

ENERGIA NUCLEARE: una panoramica sull'argomento

Ricerca fondamentale, produzione
dell'energia e smaltimento delle scorie
radioattive

Gianni Vannini

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Bologna



Il pianeta Terra e l'utilizzo antropico dell'energia

- Prima di parlare delle varie “fonti” energetiche è indispensabile conoscere la **situazione attuale del nostro pianeta** e capire quale è la direzione che stiamo prendendo se non cambiamo i modi di produzione dell'energia (**conseguenze delle scelte**).
- Per capire ciò occorrono **informazioni corrette e complete** e la **conoscenza delle leggi della natura.**

Inrformazioni e notizie

Vi elenco alcuni fatti accaduti in quest'ultimo anno:

- Gennaio 2007: Rapporto Commissione UE: effetto serra e desertificazione del sud dell'Europa.

- Autunno 2007: Film e Conferenze di Al Gore.

*Giornali, TV... l'enfasi è sull'aspetto economico (turismo !...); nessuno che si chieda il **perché** si è arrivati a questa situazione, né **cosa si deve fare**, se non generici inviti al risparmio e alle energie alternative.*

- 2008: c'è chi propone il nucleare perché è economicamente conveniente.
- Ottobre 2008: il governo italiano ha bloccato le risoluzioni della UE per ridurre le emissioni di CO₂ con la motivazione che sarebbero troppo onerose per le industrie italiane.

Il problema non è l'economia!

- 2008: Il rapporto dell'IPCC (International Panel on Climate Change) mostra chiaramente quale è il problema: il cambiamento climatico è chiaramente in corso ed è correlato alle emissioni di anidride carbonica e altri gas serra.
- Novembre 2008: pubblicazione su Nature Geoscience dimostra che l'aumento delle temperature ai Poli (con conseguenze sui ghiacci, sul livello dei mari, sulla biologia, etc.) e' direttamente dovuto alle **attività umane.**



Informare, discutere e INSEGNARE

- Si discute di ciò a livello politico, nei media, *nelle scuole*, nelle famiglie?
- INFORMAZIONE
- ANALISI E COMPrensIONE DEI FENOMENI
- RICERCA e CONOSCENZA
- CONFRONTO delle idee, delle opinioni e delle situazioni



Le leggi della Natura

- Il pianeta Terra è un sistema finito
- La specie umana **fa parte** della natura e tutto quanto l'uomo fa è naturale e quindi è soggetto alle leggi della natura!

Il vero nodo del problema di questi ultimi due secoli è l'energia e il fatto che l'umanità ne abbia necessità in una particolare forma.

Si deve capire cosa significa "**Produzione di Energia**".
E per capire occorre conoscere le leggi naturali che riguardano l'energia e il suo utilizzo.



Le leggi della Natura

Due leggi fondamentali e generali che valgono per tutto il nostro universo!

- 1. La conservazione dell'energia** (produrla significa "prenderla da qualche parte")
- 2. L'aumento dell'entropia dell'universo** (produrre energia utilizzabile porta a conseguenze nel resto dell'universo: inquinamenti...)



Le leggi della Natura e il Pianeta Terra

La Terra è non solo un sistema limitato ma è “in espansione” (numero di abitanti, energia “consumata”, ...).

Due questioni determinanti che sono
conseguenza delle due leggi generali precedenti.

- **“conservazione delle risorse”**
(esaurimento riserve, fonti rinnovabili)
- **“impatti ambientali”** (inquinamento, **clima**, ...)

Le leggi della Natura e il Pianeta Terra

Che cosa si fa?

- Guerre
- Protocollo di Kyoto (riduzione emissioni gas-serra) [1997, entrata in vigore 2005]
- Studi e ricerche

Cultura e conoscenza:

**Senza conoscenza delle leggi naturali non è
possibile risolvere alcun problema !**

**Questo è quello che scuola e Università dovrebbero
insegnare !**

[Fatti non foste a viver come bruti, ...]

[Felix qui potuit rerum cognoscere causas.]

Rivista dell'Accademia delle Scienze di New York, Ottobre 2008: "Building the Knowledge Capitals of the Future" (to transform the countries into knowledge societies)
Gianni Vannini



Le leggi della Natura e il Pianeta Terra

Due parole sulla **RICERCA**:

Non è una parola con cui riempirsi la bocca. Ricerca significa studio, studio dei problemi, studio con un metodo, un metodo scientifico.

Significa anche investimenti (denaro e risorse), anche a lunghissimo termine e senza "guadagni" immediati. Altro che "beneficenze ed elemosine" !!

Significa studiare le leggi generali che governano i fenomeni: *i problemi singoli non si risolvono se non si conosce il generale*. Quindi la ricerca di base, fondamentale, è **indispensabile** per raggiungere conoscenza e anche per trovare le soluzioni dei singoli problemi



La "Caccia all'Energia"

- Vita sulla Terra: **energia dal sole, reazioni chimiche, il fuoco, ...**
- Rivoluzione industriale: le macchine

Come si "estrae" l'energia? (Ricordarsi che "si conserva")
Sfruttando l'esistenza di particolari forze in natura

- **Gravitazionale**
- **Elettromagnetica**
- **Debole**
- **Forte, nucleare**

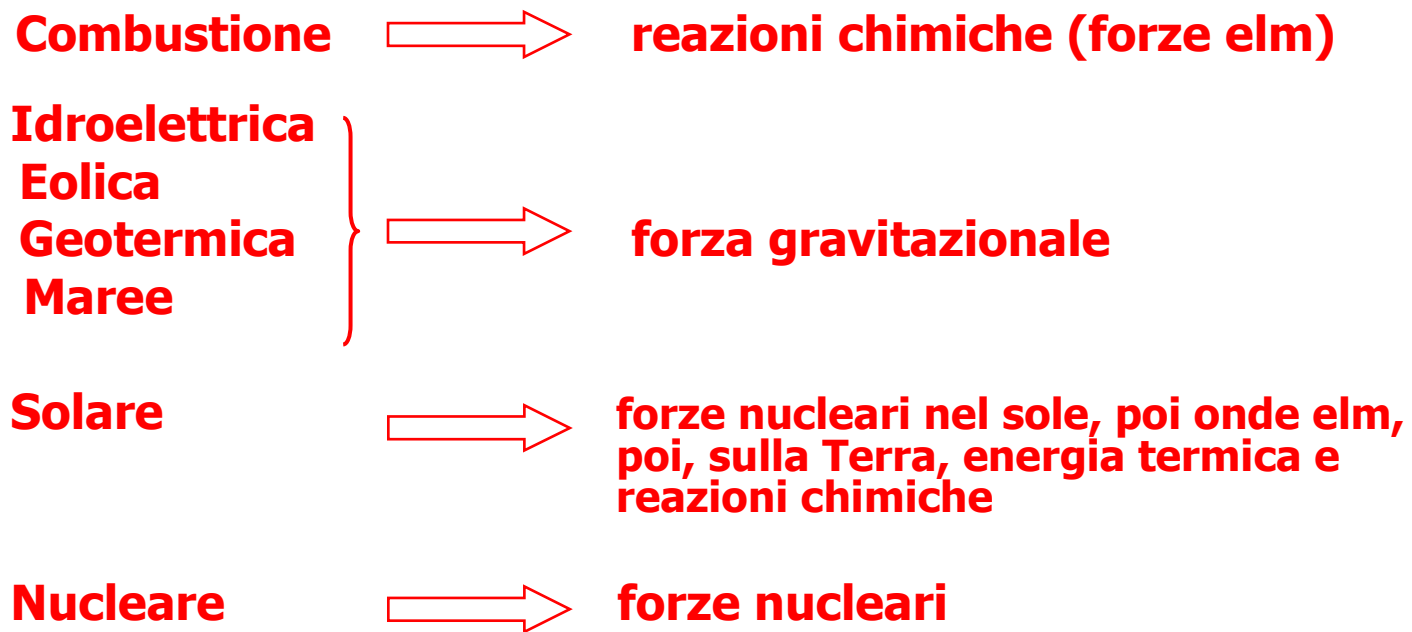
Il principio di base per la produzione di energia è sempre lo stesso



La "Caccia all'Energia"

Far passare un insieme di corpi da uno stato "meno legato" a uno stato "più legato". E il "legame" è dovuto alla particolare forza.

Attualmente



N.B.: tutto viene dal sole che produce energia tramite reazioni nucleari



La "Caccia all'Energia"

La legge dell'Aumento dell'Entropia mostra che qualunque sia il modo in cui si produce l'energia, si modifica il "Resto dell'Universo", cioè, in particolare, "l'Ambiente"

Ogni produzione energetica comporta dei **rischi**: ...incidenti, ..., inquinamenti, ..., cambiamenti climatici, ...

Attualmente la produzione energetica primaria mondiale è così distribuita

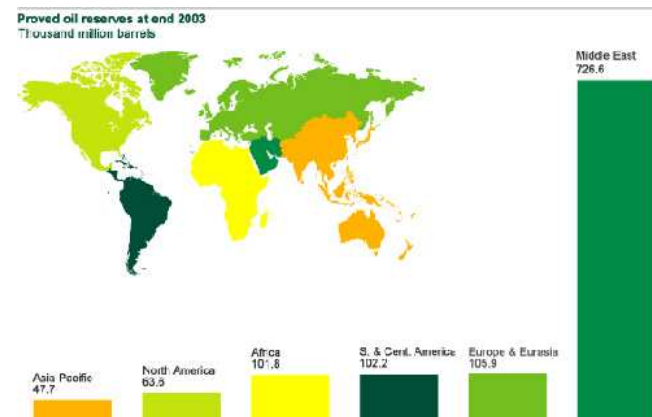
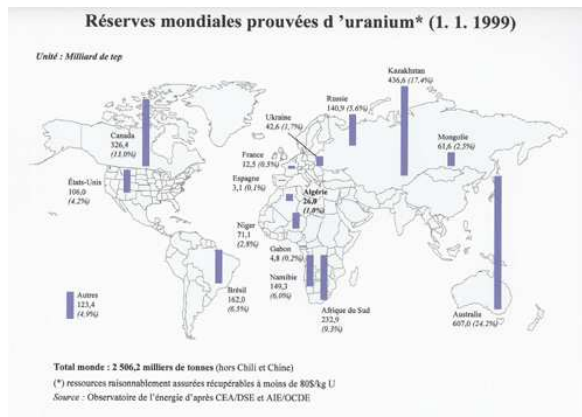
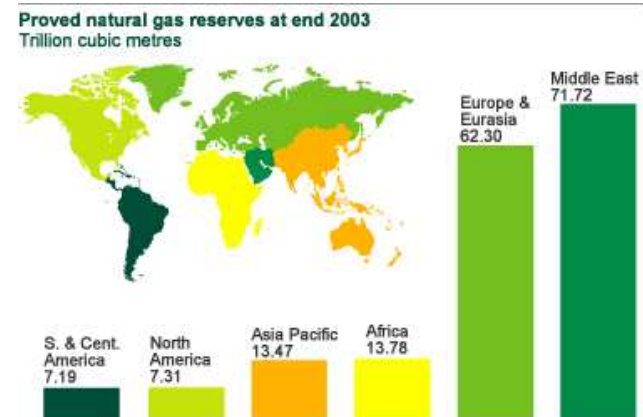
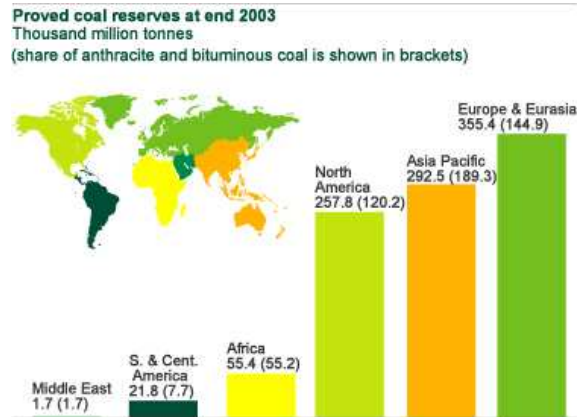
	dati 2003	2007	
Petrolio	37,3%	35.8%	} combustione!
Gas Naturale	23,9%	23.7%	
Carbone	26,5%	28.4%	
Rinnovabili	6,1%	6.3%	
Nucleare	6,1%	5.9%	



Gli usi prevalenti dell'energia

- Il fabbisogno prevalente di fonti energetiche riguarda:
 - la produzione diretta di mobilità (trasporti)
 - la produzione diretta di calore
 - la produzione diretta di elettricità
- Nei paesi industriali avanzati
 - 1/3 dell'energia primaria è utilizzato per produrre mobilità
 - 1/3 dell'energia primaria è utilizzato per produrre calore
 - 1/3 dell'energia primaria è utilizzato per produrre elettricità

La "Caccia all'Energia"





Pauro ?

- Chimica ?

Chi si ricorda di Bhopal ? (4000 morti e 500000 intossicati per isocianato di metile)

- Biologia ?

- Batteriologia ?

- C'è un "qualcosa" che produce circa 100.000 morti all'anno nella sola Unione Europea ! Ne abbiamo paura?

- **Nucleare ?**

Chi si ricorda di Chernobyl ? (58 morti e)

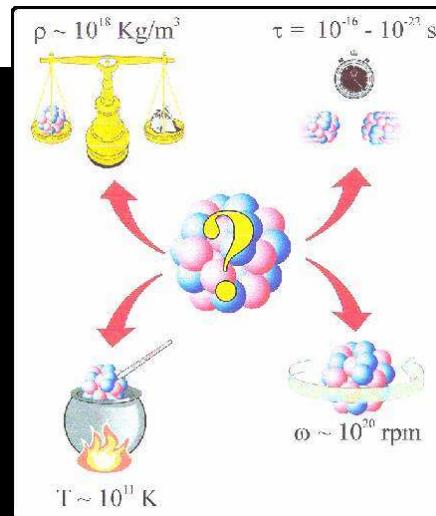
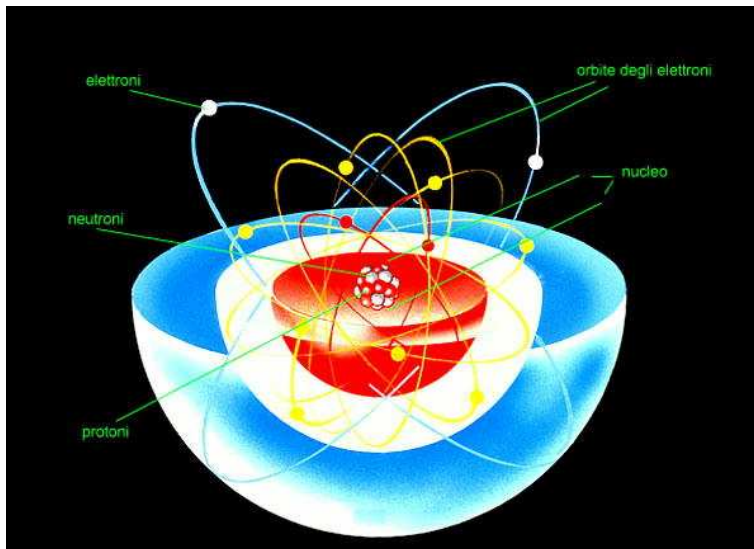
- Da cosa nasce la paura?

- Dal rischio reale? Oppure.....

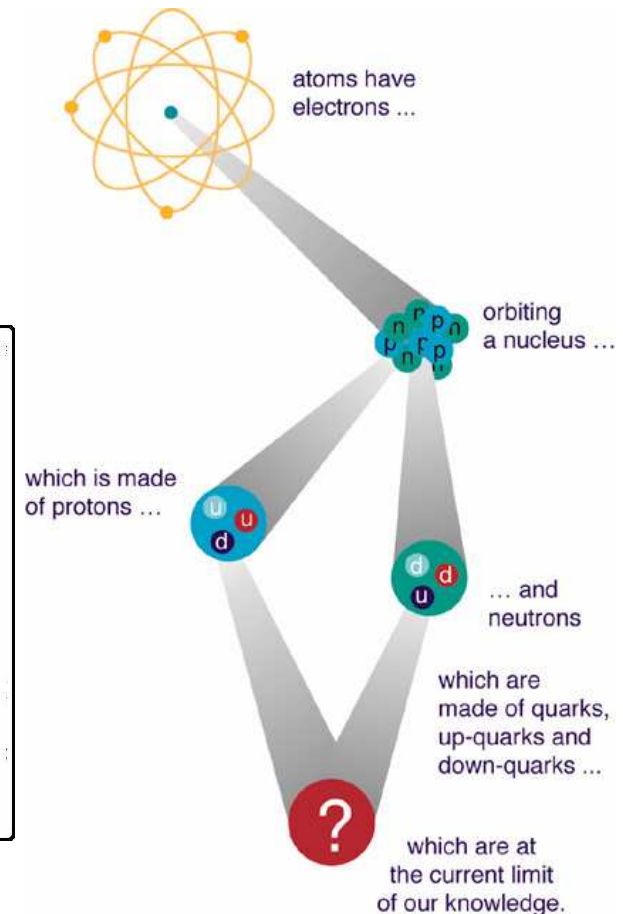
- **Sindrome NIMBY** (solo in Cina 5000 morti all'anno nelle miniere di carbone, ma chi di noi fa il minatore?)

Il nucleo atomico

- Per poter parlare con razionalità dell'energia nucleare occorre sapere che cosa è il nucleo atomico

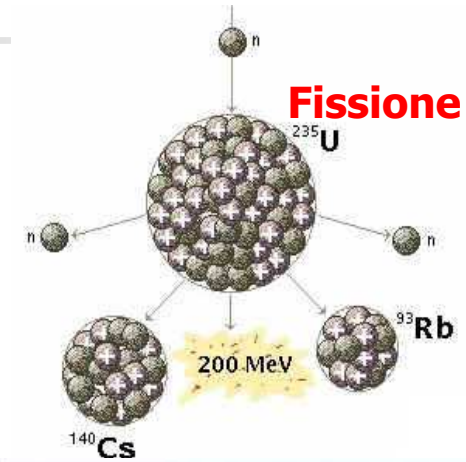
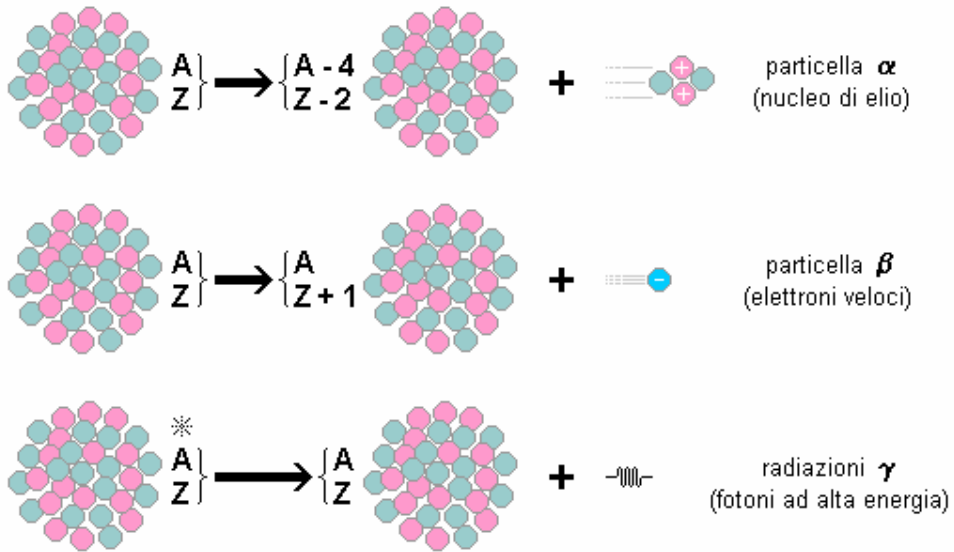


Gianni Vannini

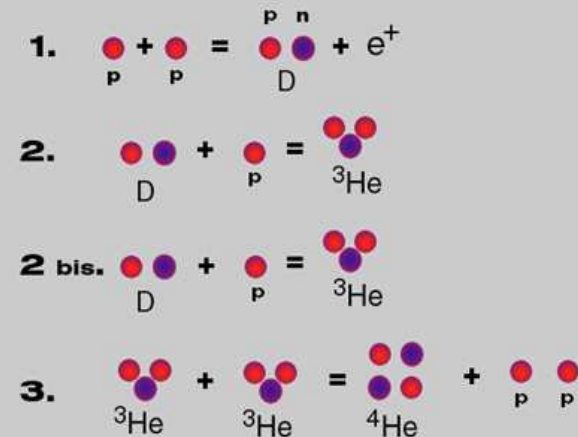


Il nucleo atomico

Emissioni dei nuclei radioattivi



Fusione dell'elio Ciclo protone - neutrone



● protone ● neutrone



Reazioni Nucleari

- **Reazioni nucleari:**

p+nucleo \longrightarrow nuovo-nucleo+...

n+nucleo \longrightarrow isotopo+... \longrightarrow eventuale
nuovo nucleo

e+nucleo \longrightarrow nuovo nucleo+...

nucleo+nucleo \longrightarrow nuovo nucleo+...

Si "creano" nuovi nuclei e quindi nuovi elementi:

-nelle stelle

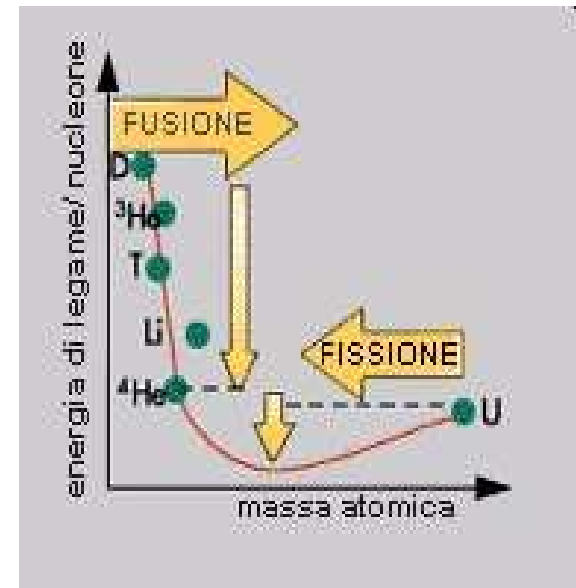
-sulla terra *con gli acceleratori di particelle.*

Si può ottenere energia da reazioni nucleari!

Tutte le stelle emettono energia prodotta in reazioni nucleari

Reazioni nucleari per produrre energia

- **Reazioni nucleari esoenergetiche**
- Gli elementi ,in natura, sono costituiti da molecole formate da atomi. Gli atomi sono caratterizzati da, un nucleo carico positivamente e dagli elettroni periferici negativi, che ne determinano la specie. Il nucleo a sua volta è costituito da neutroni e protoni, i nucleoni, tenuti insieme da forze estremamente intense e a breve raggio di azione, le forze nucleari. La massa di un nucleo e' minore della somma delle masse dei nucleoni (protoni e neutroni) che lo costituiscono : la differenza di massa (Δm), che è in relazione con l'energia di legame secondo la legge di equivalenza massa energia, $\Delta E = \Delta mc^2$, si chiama difetto di massa.
- Sono possibili combustibili nucleari, i nuclei che hanno più bassa energia di legame per nucleone, cioè quelli a piccola o ad elevata massa atomica: gli uni danno energia nucleare per **fusione**, gli altri per **fissione**.
- Consideriamo ora le reazioni nucleari che avvengono con sviluppo di energia:
- la **reazione di fusione** di due nuclei leggeri, in cui si origina un nucleo più pesante: in essa si ha liberazione di energia perché la massa del nucleo risultante è minore delle masse dei due nuclei reagenti;
- la **reazione di fissione**, in cui un nucleo molto pesante si spezza in due nuclei più leggeri: anche in questo caso la massa complessiva dei frammenti è minore della massa del nucleo di partenza.
- L' energia liberata nelle reazioni nucleari, a parità di quantità di sostanze reagenti, è milioni di volte più grande di quella liberata nelle reazioni chimiche (combustione).





L'ENERGIA NUCLEARE

“Produrre” energia sfruttando la forza forte che tiene legati i costituenti del nucleo atomico (i protoni e i neutroni)

- Fusione nucleare
- Fissione nucleare

In entrambi i casi si passa da un sistema meno legato a un sistema più legato

Concetto di reazione a catena.

Entrambe le reazioni sono state usate per produrre energia in modo esplosivo: bombe A e H

Solo la fissione è stata usata per produrre energia in modo controllato: **Reattori Nucleari**

Reattori critici e sottocritici

Fissione nucleare: i reattori nucleari a fissione

Possibilità di controllo della reazione → **REATTORI a FISSIONE**

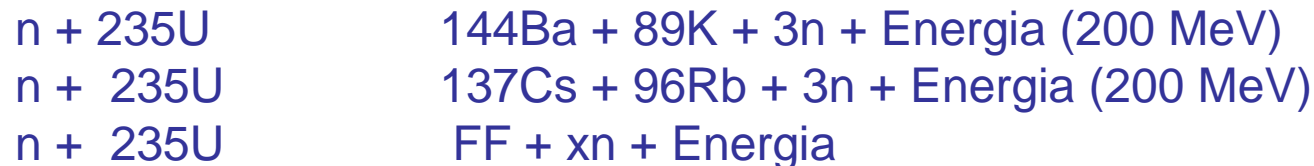
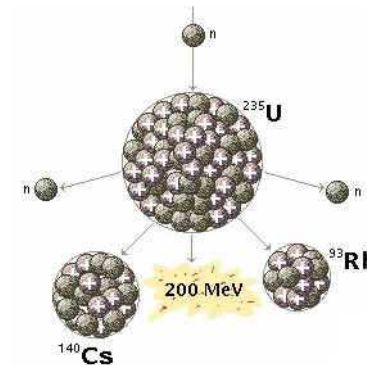
■ **COMBUSTIBILE:**

miscela di isotopi dell'Uranio: ^{235}U (0.7%) e ^{238}U (99%).
Solo ^{235}U è fissile (si scinde se colpito da neutroni lenti [termici]) e dà luogo a reazione a catena (vedi figura)
L'arricchimento dell'Uranio consiste nel portare l' ^{235}U al 5%. Solo il 5% del combustibile viene utilizzato

MODERATORE: acqua pesante, grafite, etc etc.

SCORIE:

^{238}U assorbe i neutroni e diventa ^{239}Pu che è fissile e contribuisce a fornire energia, ma una parte rimane come scoria e una parte si trasforma in altri nuclei pesanti radioattivi: ^{238}U , transuranici, frammenti di fissione



$$1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ joule}$$

Gianni Vannini

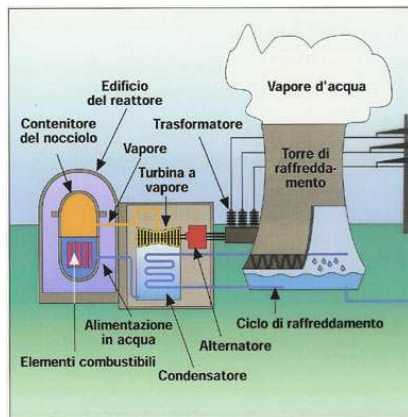
Reattori a fissione

I sistemi attuali sono “**once through**”: il combustibile, U o Pu, passa una sola volta attraverso il core del reattore



L'ENERGIA NUCLEARE

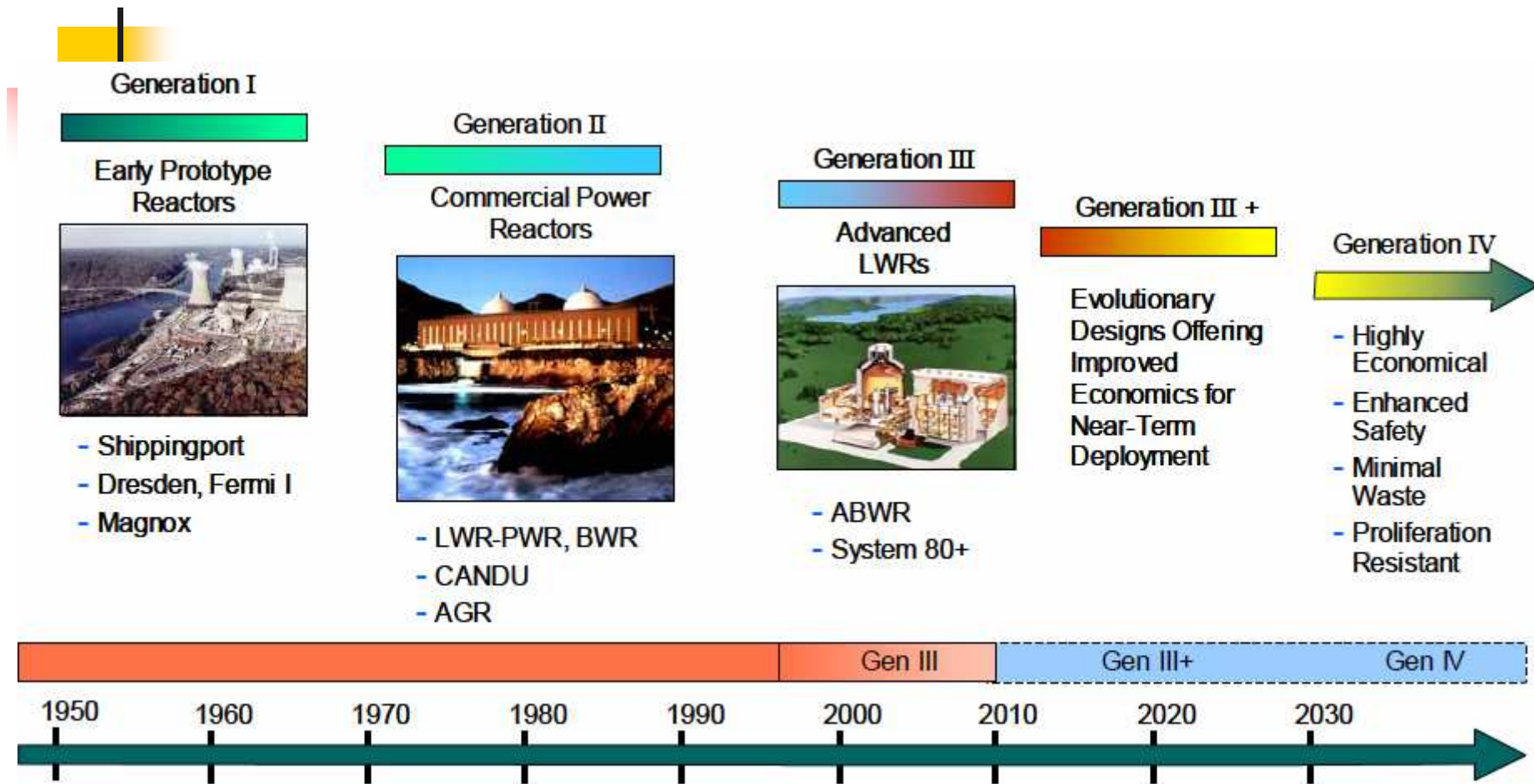
In Europa: 229 centrali nucleari (448 nel mondo)



**“E le scorie
dove le
buttiamo?”**

**L'Italia abbandona il nucleare con il referendum del 1987
Ancora presenti 4 reattori non più funzionanti:
Caorso (Piacenza), Trino (Vercelli), Garigliano(Caserta), Latina**

Passato, presente e futuro dell'energia nucleare da fissione



Gli obiettivi della IV Generazione

Richieste di progettazione per i reattori di **IV
Generazione**

Vantaggi per l'ambiente:

- zero emissione di CO₂, SO₂, etc... (**energia pulita**)
- minore produzione di **scorie**

Sostenibilità:

- maggiore efficienza di **burn-up** e maggiore efficienza **termica**
- disponibilità del combustibile nel **lungo termine**

Economicità:

- **tempi e costi** di costruzione (capital risk) confrontabili con altre fonti energetiche
- **costo del kWh** confrontabile o inferiore ad altre fonti (rinnovabili)

Sicurezza

- Bassissimo rischio di danno al **nocciolo**
- Maggiore **protezione** contro attacchi terroristici

Non-proliferazione

- bassa convenienza o impossibilità di **furto**
- impossibilità di utilizzo del combustibile per **scopi militari**

Possibilità di produrre idrogeno

- "estensione" del nucleare al settore dei **trasporti**



Gli attuali reattori a fissione

Problemi dei reattori attuali:

- bassa **efficienza di burn-up** e produzione di grandi quantità di **scorie radioattive** con tempi di decadimento molto lunghi.
- rischi di **incidenti**, soprattutto per i reattori più vecchi (e con il licensing esteso a 60 anni)
- necessità di grossi **investimenti** e lunghi **tempi** di costruzione.
- problemi di **proliferazione** (utilizzo di materiale fissile per scopi militari)

Nel breve periodo: **problema dello smaltimento delle scorie**

Nel lungo periodo (> 50 anni): **esaurimento disponibilità** di Uranio



Scorie nucleari

Un esempio, in Francia ogni anno si producono:

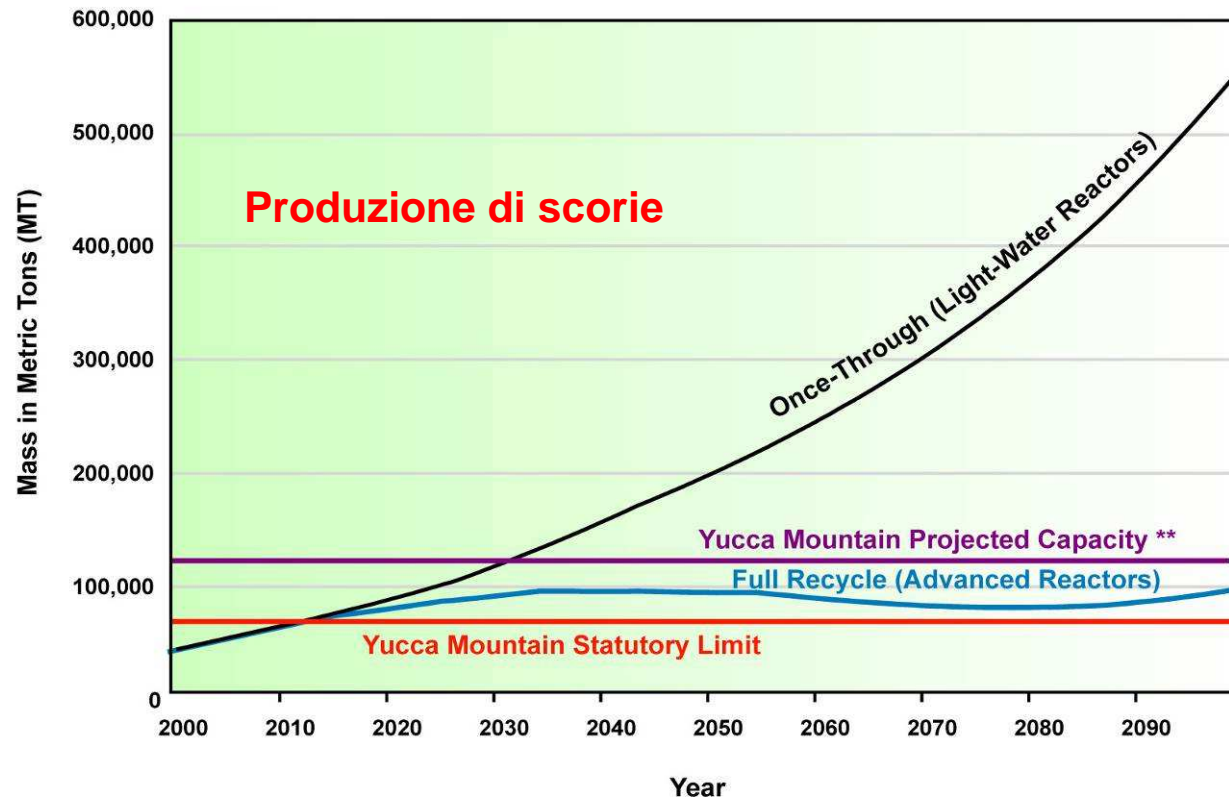
- 1 Kg/abitante di scorie nucleari radioattive (di cui 20 g di scorie altamente radiotossiche);
- 2500 Kg/abitante di scorie chimiche tossiche (di cui 100 Kg scorie "eterne" come metalli pesanti)

Proiezione al 2010 delle quantità di scorie radioattive dai Reattori nucleari in tutto il mondo (circa 400 GW_e) **Uso civile:**

- | | |
|---|--------------|
| • Combustibile esausto | 300'000 tons |
| • Isotopi del plutonio | 3000 tons |
| • Isotopi del Np | 140 tons |
| • Am ed altri attinidi | 120 tons |
| • FF a lunga vita media (⁹⁹ Tc, ¹³⁵ Cs, ¹²⁹ I) 250+90+60 tons | |



Il problema delle scorie



Al rate attuale di crescita della produzione di energia elettrica, e con il nucleare al 20 % del totale, necessario approntare un deposito geologico (con capacità 10^5 Tonn) ogni 20 anni.

*Assumes continued electricity growth, with nuclear energy maintaining 20 percent market share.

**U.S. Department of Energy, 2002, *Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada*, DOE/EIS-0250, Washington, D.C., February.

Reattori nucleari a fissione

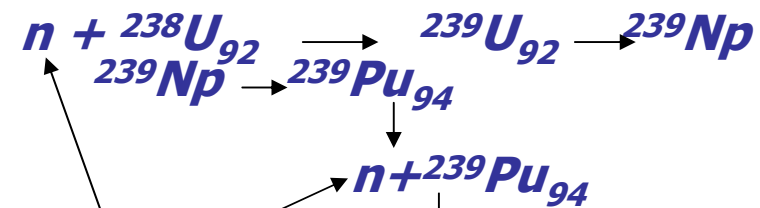
Reattori termici

Combustibile: U che è una miscela di isotopi: ^{235}U (0.7%) e ^{238}U (99%), solo l' ^{235}U è fissile (si scinde se colpito da neutroni lenti [termici]) e dà luogo a reazione a catena → arricchire l'U portando il 235 al 5%. Solo il 5% del combustibile viene utilizzato

Scorie: il 238 assorbe i neutroni e diventa ^{239}Pu che è fissile e contribuisce a fornire energia, ma una parte rimane come scoria e una parte si trasforma in altri nuclei pesanti radioattivi: a) ^{238}U , b) transuranici, c) frammenti di fissione

Reattori veloci

Combustibile: U e Pu



neutroni + frammenti di fissione + energia

Si brucia tutto l'U e si può produrre più Pu di quanto se ne consumi. Neutroni veloci e raffreddamento a metallo liquido.

Può recuperare più del 99% dell'energia del combustibile esausto di un reattore termico

Scorie: Pu e frammenti di fissione

Le scorie nucleari nei reattori (1 GW_e)

LWR)

	Cm 238 2,4 h	Cm 239 3 h	Cm 240 27 d	Cm 241 32,8 d	Cm 242 162,94 d	Cm 243 29,1 a	Cm 244 18,10 a	Cm 245 8500 a	Cm 246 4730 a
Am 236 ? 3,7 m	Am 237 73,0 m	Am 238 1,63 h	Am 239 11,9 h	Am 240 50,8 h	Am 241 432,2 a	Am 242 161 a	Am 243 7370 a	Am 244 10,1 h	Am 245 2,05 h
Pu 235 25,3 m	Pu 236 2,858 a	Pu 237 45,2 d	Pu 238 87,74 a	Pu 239 2,411 · 10 ⁴ a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 10 ⁵ a	Pu 243 4,956 h	Pu 244 8,00 · 10 ⁷ a
Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,5 h	Np 237 2,144 · 10 ⁶ a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m	Np 243 1,85 m
U 233 1,592 · 10 ⁵ a	U 234 0,0055 a	U 235 0,7200 a	U 236 2,342 · 10 ⁶ a	U 237 175 d	U 238 99,2745 a	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h		U 242 16,8 m
Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234 1,17 m	Pa 235 24,2 m	Pa 236 9,1 m	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m		148	150
Th 231 25,5 h	Th 232 100 a	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 m	Th 236 37,5 m	Th 237 5,0 m			

244, 245Cm
1.5 Kg/yr

241Am: 11.6 Kg/yr
243Am: 4.8 Kg/yr

239Pu: 125 Kg/yr

237Np: 16 Kg/yr

LLFP
76.2 Kg/yr

LLFP



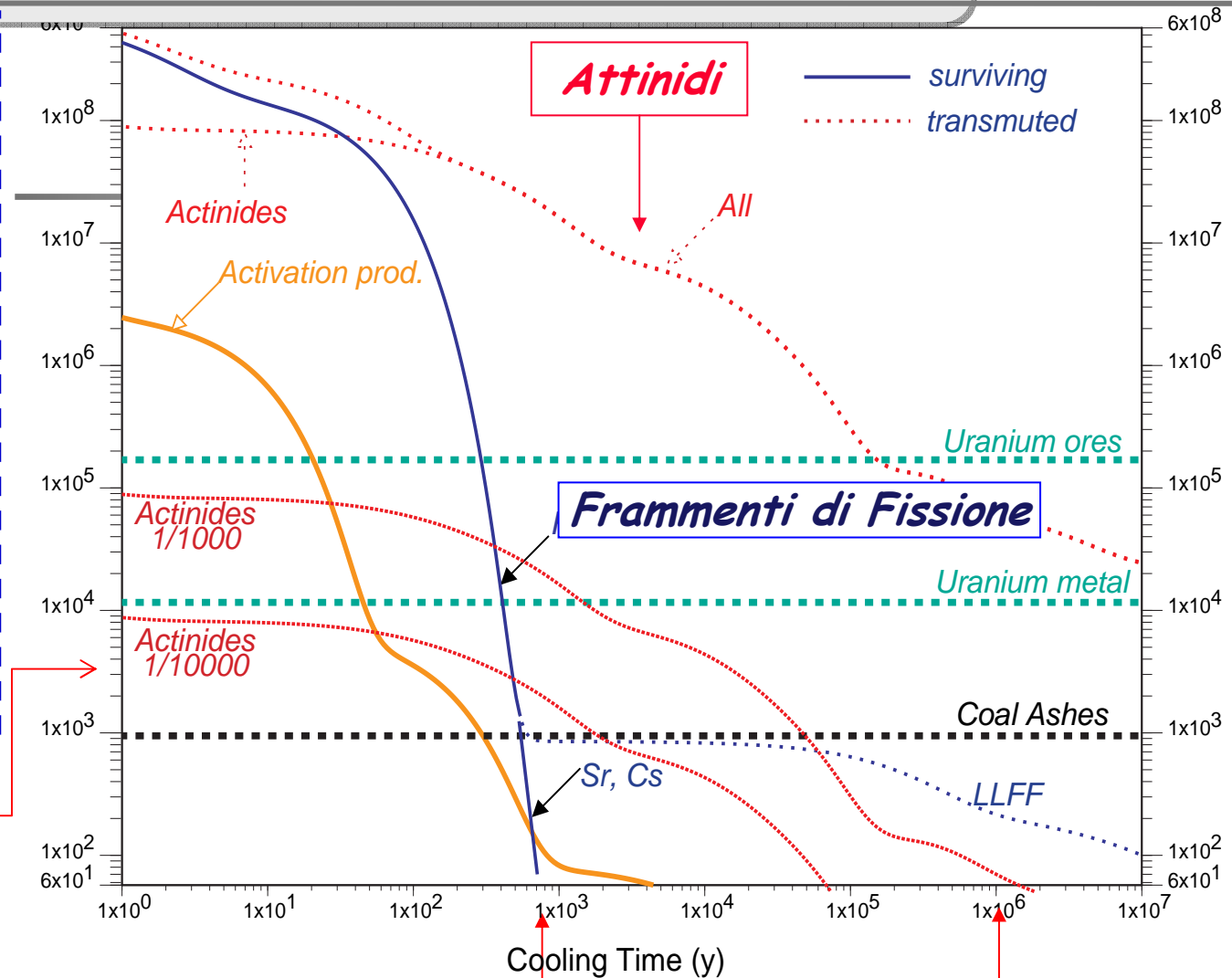
Le varie componenti delle scorie nucleari

I **Frammenti di Fissione** decadono in poche **centinaia di anni** (a parte alcune eccezioni).

Gli **attinidi** sopravvivono per **milioni di anni**.

Plutonio e attinidi minori rappresentano il problema principale per lo smaltimento delle scorie nucleari.

Radiotossicità naturale

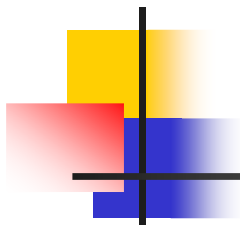


700 anni

1 milione di anni



L'ENERGIA NUCLEARE: le scorie



Le problematiche connesse al combustibile nucleare esaurito riguardano: **il volume occupato, il calore prodotto e la radioattività.**

scorie	Classificazione	caratteristiche	Depositi
U + elementi attivati	<i>short-lived waste</i> <i>Low-level waste</i>	grande volume, radioattività bassa e modesto calore sprigionato	In loco presso il reattore
Frammenti di fissione a breve vita media	<i>short-lived waste</i> <i>Low-level waste</i>	5% in volume, maggiori responsabili della radioattività e calore a breve termine (50 anni)	Depositi superficiali
Frammenti di fissione a lunga vita media	<i>Long-lived waste</i> <i>Medium-level waste</i>	Es: I, Tc, Zr Vite medie $>10^4$ anni Piccole quantità 4% in volume	Depositi geologici profondi (>300 metri)
Attinidi (Pu, Np, Am, Cm, ...)	<i>Long-lived waste</i> <i>High level waste</i>	Fissili, emettitori α Piccole quantità 0.2% in volume Vite medie $>10^{4-5}$ anni	Depositi geologici profondi (>300 metri)

L'ENERGIA NUCLEARE, le scorie radioattive

L'immagazzinamento geologico risulta pericoloso per:

- Criticità
- Possibilità di contaminazione faglie acquifere
- Terrorismo nucleare

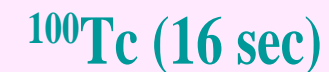
Alternativa

• **Trasformazione nucleare (trasmutazione):** neutroni (o altre particelle) inducono reazioni nucleari che trasformano i materiali indesiderati in specie nucleari accettabili

⇒ **Attinidi:** farli fissionare

⇒ **Frammenti di fissione:** trasformarli da "a lunga vita media" a "a corta vita media" o stabili

Un esempio di trasmutazione:



La trasmutazione delle scorie radioattive

Trasmutazione (o incenerimento nucleare) delle scorie radioattive: reazioni indotte da **neutroni** per trasformare isotopi radioattivi a lunga vita media in **isotopi stabili** o a vita media breve.

Element (quantity)	Isotope	Half-life (years)	Quantity (ton/year)
Plutonium (11.4 ton/year)	²³⁸ Pu	88	0.19
	²³⁹ Pu	2.4×10^4	6.53
	²⁴⁰ Pu	6.5×10^3	2.52
Minor actinides (1.1 ton/year)	²³⁷ Np	2.1×10^6	0.48
	²⁴¹ Am	430	0.25
	²⁴³ Am	7.4×10^3	0.14
	²⁴⁵ Cm	8.5×10^3	0.001
Fission products (39 ton/year)	¹³⁵ Cs	2.3×10^6	0.4
	⁹⁹ Tc	2.1×10^5	1.0
	⁹³ Zr	1.5×10^6	0.9
	¹²⁹ I	1.0×10^7	0.2
	¹⁰⁷ Pd	6.5×10^6	0.25

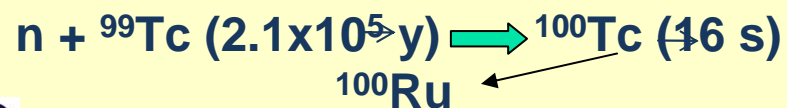
Reazioni di trasmutazione

Frammenti di fissione (LLFF)

¹⁵¹Sm, ⁹⁹Tc, ¹²¹I, ⁷⁹Se ...



cattura neutronica (n,γ)



Pu e attinidi minori

²⁴⁰Pu, ²³⁷Np, ²⁴¹Am, ²⁴³Am, ²⁴⁴Cm, ²⁴⁵Cm,

...



fissione indotta da neutroni (n,f)
cattura neutronica (n,γ)

La produzione di scorie

Una soluzione al problema è il **riutilizzo del combustibile (ciclo chiuso)**.

Attualmente praticato in alcuni casi il **riprocessamento**, che consiste nel separare dal combustibile spento U e Pu, utilizzato per preparare nuovo combustibile.

- vantaggio -> riduzione del volume delle scorie;
- svantaggio -> al momento non è economicamente conveniente

Non è un vero ciclo chiuso (volume delle scorie prodotte è ancora significativo).

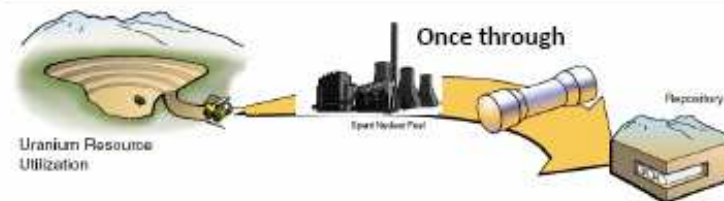
Il salto di qualità si avrebbe con sistemi che **riutilizzano** non solo U e Pu, ma anche una grossa parte delle **scorie** (soprattutto attinidi a lunga vita media).

Semplificherebbe notevolmente il problema dello **stoccaggio**, grazie al ridotto volume e vita media delle scorie residue.

Reattori di nuova generazione



I reattori di nuova generazione



Reattori attuali hanno bassa **efficienza di burn-up** e producono grandi quantità di **scorie radioattive**.



Reattori di **nuova generazione** pensati per riutilizzare gran parte del combustibile spento.

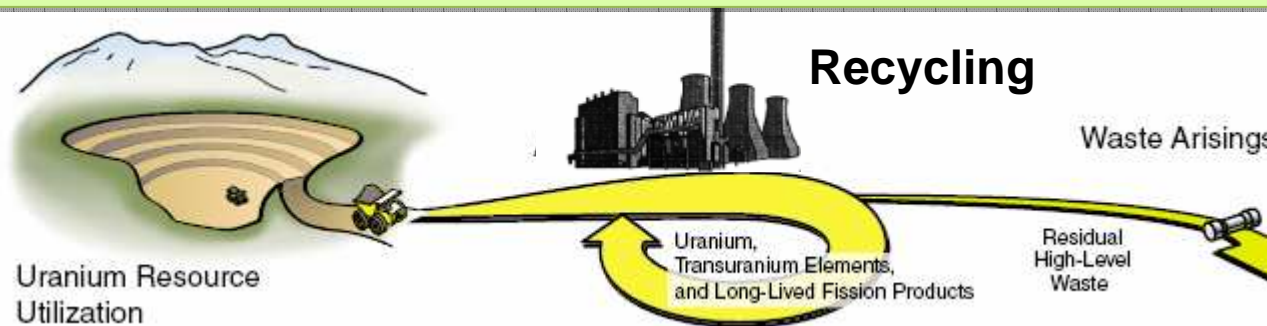
Vantaggi dei reattori di **IV Generazione** (e Accelerator Driven Systems):

- maggiore **efficienza** di burn-up e minore produzione di **scorie**
- maggiore **sicurezza e non-proliferazione**
- minori **costi e tempi** di costruzione

I reattori di nuova generazione

Allo studio reattori di **nuova generazione** che non presentino i problemi attuali (in particolare limitata disponibilità di U e produzione di scorie).

Principio fondamentale è il **riutilizzo** di una parte importante del combustibile spento.



Attualmente allo studio due tipi di nuovi sistemi nucleari:

- reattori di **IV Generazione** (critici), con scopo primario la produzione di energia;
- **Accelerator Driven Systems** (sottocritici), mirati per lo più alla trasmutazione delle scorie radioattive (LLFF e MA).

L'ENERGIA NUCLEARE: nuove idee sulla sicurezza

- Introduzione di condizioni deterministiche piuttosto che probabilistiche che proibiscono *a priori* l'accadere di eventi estremi (es: incidenti di criticità, come Chernobyl, eliminati se il reattore lavora in modo sottocritico \implies ADS e ciclo del Torio)
- Cicli chiusi del combustibile partendo da ^{238}U o da ^{232}Th (**idea nuova**) cioè **senza "arricchimenti"** e con le **scorie di attinidi recuperate e interamente riciclate**. In queste condizioni tutto il combustibile viene bruciato e **l'energia estratta è circa 200 volte quella dei reattori attuali**. Poche scorie: piccole quantità di attinidi e frammenti di fissione, ma **...possibilità di trasmutazione**.
- Utilizzando il **ciclo del Torio** non si producono quantità utilizzabili di Pu e quindi **non ci sono rischi di produzioni di armi nucleari**.

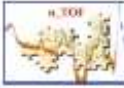
L'ENERGIA NUCLEARE: nuove idee




Proposte di Carlo Rubbia:
Accelerator Driven System (ADS)
e l'Energy Amplifier (EA)

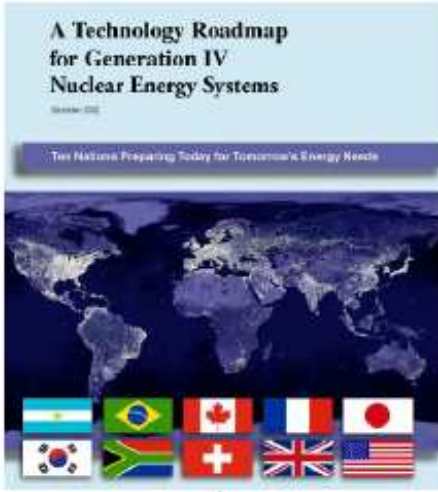
Proposte USA: nuovi reattori veloci
con trattamento pirometallurgico
delle scorie e riciclo quasi totale

Reattori di IV Generazione



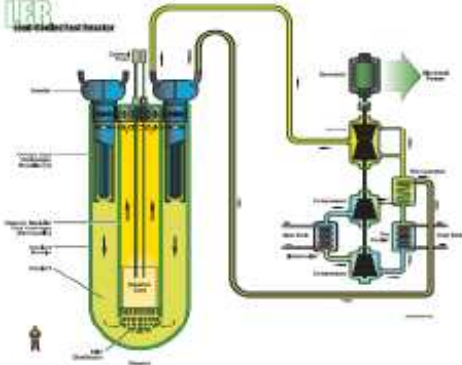
The Generation IV forum





L'Italia non c'è
(ma qualcosa si sta muovendo)


Generation IV System	Acronym
Gas-Cooled Fast Reactor System	GFR
Lead-Cooled Fast Reactor System	LFR
Molten Salt Reactor System	MSR
Sodium-Cooled Fast Reactor System	SFR
Supercritical-Water-Cooled Reactor System	SCWR
Very-High-Temperature Reactor System	VHTR



CSN III, Roma 3 Aprile 2008

10

Proposte di Carlo Rubbia: Accelerator Driven System (ADS) e l'Energy Amplifier (EA)

- Utilizzo di un reattore sottocritico guidato da un acceleratore esterno.
- Utilizzo di un ciclo di combustibile che non possa portare a importanti quantità di scorie a lunga vita media
- Nessuna possibilità di produrre bombe nucleari
- Combustibile abbondante e facilmente reperibile
-  ciclo del Torio

L'ENERGIA NUCLEARE, cicli di combustibile a confronto

Ciclo dell'uranio:

l'elemento fissile deriva dalla reazione di cattura su ^{238}U e ^{235}U



-Reattori critici


Ciclo del torio:

l'elemento fissile deriva dalla reazione di cattura su ^{232}Th



fissione

Vantaggi:

- Riserve di torio ingenti
- Th isotopo puro
- $A(^{232}\text{Th}) < A(^{238}\text{U})$  no bomba, pochissime scorie

Gianni Vannini

• ***Reattori sottocritici***

Il ciclo Th/U

	Cm 238 2,4 h	Cm 239 3 h	Cm 240 27 d	Cm 241 32,8 d	Cm 242 162,94 d	Cm 243 29,1 a	Cm 244 18,10 a	Cm 245 8500 a	Cm 246 4730 a
Am 236 ? 3,7 m	Am 237 73,0 m	Am 238 1,63 h	Am 239 11,9 h	Am 240 50,8 h	Am 241 432,2 a	Am 242 141 a 16 h	Am 243 7370 a	Am 244 26 m 10,1 h	Am 245 2,05 h
Pu 235 25,3 m	Pu 236 2,858 a	Pu 237 45,2 d	Pu 238 87,74 a	Pu 239 2,411 · 10 ⁴ a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 10 ⁵ a	Pu 243 4,956 h	Pu 244 8,00 · 10 ⁷ a
Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,5 h 1,54 · 10 ⁵ a	Np 237 2,14 · 10 ⁶ a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m 65 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m 3,5 m	Np 243 1,85 m
U 233 1,592 a	U 234 2,455 · 10 ⁵ a	U 235 7,200 a	U 236 2,34 · 10 ⁷ a	U 237 4,5 d	U 238 99,2745 a	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h		U 242 16,8 m
Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234 1,17 m 6,70 h	Pa 235 24,2 m	Pa 236 9,1 m	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m		148	150
Th 231 25,5 h	Th 232 1,405 · 10 ¹⁰ a	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 m	Th 236 37,5 m	Th 237 5,0 m			

LLFP

LLFP



nTof

neutron time of flight facility @ CERN

Per capire la fattibilità di queste nuove idee occorre conoscere le probabilità con cui i neutroni vengono catturati e interagiscono con i nuclei. **Allora:**

ESPERIMENTI DI FISICA NUCLEARE FONDAMENTALE

nTof: Misure di sezione d'urto neutroniche ad alta risoluzione ed in un largo intervallo energetico, di interesse per l'Astrofisica e per Applicazioni (ADS).

Collaborazione internazionale:

130 ricercatori

40 istituzioni europee + 3 Usa + India



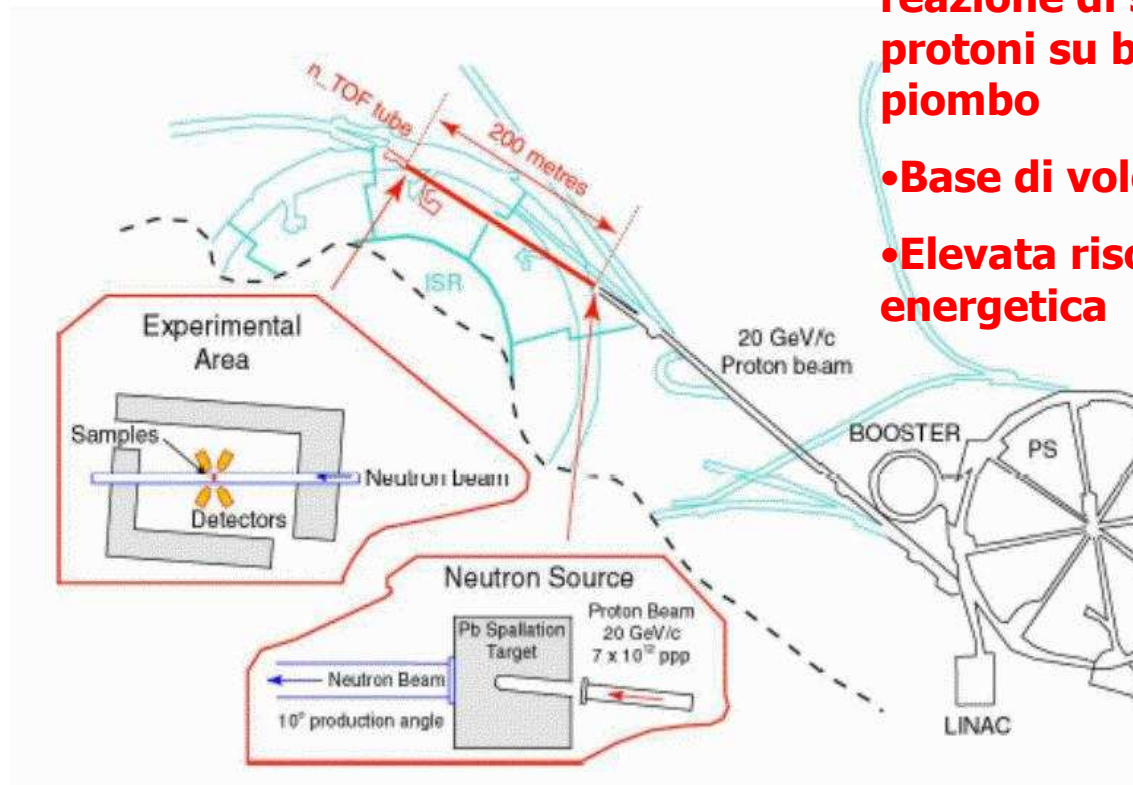
Partecipazione italiana:

15 ricercatori di 4 sezioni INFN
(Bari, Bologna, LNL, Trieste)

Gianni Vannini

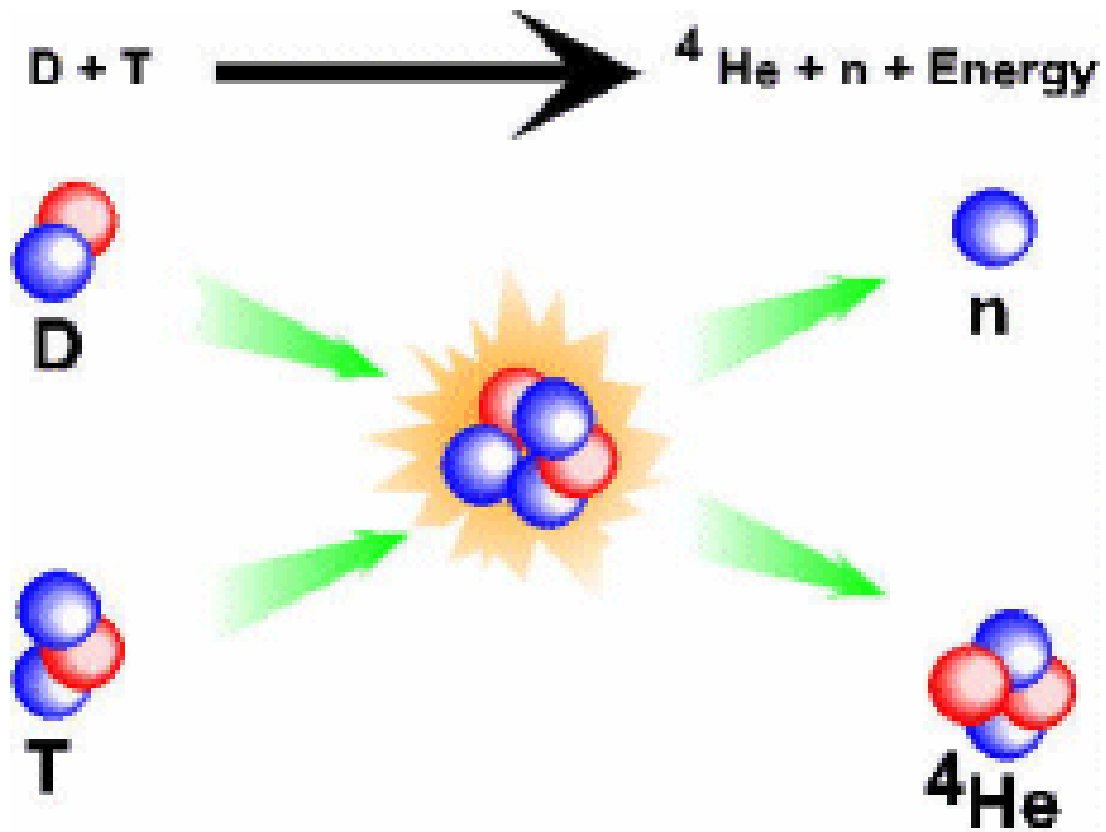
nTof

neutron time of flight facility @ CERN



- Neutroni prodotti da reazione di spallazione di protoni su bersaglio di piombo
- Base di volo di 200 metri
- Elevata risoluzione energetica

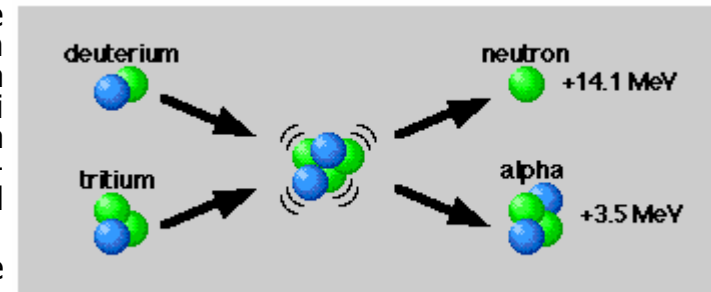
Fusione nucleare



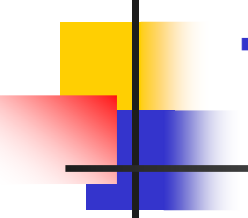
Fusione nucleare

■ La Fusione termonucleare

- E' la reazione nucleare che avviene nel sole e nelle altre stelle, con produzione di una enorme quantità di energia. Nella reazione di fusione nuclei di elementi leggeri, quali l'idrogeno, a temperature e pressioni elevate, fondono formando nuclei di elementi più pesanti come l'elio.
- Sono noti tre isotopi dell'idrogeno : l' idrogeno propriamente detto (H), il deuterio (D) e il trizio (T). Il nucleo di tutti e tre contiene un protone; il nucleo di deuterio contiene inoltre un neutrone mentre quello del trizio due neutroni. In tutti i casi l' atomo neutro ha un elettrone al di fuori del nucleo per compensare la carica del singolo protone. La reazione più probabile è quella che avviene tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio, reazione in cui si genera un nucleo di elio (particella alfa) e un neutrone. In questa reazione la massa complessiva dei prodotti è inferiore a quella delle particelle interagenti e si verifica liberazione di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia. L'energia liberata si distribuisce tra la particella alfa e il neutrone in rapporto inverso alle rispettive masse. .
- I due nuclei interagiscono solo a distanze molto brevi, equivalenti alle dimensioni del nucleo (10-13cm) dove le forze nucleari sono predominanti sulle forze di repulsione elettrostatica dovute alla carica positiva dei nuclei. Perché due nuclei si avvicinino a distanze sufficientemente brevi è necessario che la velocità con cui si urtano sia molto alta; la loro energia cinetica (e quindi la temperatura) deve essere molto elevata. Per ottenere in laboratorio reazioni di fusione, ad esempio, è necessario portare una miscela di deuterio e trizio a temperature elevatissime (100 milioni di gradi) per tempi di confinamento sufficientemente lunghi. In tal modo i nuclei hanno tempo di fare molte collisioni, aumentando la probabilità di dar luogo a reazioni di fusione.

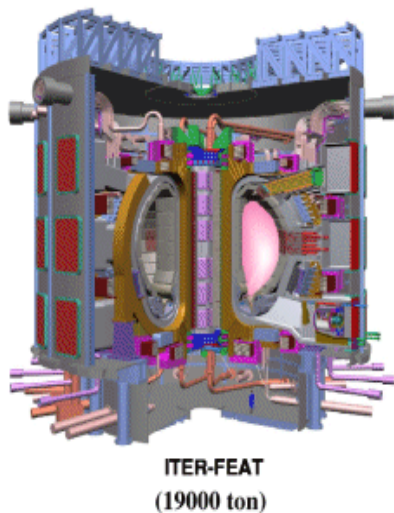


Possibili reattori a Fusione

- 
- Perché la forza nucleare forte, che ha un corto raggio d'azione, entri in gioco, bisogna "schiacciare" i nuclei uno contro l'altro, con energia sufficiente a superare la "barriera di Coulomb", cioè la repulsione elettrostatica tra i protoni, con carica elettrica positiva. Tre (forse quattro) sono gli schemi possibili:
 - **Confinamento gravitazionale.** E' il meccanismo utilizzato nelle stelle, non è ovviamente utilizzabile nei reattori terrestri
 - **Confinamento inerziale.** Si comprime una "pasticca" di Deuterio e/o Trizio mediante un "bombardamento" concentrico di raggi laser ad alta potenza o fasci di particelle di grande energia. Si tratta di provocare "piccole esplosioni termonucleari": si devono raggiungere densità molto elevate (dell'ordine di 10^{25} part./cm³ per tempi estremamente brevi (100 picosecondi).
 - **Confinamento magnetico.** Si riscalda la "miscela" nucleare, il plasma di Idrogeno / Deuterio / Trizio, confinandolo tramite un forte campo magnetico per impedirne sia la dispersione sia il contatto con una qualunque parete solida che non resisterebbe a simili temperature. Si tratta della tecnica che si vuole sperimentare con ITER e IGNITOR, è la tecnica oggi considerata più promettente.
 - **Fusione Fredda.** Nei solidi la repulsione coulombiana può essere schermata da effetti collettivi degli elettroni del reticolo e non è più necessario riscaldare per fornire l'energia necessaria a superare la barriera coulombiana. La tecnica si basa su elettrolisi con elettrolita deuterato utilizzando catodi specifici (ad es. Palladio). Tramite elettrolisi si fa entrare nel reticolo del catodo il deuterio fino a portarlo ad una concentrazione (part./cm³) dell'ordine di quella degli ioni costituenti il reticolo. I risultati sperimentali sono controversi e difficilmente riproducibili: si ha sviluppo di calore quando la concentrazione del deuterio è dell'ordine di quella dell'elemento del catodo ma sono imprevedibili l'inizio del fenomeno e la durata, si ha qualche evidenza di trasmutazioni nucleari. In mancanza di un solido fondamento teorico e di risultati apprezzabili non è possibile dire se questa linea di ricerca potrà portare alla produzione di energia.

Reattori a fusione: la situazione attuale

ITER/Ignitor: dimensioni relative



- **ITER** Gli attuali partner del progetto ITER sono Cina, Unione Europea, Giappone, Russia, Corea del Sud e Stati Uniti. Recentemente (2005) l'India ha chiesto di partecipare al progetto, i negoziati per il suo ingresso sono in corso.
La partecipazione finanziaria degli Stati Uniti è stata ufficialmente ratificata dall' "Energy bill 2005" (firmato da Bush) che assegna 1,1 miliardi di dollari alla ricerca sulla fusione nel triennio 2006/2009 e, in aggiunta a questo stanziamento, "quanto necessario" alla partecipazione americana alla costruzione di ITER. I sei partner hanno deciso il luogo dove sarà costruito ITER: Cadarache nel sud della Francia. Se tutto andrà secondo i piani la costruzione dell'impianto durerà circa 10 anni: ci si aspetta di creare il primo plasma nel 2016.
- L'attuale stima dei costi per la costruzione di ITER è di circa 5 miliardi di euro più ulteriori 5 miliardi per tenerlo in funzione per 20 anni.

Reattori a fusione: la situazione attuale

- **IGNITOR (progetto MIT-ENEA su progetto di B. Coppi)**
- Il progetto IGNITOR si trova in uno stadio avanzato di progettazione e di prototipazione che ne consentirebbe la realizzazione, grazie anche alle sue dimensioni contenute, in 4 / 5 anni.
- Il costo di realizzazione del "nucleo" può essere stimato in circa 70 milioni di €, quindi un costo complessivo dell'impianto non superiore ai 150/200 milioni di euro (circa 20 volte minore del costo stimato per ITER). Un costo teoricamente affrontabile dalla sola Italia. (ad oggi sono stati stanziati dall' Italia per IGNITOR (periodo 1994/2000) e in parte non spesi circa 65 milioni di euro).
- Il progetto è stato presentato nel luglio del 2002 al "Fusion Summer Study" tenutosi a Snowmass (CO) durante il quale è stato confrontato con ITER e con FIRE (la proposta americana alternativa ad ITER ed al momento "congelata" vista la decisione di partecipare ad ITER). Le conclusioni dello studio (vedi [Major Conclusions of the MFE Study](#)) sono state che IGNITOR non poteva sostituire ITER o FIRE come "esperimento principale" ma costituire un buon elemento a supporto visto la sua (probabile) capacità di produrre plasma in condizioni di bruciamento, i suoi costi contenuti e l'avanzato stadio di progettazione che ne consentiva la realizzazione in tempi rapidi.
- Il progetto è ad oggi sostanzialmente "fermo" in attesa di una decisione politica. Di fatto il governo non si è più occupato della questione dopo la finanziaria del 2000. L' onorevole Gianfranco Morgando (Margherita) ha presentato nel 2004 una proposta di legge per "smuovere le acque" e riportare attenzione sull'argomento, anche se con speranze praticamente nulle che sia presa in considerazione in questa legislatura. Il sito ad oggi "individuato" per l'eventuale costruzione di IGNITOR è il sito Terna-Enel di Rondissone (Piemonte) a circa 30Km da Torino e nelle vicinanze del centro ENEA di Saluggia (IGNITOR richiede infatti la disponibilità di oltre 1.000 MW di potenza elettrica, richiesta non banale da soddisfare). Un sito alternativo è quello della centrale nucleare (in corso di smantellamento) di Caorso in provincia di Piacenza.
- Quanto visto porta a concludere che la costruzione di IGNITOR è praticabile ed ha senso nell'ambito dello sforzo internazionale verso la realizzazione di un reattore a fusione solo se l'eventuale decisione di procedere sarà presa rapidamente, IGNITOR è tanto più importante quanto sarà disponibile prima che la realizzazione di ITER si avvicini alle sue fasi finali.

REATTORI A FUSIONE: LA SITUAZIONE ATTUALE

La strada per arrivare alla produzione di energia da fusione prevede di portare avanti "in parallelo":

- -la costruzione di una "major facility" qual è ITER
- -studi sulla fisica di base del plasma, settore dove IGNITOR potrebbe dare il suo contributo più importante
- -studi sulle tecnologie di base necessarie alla costruzione di un reattore commerciale tra cui di grande importanza sono gli studi sui materiali a bassa attivazione sotto bombardamento neutronico e che operino ad alte temperatura.

Il passo successivo sarà la costruzione di un impianto "dimostrativo" (macchina DEMO) in grado di produrre effettivamente energia elettrica: questa macchina potrà essere basata su una configurazione Tokamak simile a quella di ITER o su una diversa configurazione a seconda dei risultati ottenuti grazie ad ITER e agli altri esperimenti condotti in parallelo.

Tutto questo porta ad una previsione di disponibilità di un reattore commerciale a fusione non prima del 2050.



PERCHE' ?

- Il 2050 è troppo tardi! Perché?
- Perché si discute dell'energia nucleare (reattori a fissione)?
- Perché si deve produrre sempre più energia?
- E' necessario trovare nuovi modi di "produrre" energia? E, se sì, perché?



Necessità e problemi

- **Necessità** di cambiare i modi di produzione dell'energia.
- **Necessità** di investire in studi e ricerca in tutte le direzioni.
- Ci sono problemi tecnici, ma il vero problema è quello della **sopravvivenza del genere umano**.
- Problema **etico-morale**. Uno svedese consuma 15000 kWh/anno e un tanzaniano 100 kWh/anno. Legame strettissimo fra energia e povertà. Possiamo continuare così?

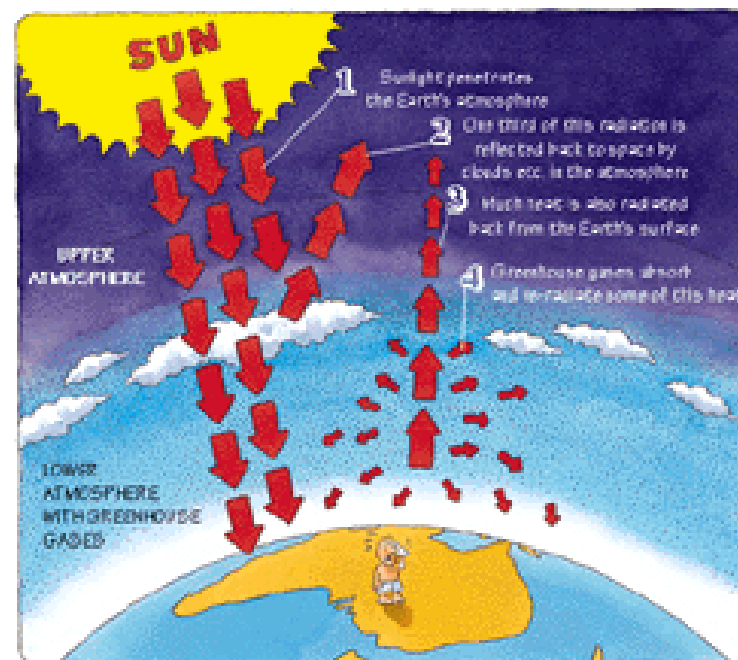
Le conseguenze dell'attuale utilizzo delle risorse energetiche

Nonostante alcuni di noi abbiano da decenni indicato il problema, solo ora sta emergendo la consapevolezza che continuare a bruciare combustibili fossili rischia di portare il Pianeta in una condizione irreversibile di invivibilità per la specie umana.

Uno dei problemi è la produzione di gas-serra, di CO₂ in particolare (aumentato del 35% negli ultimi decenni).

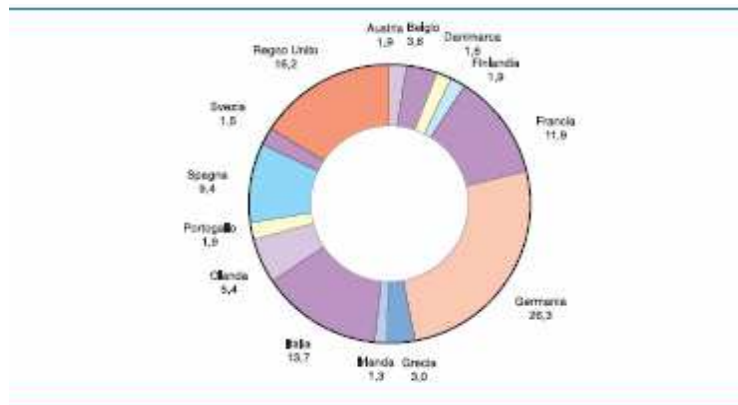
Tali emissioni stanno crescendo in tutto il mondo. Questo problema ha portato al protocollo di Kyoto (impegno a ridurre le emissioni di gas serra entro il 2010 rispetto al 1990)

■ Unione Europea	-8%	ratificato
■ Stati Uniti	-7%	non ratificato
■ Giappone	-6%	ratificato
■ Australia	+8%	ratificato
■ Russia	0%	ratificato

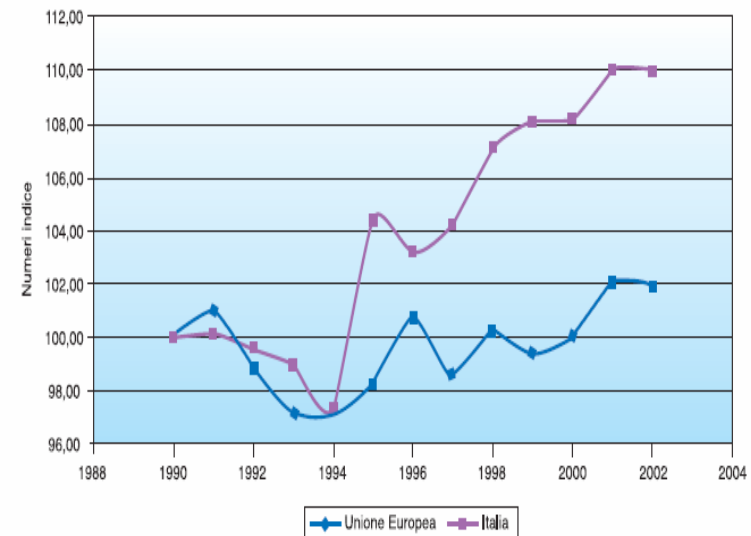


Le conseguenze

Contributo di ogni Paese al totale delle emissioni energetiche di CO₂ in Europa (anno 2002)



Emissioni di CO₂ dal sistema energetico in Italia ed in Europa (numeri indice 1990=100)



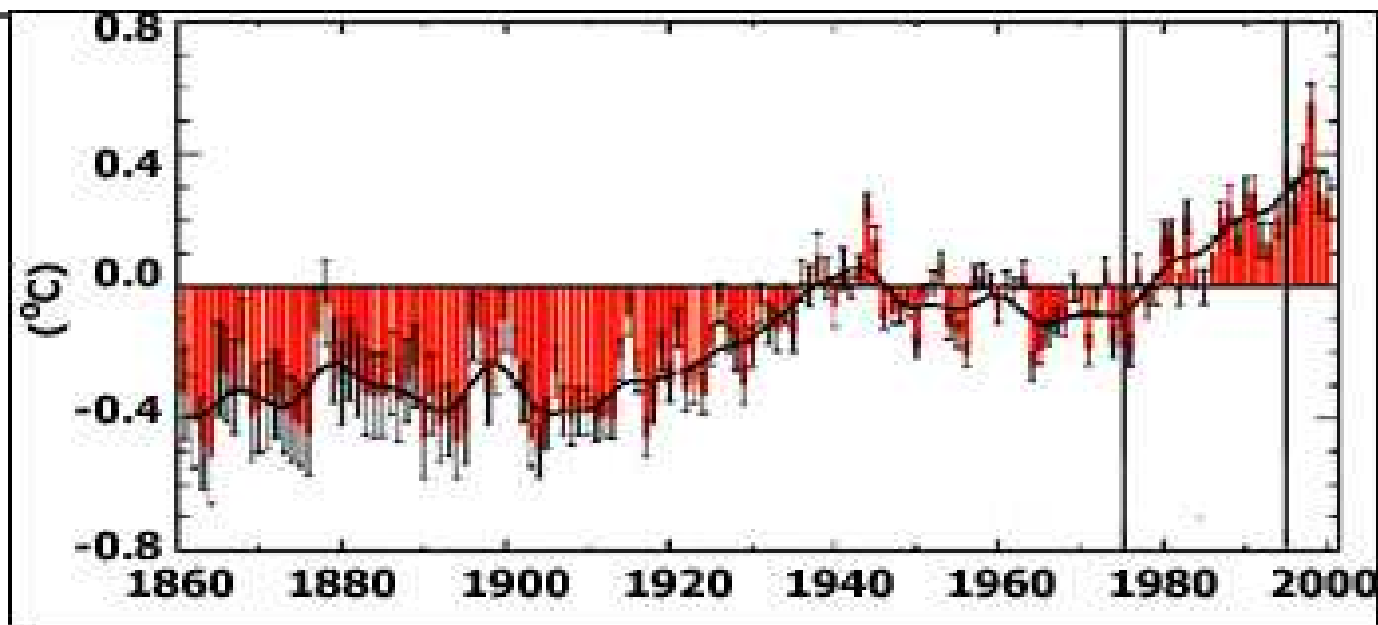


Le emissioni di CO₂

Esempi:

- se bruciamo un blocco di Carbone di **un chilo** si produce energia termica e **3.5 Kg di CO₂ !**
Il calore che si accumula per effetto serra della CO₂ è **100 volte superiore al calore sviluppato dalla combustione !!!**
- Ogni automobile emette ogni anno una massa di CO₂ pari a 4 volte il suo peso !
- **Media europea: 27 kg al giorno a persona !!!**

Le conseguenze (evidenze sperimentali)



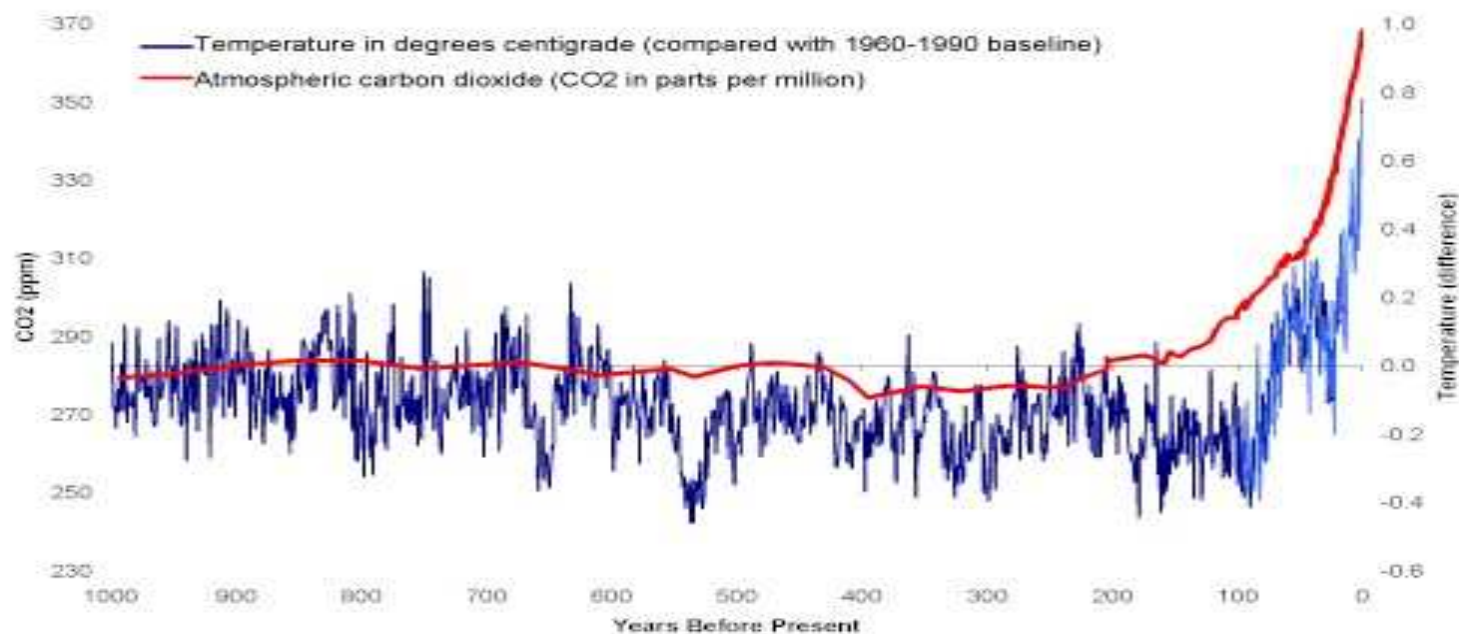
Studio del *Goddard Institute for space studies*: il suo direttore Jim Hansen
(calore assorbito dalla Terra) – (calore ceduto) = 0.85 Watt/m² (nel 2004)

**L'equivalente di mezzo milione di stazioni elettriche da 1000
MegaWatt!!!**

Attualmente e' stimato essere 1.5 Watt/m² !!!

Gianni Vannini

Le conseguenze (evidenze sperimentali)



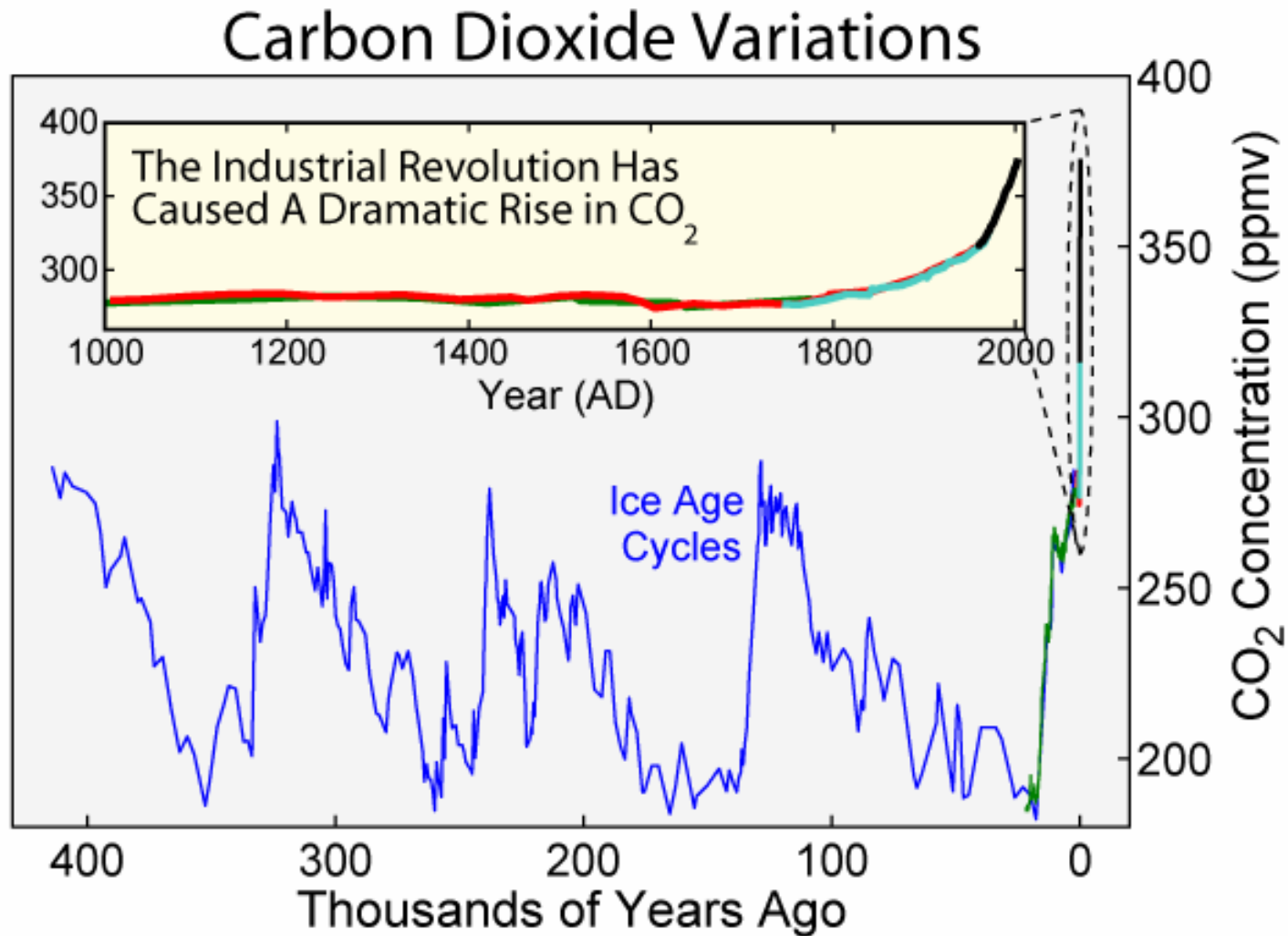
aumento della CO₂



Aumento della temperatura atmosferica

Gianni Vannini

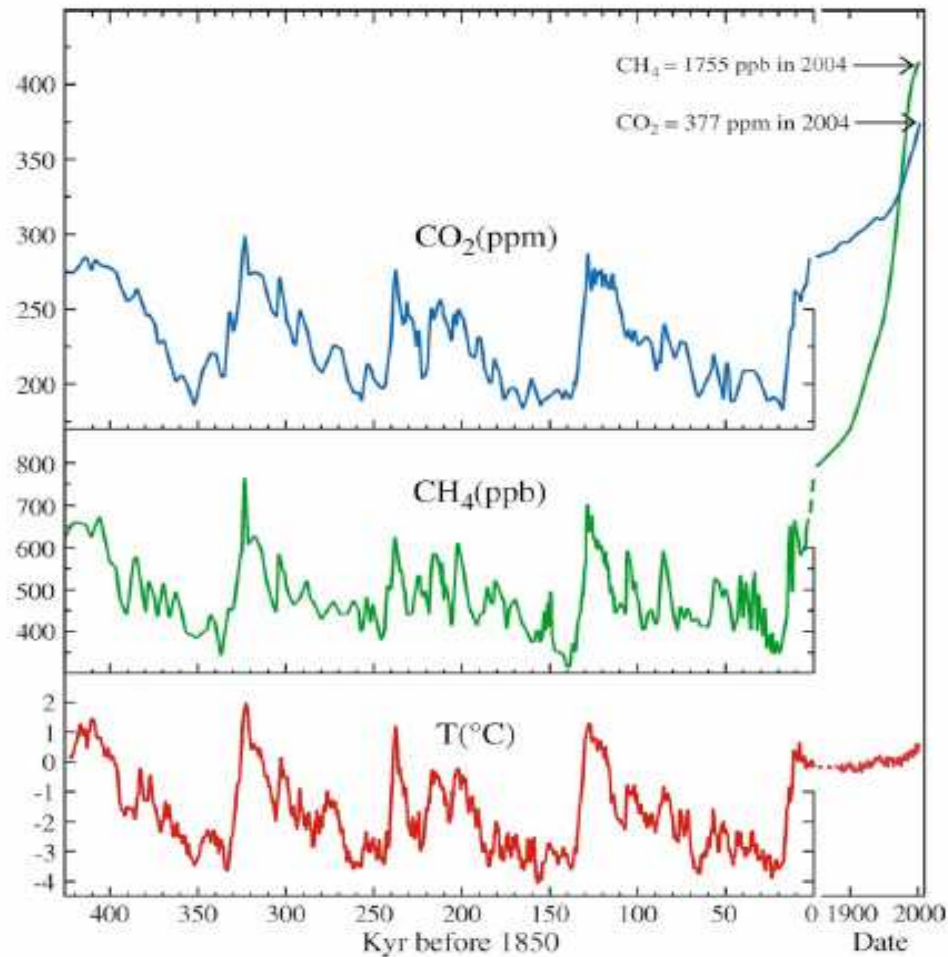
Le conseguenze (evidenze sperimentali)



Gas serra e Temperatura

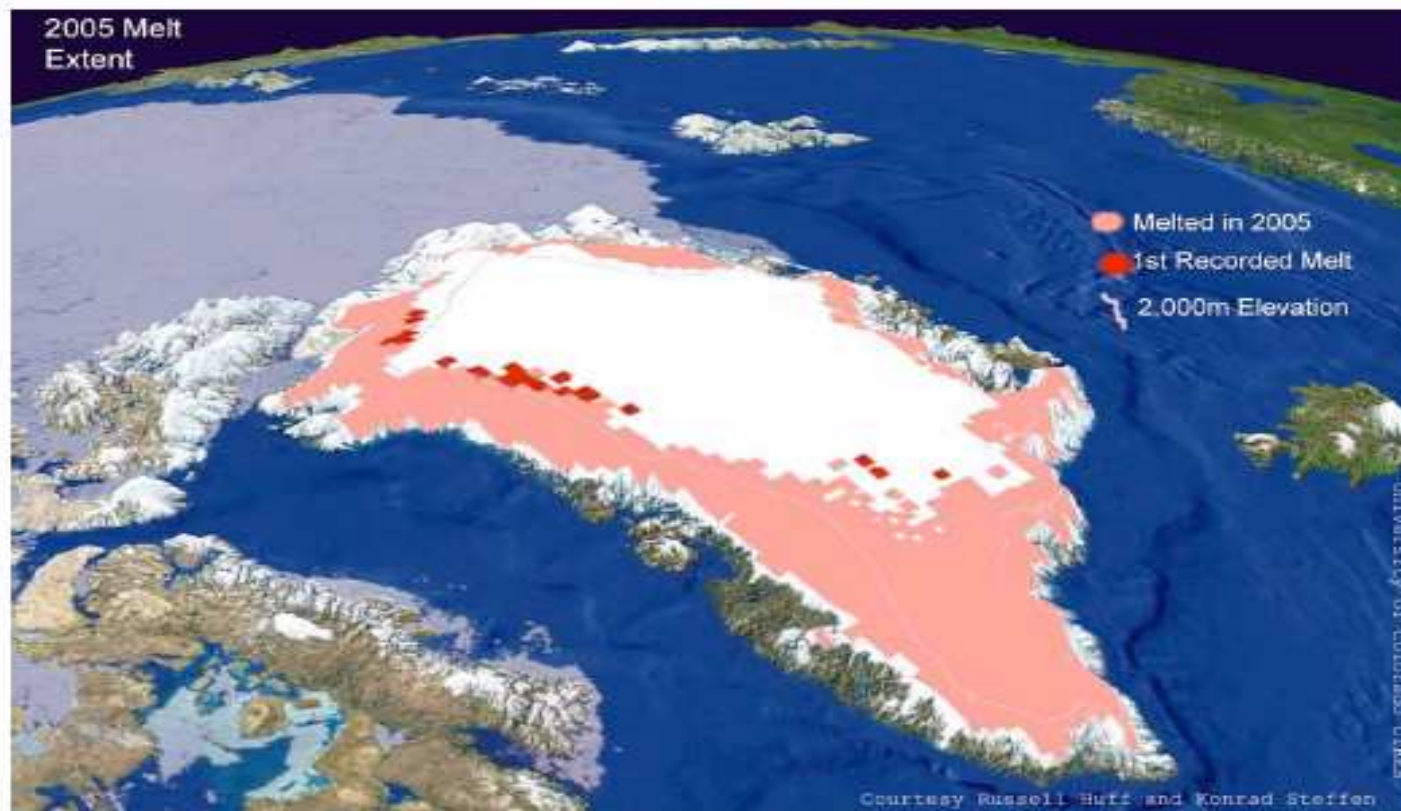
CO₂, CH₄ and
estimated global
temperature (Antarctic
 $\Delta T/2$
in ice core era)
0 = 1880-1899 mean.

Source: Hansen, *Clim.
Change*, 68, 269, 2005.



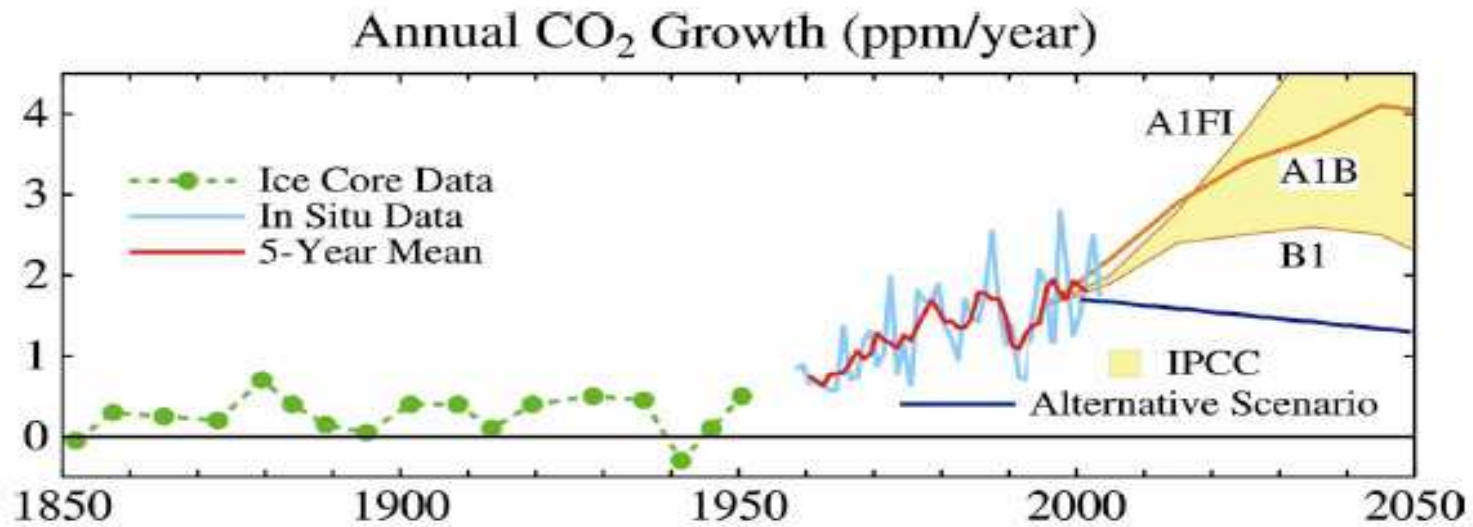
Le conseguenze (evidenze sperimentali)

2005 Melt Area on Greenland



Source: University of Colorado CIRES (courtesy Russell Huff and Konrad Steffen)

Le conseguenze (evidenze sperimentali e previsioni)

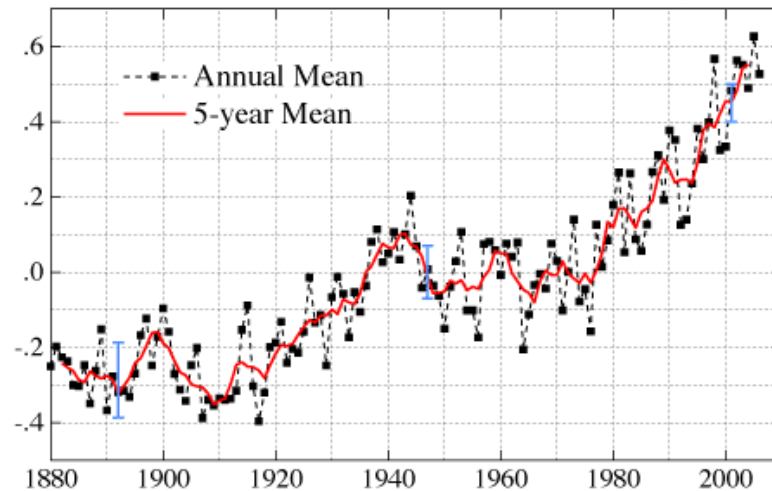


Growth rate of atmospheric CO₂ (ppm/year).

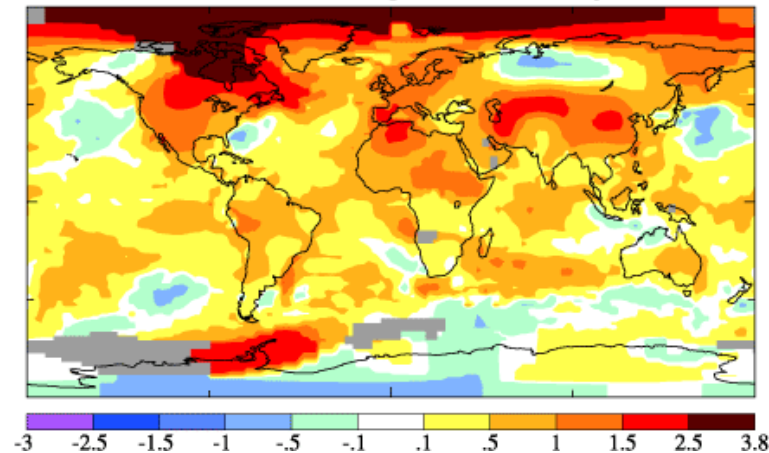
Source: Hansen and Sato, PNAS, 101, 16109, 2004.

Evidenze sperimentali: dati 2006. Goddard Institute, NASA

(a) Global-Mean Surface Temperature Anomaly ($^{\circ}\text{C}$)

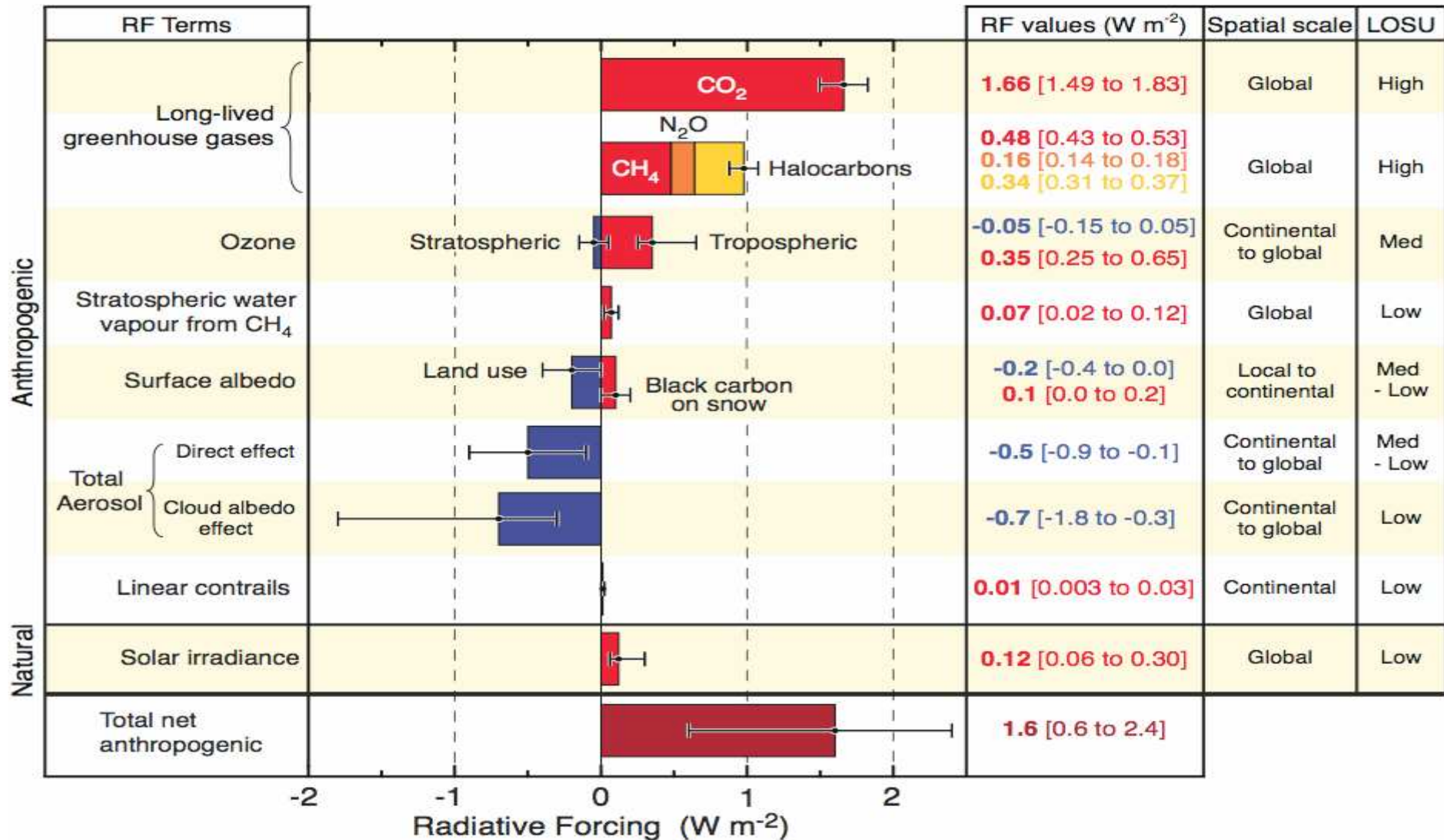


(b) 2006 Surface Temperature Anomaly ($^{\circ}\text{C}$)



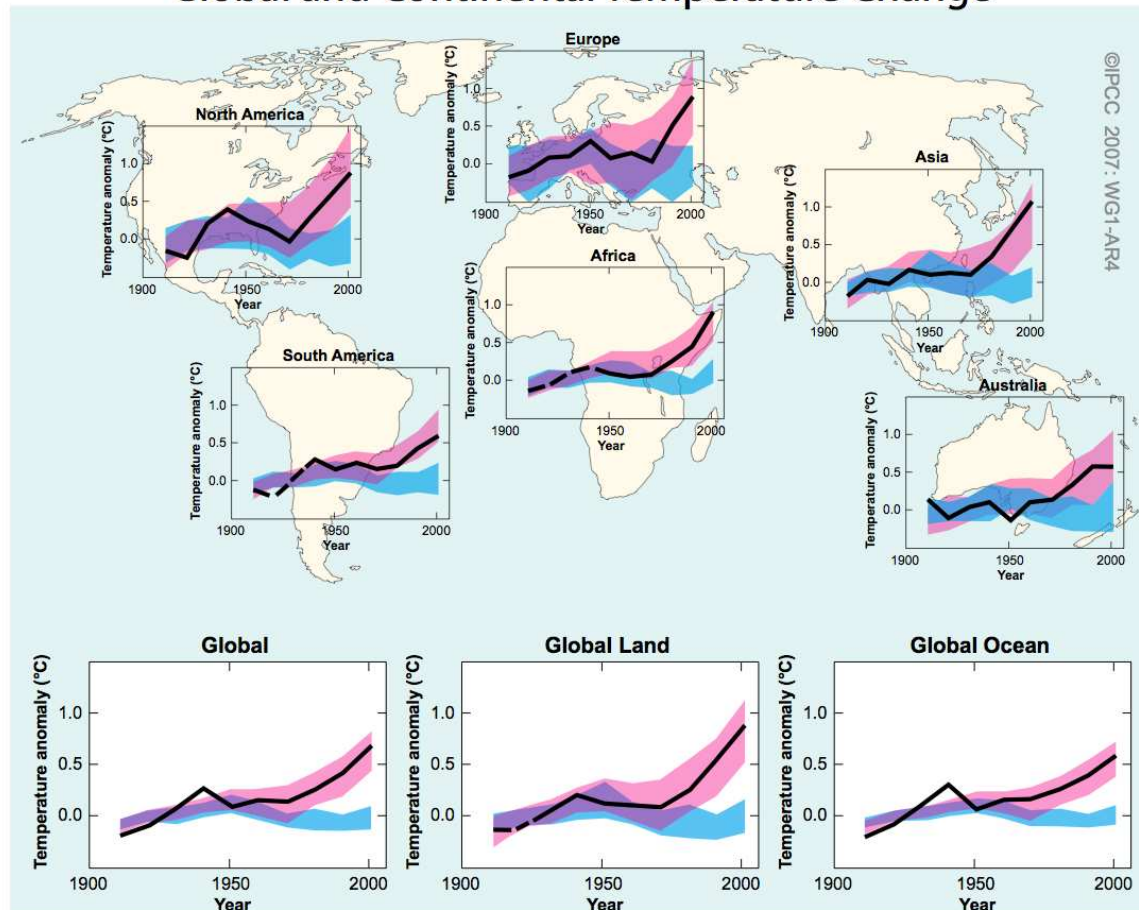
Global-average radiative forcing estimates and ranges

Radiative Forcing Components

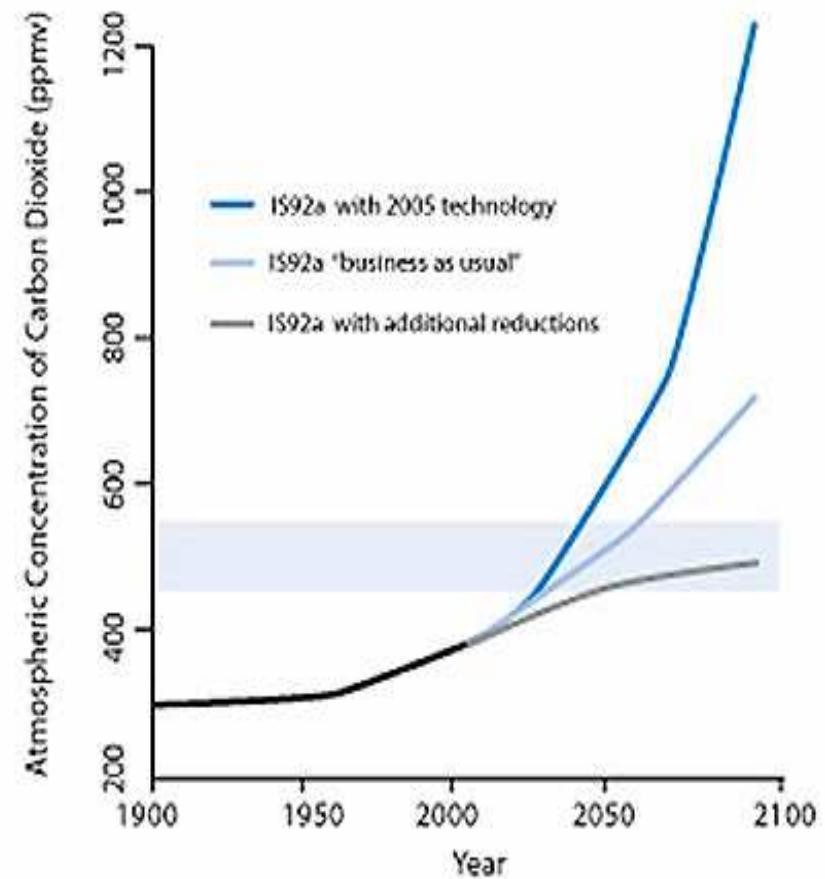
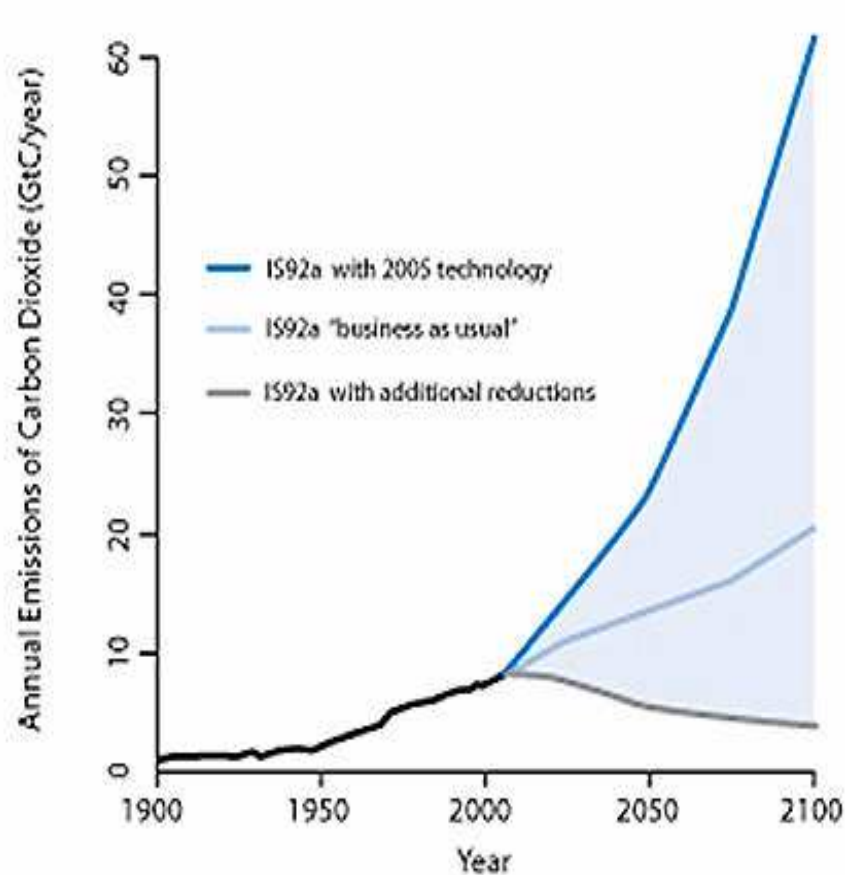


Understanding and Attributing Climate Change

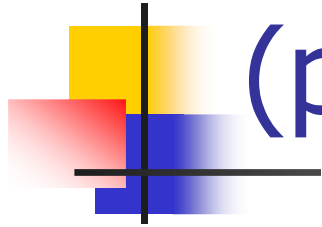
Global and Continental Temperature Change



Scenari di previsione per le emissioni di CO₂

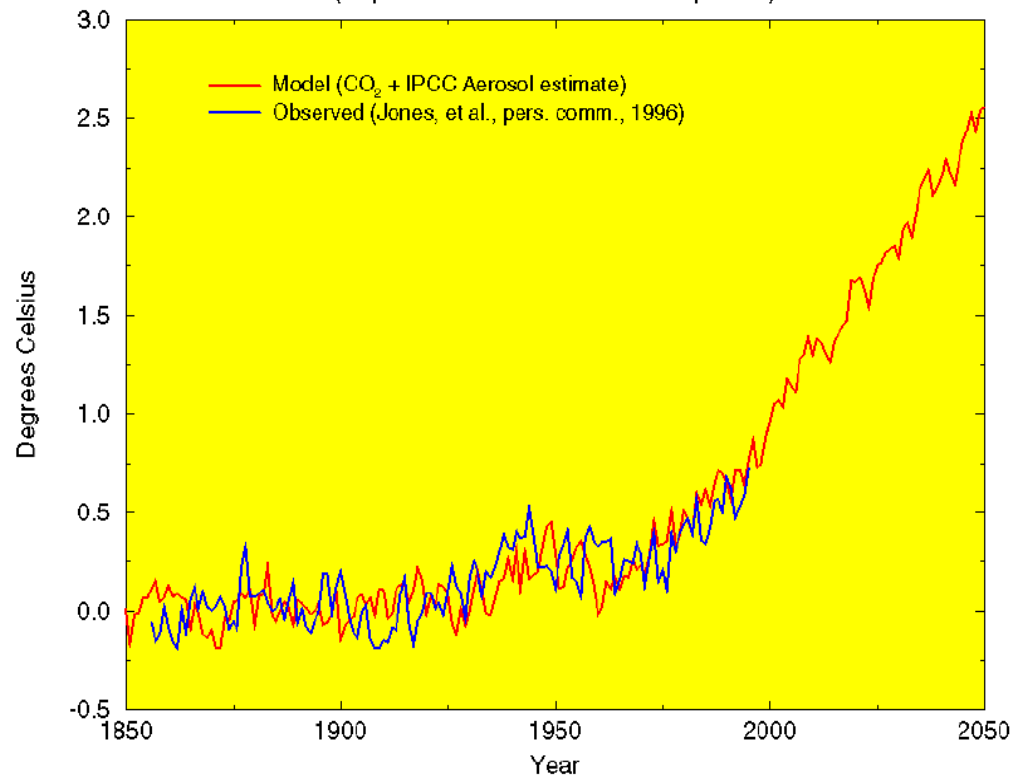


Le conseguenze (previsioni)



Global Mean Surface Air Temperature

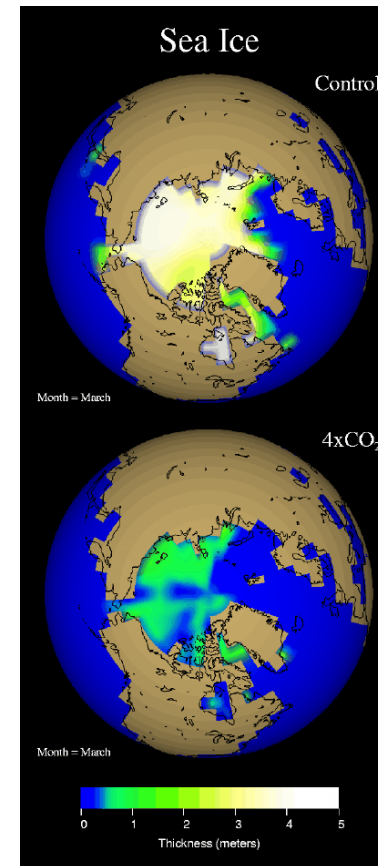
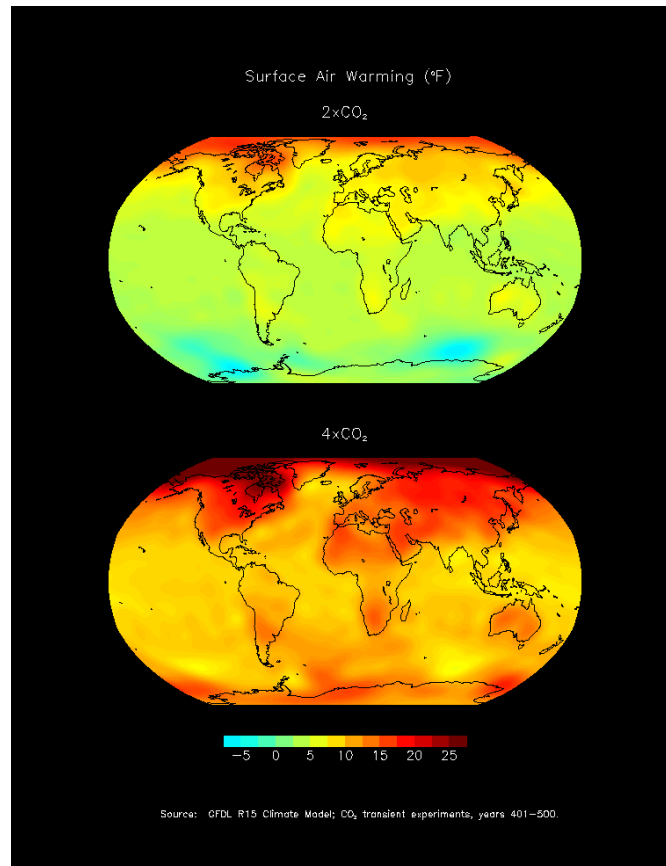
(Departure from 1880-1920 base period.)



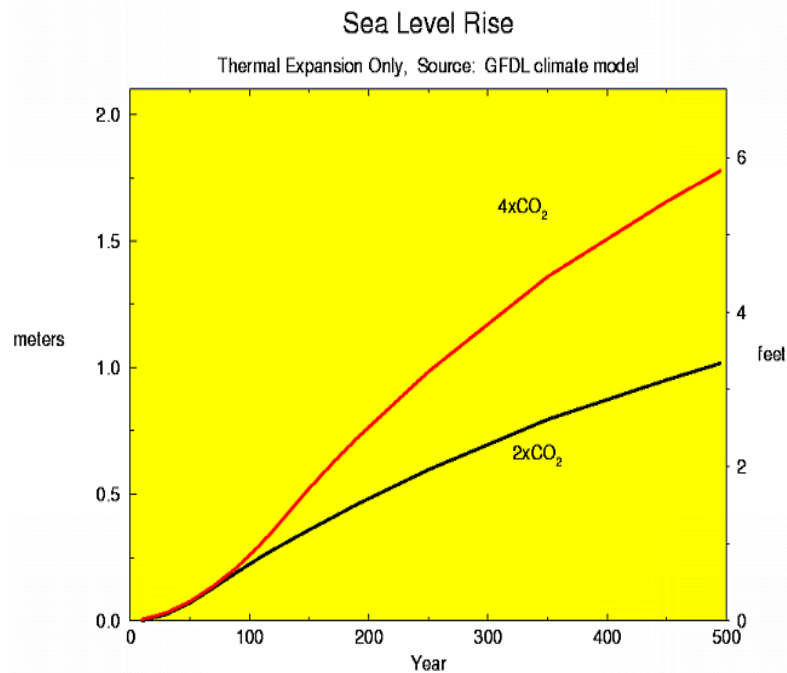
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)

<http://www.gfdl.noaa.gov>

Le conseguenze (previsioni)

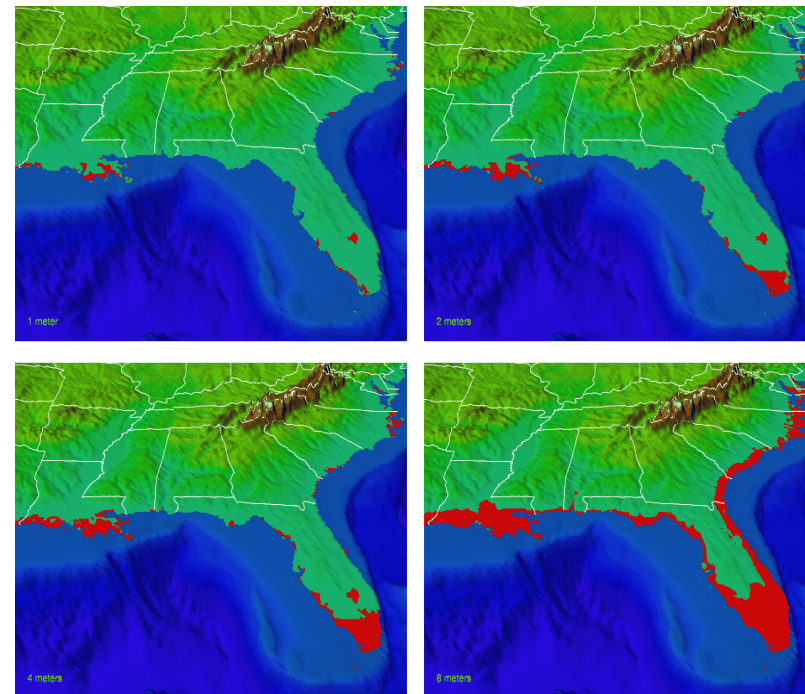


Le conseguenze (previsioni)



solo per dilatazione termica

Sea Level Rise



Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)

<http://www.gfdl.noaa.gov>

Gianni Vannini

IPCC

Intergovernmental Panel on Climate Change

Istituita dall'ONU nel 1988, raccoglie scienziati di tutto il mondo.
Le affermazioni dell'IPCC sono puramente scientifiche e si basano su misure e fatti accertati, trasparenti e pubblicati.

Evidenze Attuali:

1. Aumento della temperatura globale;
2. Crescita delle precipitazioni continentali del 5-10%;
3. E' cresciuta la frequenza e l'intensità della siccità (Africa, Asia e Amazzonia);
4. I ghiacciai non polari si sono ritirati e la copertura nevosa è calata del 10%;
5. Barriere corallifere "sbiancate" in molte parti del mondo;
6. Il mare artico ha diminuito l'estensione di ghiaccio di circa il 10-15% e il suo spessore di circa il 40% (si sta scaldando più del previsto!).



Rio delle Amazzoni
2005

Cosa sta producendo tutto ciò?

Il gas serra (principalmente CO₂)

Gianni Vannini

IPCC

Intergovernmental Panel on Climate Change

Previsioni dell'IPCC (pubblicati nel 2005) se si continua come ora a bruciare combustibili fossili:

1. Ulteriori aumenti della temperatura media: da 1,4 °c a 5,8 °c;
2. Problema dell'acqua e delle irrigazioni agricole (in Asia il problema sarà drammatico);
3. Livelli dei mari innalzati: 10 cm – 1 m;
4. Ondata di calore;
5. Tassi di malattie infettive e respiratorie in grande aumento;
6. Economie "dislocate";
7. Tutte le forme di vita verranno influenzate
[nel 2100: 25% delle specie dei mammiferi estinto!!! Più del 50% degli insetti estinto!!! Circa il 15% degli uccelli estinto!!!];
8. Anche se tutti i paesi rispetteranno il protocollo di Kyoto (cosa molto molto difficile) le temperature continueranno ad aumentare!

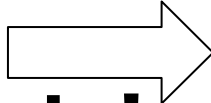
Impatti Ambientali: Ultime ricerche

- Ist. Naz. Brasiliano per le ricerche sull'Amazzonia
emissioni di CO₂ dalla diga Curuà-Una e di metano (piante
marcite e decomposizione...) → l'idroelettrico sporca
- New York Academy of Sciences
*The Slow Motion Tsunami: How Climate Change Could Change
the World.* (marzo 2005)
- OMS e FAO
ecosistema sconvolto → previsione al 2100:
25% delle specie dei mammiferi estinto
Più del 50% degli insetti estinto
Circa il 15% degli uccelli estinto (04/04/2005)
- National Oceanic and Atmospheric Administration (Usa)
la concentrazione di CO₂ sta aumentando e il riscaldamento non
si fermerà.

Impatti Ambientali: Ultime ricerche

- Potsdam Institute for Climate Impact Research (Germany). *D. Schroeder, Science 2005*: Modelli con vari tipi di scenari di emissioni di gas serra, previsioni da oggi al 2080 per gli ecosistemi europei:
 1. Aree Mediterranee, risorse idriche a rischio: fra il 20% e il 38% della popolazione dell'Europa meridionale (anche Italia) si troverà in bacini idrici insufficienti per la popolazione
 2. Aree montuose, diminuzione di precipitazione nevose: inondazioni invernali, difficoltà di produzione di energia elettrica e della navigazione fluviale
 3. Bio-diversità: estinzioni di molte specie arboree (Pino marittimo, leccio, quercia da sughero, ...)
- UNEP (United Nations Environment program) *World lake conference, Nairobi ottobre 2005*:
 1. Tutti i laghi africani si stanno restringendo (sono a rischio) in particolare il Ciad e il Vittoria

Impatti Ambientali: Ultime ricerche

- **NOAA 2006: nel 2005 la CO₂ è arrivata a 381 ppm con un aumento di 2.6 ppm/anno. Nel 2000 il tasso era 1.5 ppm/anno !!!**
- **Science 2006 vol 311, 2 articoli: entrambi concordano che i ghiacci della Groenlandia si sciolgono più velocemente del previsto. Il ghiaccio riflette i raggi solari  meno ghiaccio più riscaldamento!**

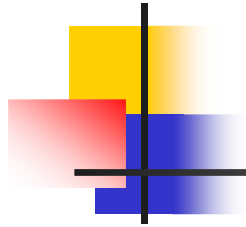
Impatti Ambientali: Ultime ricerche

- ***Nature 2006 vol. 443: il permafrost (ghiaccio perenne) siberiano si sta sciogliendo a causa del riscaldamento dell'effetto serra e rilascia grandi quantità di metano che, come gas-serra è 20 volte più potente della CO₂, quindi accelerazione del surriscaldamento globale***
- ***Proceedings of the National Academies of Sciences degli USA, Settembre 2006: J. Hansen et al. (Goddard Institute for Space Studies, NASA): ora la Terra ha la temperatura più alta degli ultimi 12000 anni ed è a solo un grado dalla temperatura più alta dell'ultimo milione di anni; se crescesse di 2-3 gradi il pianeta cambierebbe completamente aspetto (come 3 milioni di anni fa: mari 25 m più alti...). Il taglio delle emissioni della CO₂ è vitale!***
- ***Journal of Climate, Ottobre 2006, G. Marshall et al (British Antarctic Survey): prova diretta e inequivocabile che lo scioglimento dei ghiacci antartici è causato dal riscaldamento globale prodotto dalle emissioni umane di gas serra.***
- ***Global Change Biology, Gennaio 2008 (USA, Italia, Belgio, Inghilterra, Estonia): l'aumento dei livelli di CO₂ nell'atmosfera agisce direttamente sul ciclo stagionale delle piante, stravolgendolo.***

Impatti Ambientali: Ultime ricerche

■ Emerging Technologies Conference del MIT (Settembre 2006):

- "Se non iniziamo subito a privilegiare le alternative ai combustibili fossili non abbiamo nessuna possibilità di arrestare i drammatici mutamenti che il nostro pianeta sta subendo."
- "Se non curiamo il cancro, il mondo resterà lo stesso, se non curiamo l'AIDS, anche. Ma, se non risolviamo questa situazione entro venti anni, il pianeta non sarà mai più lo stesso."
- R. Armstrong (direttore dell'Energy Initiative del MIT): "La maggior parte dei presenti vivrà abbastanza a lungo da conoscere quello che accadrà e ciò sarà causa di enormi sensi di colpa..."; **"Dobbiamo risolvere il problema adesso o ci resterà un pianeta completamente distrutto."**



Ultimo rapporto IPCC

Climate Change 2007: The Physical Science Basis

Working Group I Contribution to the
IPCC Fourth Assessment Report

Presented by
R.K. Pachauri, IPCC Chair
and
Bubu Jallow, WG 1 Vice Chair

Nairobi, 6 February 2007



Ultimo rapporto IPCC (Aprile 2007)

Direct Observations of Recent Climate Change

Warming of the climate system is **unequivocal**

Is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global mean sea level.

Le intuizioni delle femmine





VERSO IL FUTURO

Stiamo esaurendo i combustibili fossili

- Stiamo producendo una catastrofe climatica (CO₂, CH₄, N₂O, CFC)
- Stiamo inquinando i mari e l'atmosfera (SO₂, piogge acide, aerosol)

Tutto questo supponendo che il consumo di energia continui con il tasso attuale,

MA

- I paesi in via di sviluppo e quelli poveri e arretrati hanno il diritto di avere più energia (1.6 miliardi di persone sono senza elettricità, 2.4 miliardi hanno come principale fonte energetica le tradizionali biomasse).
- La popolazione mondiale aumenta (nel 2020 saremo almeno 8 miliardi)

Allora, che fare?

Gianni Vannini



Verso il futuro

1. Aumento dell'efficienza di utilizzo
2. Produzione "sostenibile" : turbine a vento, potenza mareale, **energia solare**, ... ma ora possono produrre solo una piccola parte dell'energia necessaria!
3. **Nucleare** (non è una scelta economica, è sopravvivenza!!!)
4. Centrali piccole e distribuite (solari e nucleari) per produrre idrogeno?
5. Ricordiamoci che non c'è più tempo!



Il "caso idrogeno"

- L'idrogeno esiste in natura allo stato gassoso in piccole percentuali nella composizione dell'aria, e quindi deve essere prodotto
 - per via termica dal metano ($\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + E_t \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$)
 - per via elettrolitica dall'acqua ($2\text{H}_2\text{O} + E_t \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$)
 - per via radiolitica dall'acqua ($2\text{H}_2\text{O} + E_\gamma \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$)
- In tutti i casi è necessario un apporto di energia esterno, e nei primi due casi il bilancio economico-energetico complessivo è negativo.
- **L'idrogeno, quindi, non è una *fonte di energia*, ma un *vettore energetico*, conveniente per altri motivi (impatto ambientale locale nullo) solo se si riesce a produrlo a basso costo.**



VERSO IL FUTURO: le riserve

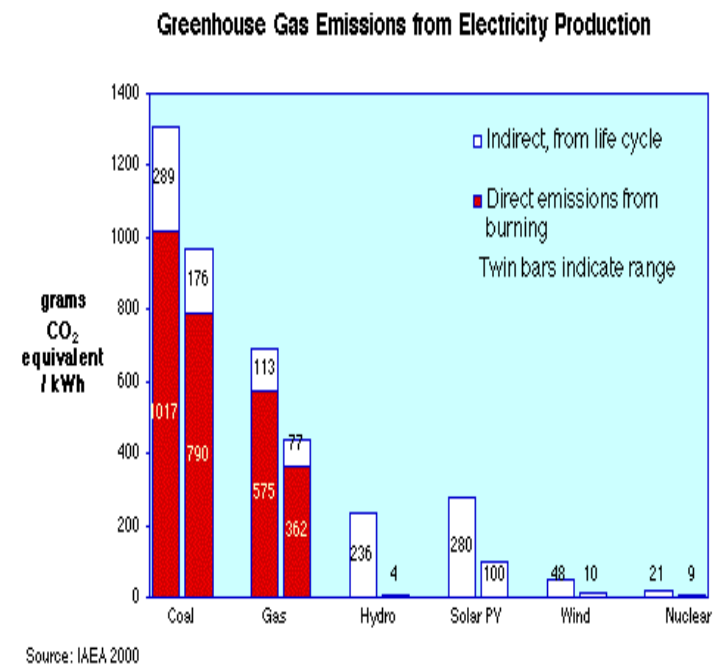
Risorse:	Stima durata ai ritmi attuali
Carbone	400 anni
Petrolio	40 anni
Gas naturale	70 anni
Nucleare	>1000 anni
Rinnovabili *	∞

* al 2050 le energie rinnovabili porteranno al massimo un contributo alla produzione di energia del 40%

(rapporto IAEA)

VERSO IL FUTURO: un esempio

	Centrale da 1 GW Nucleare	Centrale da 1 GW Carbone
Superficie occupata	<i>15 ettari</i>	<i>30 ettari</i>
Combustibile bruciato	<i>50 ton</i>	<i>2.5x10⁶ ton</i>
Emissioni annuali: Gas serra (CO ₂)	-	<i>6.5x10⁶ ton</i>
SO ₂	-	<i>900 ton</i>
NO _x	-	<i>4000 ton</i>
Consumo di ossigeno	-	<i>5x10⁶ ton</i>
Scorie radioattive: A breve vita media	<i>400 ton</i>	<i>Tracce</i>
A lunga vita media	<i>700 Kg</i>	<i>Tracce</i>





Occupazione del suolo

Un impianto elettrico da 1000 MWe occupa le seguenti aree:

Tipo di impianto	Area occupata (ettari)
Nucleare	15
Carbone	30
Olio combustibile	20
Gas (ciclo combinato)	12
Solare (fotovoltaico)	200
Solare (termico, progetto Archimede)	2.000
Eolico	12.500

Ruolo delle fonti rinnovabili in Italia

Energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili in Italia nel 2002 : 17,25 Mtep (7,2%).

Idroelettrica	9.067
Legna e assimilati	6.487
Geotermica	1.140
CDR	267
Biocombustibili	222
Eolica	51
Solare	13
Totale	17.247

- Il contributo più significativo (16,7 Mtep) proviene dalle fonti rinnovabili di tipo classico (idraulico, geotermico, legna da ardere).
- Il contributo delle nuove FER equivale allo 0,09% del fabbisogno elettrico nazionale.

Contributo massimo ottenibile fonti rinnovabili

■ Fonte	Mtep
Idroelettrica	15.558
Legna e assimilati	9.598
Geotermica	5.883
CDR	8.304
Biocombustibili	6.198
Eolica	2.878
Solare	3.126
TOTALE	51.544

- Una stima del contributo massimo ottenibile dalle fonti rinnovabili in Italia era contenuta nel documento TERES II del programma ALTENER della Commissione Europea (1996).
- Nelle condizioni di scenario più favorevole (best practice policies) il contributo teorico massimo da nuove FER raggiungibile in Italia nel 2020 è di 20,5 Mtep, cioè **meno del 5% del fabbisogno energetico nazionale**



L'ENERGIA NUCLEARE

Il compito dei fisici è avere idee!

- Sappiamo “**trasmutare**” gli elementi
- Grazie ai fisici vi è stato un grande sviluppo tecnologico nel campo degli acceleratori di particelle
- Conosciamo i meccanismi di produzione dei neutroni e delle reazioni nucleari
- Abbiamo conoscenza e familiarità con le più avanzate tecniche di calcolo e di simulazione

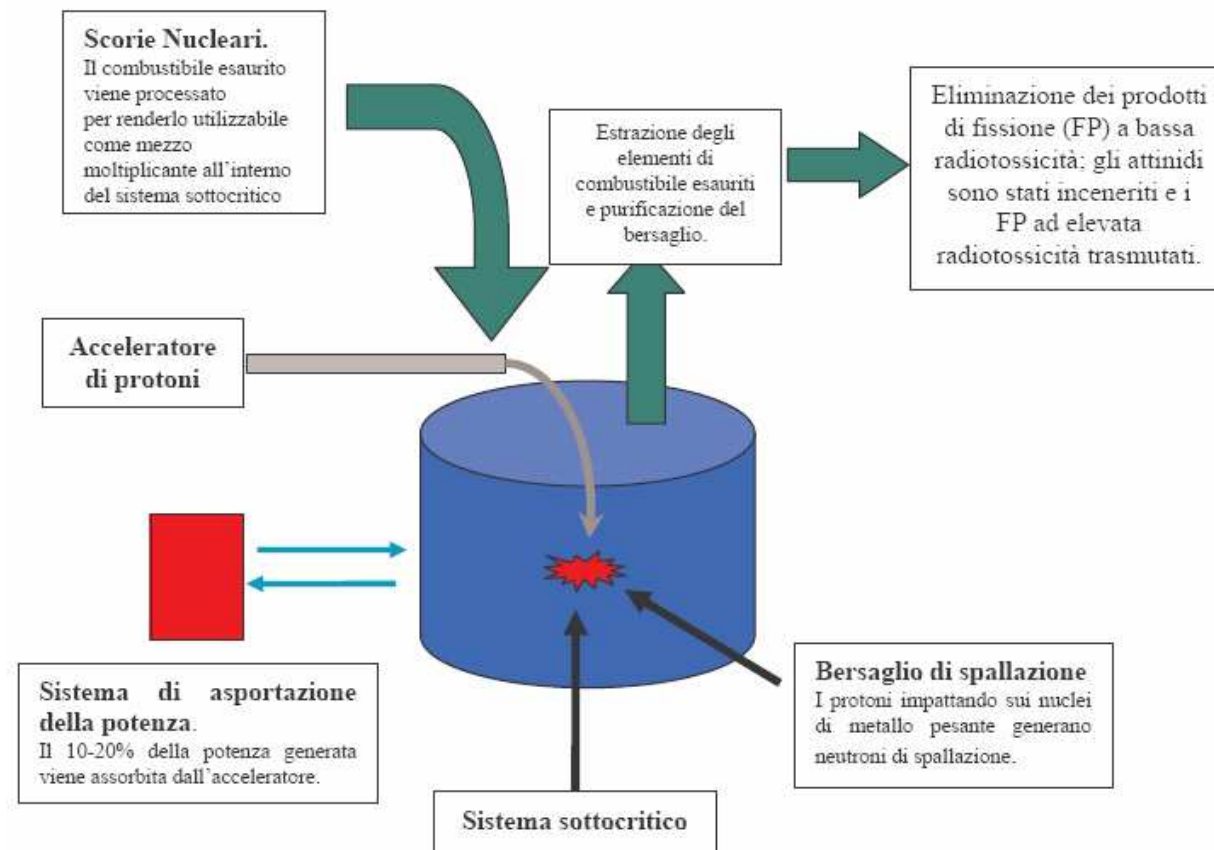
Allora:

- Possiamo utilizzare acceleratori per la trasmutazione di scorie radioattive?
- Possiamo progettare un reattore che sia “intrinsecamente sicuro” e che usi un combustibile tale da produrre pochi attinidi e a bassa tossicità?
- Possiamo utilizzare una tecnologia che **non permetta il proliferare delle armi nucleari?**

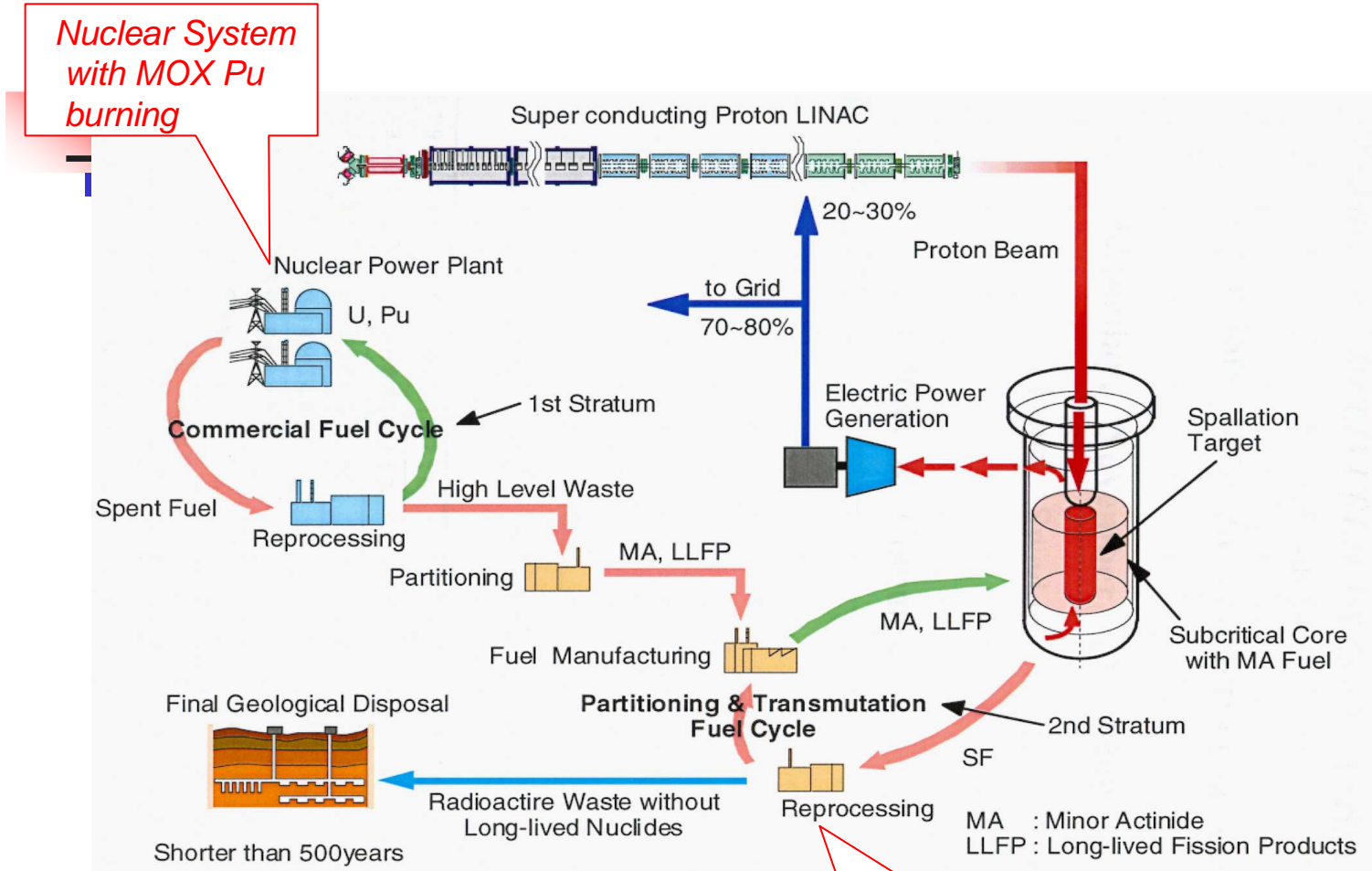
L'ENERGIA NUCLEARE: nuove idee sulla sicurezza

- Introduzione di condizioni deterministiche piuttosto che probabilistiche che proibiscono *a priori* l'accadere di eventi estremi (es: incidenti di criticità, come Chernobyl, eliminati se il reattore lavora in modo sottocritico \implies ADS e ciclo del Torio)
- Cicli chiusi del combustibile partendo da ^{238}U o da ^{232}Th cioè **senza "arricchimenti"** e con le **scorie di attinidi recuperate e interamente riciclate**. In queste condizioni tutto il combustibile viene bruciato e **l'energia estratta è circa 200 volte quella dei reattori attuali**. Poche scorie: piccole quantità di attinidi e frammenti di fissione, ma **...possibilità di trasmutazione**.
- Utilizzando il **ciclo del Torio** non si producono quantità utilizzabili di Pu e quindi **non ci sono rischi di produzioni di armi nucleari**.

ADS e TRASMUTATORE



Japanese Proposal (JAERI/KEK)



Disposal for ≈ 500 years

Incineration of Minor Actinides and Long Lived FF

C. Rubbia 2005

Gianni Vannini



L'ENERGIA NUCLEARE, ADS e EA

*Dalla relazione di Carlo Rubbia al **International Symposium on Neutrons in Basic Science and Nuclear Technologies n_BANT, CERN, Geneva - March 22-23, 2005** :*

- In a *sub-critical operation* the energy process is controlled and driven by some additional neutrons (typically $\approx 1\%$ to 2%), externally supplied with a proton spallation target (**ADS**).
- In these conditions, the energy gain G is controlled and directly proportional to the power produced by the external accelerator. Because of the excellent neutron yield of the spallation process, *high values of G are possible*, typically in the range of G between 250 and 500. This means that a thermal power in the GWatt range is controlled by a p-beam of only a few MWatt (a few mA) (**EA**).
- A realistic scenario in which an efficient separation and incineration of the ≈ 3.0 Ton of MA annually produced by the ≈ 60 French is feasible.
- *The additionally installed thermal power in order to achieve such a complete incineration of MA's is about equivalent to one more standard PWR ($\approx 3 GW_{th}$).*



L'energia nucleare

Allora la risposta agli interrogativi precedenti

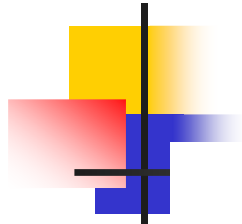
(-Possiamo utilizzare acceleratori per la trasmutazione di scorie radioattive?)

-Possiamo progettare un reattore che sia "intrinsecamente sicuro" e che usi un combustibile tale da produrre pochi attinidi e a bassa tossicità?

-Possiamo utilizzare una tecnologia che **non permetta il proliferare delle armi nucleari?**)

è Sì se verranno finanziate subito sia ricerche di base che tecnologiche

L'ENERGIA NUCLEARE, la ricerca di base



Acronym	Research area	Coordinator	Number of partners	Length (month)	EU funding (M€)
Basic researches					
MUSE	Experiments for Sub-critical Neutronics Validation	CEA (France)	13	36	2.0
HINDAS	High and Intermediate Energy Nuclear Data for ADS	UCL (Belgium)	16	36	2.1
n-TOF-ND-ADS	ADS Nuclear Data	CERN	18	36	2.4
Technological researches					
SPIRE	Effects of Neutron and Proton Irradiation in Steels	CEA (France)	10	48	2.3
TECLA	Materials and Thermo-hydraulics for Lead Alloys	ENEA (Italy)	16	36	2.5
CONFIRM	Uranium Free Nitride Fuel Irradiation and Modeling	KTH (Sweden)	7	48	1.0
THORIUM CYCLE	Development of Thorium Cycle for PWR and ADS	NRG (NL)	7	48	1.2
ADOPT	Thematic Network on Advanced Options for P&T	SCK.CEN (Belgium)	16	36	0.4
MEGAPIE	Megawatt Pilot Experiment	FZK (Germany)	16	36	2.43
FUTURE	Fuel for Transmutation of Transuranic Elements	CEA (France)	10	36	1.7
PDS-XADS	Preliminary Design Studies of an Experimental ADS	Framatome (France)	26	36	6.0

Problema Energetico: alcune domande

-E' possibile una produzione "sostenibile" di energia?

Quello che è certo è che

- Il fossile porterà in pochi anni a sconvolgimenti planetari
- Senza nuovi modi di produzione si va inevitabilmente al disastro

-Si può fare una discussione razionale ed onesta?

-Si può distinguere la propaganda dettata da enormi interessi finanziari dalle esigenze reali dell'umanità ?

Quale ruolo devono giocare i fisici nucleari?

Ricerca di base \Rightarrow contributi alla ricerca sulle tecniche di bruciamento delle scorie radioattive e alla progettazione di ADS

- Contribuire all'educazione dei cittadini nel comprendere le idee generali del rischio
- Fornire una sorgente di conoscenza ed esperienza, addestrando giovani laureati nella conoscenza di processi nucleari e nelle tecniche di rivelazione

Quale ruolo deve giocare la scuola?

E chi governa? Che ruolo deve assumere? Sulla base di che cosa deve decidere?



CONCLUSIONI

- Non si devono fare scelte solo in base a criteri economici.
- Solo la conoscenza delle leggi della natura può permetterci di fare scelte consapevoli.
- Continuare a bruciare combustibili fossili porterà la Terra in una situazione insostenibile per l'umanità: senza risorse e irreversibilmente inquinata.
- Non è un problema partitico, filosofico, intellettuale, economico, è una emergenza; si tratta dell'estinzione del genere umano o per lo meno della civiltà come noi la conosciamo.



CONCLUSIONI

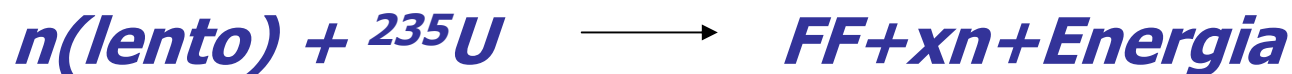
- Due priorità assolute e urgentissime:

a) l'integrità della biosfera,

b) la dignità della vita umana di tutti gli abitanti della Terra e non solo di una parte.

L'ENERGIA NUCLEARE, Fissione

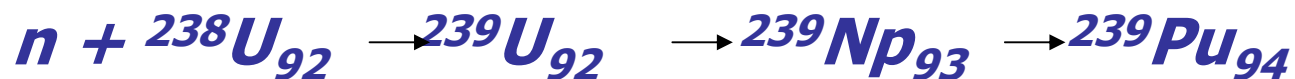
scorie



Energia/fissione = 200 MeV = $2 \cdot 10^{-17}$ kWh

⇒ 1 Kg di ${}^{235}\text{U}$ produce circa $25 \cdot 10^6$ kWh

L' ${}^{238}\text{U}$ fissiona molto poco ma produce plutonio il quale, se colpito da neutroni veloci, fissiona



I neutroni emessi nella fissione danno origine ad altre fissioni:

Possibilità di **reazioni a catena**

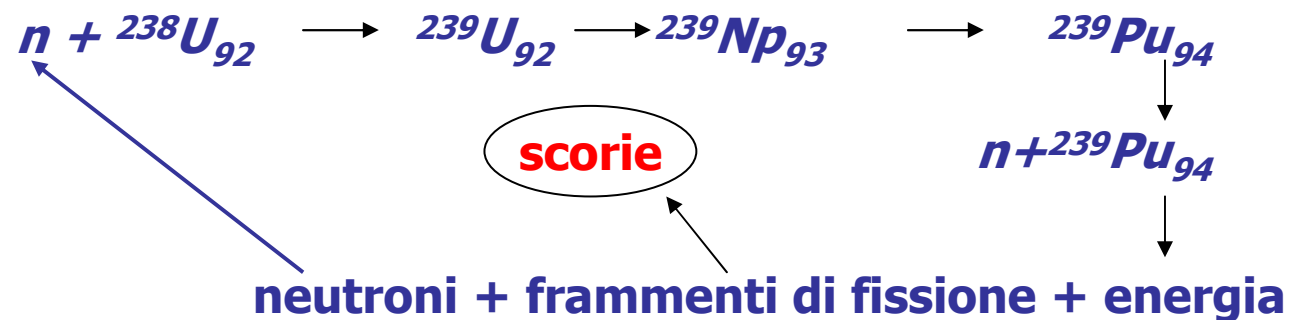
L'ENERGIA NUCLEARE

Il bilanciamento fra:

- Quantità di combustibile (^{235}U) [è il 4%-5%, il resto è $^{238}\text{U}_{92}$]
- Moderatori
- Materiali assorbenti

porta alla costruzione dei reattori. Solo il 5% del combustibile è utilizzato

Ci sono anche i reattori veloci o **autofertilizzanti**: producono più combustibile di quanto ne venga consumato.





L'ENERGIA NUCLEARE

Il concetto di massa critica

Per l' ^{235}U $M_{\text{crit}} = 50 \text{ Kg}$

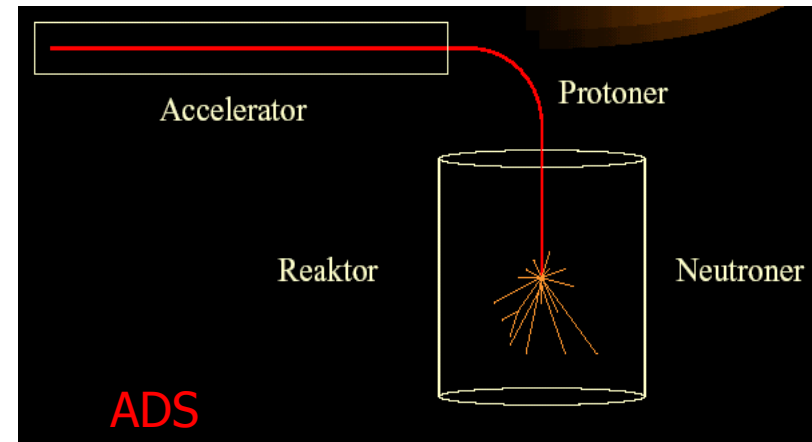
Fare una bomba atomica è "facile"

- L' ^{235}U è solo lo 0,7% dell'uranio naturale
 \implies arricchimento dell'U
- I neutroni devono essere lenti \implies in un reattore ci devono essere dei "moderatori" (grafite, acqua pesante, acqua naturale)
- In un reattore devono esserci dei materiali assorbenti per i neutroni (B, In, Ag, Cd) per regolare il numero di quelli che danno fissione \implies regolazione e guida del processo

L'ENERGIA NUCLEARE, nuove idee

Nuove idee per la produzione di energia e lo smaltimento delle scorie:

- Combustibile basato sul ciclo del torio
- Reattore sottocritico ($k_{\text{eff}} \sim 0.96$)
- Trasmutazione delle scorie a lunga vita media



Produzione di energia: necessario un fascio di neutroni prodotto con acceleratori per sostenere un ciclo in reattori sottocritici

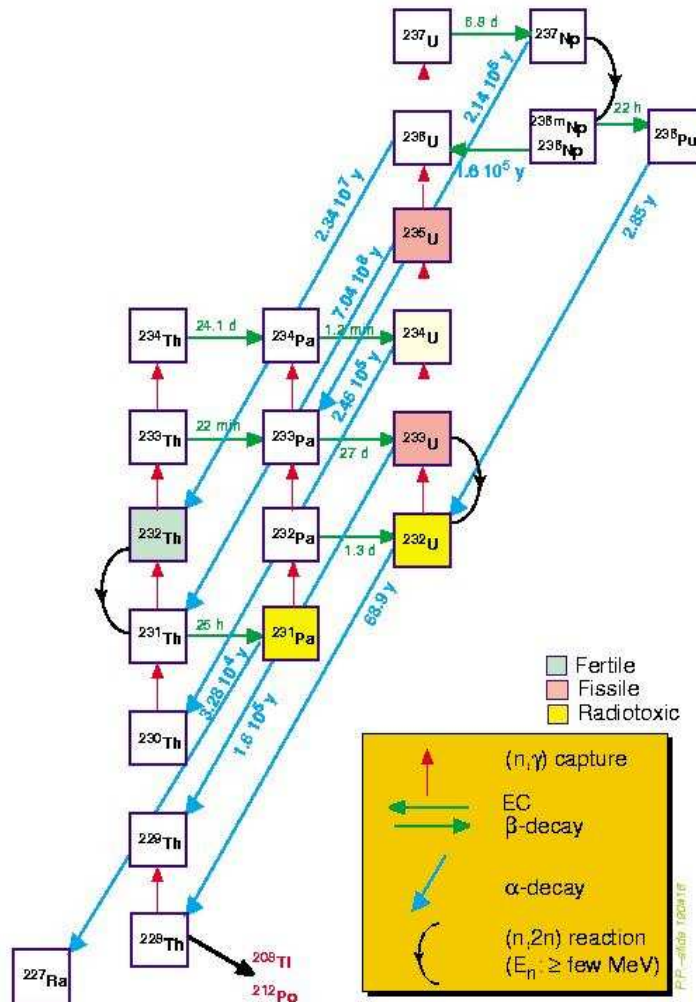
Misure necessarie:

Reazioni principali: $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$, $^{233}\text{U}(n,\gamma)$, $^{233}\text{U}(n,f)$

Reazioni concorrenti: $^{233}\text{Pa}(n,\gamma)$, $^{233}\text{U}(n,2n)^{232}\text{U}$, $^{232}\text{Th}(n,2n)^{231}\text{Th}$, $^{231}\text{Pa}(n,\gamma)$

Materiali strutturali (sottoposti ad elevati flussi di neutroni) : **Fe, Cr, Mn, Ni, Mo**

L'ENERGIA NUCLEARE, il ciclo del torio



Occorre una conoscenza accurata delle sezioni d'urto fondamentali:

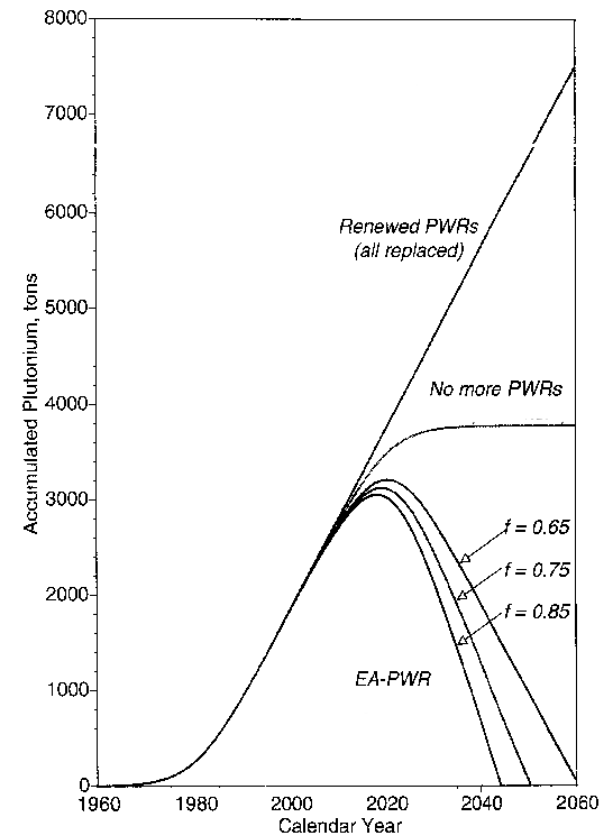
- Cattura neutronica
- Diffusione elastica
- Fissione indotta da neutroni

L'ENERGIA NUCLEARE, le scorie radioattive

Lo smaltimento di rifiuti radioattivi (attinidi e frammenti di fissione) prodotti in reattori nucleari o dallo smaltimento di armi nucleari costituisce un grosso problema ambientale.

Solo in Francia, sono prodotte oltre 50 tonnellate all'anno di attinidi e frammenti di fissione a lunga vita media.

Se si assume un incremento pari al 2,3%/anno consumo di energia a livello mondiale e che per il 2050 il contributo dell'energia nucleare sia del 30%, allora la produzione annua di scorie radioattive può essere stimata in 100000 ton/anno (corrispondente al riempimento di un centro di stoccaggio qu Yucca mountain ogni 8 mesi!)

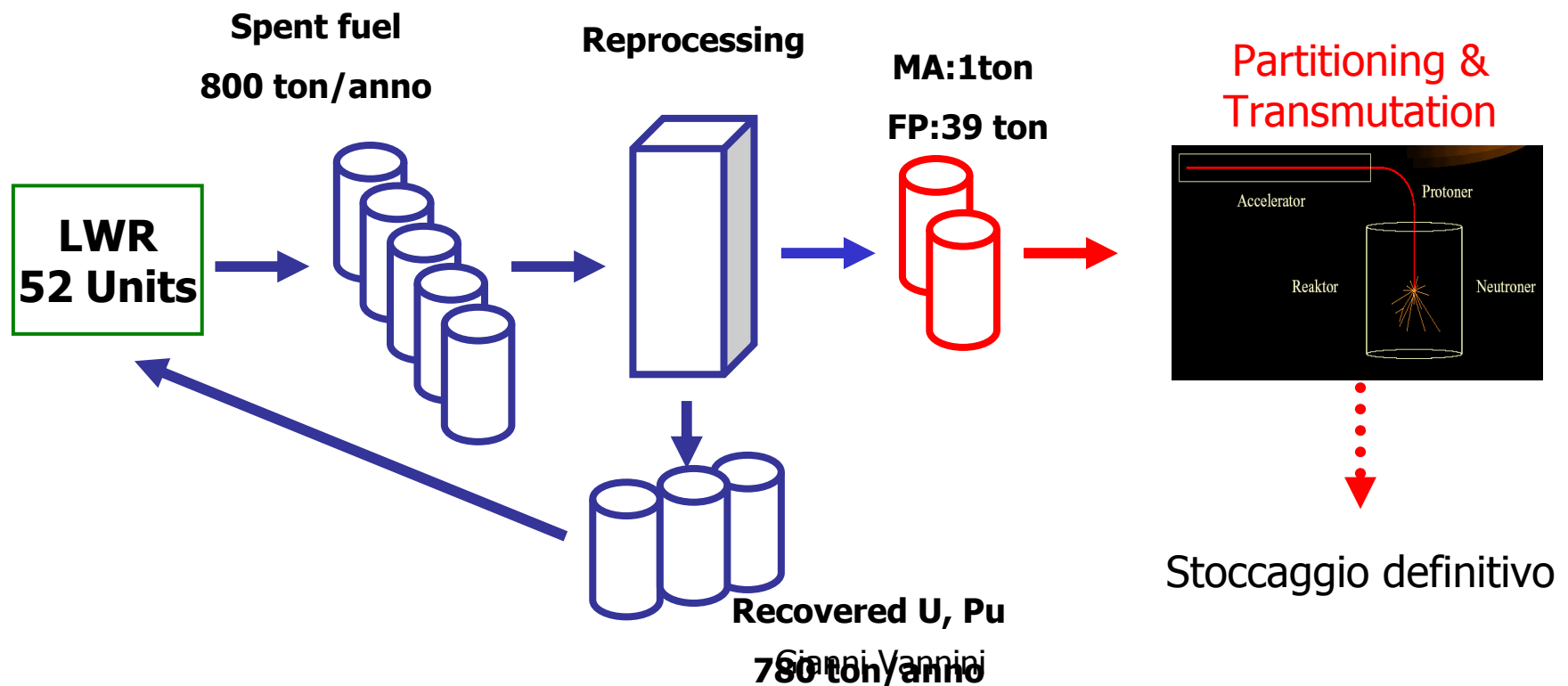


Marchetti et al., 1994

L'ENERGIA NUCLEARE, la trasmutazione delle scorie radioattive

Sono allo studio sistemi per l'incenerimento nucleare delle scorie radioattive

Si possono utilizzare reazioni indotte da neutroni per trasmutare attinidi frammenti di fissione a lunga vita media in isotopi stabili o a breve vita media



L'ENERGIA NUCLEARE, le scorie radioattive

Esempio di un tipico reattore LWR (1Gwatt) in funzione da 40 anni

Fabbisogno minimo di neutroni per smaltire i prodotti di fissione più preoccupanti

1 kg di neutroni = 5.97×10^{26}
neutroni!

$E_n = 40 \text{ MeV/n} = 6.4 \times 10^{-12} \text{ Joule/n}$

1 kg di neutroni richiede:

- 1.061×10^9 KWh (equivalente a:)
- 3.029 MW di potenza di fascio (durante i 40 anni di funzionamento della centrale) → 0,3% dell'energia prodotta!

Isotopo	Massa Kg	Neutroni Kg
^{99}Tc	843	8.51
^{129}I	196.2	1.98
^{93}Zr	810.4	8.71
^{135}Cs	442.2	3.27
^{79}Se	6.57	0.80