# Fissione nucleare: una opzione per il futuro post-fossile ?

Francesco Spanò
Columbia University & conCERNed for Humanity

Il relatore è il solo responsabile delle informazioni ed opinioni espresse in quanto segue.
Egli non rappresenta posizioni ufficiali della Columbia University o del conCERNed for Humanity.

# Sommario

- Introduzione
  - Energia : motore dell'universo
  - Dove siamo? Il mix energetico e il ruolo dei fossili
- Fissione: Energia dal nucleo
  - come funziona? Come si estrae l'energia?
- Fissione oggi
  - Contributo al mix energetico odierno
- Prospettive medio -lungo termine
  - Spaccato sugli scenari e i punti critici

# Ciò che non affronterò

- Fisica dei cambiamenti climatici
- Sicurezza dei reattori  e smaltimento scorie

# Energia: motore dell'universo

capacità di compiere lavoro = spostare un punto di applicazione di una forza

Si misura in

1 Joule (J) = forza (1Kg $m/s^2$) spostamento (1 m)

~390m

1 cal = 4.1868 Joule

1 KWh = 3.6 $10^6$ J = 3.6 MJ = Lavoro per sollevare una FIAT Panda vuota (~950 Kg) in cima all ESB

Panda ha $E_{POTENZIALE}$ (lavoro fatto per portarle su) può tornare a terra trasformandola in $E_{CINETICA}$ (movimento)

# Termodinamica: Le leggi dell'Energia

Prima legge: energia si conserva

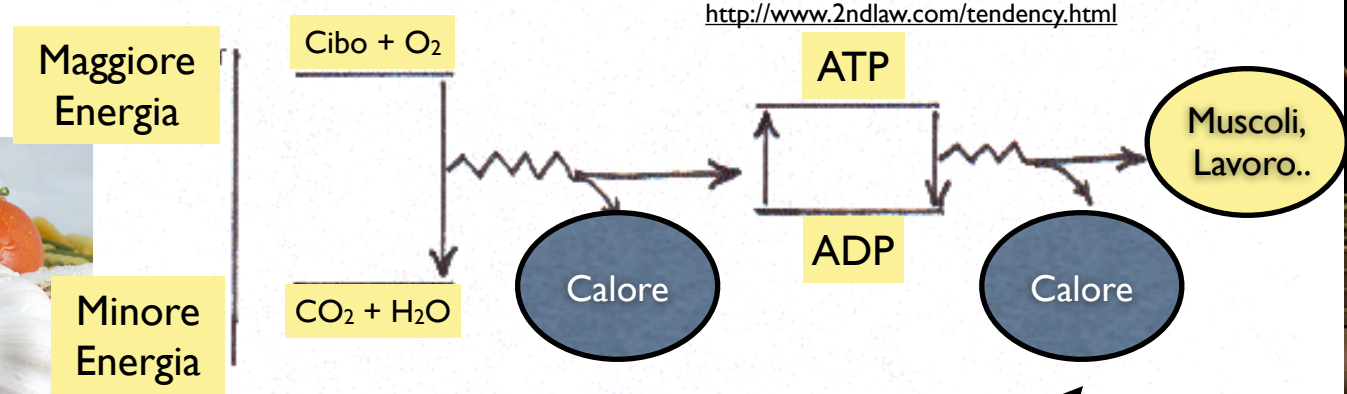
quanto e' perso? non si crea, ne si distrugge, si trasforma

working land

L'essere umano: da nutrizione ad azione

Figure 3. The use of "downhill" evolved energy to force "uphill" non-spontaneous reactions.

http://www.2ndlaw.com/tendency.html



Thinking

Seconda legge: processi più probabili "disperdono" l'energia, degradandone una parte in calore. Impossibile convertirla 100% in lavoro. Cresce l'entropia = misura di dispersione energetica.

# Energia e Forze

Forza ↔ Interazione

Energia

should we use storm's intro?

fotoni

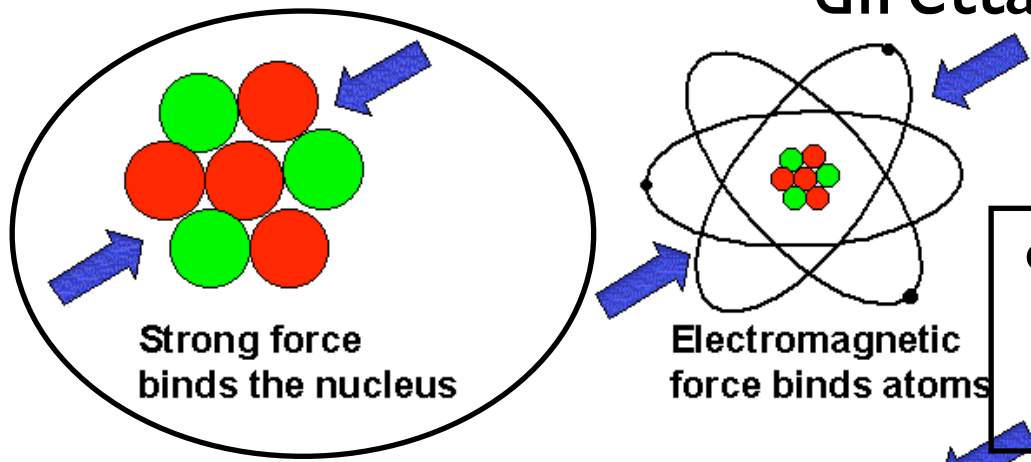
diretta

radiazione solare (fotoni)

forte

immagazzinata

calore da nuclei







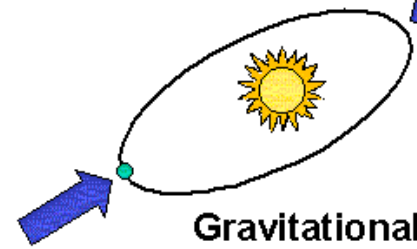
combustibili fossili

biomassa

calore da ossidazione

fluidi (vento, mare)

idroelettrica




debole

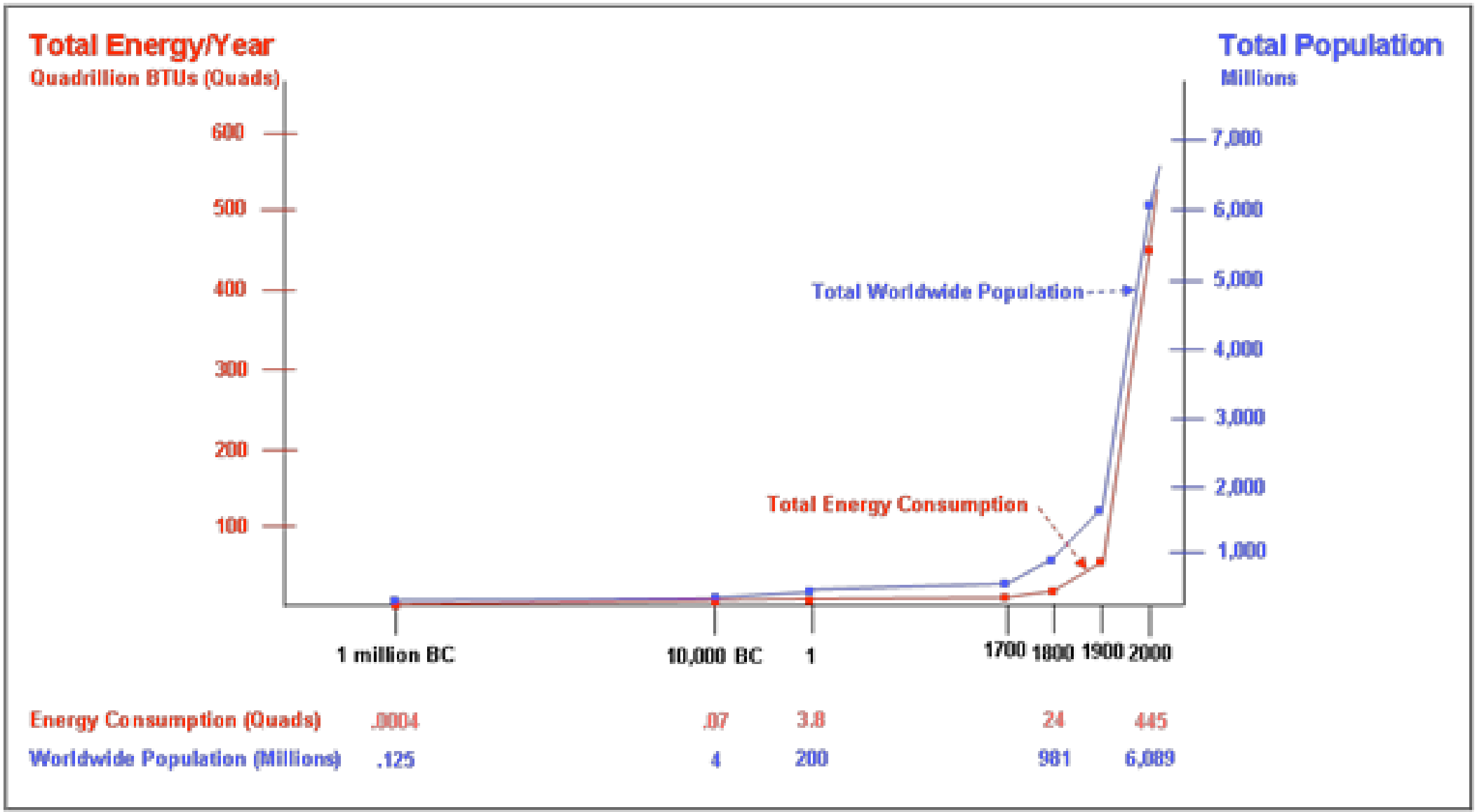
maree

# Dove siamo?

Il paradigma attuale

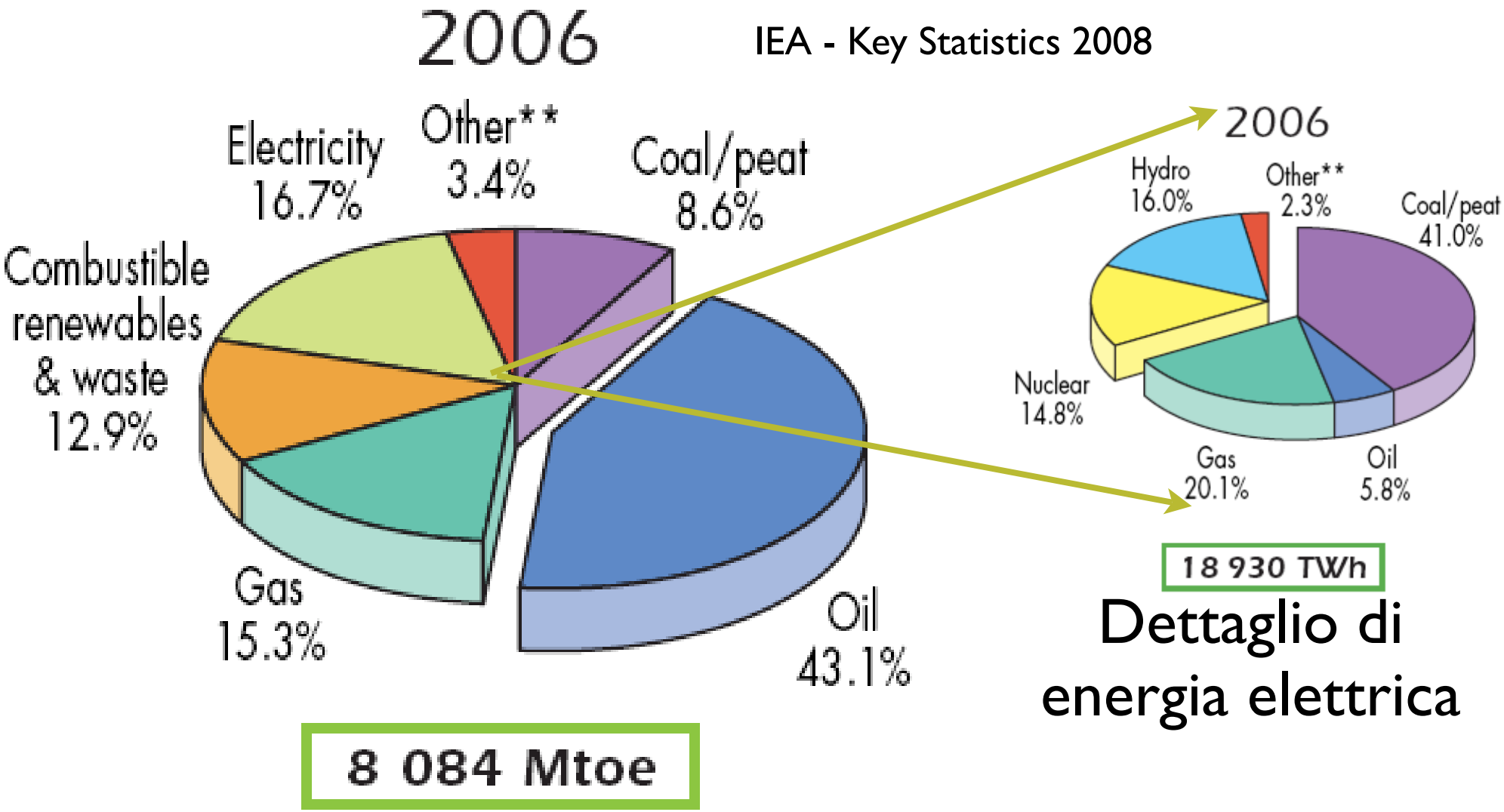
# Energia e popolazione

http://www.energybulletin.net/node/34120



# Energia: da dove?

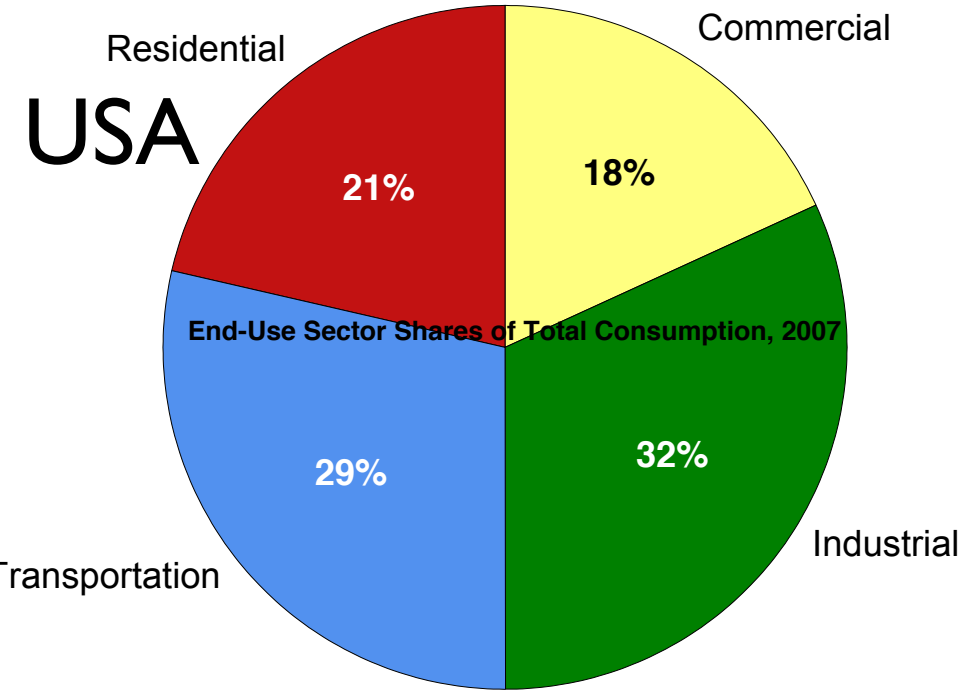
Consumo Totale Finale: energia utilizzata + scambi commerciali?




combustibili fossili ~78% del consumo finale mondiale!

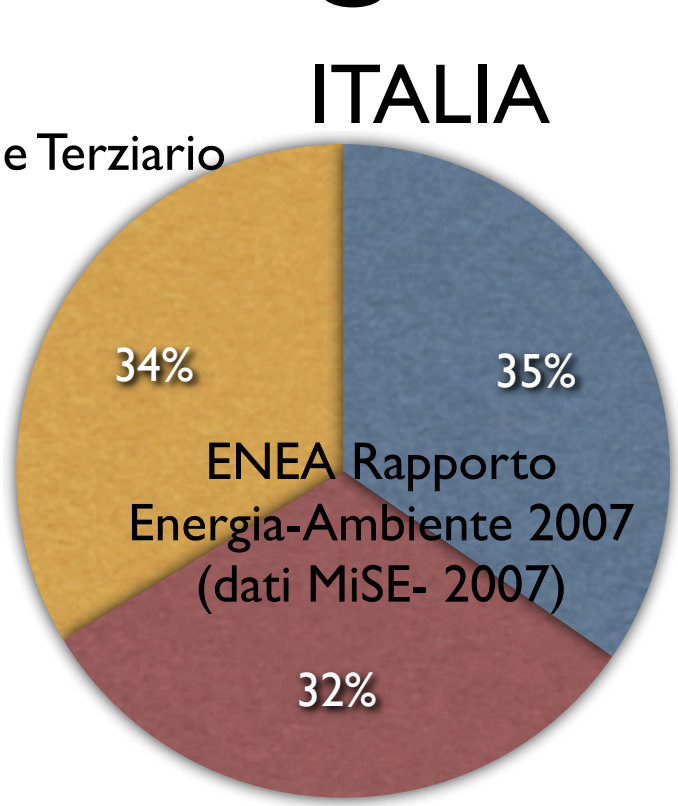
# Per cosa usiamo l'energia?

USA




http://www.eia.doe.gov/aer/consump.html

ITALIA




Consumo medio di

cittadino EU occidentale~50000 KWh

media mondiale (6,5 Miliardi)~17000 KWh

cittadino Cina (1.3 Miliardi)~9400 KWh

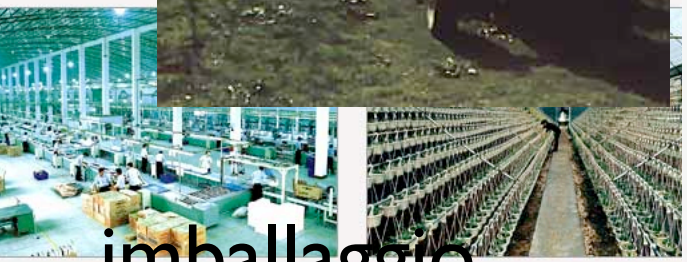
cittadino India (1.1 Miliardi)~3700 KWh

# L'oro nero

http://resources.schoolscience.co.uk/ExxonMobil/infobank/4/2index.htm?2home.htm

colivazioni

pesticidi

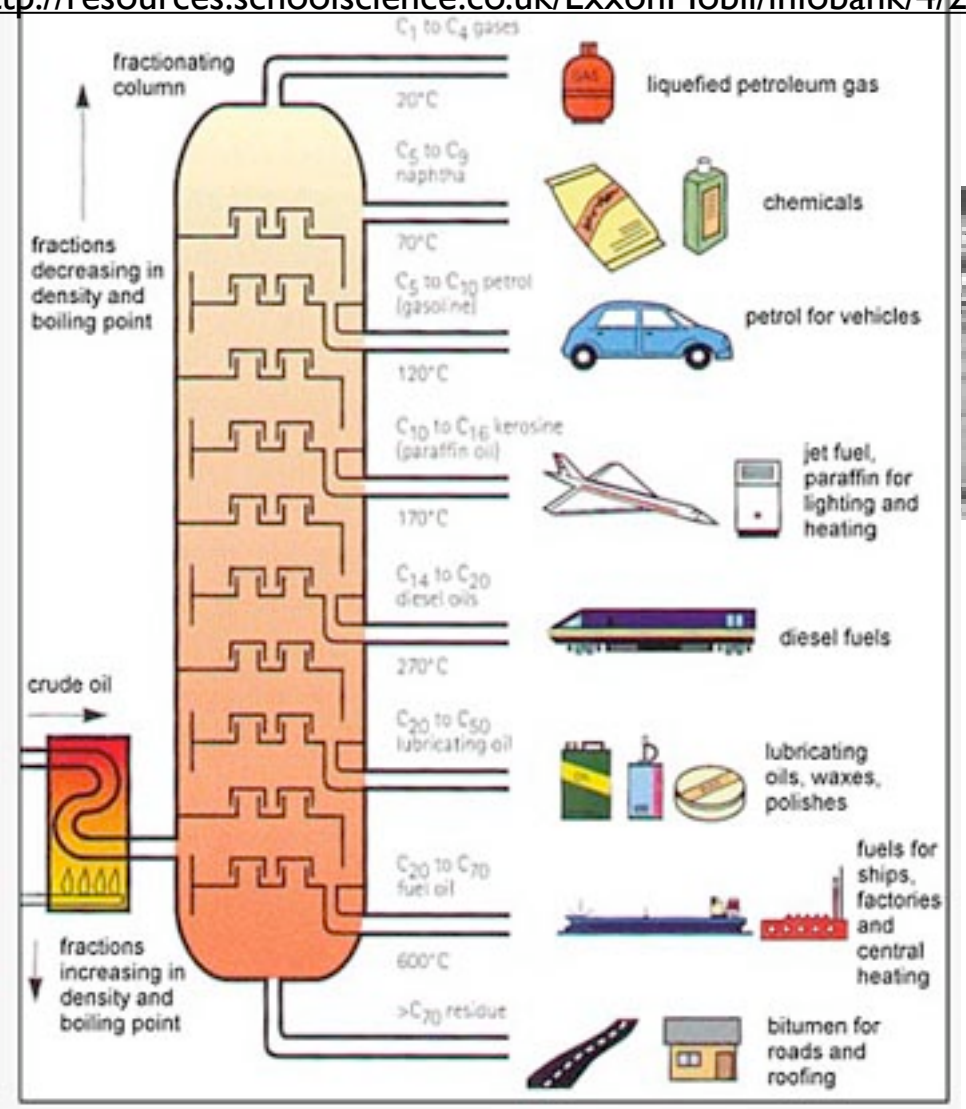


imballaggio

e stoccaggio

nylon

spazzolini




carburante

per industrie,

riscaldamento

elettronica

isolanti materiali

per edilizia

combustibile

per TUTTI i

trasporti :97%

da fossili

bitume

plastica

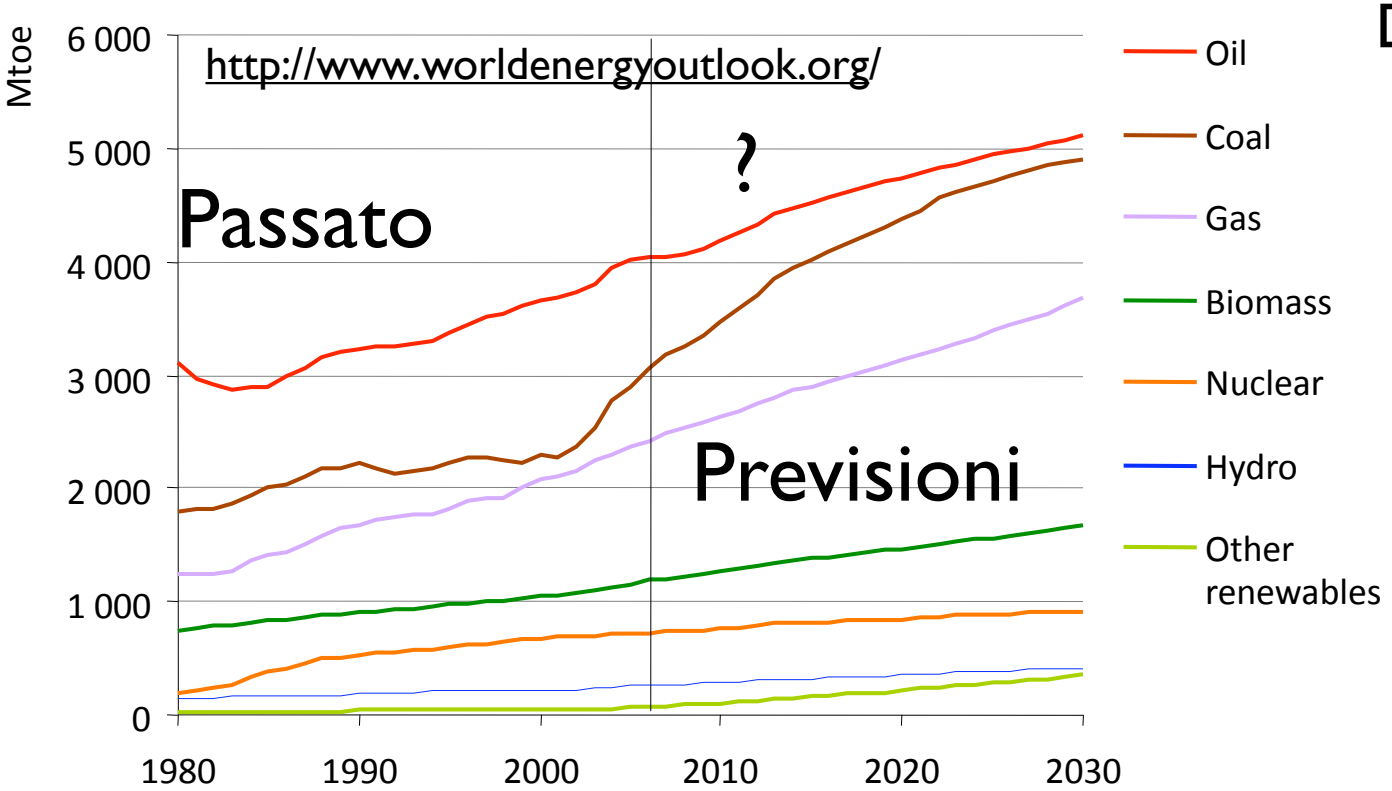
poliestirene

imballaggi

# Richiesta di energia - Scenario di riferimento

Domanda cresce circa 1.6% l'anno: (+45% al 2030)[(IEA -2008)]

Popolazione cresce ~1% annuo (~70 milioni di persone/anno)




Durata risorse a consumo presente (anni)

Petrolio~42 anni
Risorse EU~ 8 anni

Gas ~60 anni
Risorse EU~ 15 ann

Carbone ~133 anni
Risorse EU~ 50 anni

Dati (BP Wold energy review2008)

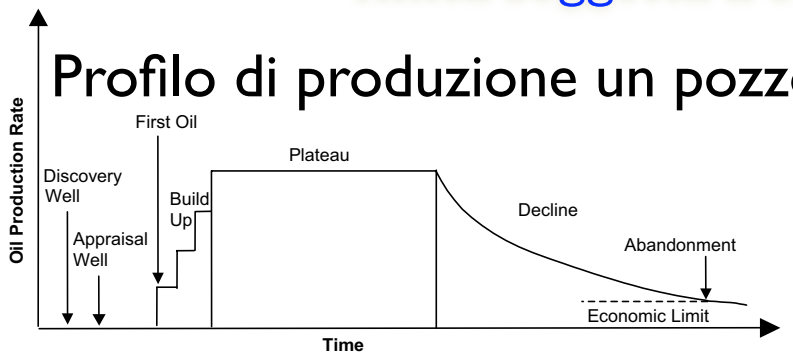
Richiesta di elettricità ~ x2.5 in 2050

Fossili dominanti (carbone ~circa 1/3 dell'incremento)

nucleare(~quasi costante), rinnovabili ( crescita) minoritari

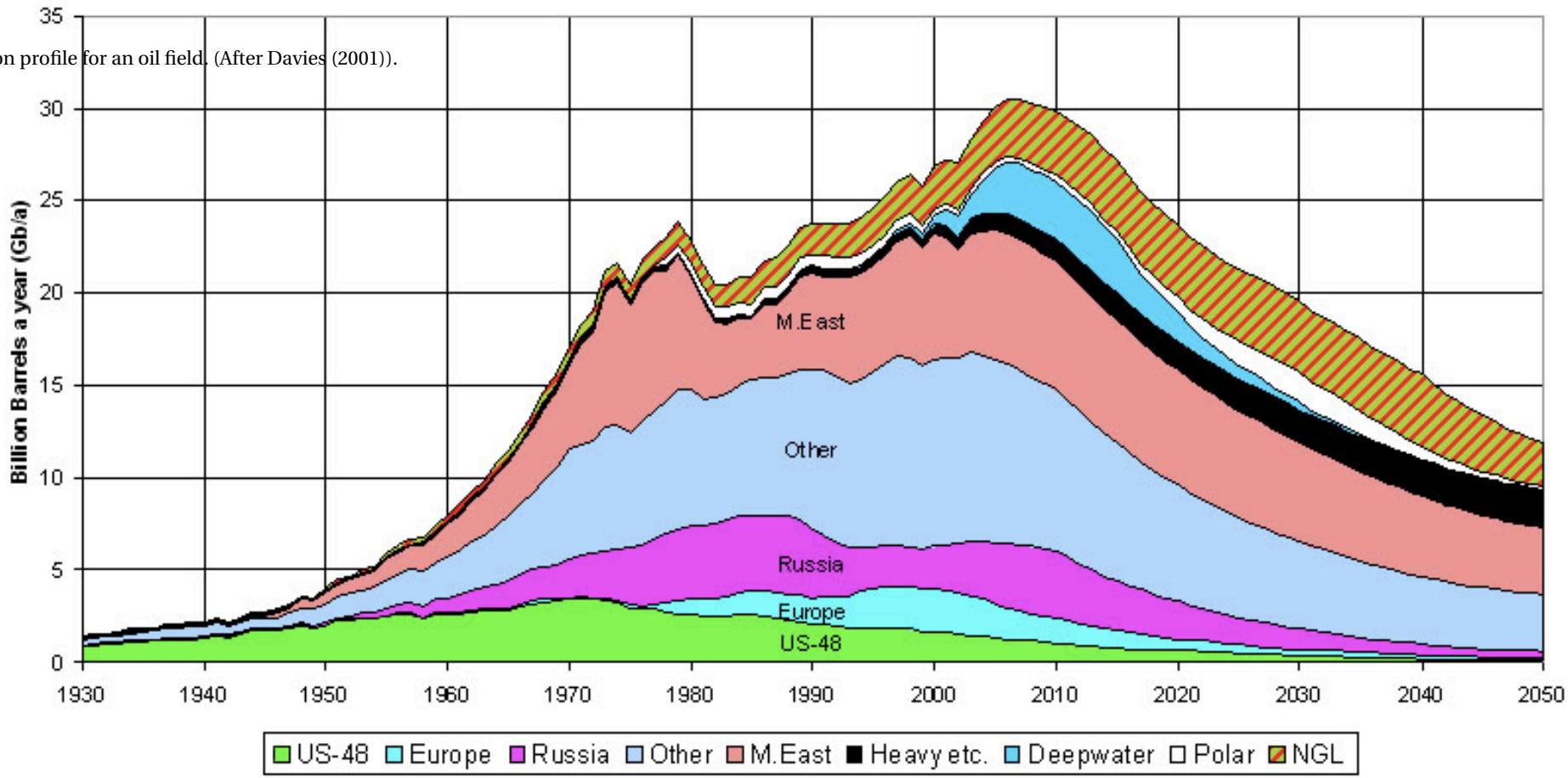
# Il picco dell'estrazione petrolifera

"Il termine Peak Oil si riferisce al massimo ritmo di produzione di petrolio in una qualsiasi area in considerazione, in riconoscimento che è una risorsa naturale finita soggetta a esaurimento" --Colin Campbell




www.peakoil.net

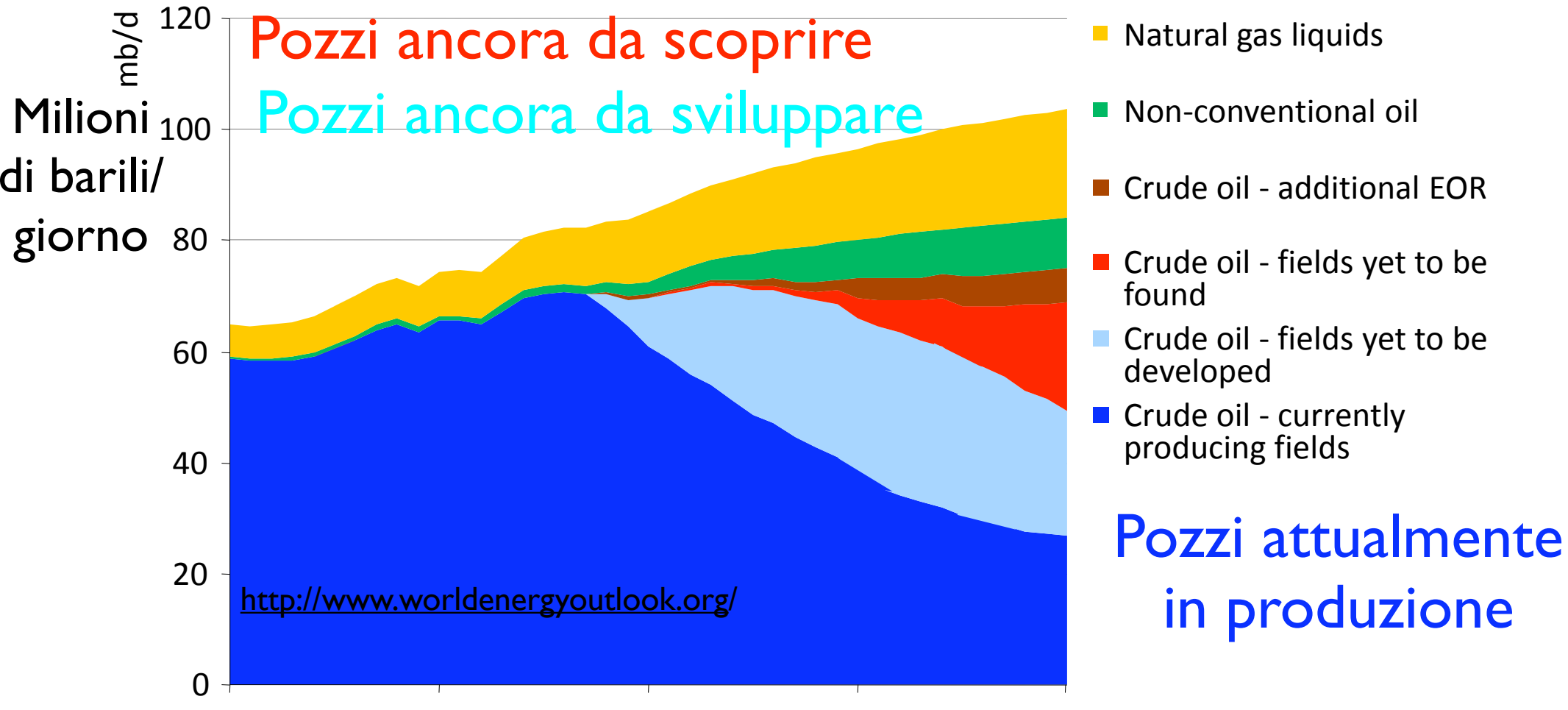
*Figure 3.5:* Production profile for an oil field. (After Davies (2001)).



# Limiti all'estrazione di petrolio

## (International Energy Agency - Novembre 2008)

"Raggiungere i 104 mb/giorno nel 2030 richiede 64 mb/giorno di capacità aggiuntiva lorda - 6 volte l'attuale capacità dell'arabia saudita- per affrontare la crescita in domanda e opporsi al declino"



# Energia dal nucleo

$_{Z}\text{Elemento}^{A}$

Z=numero di protoni  N=numero di neutroni  A=Z+N

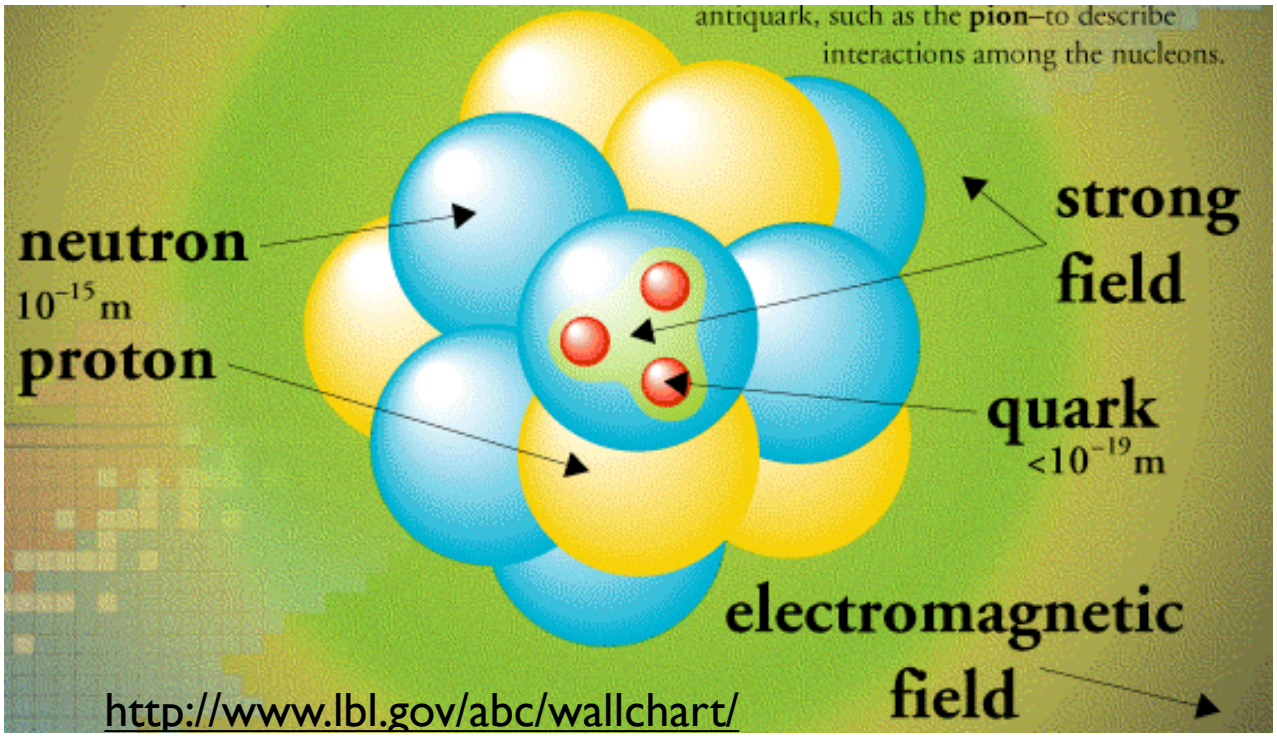
# Le forze nel nucleo atomico

forza elettromagnetica → tutti i protoni si respingono

raggio di azione: infinito

forza "forte" → quarks legati in protoni e neutroni (nucleoni)
nucleoni si attraggono fra vicini

raggio di azione~ dimensione nucleone




Energia di massa
= massa x $c^2$

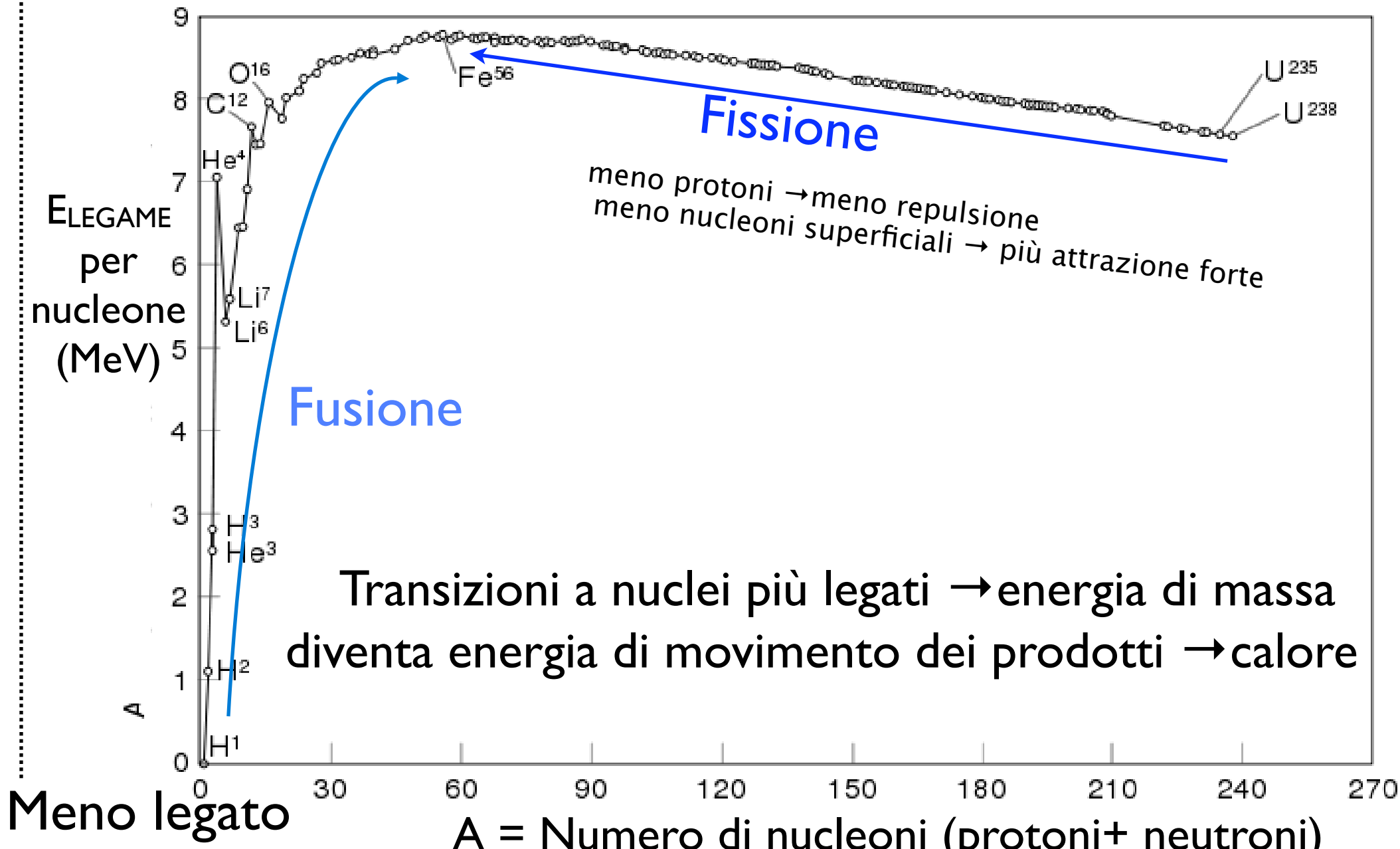
1 -10 fm
(1fm =$10^{-15}$m)

Energia di legame: $E_{LEGAME}$= $E_{MASSA}$(costituenti) - $E_{MASSA}$(nucleo) = Lavoro necessario a separare il nucleo in costituenti

# Energia di Legame e reazioni nucleari

Più legato

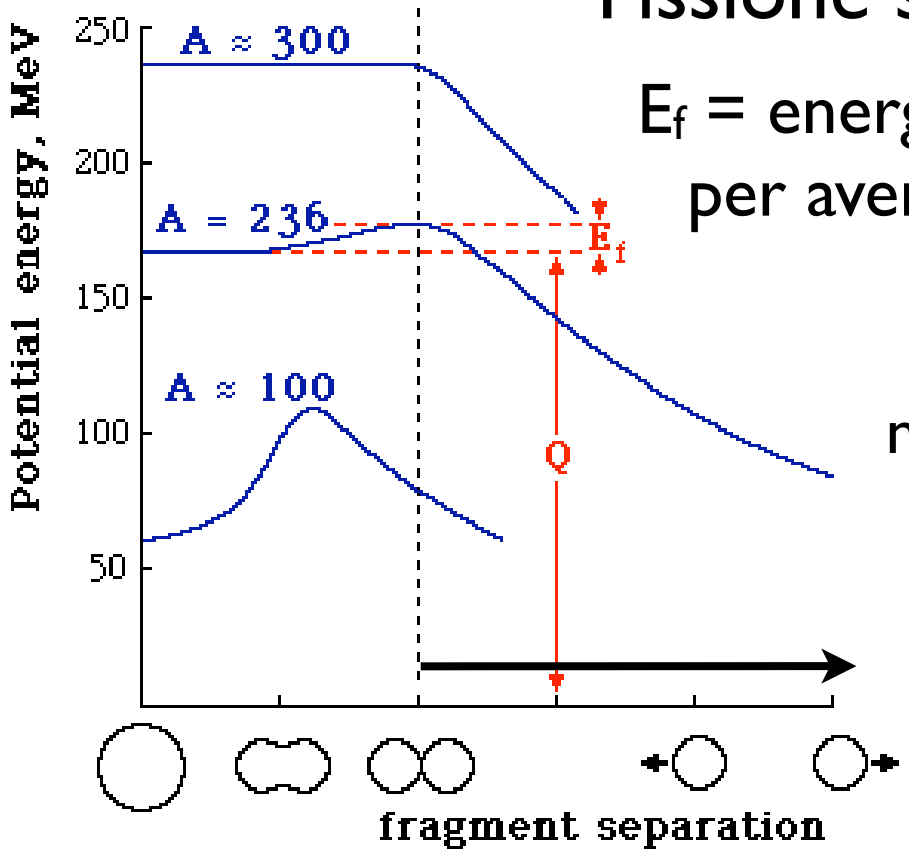
1 MeV = 1.6 $10^{-13}$ Joules = 0.44 $10^{-19}$ KWh




Transizioni a nuclei più legati →energia di massa diventa energia di movimento dei prodotti →calore

Meno legato

# Fissione spontanea? Inibita per A<~220




$E_f$ = energia da fornire al nucleo per avere fissione spontanea

$E_f$ decresce con A

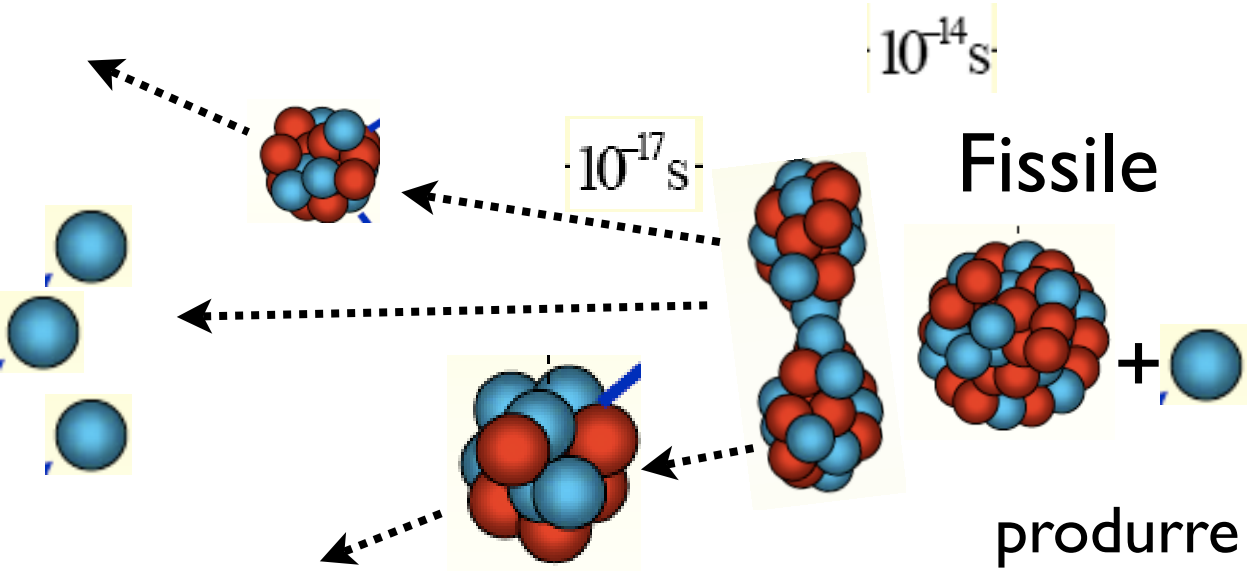
Q = energia di legame di nucleo iniziale = $E_{LEGAME}$ x A

↓

Per A>~ 220, neutrone non respinto destabilizza nucleo

↓

Fissione indotta




Fissile n

Risultato:
PF+~2.5 neutroni
+200MeV (E

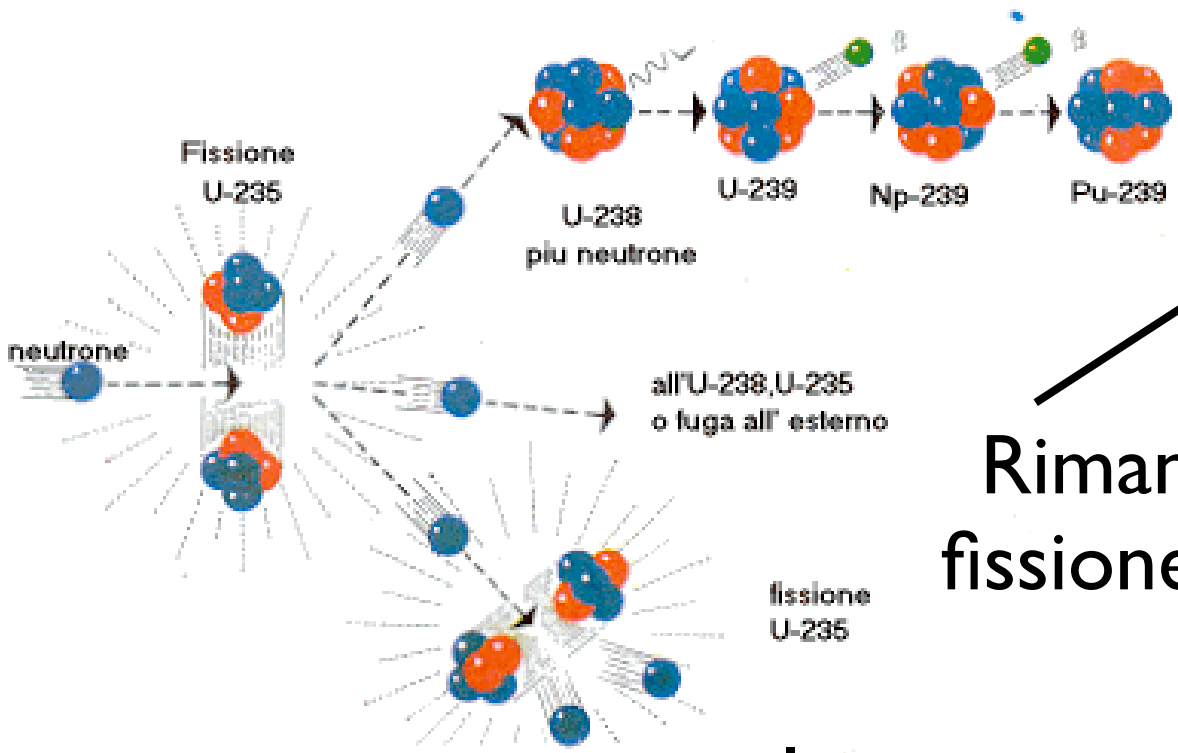
produrre 1GWe richiede ~$10^{20}$ fissioni

# Fissione indotta:come avere energia

n+ Fissile →prodotti fissione +~2.5 neutroni+ Energia

neutroni aggiuntivi sfruttabili per nuove fissioni

→reazione a catena




Fertile = non fissiona, ma produce fissile

Generazione di combustibile?

Richiede N "grande",e/o catture piccole (breeder)

Rimanenti 1.5 catturati (senza fissione) o escono dal rivelatore

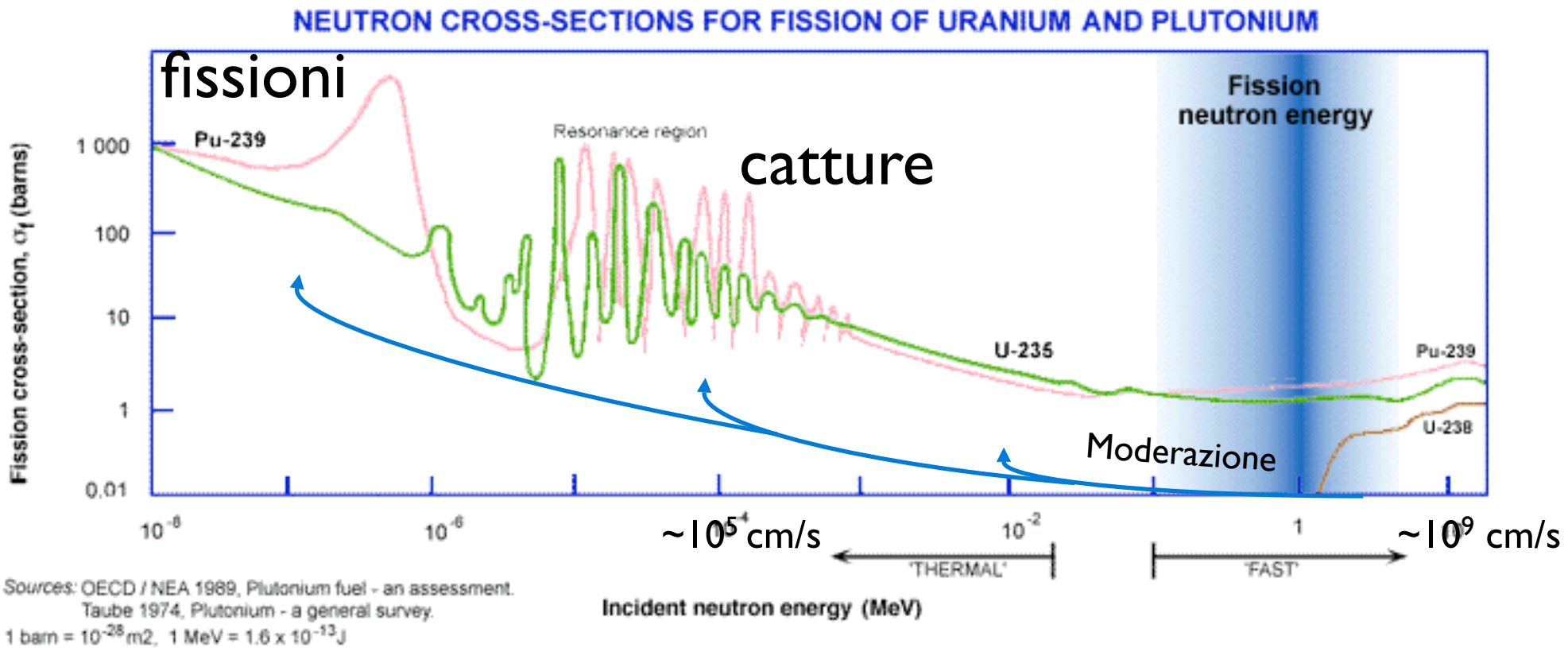
1 neutrone per nuova fissione

Se neutroni prodotti compensano esattamente le perdite: reazione autosostenibile

Reattore critico

# Fissione indotta:probabilità e moderazione

Neutroni di fissione sono veloci, alta probabilita`di interazione per termici.




Reazione a catena : rallentare neutroni (acqua, grafie etc..) + incrementare la % di $U^{235}$ (moderatori leggeri assorbono)

# Quali combustibili per la fissione?

## Proprietà necessarie

- Numero di massa (A) tale che la fissione sia energeticamente possibile (A>62)
- Alta probabilità di fissione da neutroni (A>220)
- Produrre più di un neutrone per fissione per reazione a catena: compensare perdite dovute ad altre interazioni (cattura senza fissione) e fughe
- Vita media sufficientemente lunga

## Presenti in Natura

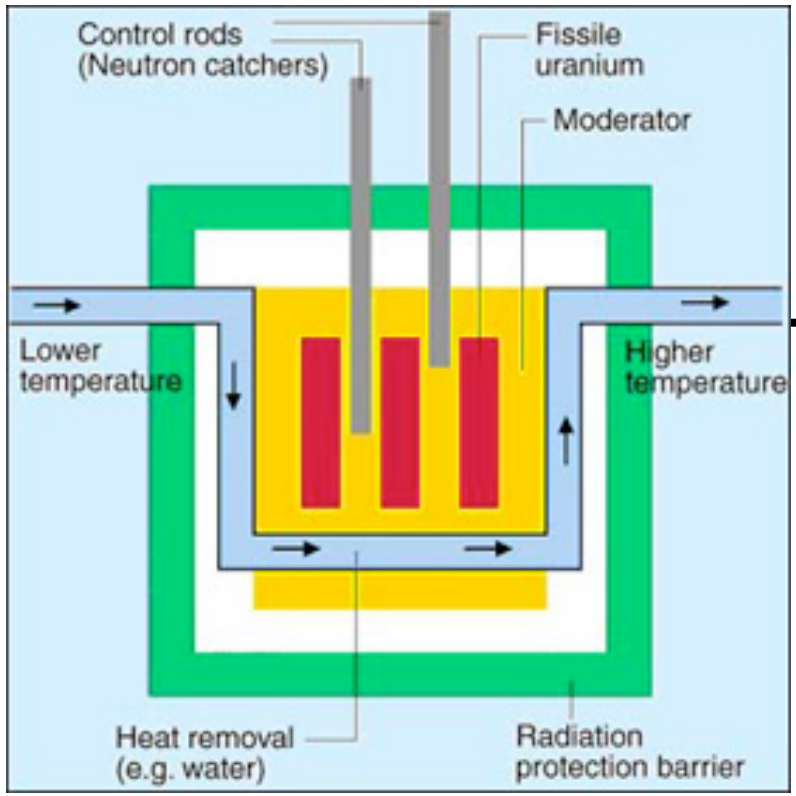
| | Fissile: fa fissione indotta | Fertile: n+X produce fissile |
|---|---|---|
| Isotopi | $_{92}U^{235}$ $_{92}U^{233}$ $_{94}Pu^{239}$ | $_{92}Th^{232}$ $_{94}Pu^{240}$ $_{94}U^{238}$ |
| Fissione | importante | nulla |
| | debole | debole |
| Cattura | parassita | utile |

Solo Isotopo fissile naturale = $_{92}U^{235}$

$_{92}U^{238}$ (99.28%) $_{92}U^{235}$ (0.71%) Fissile

# Come estrarre energia?

(European Nuclear Society)




Efficienza ~ 34%

vapore → Turbo Generatore → Rete elettrica

raffreddamento

# Fissione oggi - Capacità e Locazione

PowerReactorInfoSystem -International Atomic Energy Agency (IAEA)

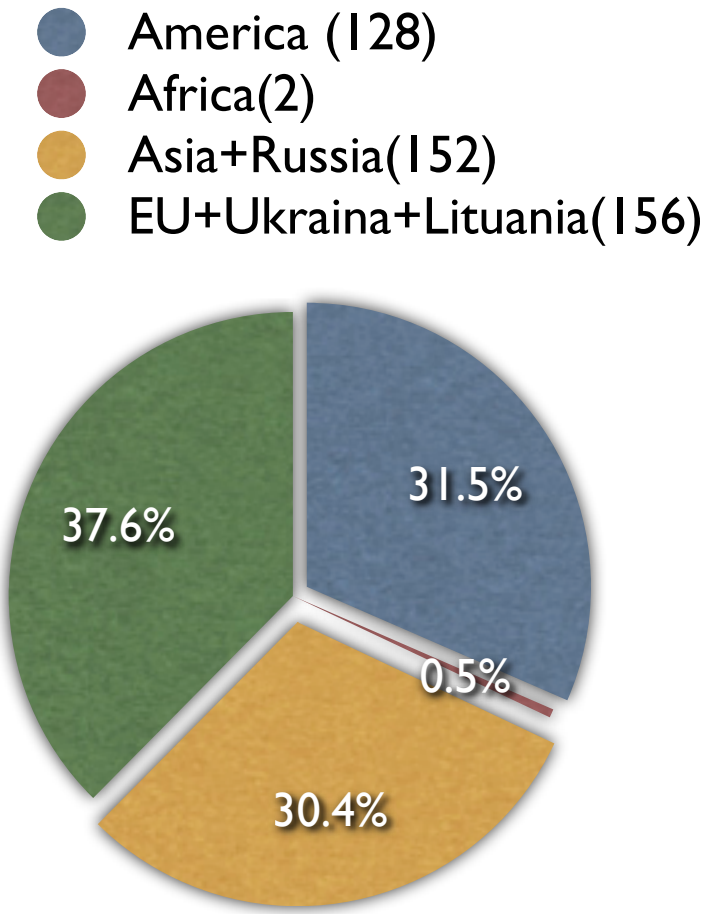
http://www.iaea.org/programmes/a2/

Al 31 Dec 08

438 reattori attivi, 5 chiusi a lungo termine, 44 in costruzione

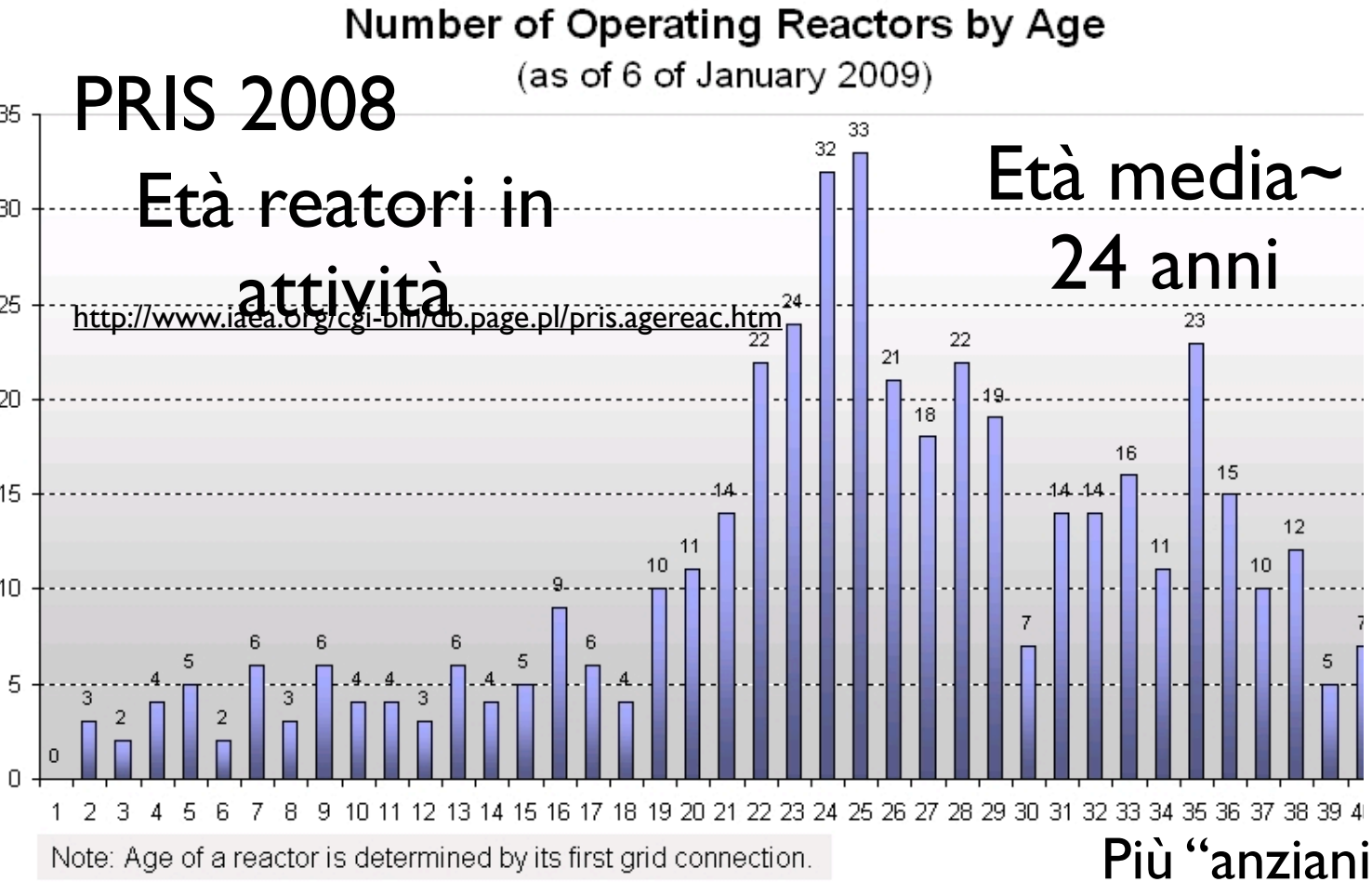
Capacità installata 371.69 GW(e), in costruzione 38 GW(e)

Energia elettrica fornita=2608TWh (WNA 2007)




Francia, Giappone e USA~ 57%

# Fissione oggi: i tempi



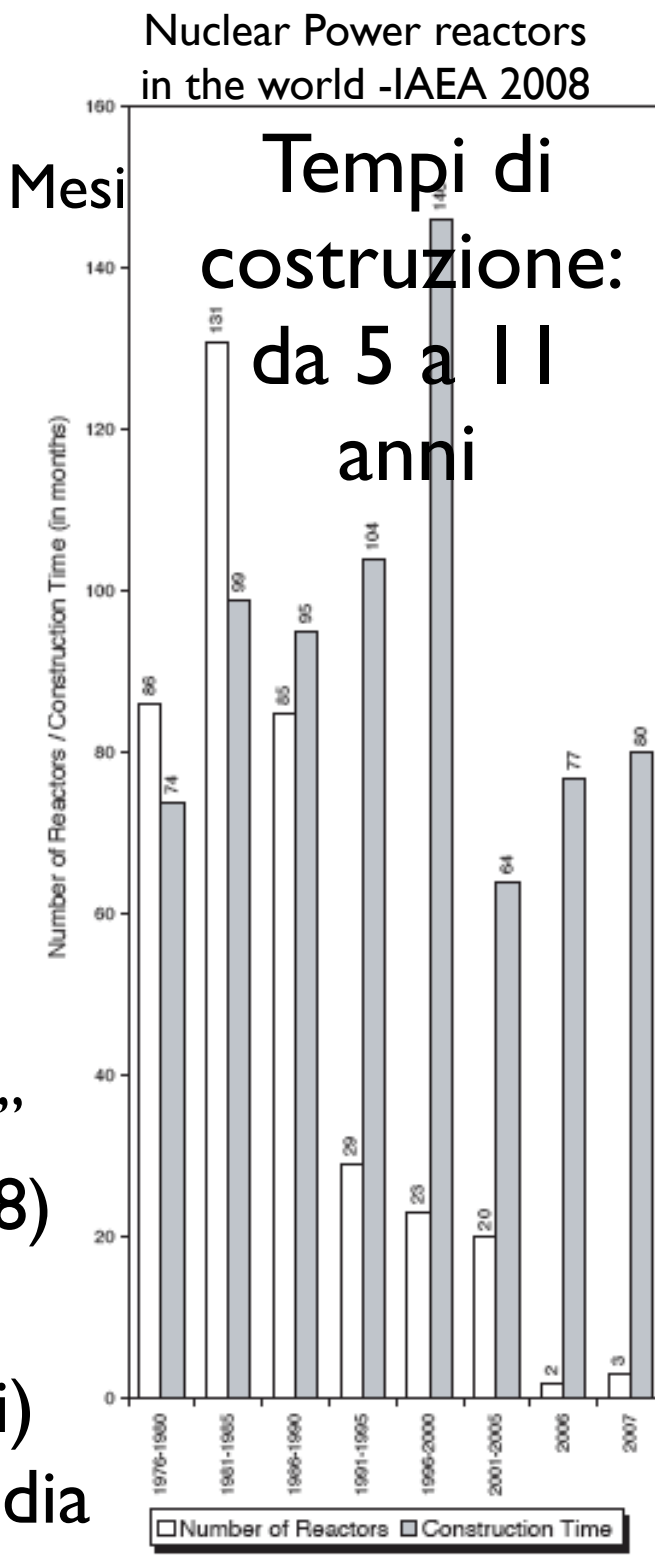

PRIS 2008

Età reatori in attività

http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.agereac.htm

Età media~ 24 anni

Più "anziani"




~4 reattori all'anno connessi dal 1997(0 nel 2008)

(IAEA RDS-2-28)

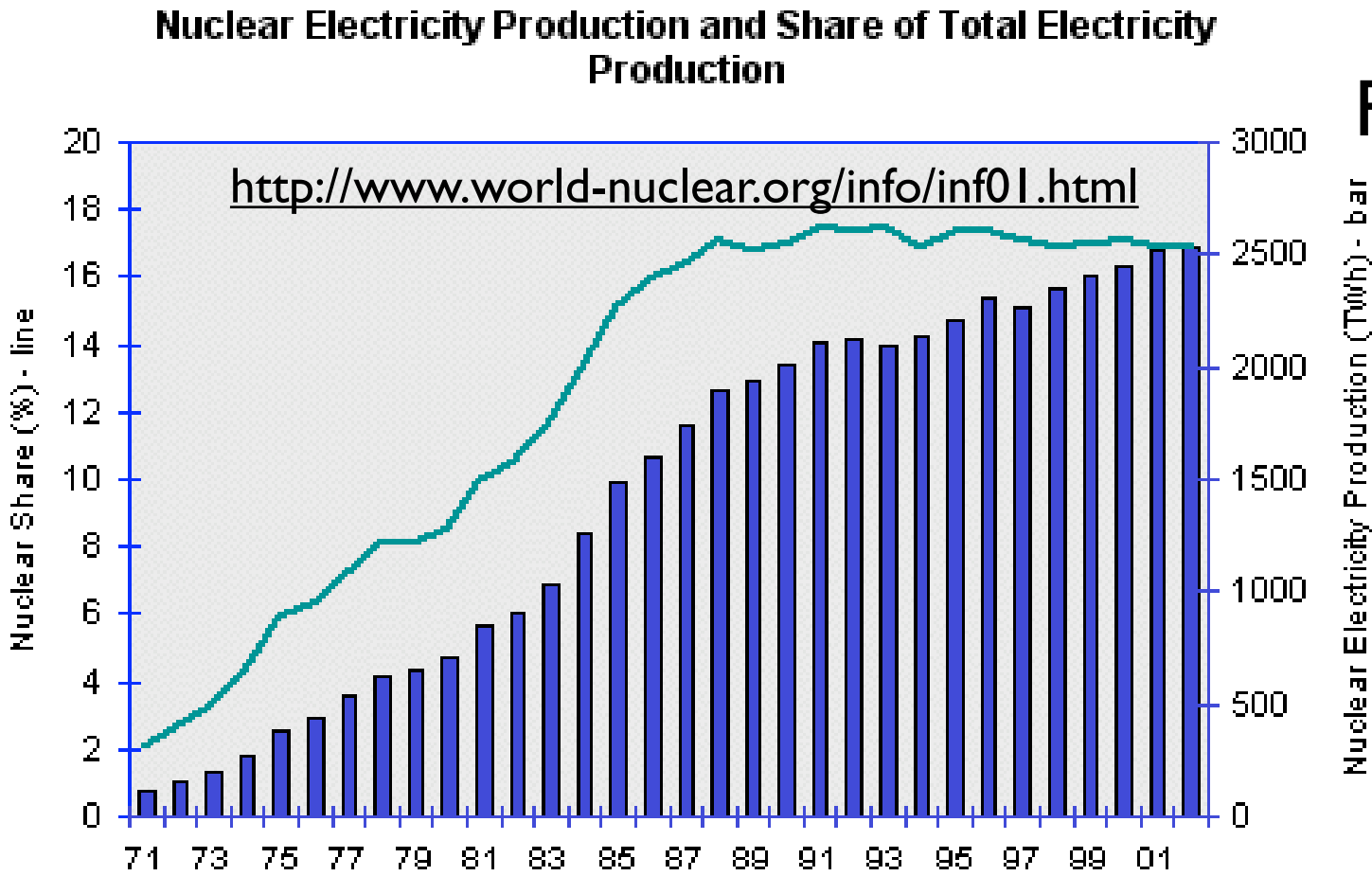
Nei prossimi 10-15 anni (a meno di estensioni)

~100 reattori da sostituire:~6-10 all'anno in media

# eta'

- quanti dei 49 reattori sono in costruzione da lungo tempo
- Perche' le centrali chiudono? Come si determina la vita

# Contributo al mix energetico




Fossili:nucleare~
5(?):1
in produzione
en elettrica

~14% della produzione elettrica
frazione massima 18% (1993)

2006: 2.658 MWh (WNA)

2007:2.608 MWh (WNA)

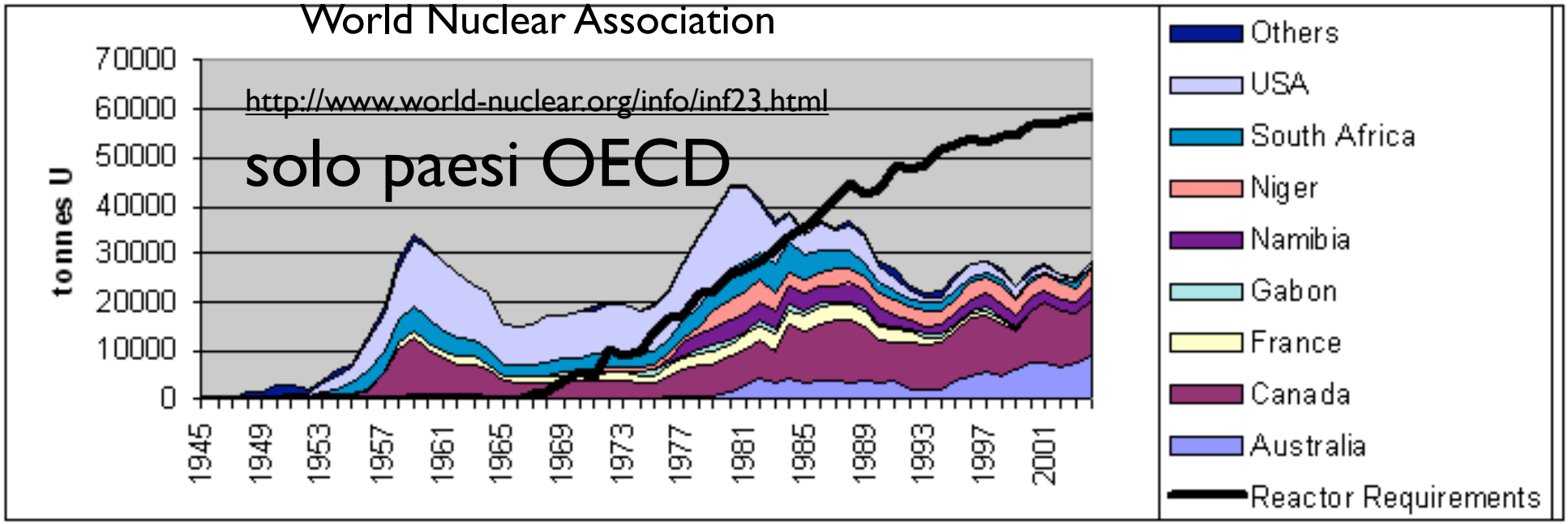
~2% del totale aggregato
del consumo energetico modiale

# Fissione oggi: consumo di uranio

Consumo : circa ~180 tonnellate di Uranio/anno per 1 reattore odierno da 1 GWelettrico (a regime)

2007: Produzione (41729 tU) copre 64% di domanda (64715 tU) di reattori attivi (WNA)

Il 36% uranio già estratto in passato, smantellamento di testate nucleari, ritrattamento/riarricchimento di combustibile (in declino dal 2013) (Nuclear Energy Agency - Uranium 2007)

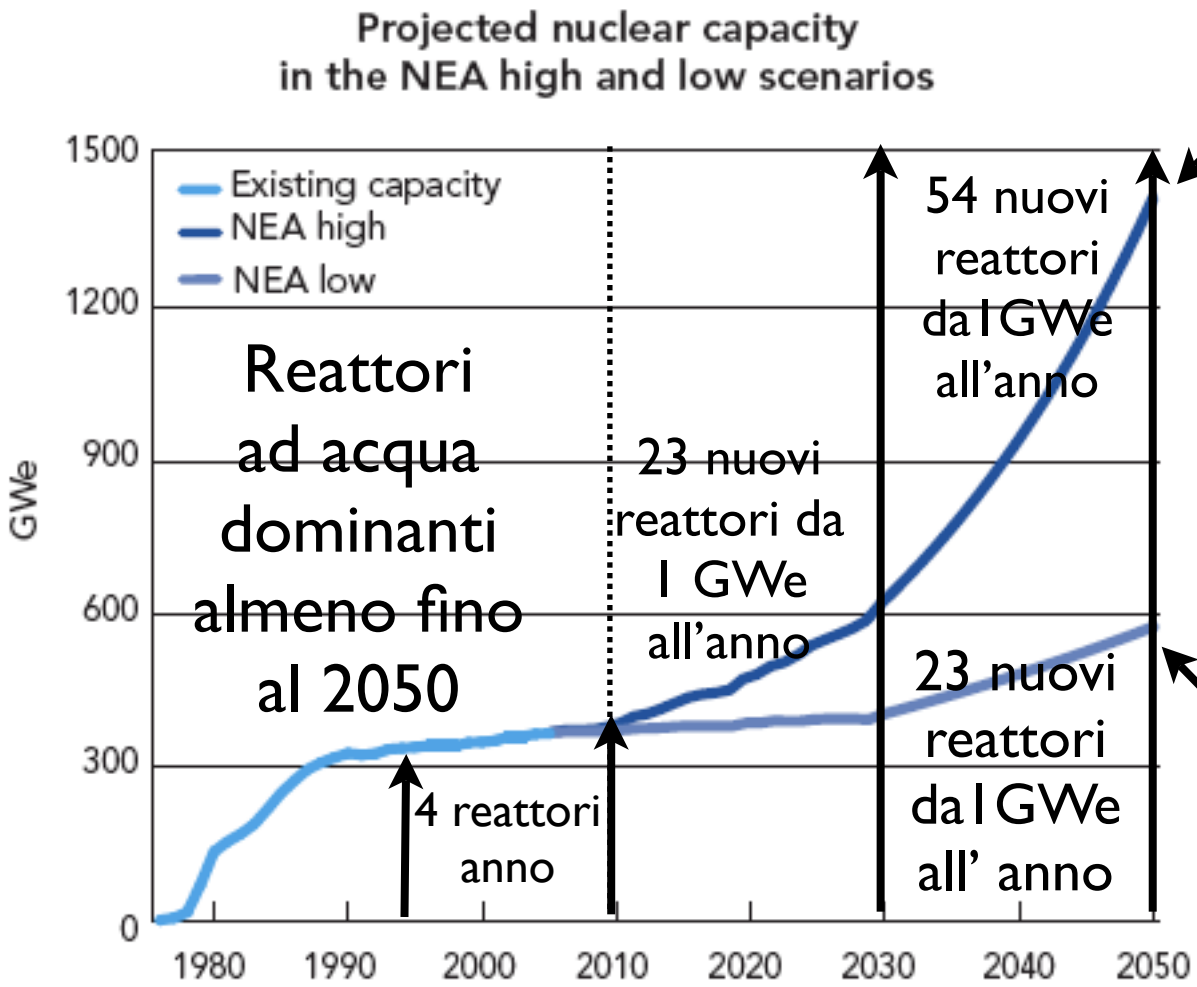


# Prospettive

# Scenari di evoluzione nucleare

(Nuclear Energy Outlook -NEA - 2008)

- Capacità globale installata : crescita da 1.5 a 3.8 nel 2050 (~1.3 a ~1.7 nel 2030)




22% di elettricità mondiale

High: realizzazione di piani di espansione entro il 2030

Quanto uranio e petrolio per espansione?

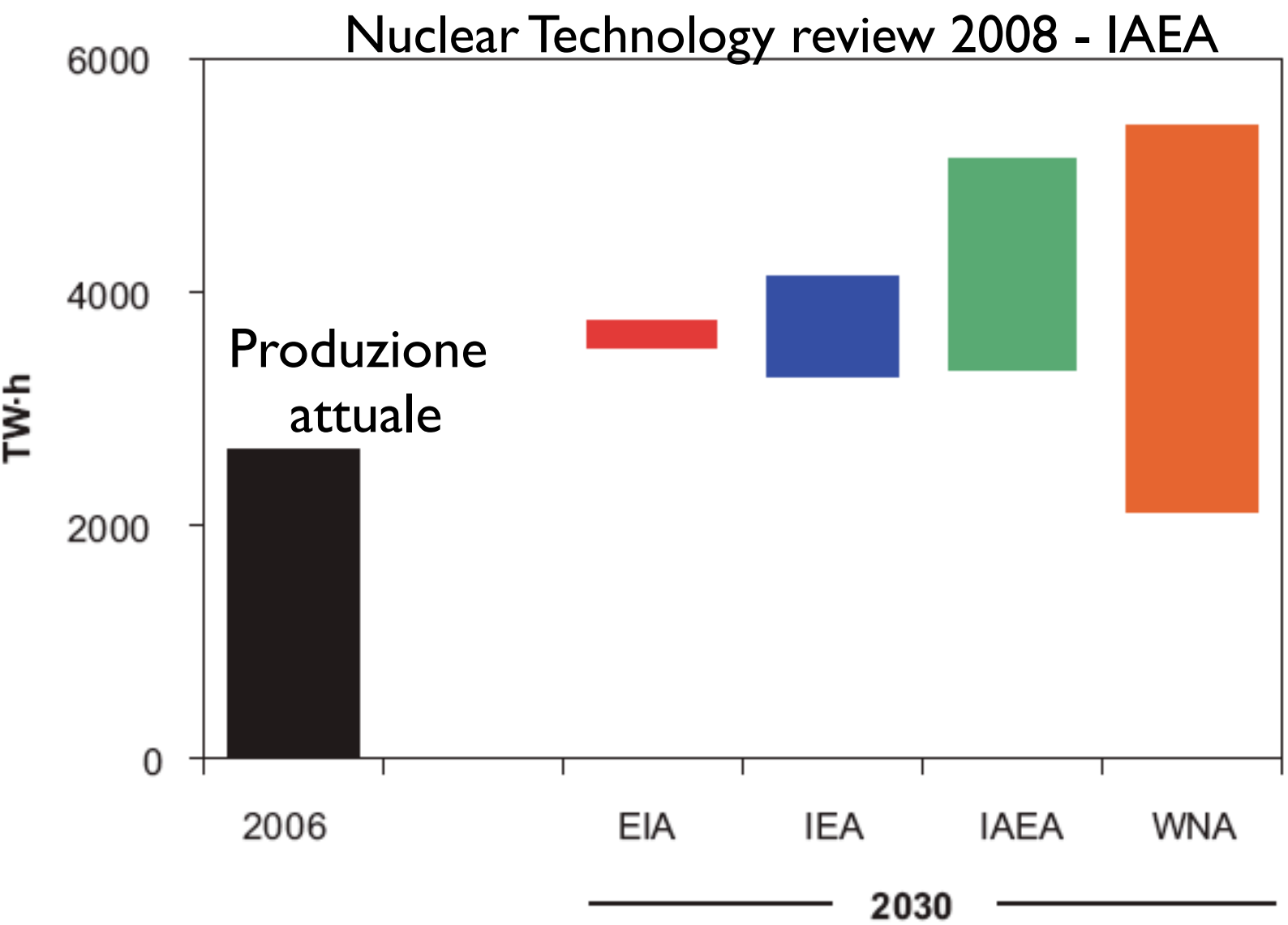
~7% di elettricità mondiale

Low: nuove centrali costruite per coprire solo le chiusure fino al 2030.

Paesi non-nucleari oggi con piani futuri: ~5% della capacità nel 2020

# Scenari di evoluzione nucleare(II)

## Min-Max Proiezioni di Produzione Nucleare di En. elettrica




NEA ~

Richieste di uranio: da 51000 a 130000 tU (WNA) (2030)

*FIG* EIA (Agenzia per l'Energia-USA), IEA (Agenzia Internazionale Energia), IAEA(Agenzia Internazionale Energia Atomica),WNA(World Nuclear Association)

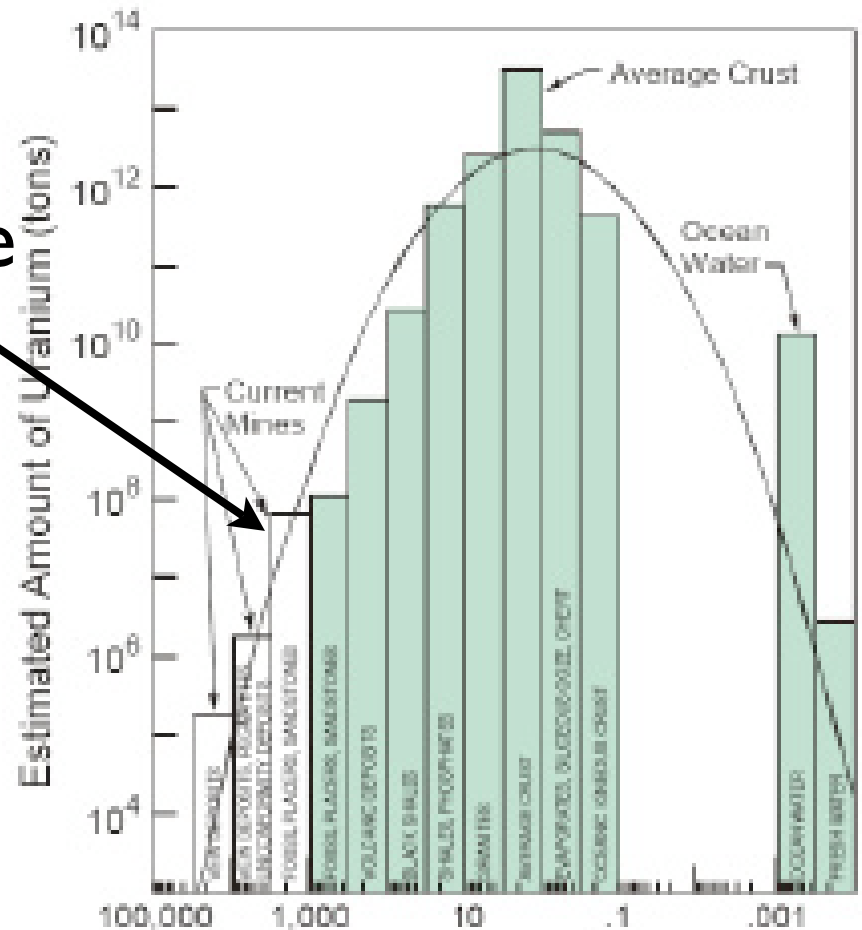
# Uranio:non molto raro...

uranium in the crust: http://www.uic.com.au/nip75.htm (2006 version)

| Uranium content of: | Concentration [ppm U] | kg/ ton |
|---|---|---|
| High-grade-or 2% U | 20 000 ppm U | 20 kg/ton |
| Low -grade-or 0.1% U | 1 000 ppm U | 1 kg/ton |
| Granite | 4 ppm U | 0.004 kg/ton |
| Sedimentary Rock | 2 ppm U | 0.002 kg/ton |
| Earth continental crust (average) | 2.8 ppm U | 0.003 kg/ton |
| Sea water | 0.003 ppm U | 3 mgram/ton |

***Distribution of Uranium in the Earth's Crust***

Attuali miniere



# Disponibilità di Uranio (I)

Categorie

| Note recuperabili (Identified) | | Non scoperte (Undiscovered) | |
|---|---|---|---|
| RAR | Inferred | Prognosticated | Speculative |

Affidabilità di stime decrescente

Tre classi: C<40$ /KgU, 80$/kg< C<130$/Kg, C<130$/Kg

C=costo di produzione

Risorse non convenzionali: assenza di tecniche di recupero efficienti

fosfati ~ 22 Milioni di tonnellate

acqua di mare ~ 4000 Milioni di tonnelate

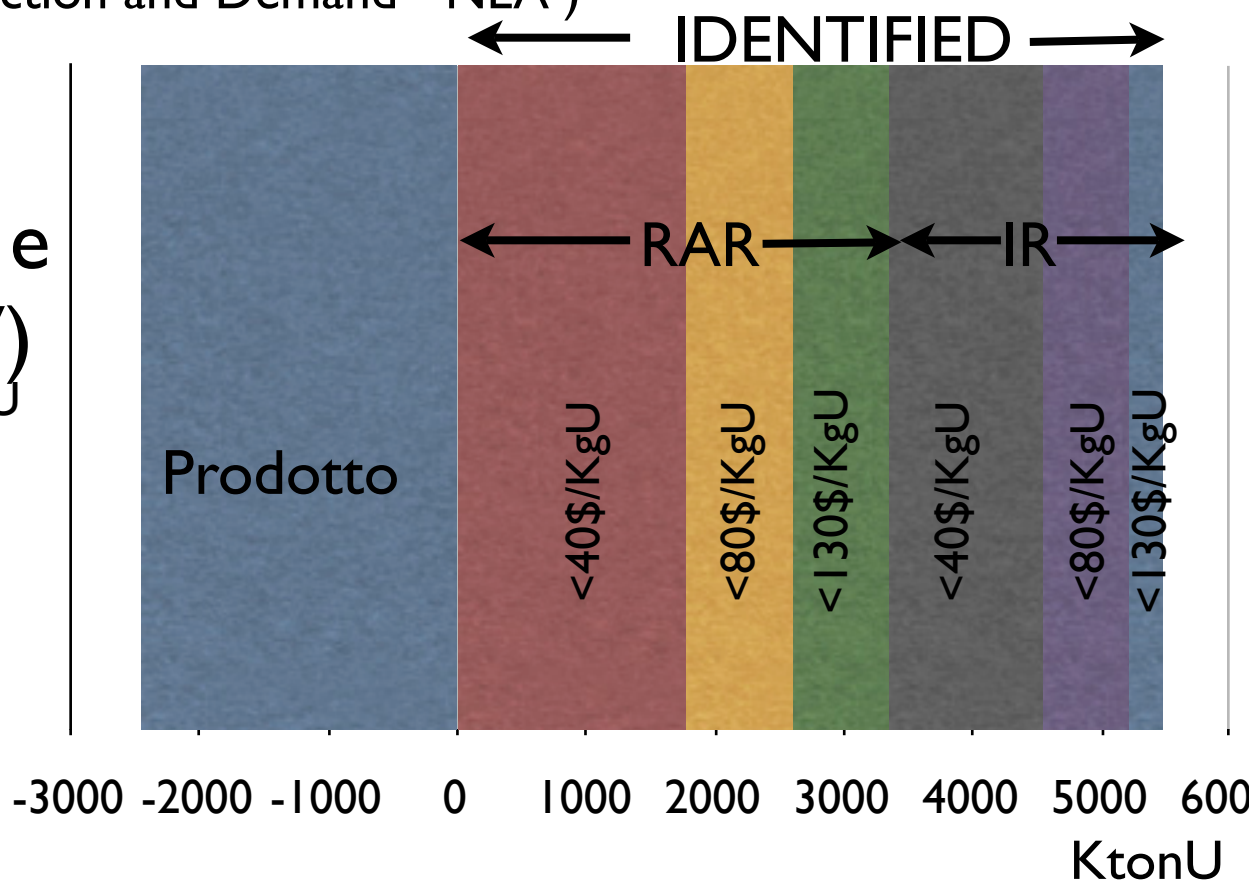
RAR= Reasonably Assured Resources = Risorse "Ragionevolmente Assicurate"

# Disponibilità di uranio (II)

(Uranium 2007: Resources, Production and Demand - NEA )

Con tecnologia presente e consumo costante (2007)

| Risorse | Durata (anni) |
|---|---|
| RAR<40$Kg | ~30 |
| RAR<130$Kg | ~50 |
| IDENTIFIED | ~84 |




tipo di uranio utilizzato attualmente

Crescita del 10% (raddoppio ogni 7 anni): durata risorse note ~18 anni

# Disponibilità di Uranio (III)

Euratom supply Agency Website - Annual report 2008

RICHIESTE DI URANIO PER REATTORI

2008: 21810 tonnellate di Uranio naturale

2017: 17529 tonnellate di Uranio naturale

2027: 14492 tonnellate di Uranio naturale

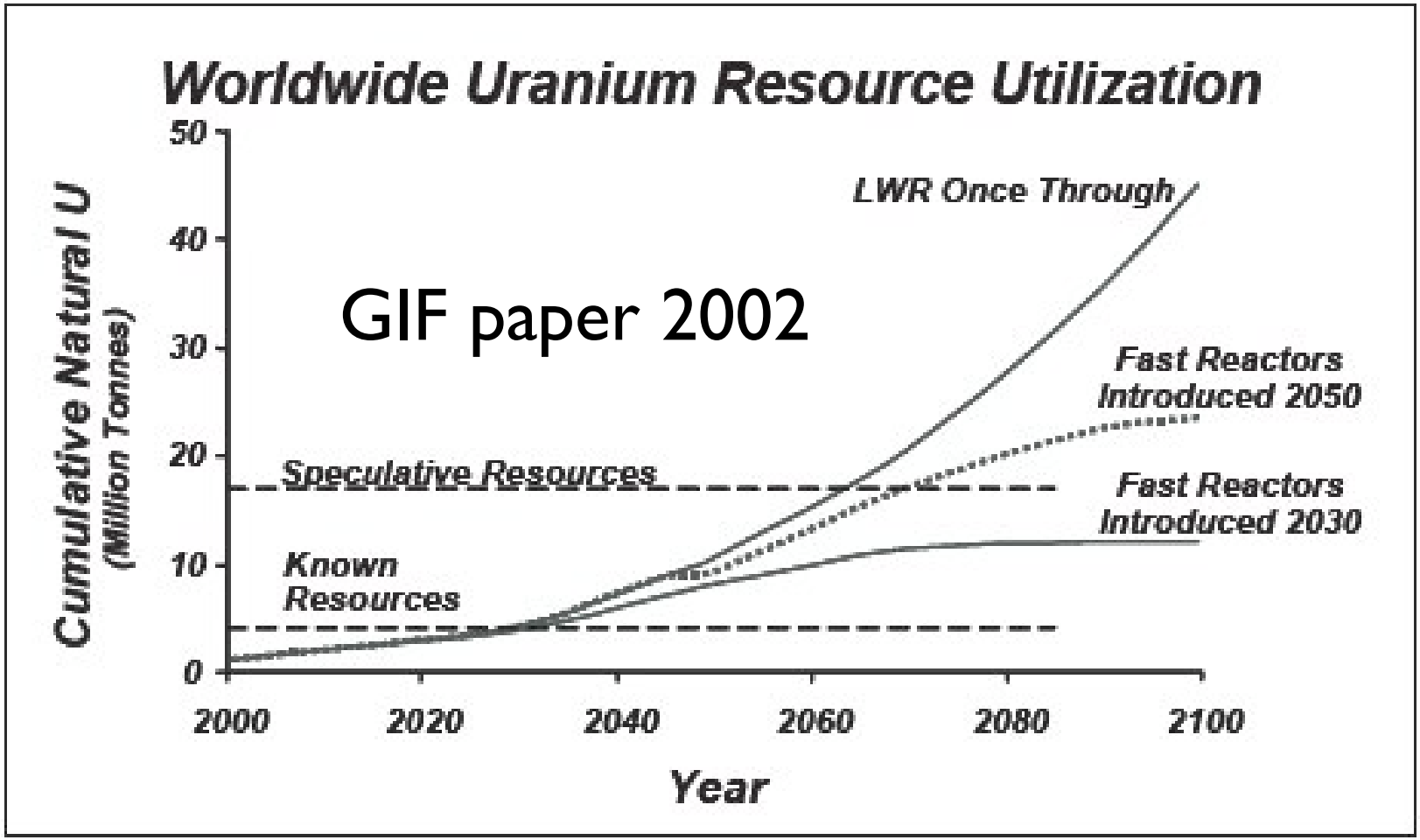
Riduzione tedesca~solo 3000 tonnellate

http://ec.europa.eu/euratom

L'A richiesta EU27 (~150 reattori) diminuisce

# La nuova generazione:GenIV

Nuovi cicli/ reattori richiesti per 2030




GIF paper 2002

Richieste

sostegno per Ricerca e Sviluppo
~ 1 milardo USD ciascuno

Primo status report
GIF2007

# Verso Nuovi reattori?

sviluppo parallelo di 6 nuovi reattori
http://www.gen-4.org/

GIF 2007

- 2 reattori con neutroni"termici" (mi gliore efficienza)
- 4 reattori con neutroni "veloci" con maggiore efficienza e capacità di autofertilizzarsi usando Pu e Torio("breeding")

3 mirano a prototipi di ricerca(no commerciali) ~2018

- Non esistono reattori autofertilizzanti funzionanti documentati come stabili produttori netti di combustibile
- Nessun risultato valutabile (nuovo prototipo funzionante)

Nuovi reattori operativi nel 2030: molto improbabile

Fuori tempo massimo?

# Conclusioni

- La fissione ha un ruolo significativo nella produzione di energia elettrica (~14% ), molto limitato nella produzione aggregata globale (~2% del valore aggregato)
- Scenari attuali favorevoli ad espansione prevedono al massimo1/5 di produzione di energia elettrica globale. Combustibili fossili ancora saldamente dominanti.
- Espansione stessa mostra aspetti problematici
  - scarsità di risorse provate per la tecnologia attuale
  - forte dipendenza della filiera dall'uso di combustibili fossili in via di esaurimento
  - notevoli incertezze su sviluppi tecnologici futuri, forse in arrivo "fuori tempo massimo"

# Back-up -Riserva

# Uranio dal Mare

## (M Dittmar presentazione ad ASPO06 - Cork, Ugo Bardi

**Si può estrarre uranio dall'acqua di mare? - Blog di ASPO - Italia** )

- 3mg/m cubo

- La produzione di uranio minerale nel 2006 è stata di circa 40.000 tonnellate. In confronto, per esempio, estraiamo circa 15 milioni di tonnellate di rame all'anno e quasi due miliardi di tonnellate di minerali di ferro.

- Una centrale nucleare da 1 GW(e) consuma circa 180 tonnellate di uranio all'anno. Per ottenere questo quantitativo, dobbiamo trattare circa 60 miliardi di metri cubi d'acqua= 10000 mcubi/s da filtrare il reno ha portata di 2000m cubi

Seko et al del 2003