notevolmente ridotto,
- incrementano la quantità di CO₂ in atmosfera,
- non sono risorse rinnovabili (velocemente).

energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



Emissioni in atmosfera

ossidi di zolfo (piogge acide) dalla combustione del carbone e sono abbattuti in: **pre-combustione** trattando il carbone (raro), **caldaia** tramite l'iniezione di composti del calcio che legano con lo zolfo per dare gesso inerte, **post-combustione** tramite lo scrubbing dei fumi con composti del calcio che formano gesso puro (preferita).

ossidi di azoto (nocivo, piogge acide) comune alle centrali a combustione. La produzione viene **limitata all'origine** tramite il disegno dei combustori, evitando porzioni di gas combusti ad eccessivamente alte temperature. In **post-combustione** si agisce con scrubber con ammoniaca o urea.

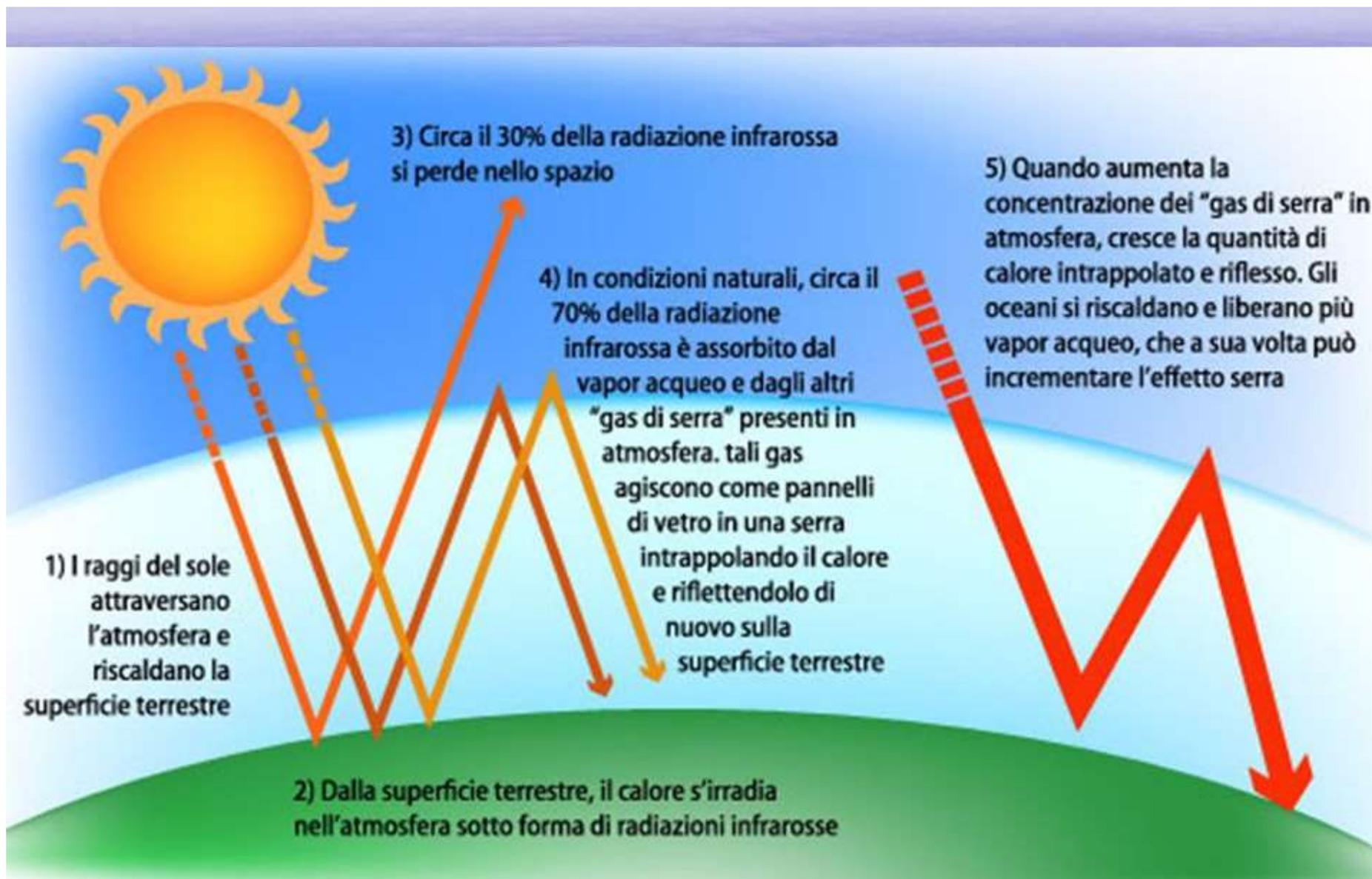
ceneri (carbone). La componente più **leggera** si abbatte con **filtri** elettrostatici e/o meccanici.

anidride carbonica (effetto serra) sequestro e stoccaggio del **carbonio**.

energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



Effetto serra sbagliato



energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



Effetto serra sbagliato



ISTITUTO MAGAZINE CATALOGO TRECCANI CULTURA TRECCANI

effetto serra

Enciclopedie on line

Crea un ebook con questa voce | Scaricalo ora (0)

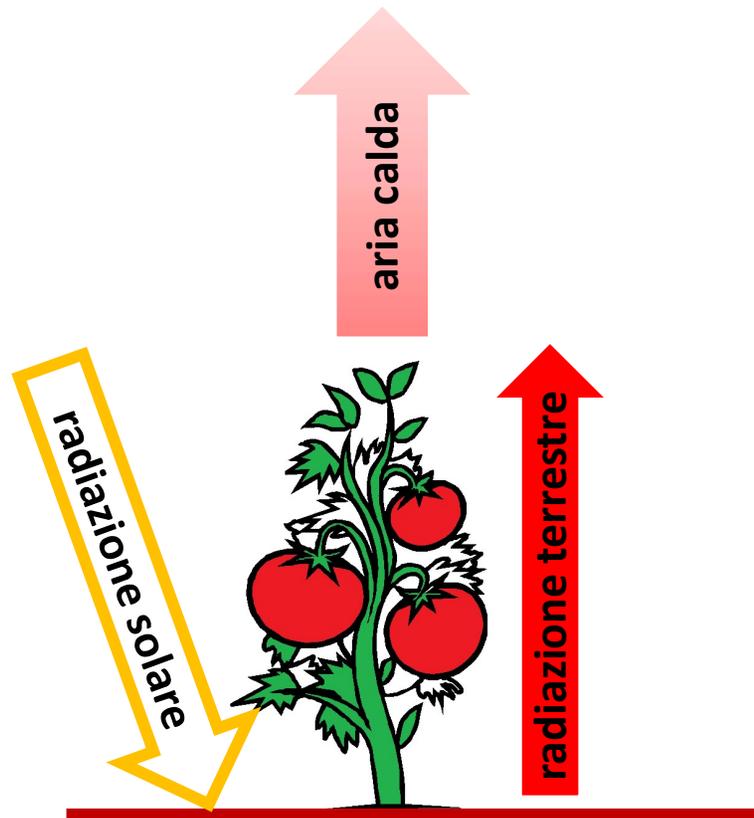
Condividi    

effetto serra Fenomeno che si produce allorché un certo mezzo (per es., il vetro con cui sono fatti i tetti delle serre) risulta trasparente alle componenti di breve lunghezza d'onda dello spettro della radiazione solare (per es., alla parte ultravioletta e visibile) ma è opaco rispetto a radiazioni di maggiore lunghezza d'onda come la radiazione infrarossa: un mezzo con queste caratteristiche **trattiene la radiazione infrarossa** emessa dai corpi riscaldati in seguito all'assorbimento della radiazione di minore lunghezza d'onda con un conseguente aumento della temperatura sottostante (fig. 1 )

energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



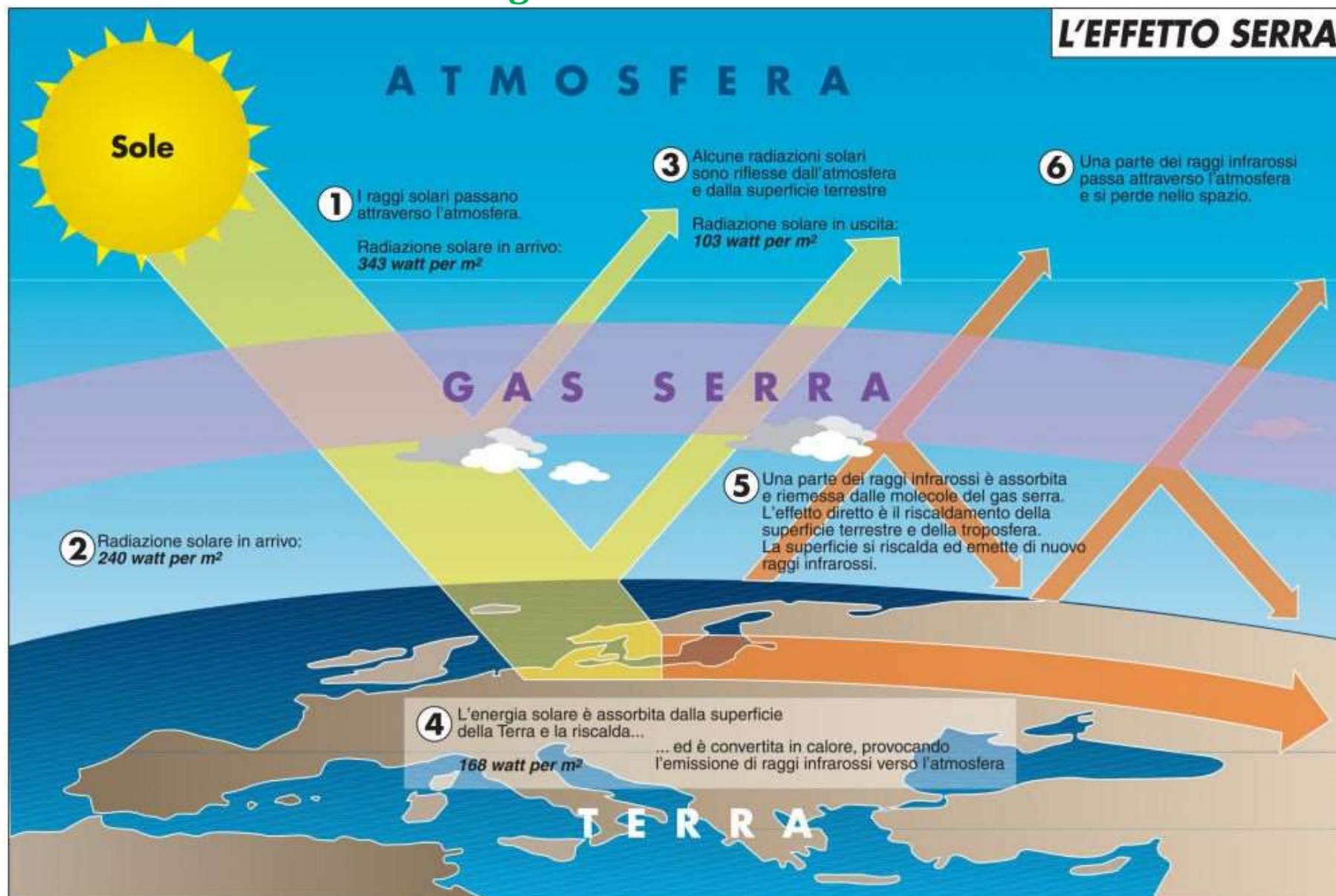
Serra per le piante



energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



Effetto serra **abbastanza giusto**



energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



Effetto serra **abbastanza giusto**



WIKIPEDIA
L'enciclopedia libera

Pagina principale
Ultime modifiche
Una voce a caso
Nelle vicinanze
Vetrina
Aiuto
Sportello informazioni

Comunità

Portale Comunità
Bar
Il Wikipediano
Fai una donazione
Contatti

Strumenti

Puntano qui
Modifiche correlate
Carica su Commons
Pagine speciali

Voce [Discussione](#)

Leggi

[Modifica](#)

[Modifica wikitesto](#)

Effetto serra

Da Wikipedia, l'enciclopedia libera.



Questa voce o sezione sull'argomento Climatologia non cita le fonti necessarie o è insufficienti.

Puoi migliorare questa voce aggiungendo citazioni da fonti attendibili secondo le linee guida sull'

Nelle scienze dell'atmosfera, l'**effetto serra**^[1] è un particolare fenomeno di *regolazione della temperatura* di un pianeta (o satellite) provvisto di *atmosfera*, che consiste nell'accumulo all'interno della stessa atmosfera di una parte dell'*energia termica* proveniente dalla *stella* attorno alla quale orbita il corpo celeste, per effetto della presenza in *atmosfera* di alcuni *gas*, detti appunto "*gas serra*".

Tali gas permettono infatti l'entrata della *radiazione solare* proveniente dalla stella, mentre ostacolano l'uscita della *radiazione infrarossa* riemessa dalla superficie del corpo celeste^[2] (caratterizzata da una lunghezza d'onda di circa 15 *micron*, maggiore della lunghezza d'onda della radiazione entrante): ciò porta da una parte ad un aumento della temperatura del corpo celeste coinvolto dal fenomeno e dall'altra parte a *escursioni termiche* meno intense di quelle che si avrebbero in assenza dell'effetto serra,^[3] in quanto il calore assorbito viene ceduto più lentamente verso l'esterno.

Il termine deriva dall'errata analogia con quanto avviene nelle serre per la coltivazione: in questo caso l'aumento di temperatura è dovuto all'assenza di *convezione* (una modalità di *trasferimento del calore*) e non all'intrappolamento dell'energia radiante.^[3] L'effetto serra, inteso come fenomeno naturale, è essenziale per la

energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)



GHG

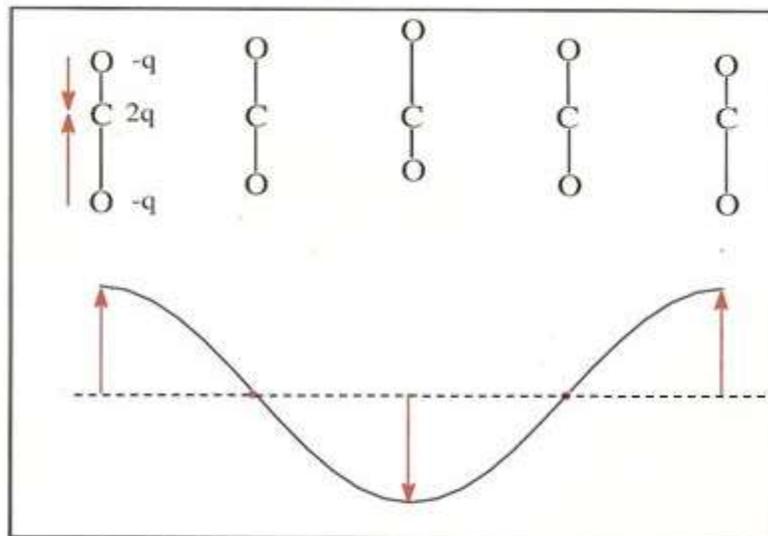
Molecule	Structure	Permanent dipole moment	May acquire dipole moment
N ₂		No	No
O ₂		No	No
CO		Yes	Yes
CO ₂		No	Yes (in two vibrational modes)
N ₂ O		Yes	Yes
H ₂ O		Yes	Yes
O ₃		Yes	Yes
CH ₄		No	Yes (in two vibrational modes)

energia da combustibili fossili (carbone, gas, petrolio)

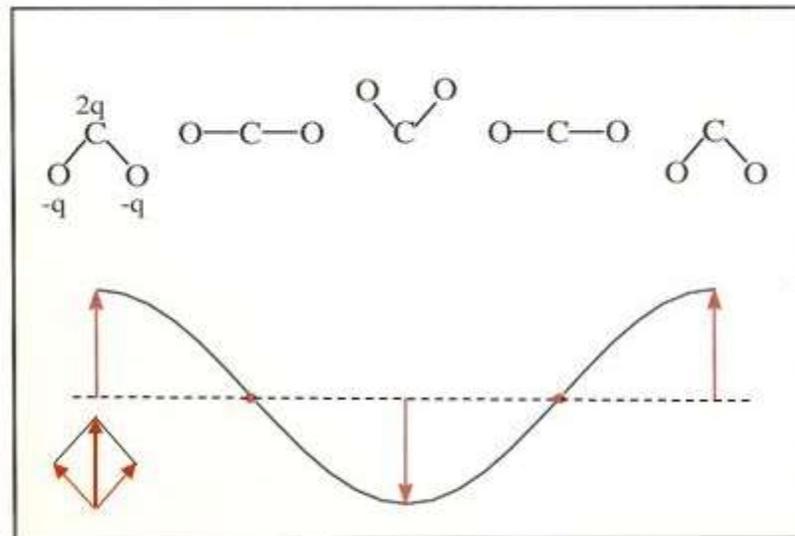
GHG



Modi otticamente attivi



Stiramento asimmetrico



Piegamento

energia solare fotovoltaica



Il **pannello fotovoltaico** sfrutta le proprietà di particolari elementi **semiconduttori** per produrre energia elettrica quando sollecitati dalla luce.

I pannelli solari fotovoltaici convertono la luce solare **direttamente** in energia elettrica. Questi pannelli sfruttano **l'effetto fotoelettrico** e hanno una efficienza di conversione che arriva fino al **32,5%** nelle celle da laboratorio.

In pratica, una volta ottenuti i pannelli dalle celle e una volta montati in sede, l'efficienza è in genere del **13-15%** per pannelli in silicio cristallino e non raggiunge il 12% per pannelli in film sottile.

I prodotti commerciali più efficienti, utilizzando celle a multipla giunzione o tecniche di posizionamento dei contatti elettrici sul retro della cella raggiungono il **19-20%**. Questi pannelli, non avendo parti mobili o altro, necessitano di **pochissima manutenzione**: in sostanza vanno solo puliti periodicamente. La durata operativa stimata dei pannelli fotovoltaici è di circa **30 anni**.

energia solare fotovoltaica

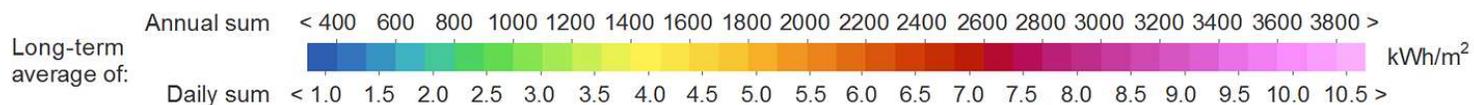
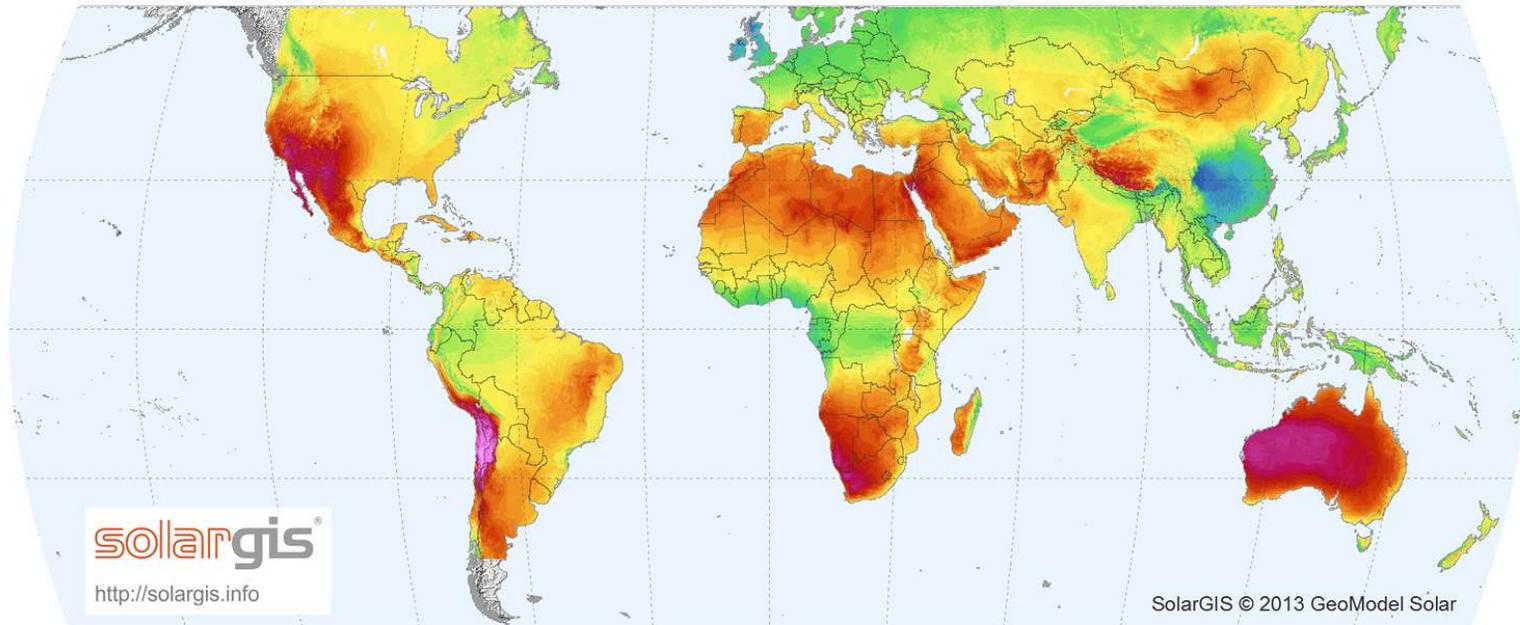


Il difetto principali di questi impianti è il costo dei pannelli, per l'estrazione del silicio metallico dai silicati e la purificazione del biossido di silicio necessaria per ottenere Si ad alta purezza, cioè con impurità inferiori ad 1 ppb.

Il secondo problema è che l'energia viene prodotta solo durante le ore di luce e l'elettricità è difficilmente accumulabile in grandi quantità.

WORLD MAP OF DIRECT NORMAL IRRADIATION

GeoModel
SOLAR



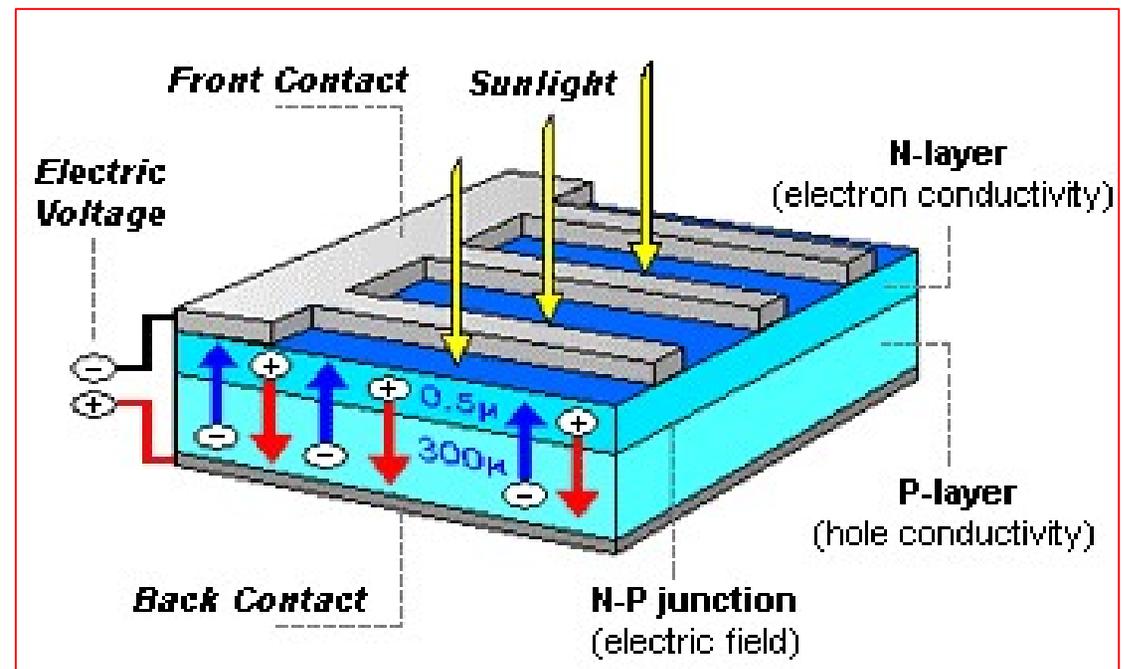
energia solare fotovoltaica



La cella fotovoltaica utilizza l'effetto fotoelettrico: I fotoni della luce solare, quando colpiscono la cella fotovoltaica, possono essere riflessi, assorbiti, o attraversarla.

Un fotone assorbito produce calore oppure, se ha sufficiente energia, libera un elettrone dallo stato legato spingendolo nella banda di conduzione.

Le coppie elettrone-lacuna così prodotte, risentono del campo elettrico, vengono spinte in direzioni opposte (l'elettrone, nella banda di conduzione, verso la zona N; la lacuna, nella banda di valenza, verso la zona P), dando origine ad un flusso elettronico che, se collegato a conduttori in un circuito chiuso, si traduce in corrente elettrica.



energia solare fotovoltaica

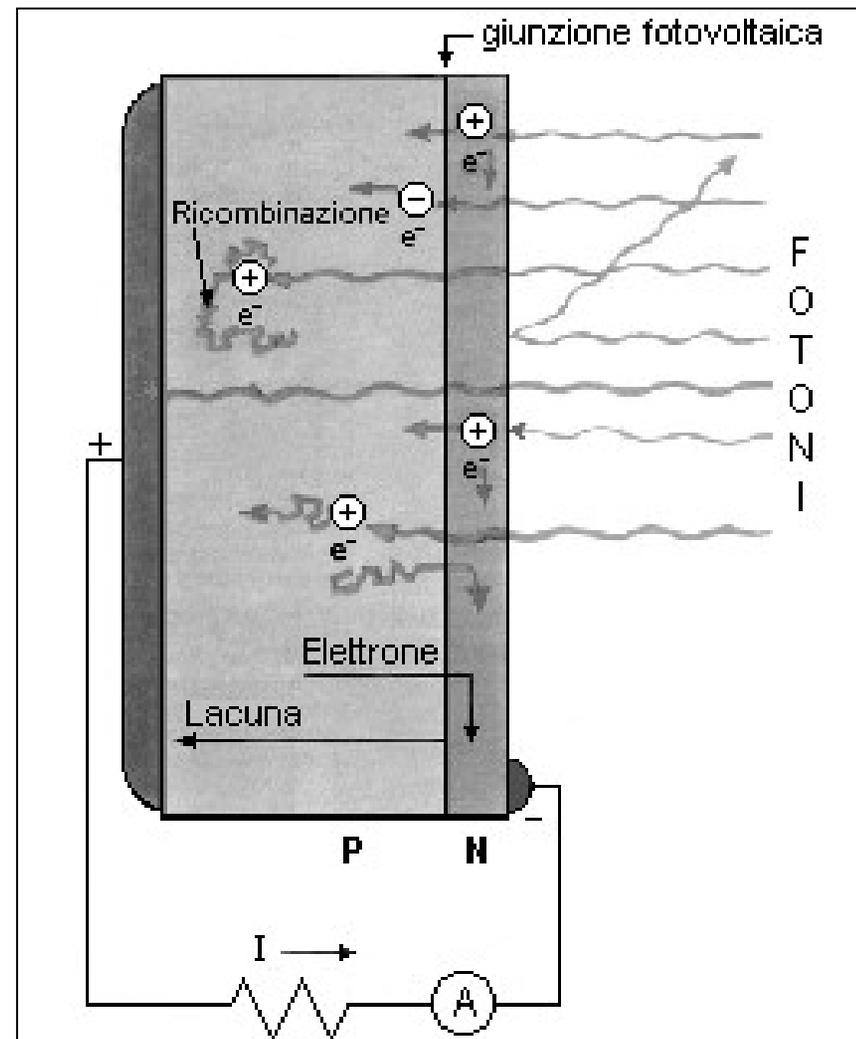


Quindi la cella fotovoltaica genera direttamente corrente elettrica.

Una cella fotovoltaica è sostanzialmente un diodo di grande superficie.

Esponendola alla radiazione solare, la cella si comporta come un generatore di corrente.

Ogni cella produce una tensione di circa 0.6 V

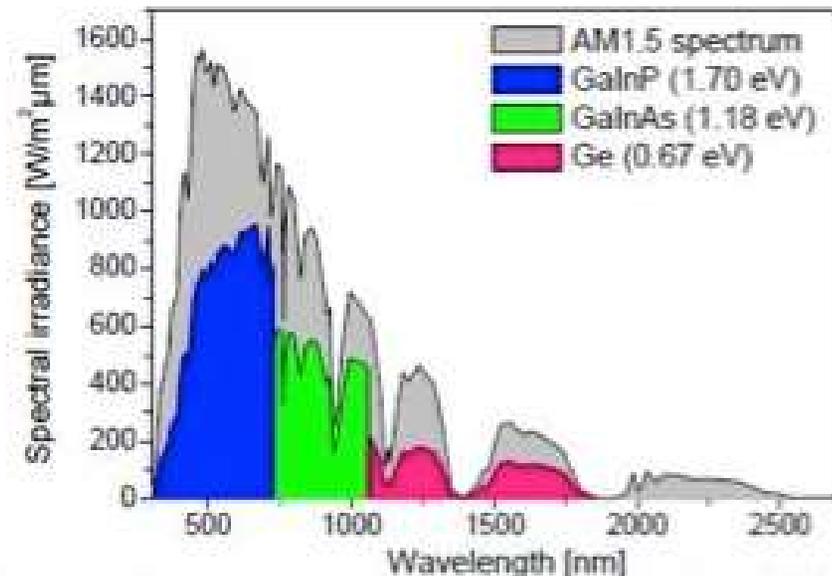
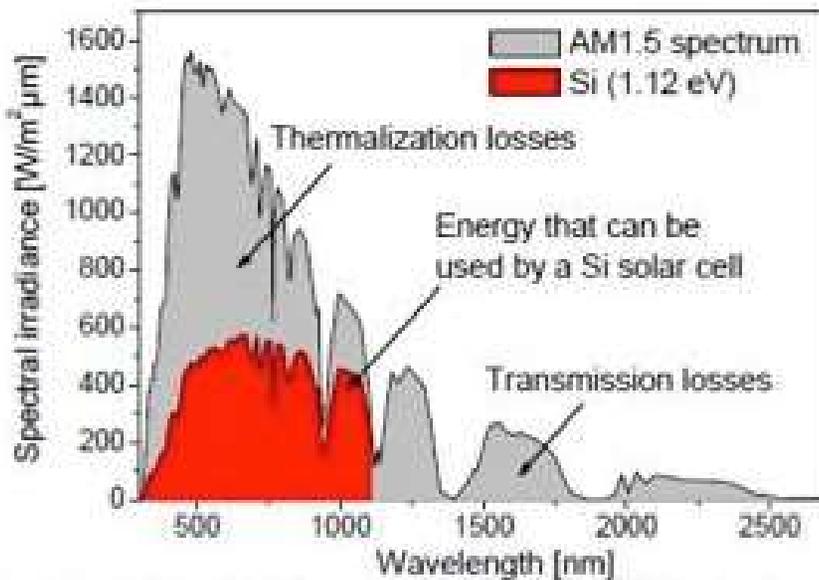
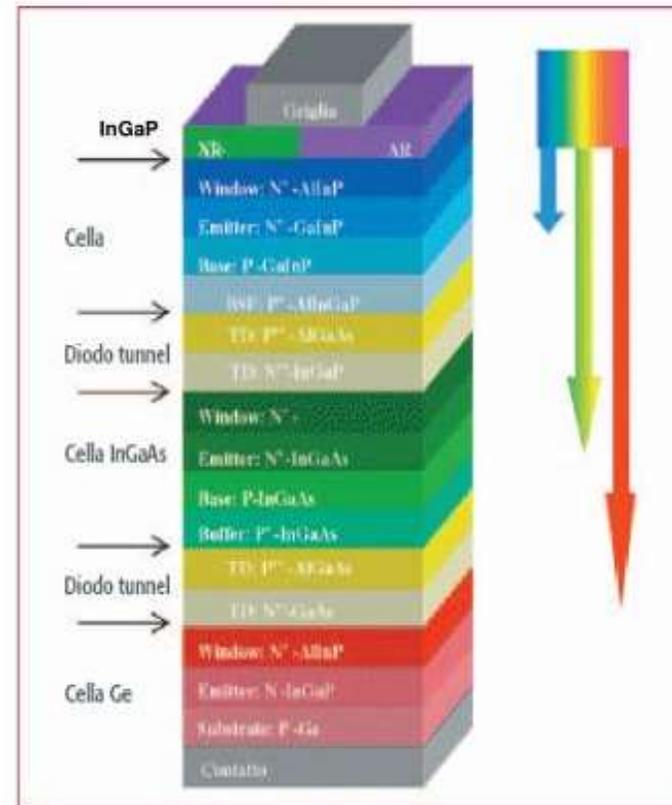


energia solare fotovoltaica



Pannelli multigiunzione:

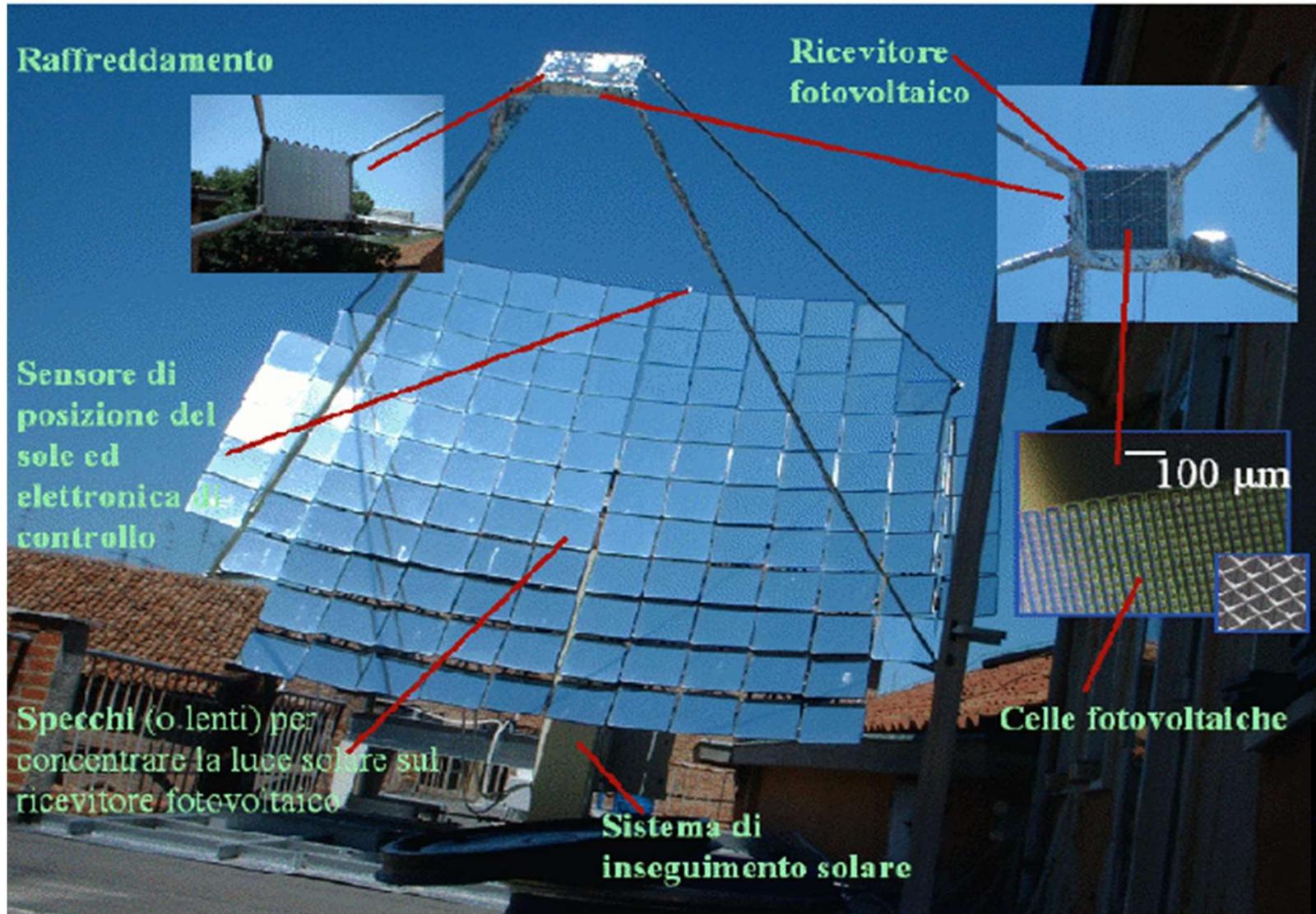
diversi semiconduttori si attivano in differenti bande dello spettro solare



energia solare fotovoltaica



Pannelli a concentrazione: la radiazione solare viene concentrata su piccoli pannelli solari

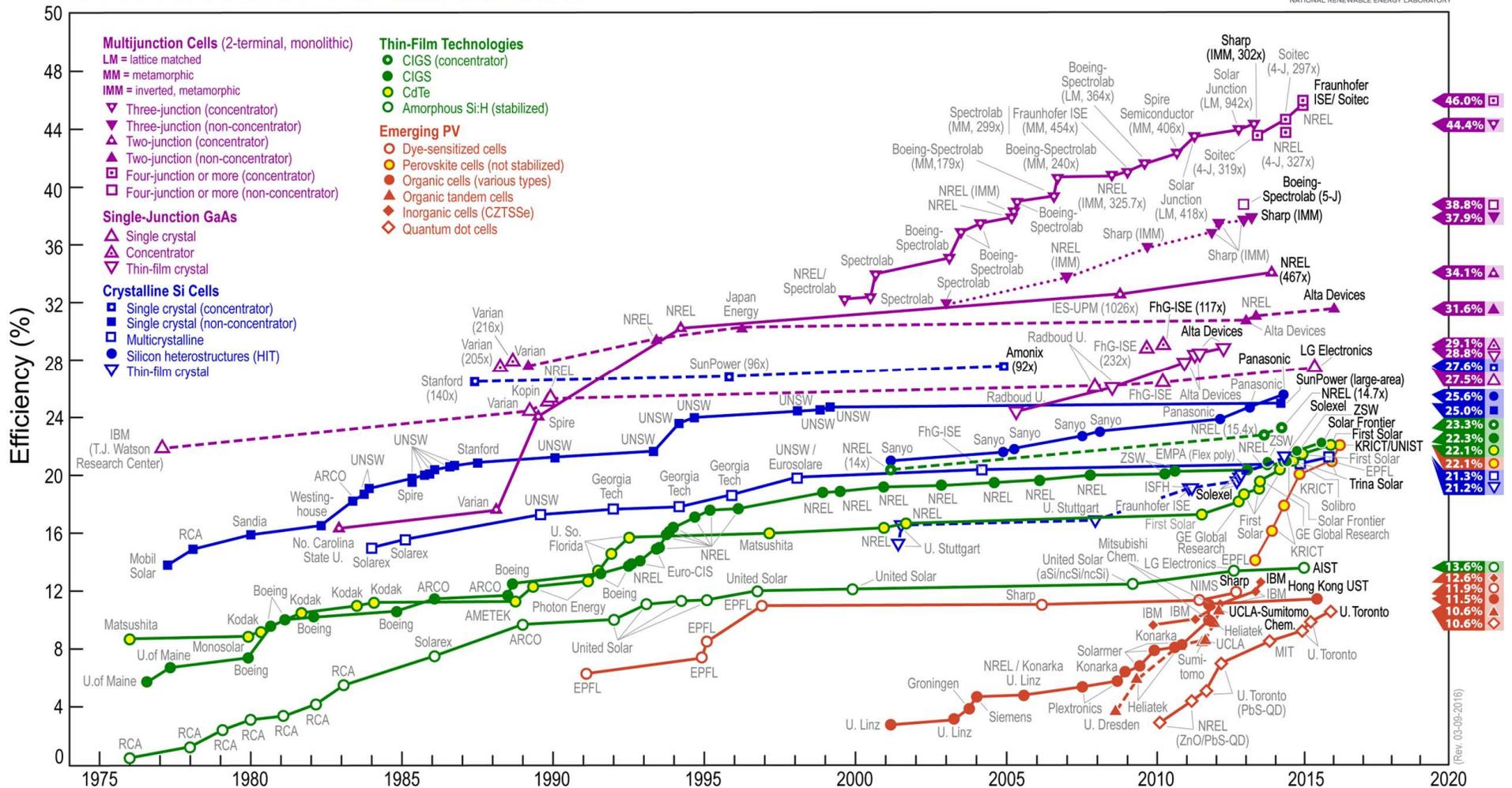


energia solare fotovoltaica



efficienza aumenta col tempo

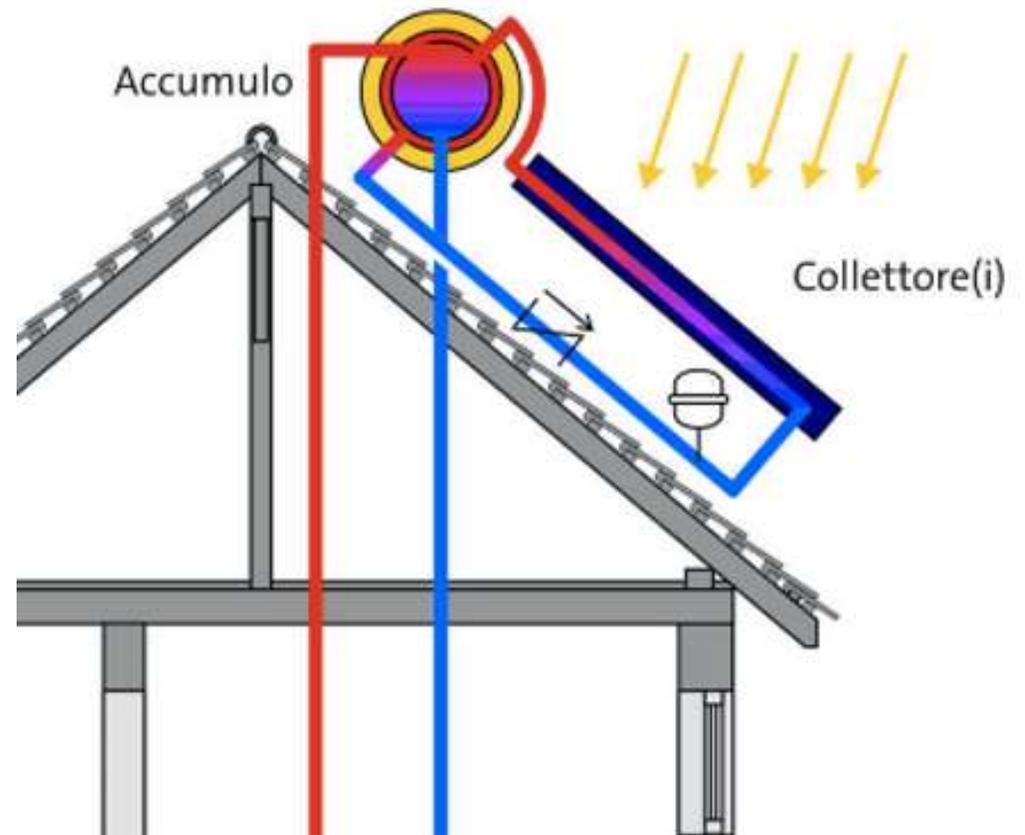
Best Research-Cell Efficiencies



energia solare termica



Si sfrutta l'energia solare direttamente per riscaldare l'acqua, per usi domestici o industriali



energia solare termica



energia solare termodinamica



Il fluido che si riscalda è una miscela di sali fusi (nitrati di sodio e di potassio) che raggiungono i 550°

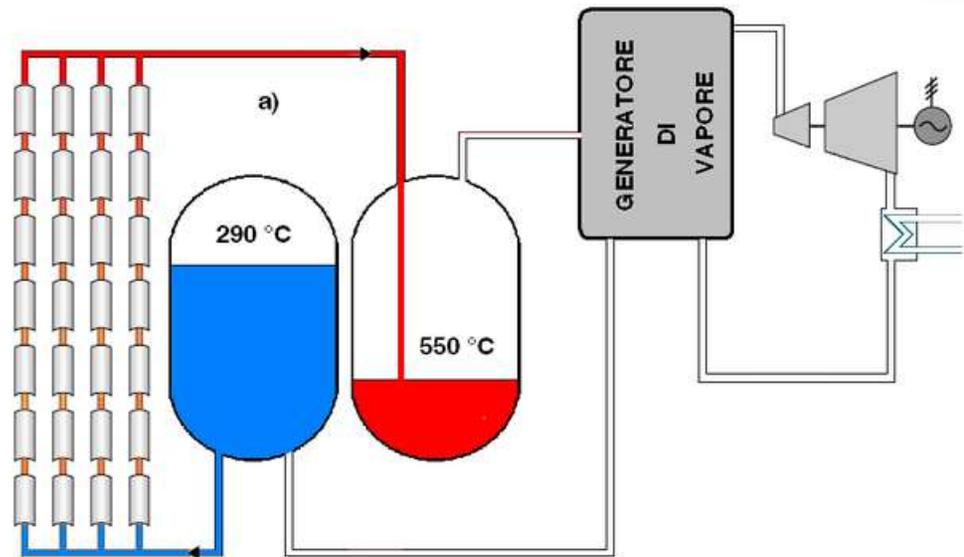


energia solare termodinamica

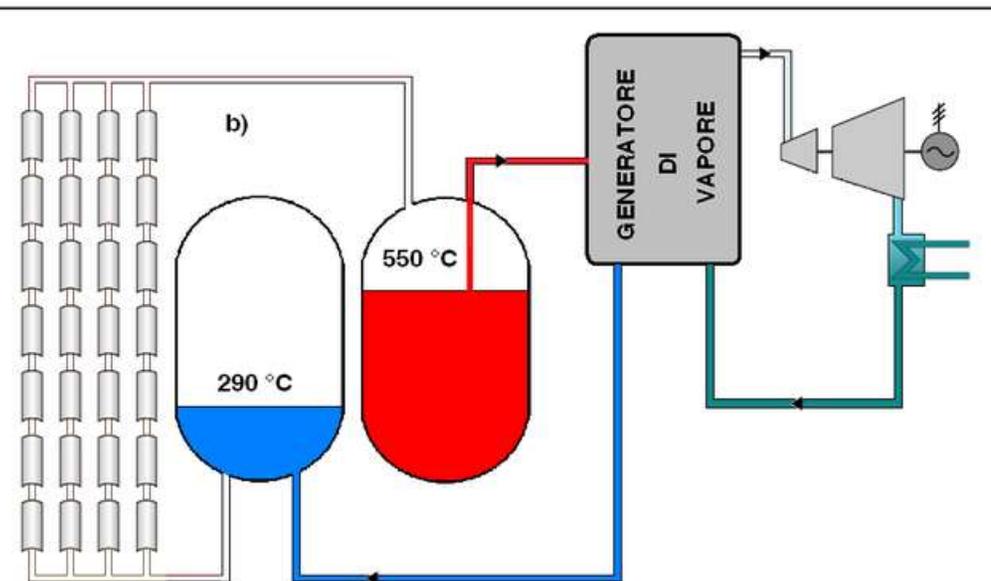


Esempio di un impianto per la produzione di energia elettrica, con le due fasi indicate:

- a) Carica del serbatoio caldo
- b) Scarica.



E' possibile l'integrazione di questo tipo di impianti con altri generatori.



energia eolica



Per energia eolica si intende l'energia ricavata dal movimento delle masse d'aria atmosferiche, generati da gradienti di pressione/temperatura.

Vi sono diverse geometrie possibili per ottenere energia dal vento:

asse orizzontale (1, 2, 3 pale)



asse verticale (varie forme)



energia eolica



Ricaviamo la potenza meccanica fornita da una massa d'aria di densità ρ e velocità v ad un rotore con pale di raggio r

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

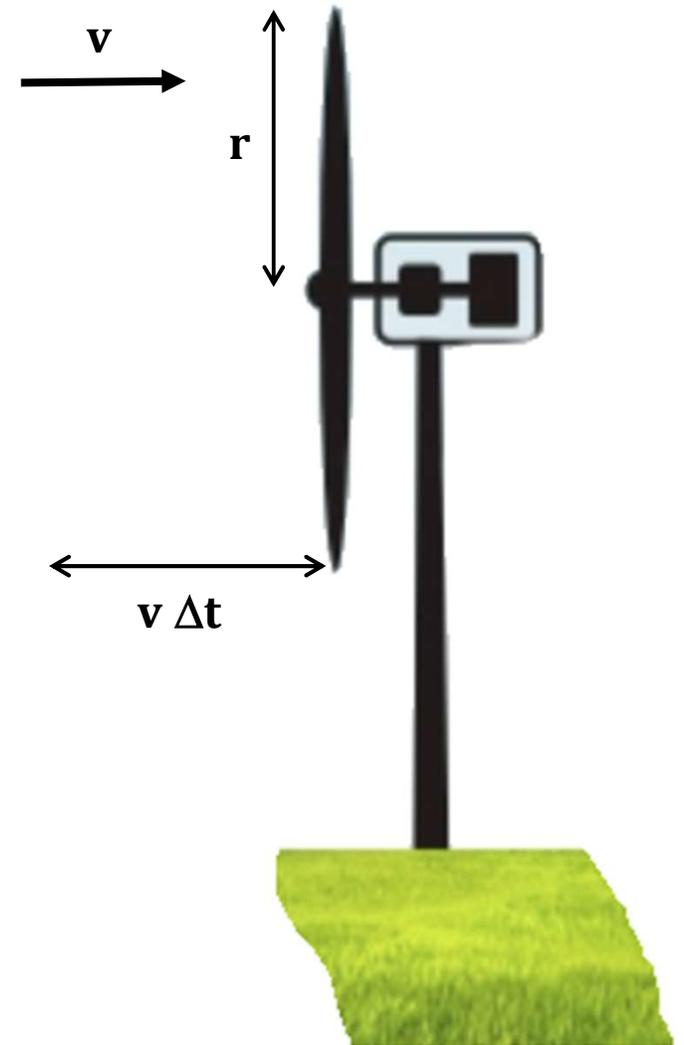
$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m v^2 = \frac{1}{2} \rho \Delta V v^2$$

$$\Delta V = \pi r^2 v \Delta t = A v \Delta t$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho A \Delta t v^3$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

il che significa che la potenza è maggiore se l'aria è più densa (a bassa quota e temperatura bassa), se la pala è grande (r grande) e se la velocità del vento è grande.



energia eolica



L'efficienza massima di un impianto eolico può essere calcolata utilizzando la Legge di Betz, che mostra come l'energia massima che un generatore eolico qualunque può produrre sia il 59,3% di quella posseduta dal vento che gli passa attraverso.

$$P_e = w P \quad w = 16/27 \text{ coefficiente di carico}$$

Tale efficienza è il massimo raggiungibile e un aerogeneratore con un'efficienza compresa tra il 40% al 50% viene considerato ottimo.

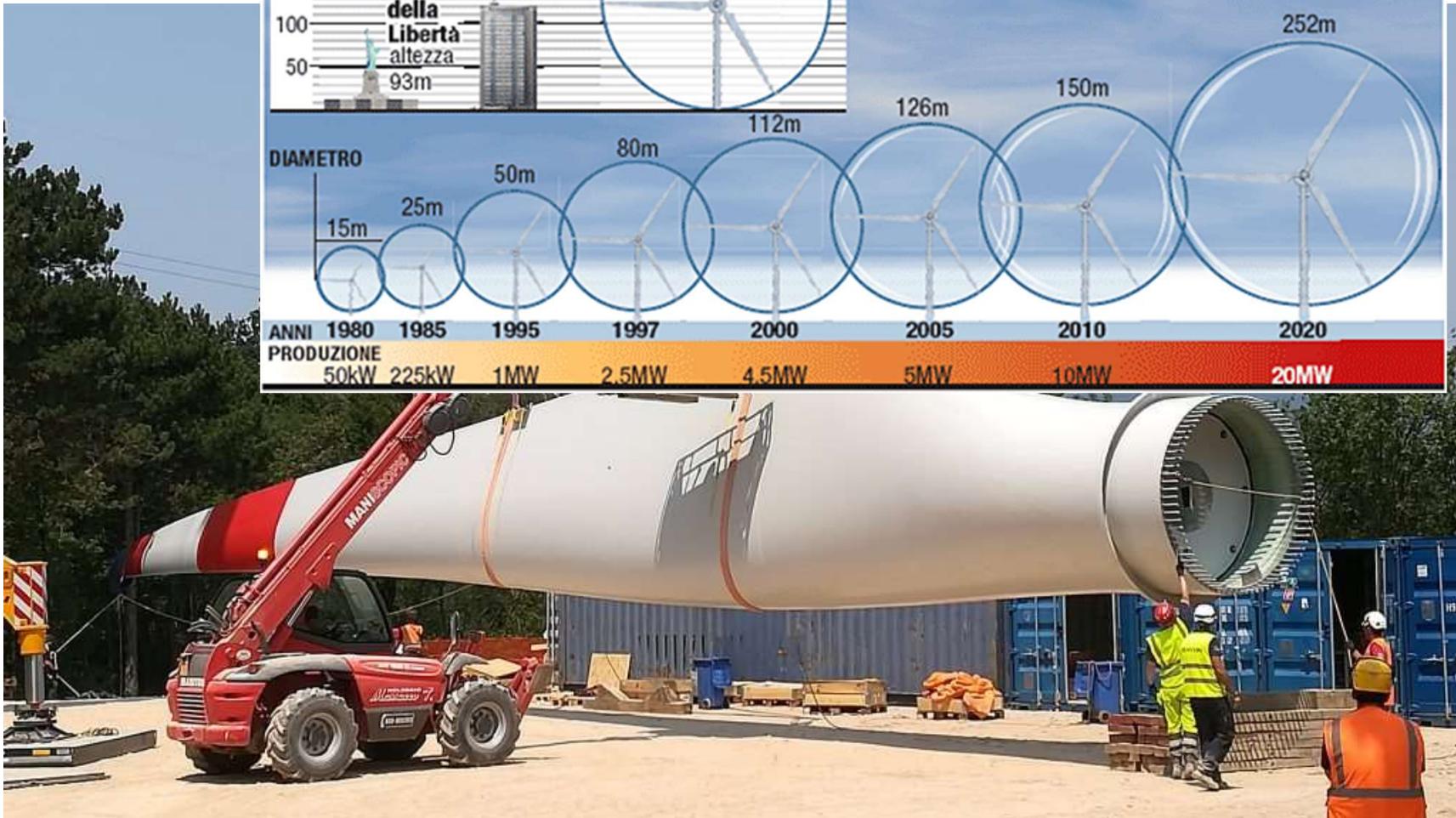
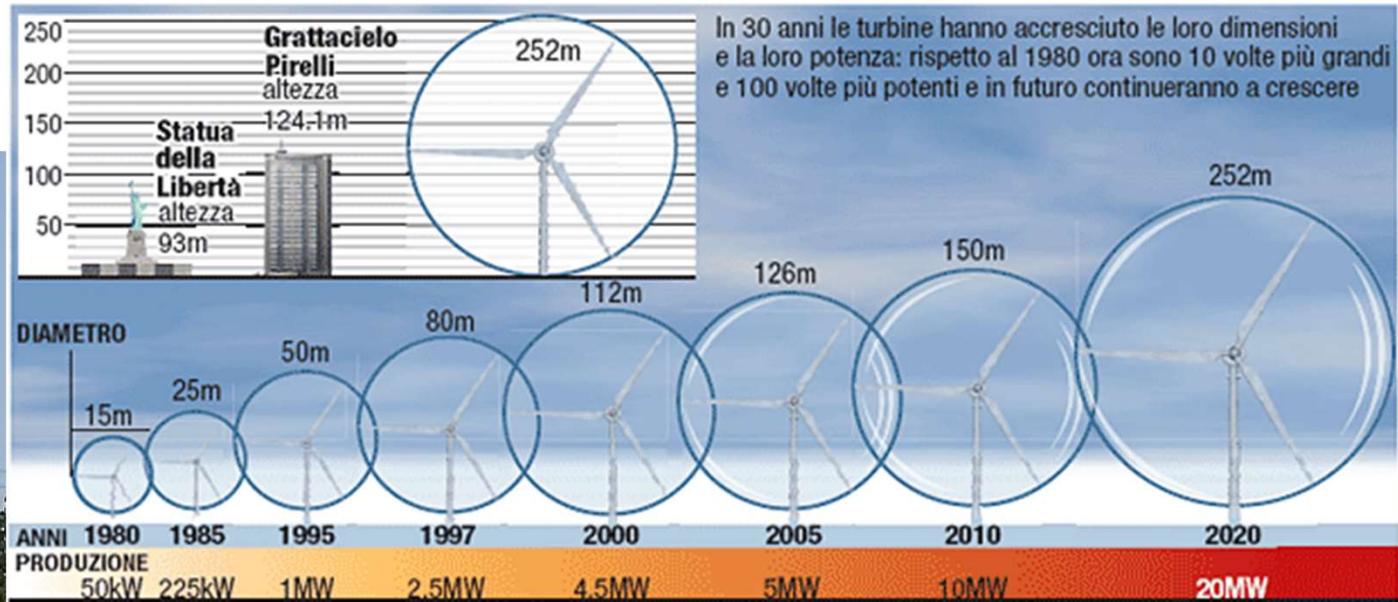
Altri approcci riguardano:

- generatori ad alta quota (venti più intensi)
- uso di nastri vibranti (micro generatori)

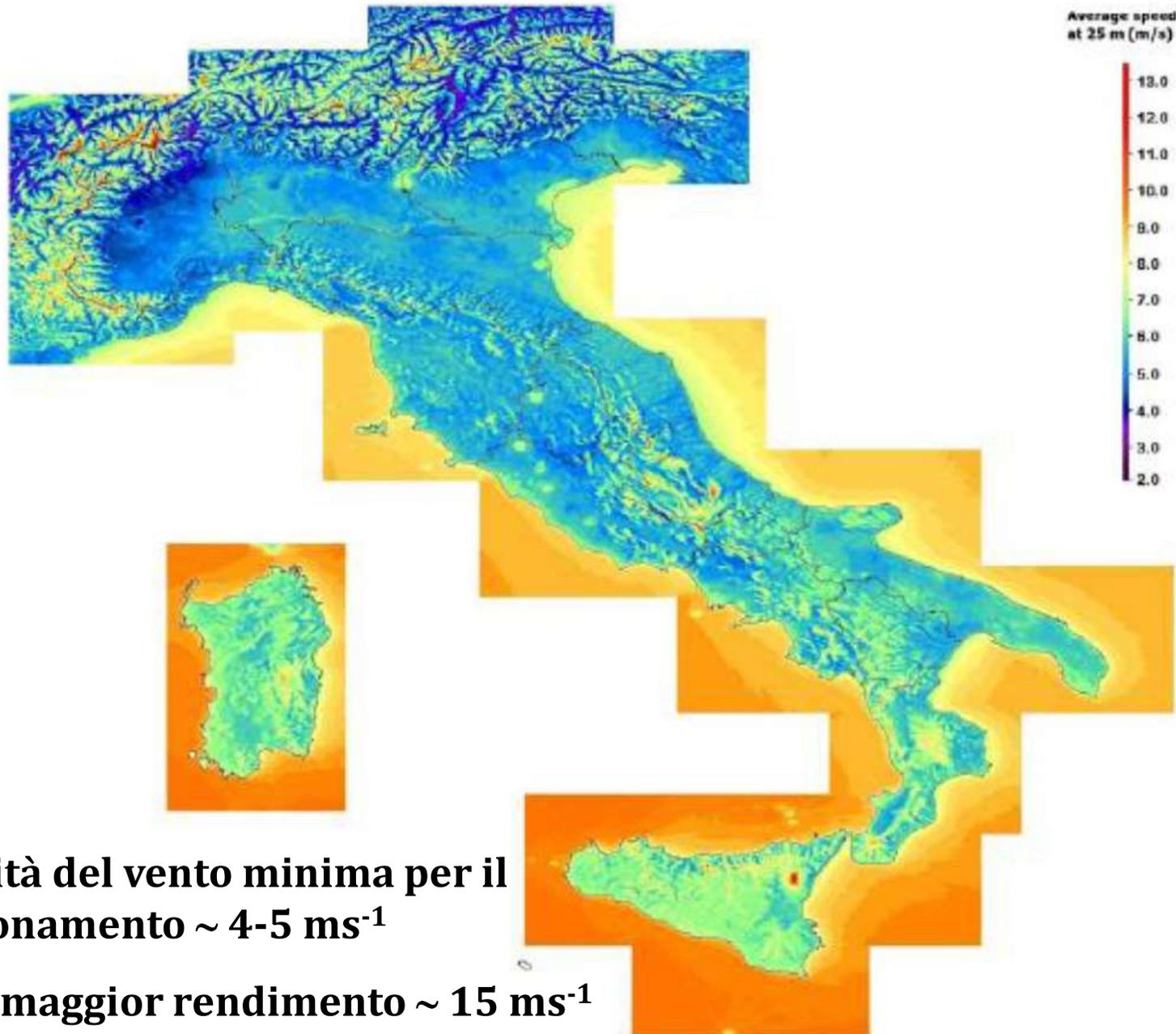
energia eolica



Le centrali eoliche sono formate da rotori con pale sempre più grandi
($P \propto r^2$)



energia eolica



energia da bio-carburanti



La prima generazione dei bio-combustibili comprende tutte quelle sostanze prodotte dalla fermentazione di **zuccheri** derivati dalle piante (mais, barbabietola, tapioca...)

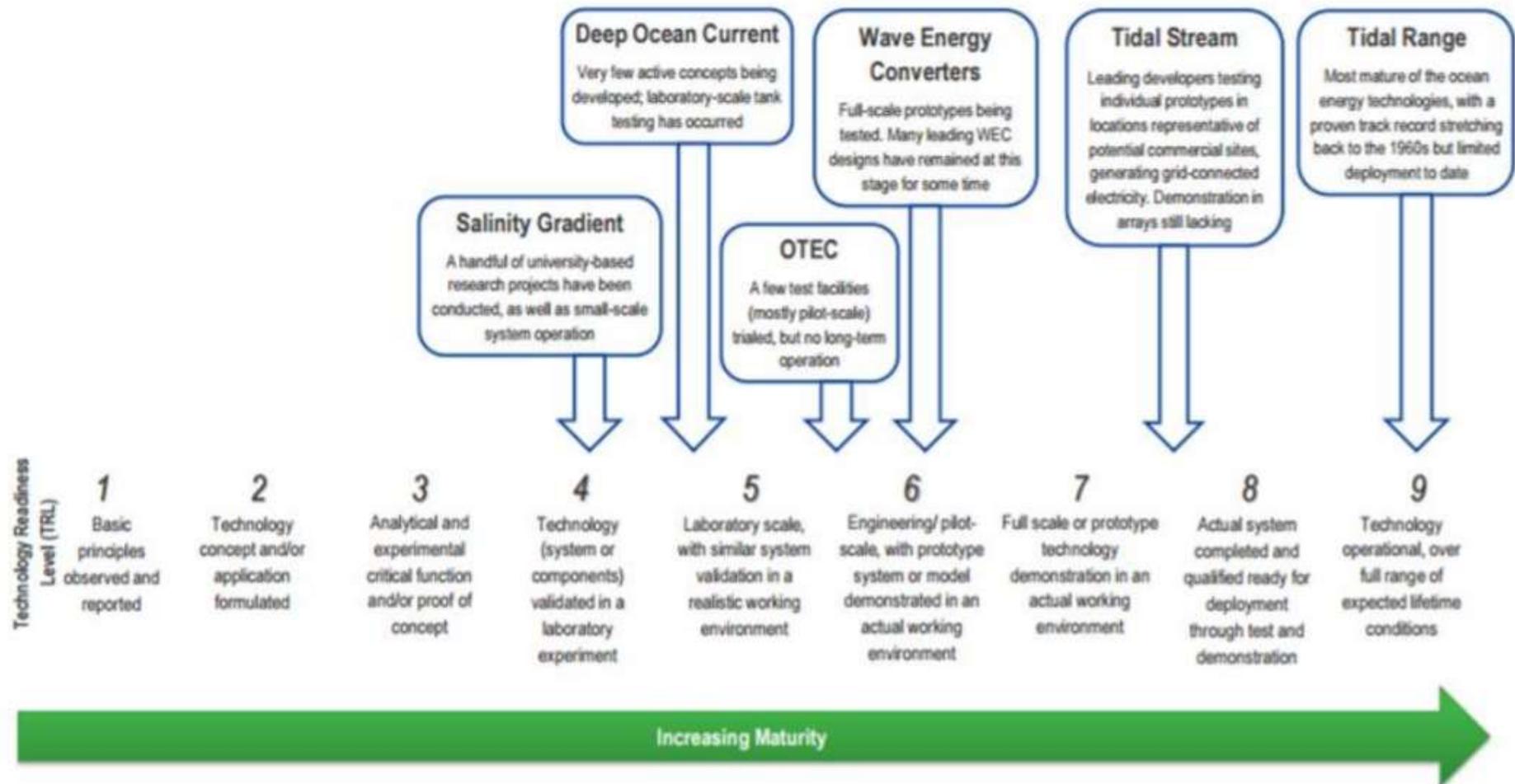
La seconda generazione riguarda sostanze ottenute dalla fermentazione di parti vegetali **non commestibili** ad alto contenuto di cellulosa. Contengono carboidrati complessi che richiedono metodi avanzati (e costosi) di pre-trattamento prima di ottenere la fermentazione.

I bio-combustibili della terza generazione sono ricavati da **alghe** e si pensa possano offrire un rendimento molto superiore (+3000%) rispetto a quelli delle prime due generazioni. Dalle alghe si possono ottenere molti combustibili **liquidi o gassosi** attraverso procedimenti (costosi). Allevamenti intensivi di alghe **geneticamente modificate** possono utilizzare gli scarichi di CO₂ prodotti da centrali a combustibili fossili.

energia marina

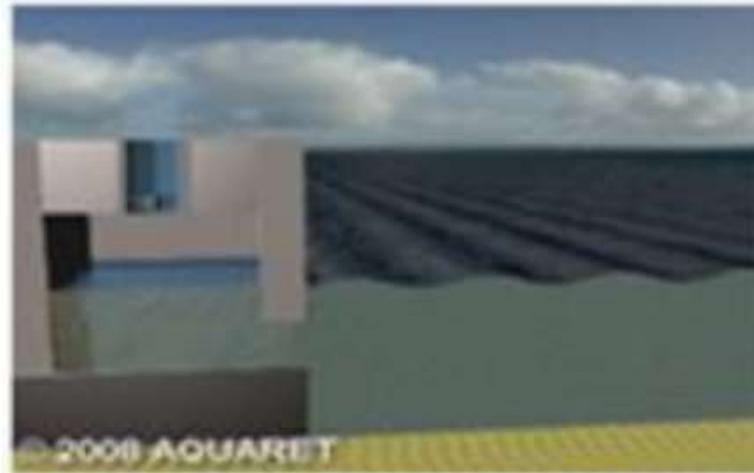


Si stima (Mørk et al., 2010) che dagli oceani si possano estrarre fino a 32 PWh in un anno (il doppio della produzione globale del 2008) utilizzando vari processi.

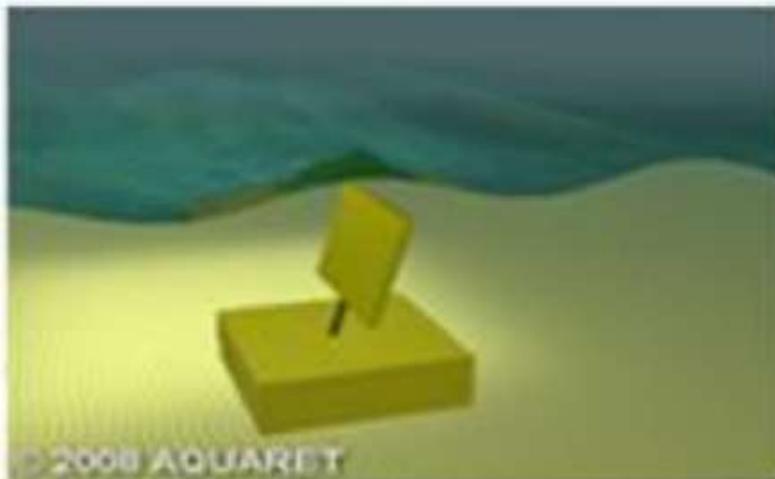


energia marina

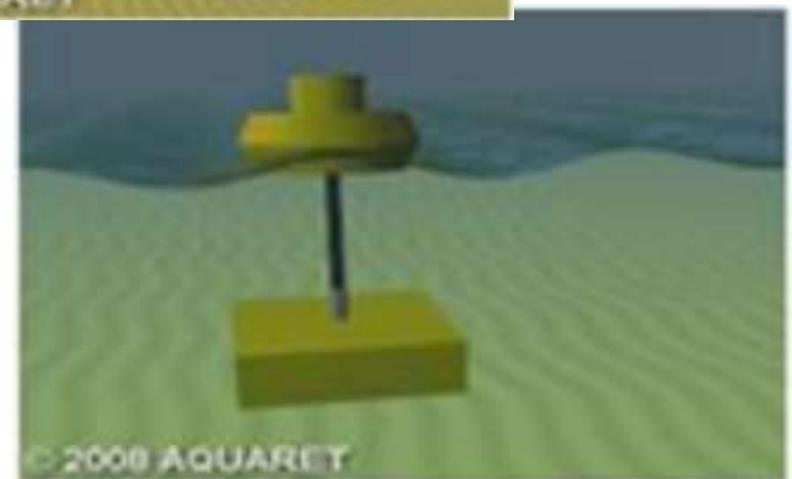
Esempi di strutture per lo sfruttamento dell'energia delle onde



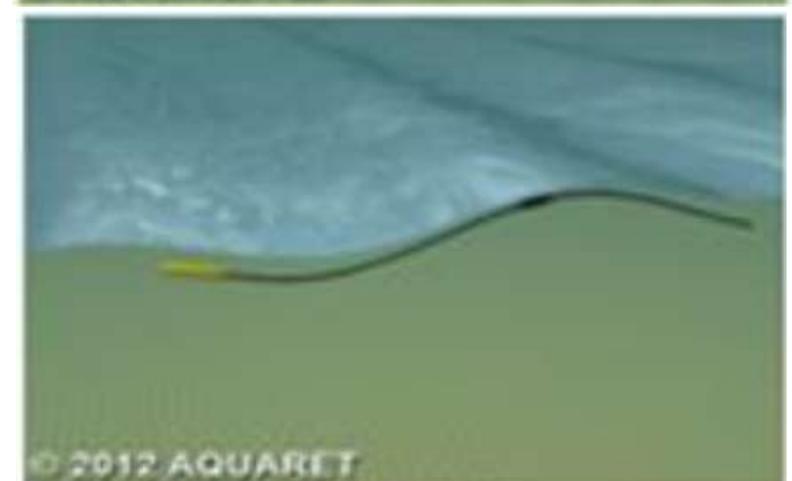
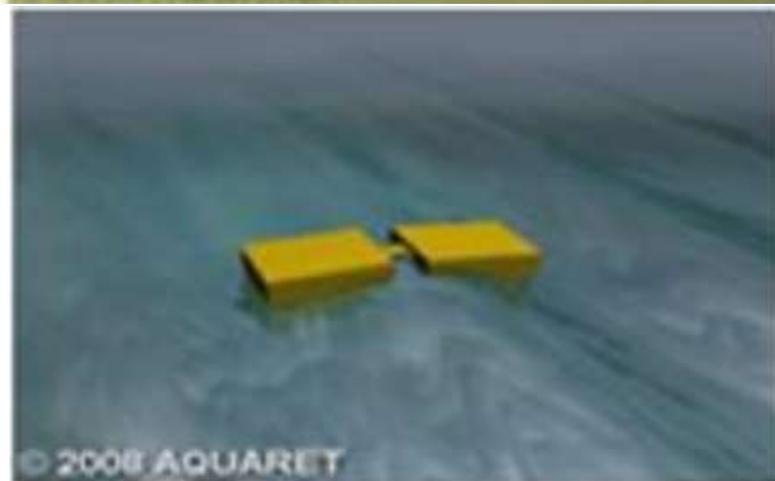
sulla
costa



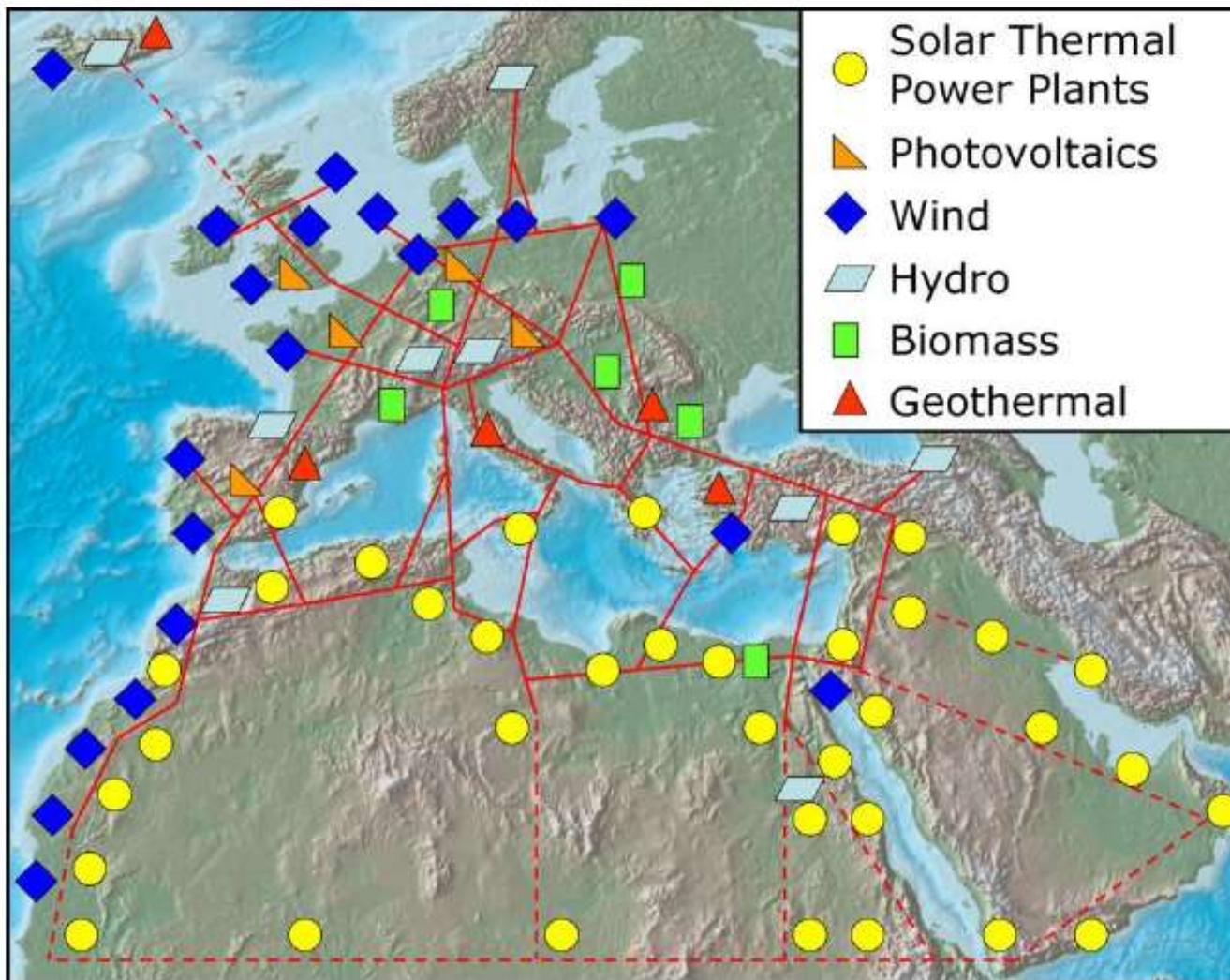
al
largo



in mare
aperto



**Within 6 hours deserts receive more energy from the sun than humankind consumes within a year
(www.desertec.org)**



Supergrid europea con un collegamento EU-MENA Schema di realizzazione di una possibile infrastruttura per l'approvvigionamento sostenibile di energia ai paesi **EU-MENA**.