



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

## Parte 1 - La questione energetica

## Parte 2 : alcune fonti per produzione di energia elettrica

a) L'energia nucleare come fonte energetica:  
fissione e fusione

b) Conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica:  
i pannelli fotovoltaici

**Gilio Cambi**

INFN Bologna & Dipartimento di Fisica ed Astronomia Università di Bologna

**Pesaro, 21 e 28 Maggio 2014**



# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

## Sommario

- ❖ **La questione energetica: consumi e prospettive**
- ❖ **Energia da reazioni nucleari: fissione e fusione**
- ❖ **La fissione nucleare:**
  - le sue basi fisiche**
  - la tecnologia (impianti nucleari attuali e futuri)**
- ❖ **La fusione nucleare:**
  - le sue basi fisiche**
  - la tecnologia**
  - l'impianto ITER**



# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive

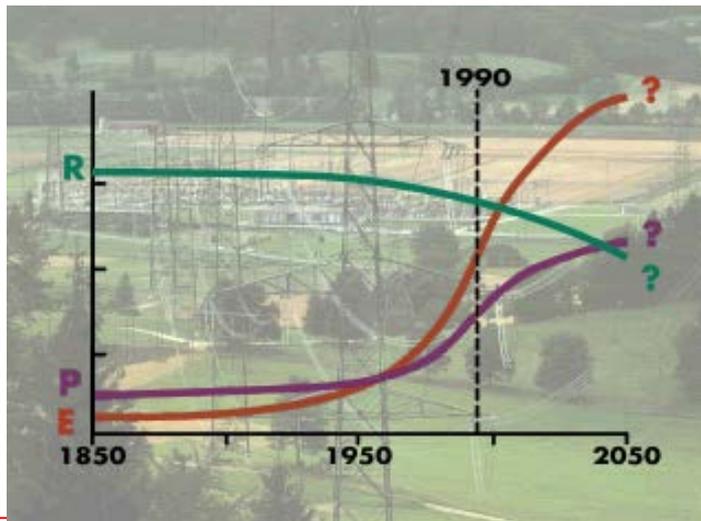


FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

## La Domanda di Energia : Il trend

Lo sviluppo dell'umanità non può farsi senza risorse energetiche, almeno secondo il nostro attuale modello di sviluppo.

La crescita della popolazione mondiale e della domanda di energia porterà, nel prossimo futuro, ad un deficit energetico difficilmente colmabile con le riserve conosciute di combustibili fossili (*riserve non rinnovabili, che tendono a diminuire*).



- R: risorse non rinnovabili
- P: popolazione mondiale
- E: consumo energetico

*Domanda:  
come affrontare e/o risolvere il  
problema ?*



## La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Secondo molte stime (*vedi ad es. [1]*) il consumo di energia a livello mondiale potrebbe raddoppiare o triplicare, rispetto al valore attuale, entro il 2050. Tutte le prospettive economiche mostrano che i bisogni energetici aumenteranno continuamente. L'ampiezza di tali aumenti varia a seconda del tipo di scenario considerato (livello di crescita economica, messa in conto o no dei vincoli ambientali, ecc.) ma comunque dipende da due cause principali:

- 1) l'aumento della popolazione mondiale, che dovrebbe passare dai 6 miliardi del 2000 a 10 miliardi nel 2050;
- 2) l'aumento dei bisogni energetici dei paesi in via di sviluppo

[1] *Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050*, World Energy Council 2007



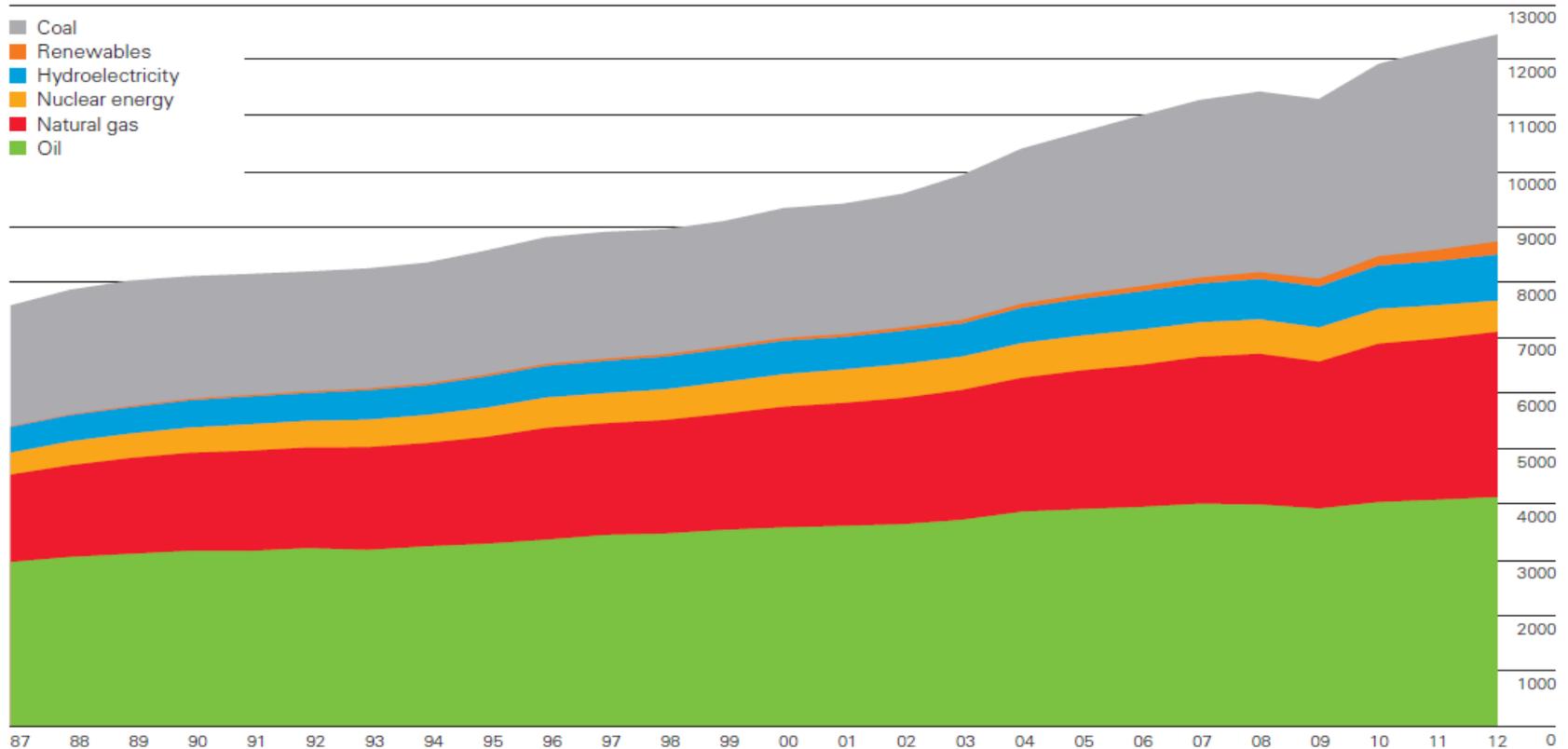
# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Il consumo totale di energia nel mondo è (valutazione anno 2012) di circa 12.5 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep).

World consumption  
Million tonnes oil equivalent





# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

## Consumo di energia nel mondo nel 2012

REGIONE	Consumo totale [Mtep]	Consumo per fonti energetiche					
		Petrolio [Mtep]	Gas [Mtep]	Carbone [Mtep]	Nucleare [Mtep]	Idroelettrico [Mtep]	Rinnovabili [Mtep]
Nord America	<b>2725.4</b>	1016.8	820.0	468.5	206.9	156.3	57.0
Centro e Sud America	<b>665.3</b>	302.2	148.6	28.2	5.0	165.7	15.6
Europa-Eurasia	<b>2928.5</b>	879.8	975.0	516.9	266.9	190.8	99.1
Medio Oriente	<b>761.9</b>	375.8	370.6	9.9	0.3	5.1	0.1
Asia Pacifico	<b>4992.2</b>	1389.4	562.5	2609.1	78.1	289.0	64.1
Africa	<b>403.3</b>	166.5	110.5	97.5	3.2	24.1	1.4
<b>TOTALE</b>	<b>12476.6</b>	<b>4059.1</b>	<b>2905.6</b>	<b>3724.3</b>	<b>599.3</b>	<b>791.5</b>	<b>194.8</b>

*Fonte: BP Statistical Review of World Energy (giugno 2013)*

Si ricorda che 1 Mtep = 1 milione di tep



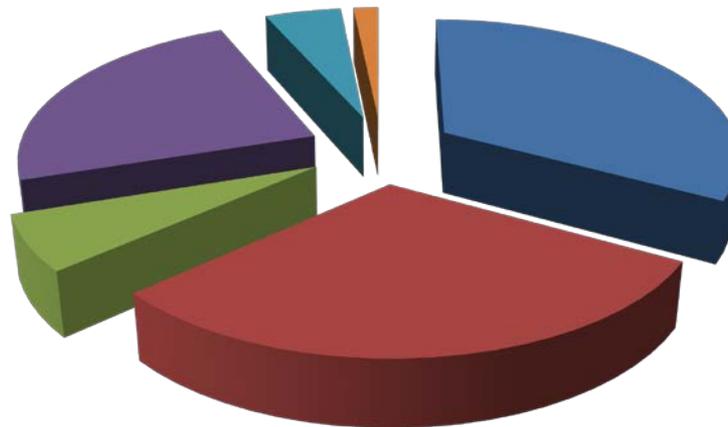
# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

## Consumo di energia nel mondo nel 2012 Fonti utilizzate

■ petrolio      ■ carbone      ■ idroelettrico  
■ gas      ■ nucleare      ■ fonti rinnovabili





# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



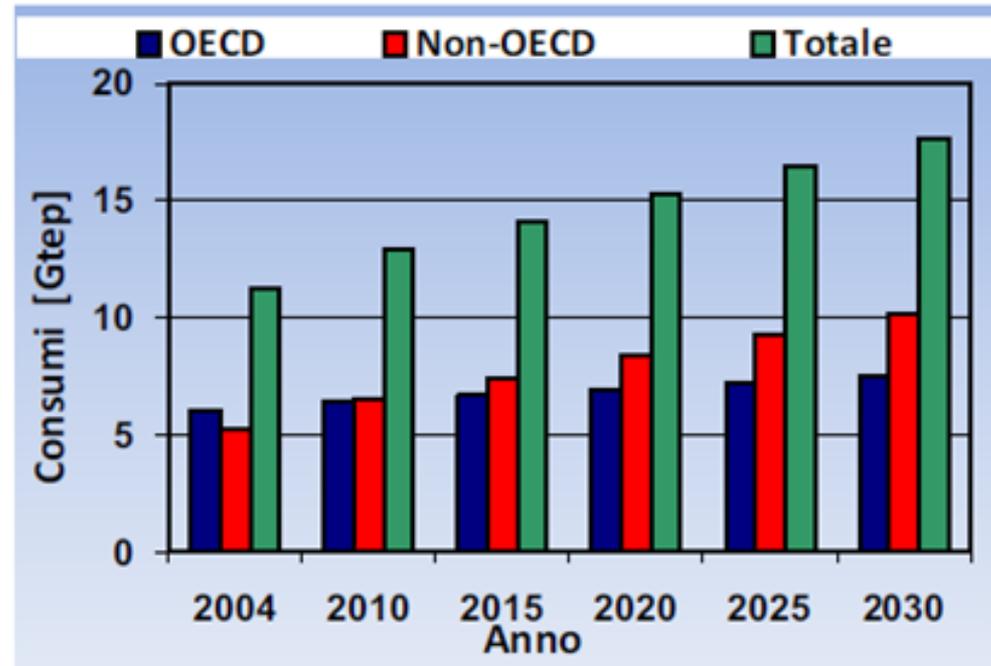
FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Previsioni di crescita dei consumi di energia [in Gtep] nel periodo 2004-2030

(fonte: EIA-International Energy Outlook 2007).

**OECD**

**O**rganization for **E**conomic  
**C**ooperation and **D**evelopment



A seconda dello scenario considerato, il consumo mondiale complessivo di energia sarà compreso tra 14 e 27 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep) nel 2050 e tra 18 e 45 tep nel 2100.



# La questione energetica: Aggiornamento al 2010



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Da: BP Statistical Review of World Energy (giugno 2013)  
([bp.com/statisticalreview](http://bp.com/statisticalreview) )

## Alcune considerazioni riguardanti il 2012 Overview

Il consumo globale di energia è aumentato in misura assai minore nel 2012 rispetto al precedente anno (1.8% contro una media del 2.6% degli ultimi 10 anni), a causa del rallentamento della crescita economica mondiale. La crescita del consumo è imputabile per circa il 90% a Cina ed India. Il consumo nei paesi OECD è diminuito dell'1.2% (con un calo del 2.8% per gli USA). Nei paesi non-OECD vi è stato un aumento del 4.2%, inferiore alla media degli ultimi 10 anni, che è del 5.3%.



## La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

E' quindi evidente che l'aumento dei bisogni energetici porterà all'utilizzo di sorgenti energetiche in grado di fornire una maggiore quantità di energia per unità di massa consumata (cioè a **sorgenti con elevata densità energetica**).

Considerando come livello di riferimento (valore = 1) la densità di energia associata alle sorgenti "fossili", la densità di energia associata alle sorgenti "nucleari" ha un valore (relativo) di 1 milione. Per le sorgenti "rinnovabili" tale valore relativo diviene 1 milionesimo.

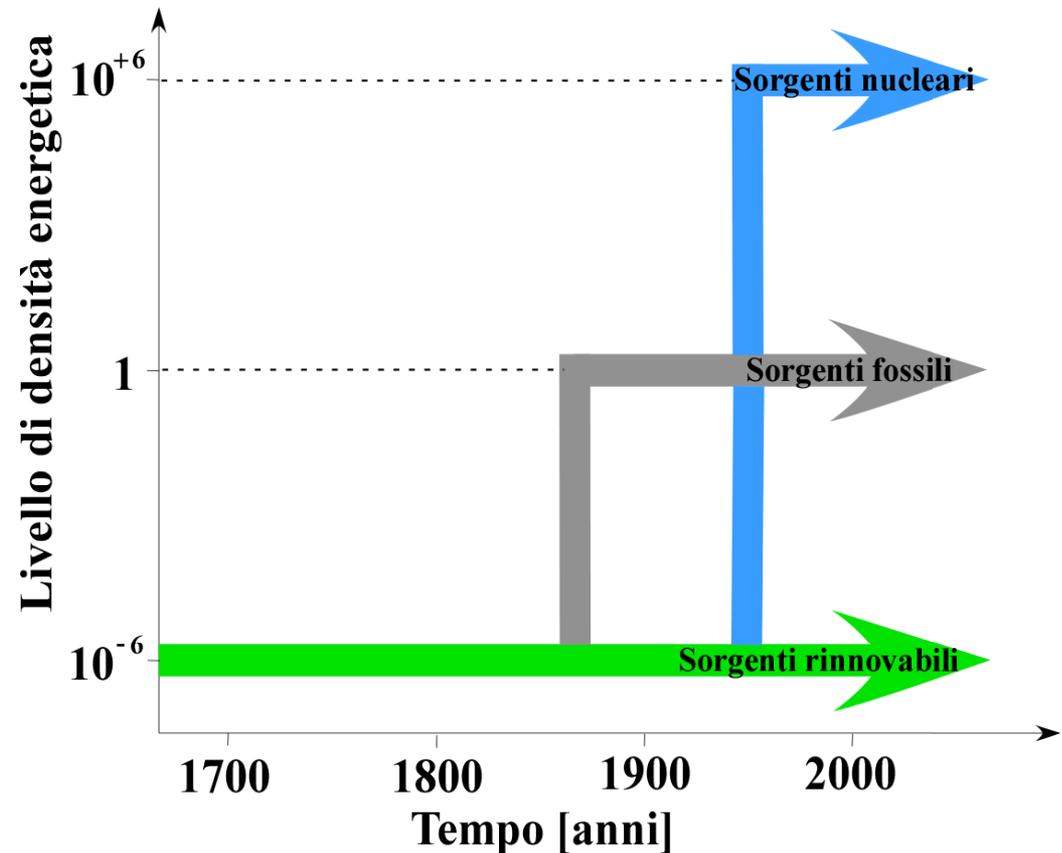


Figura estratta dal sito :

<http://www-drfc.cea.fr/fusion/principes/principes01.htm>



## La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive

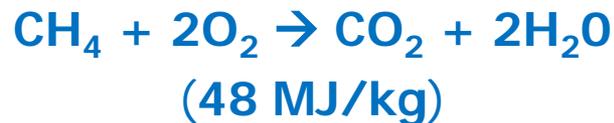


FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

La differenza fondamentale tra sorgenti fossili e sorgenti nucleari è che le **prime** si basano su reazioni chimiche che mettono in gioco fenomeni (ad esempio la combustione) che avvengono a livello degli elettroni degli atomi dei combustibili (petrolio, gas, carbone) mentre le **seconde** si basano su reazioni nucleari che mettono in gioco fenomeni (quali la fissione e la fusione) che avvengono a livello dei nuclei degli atomi dei combustibili (uranio, deuterio, trizio).

### Esempio di reazione chimica

combustione del metano



### Esempio di reazione nucleare

fissione  $\text{U}^{235}$



1 MJ =  $10^6$  J

1 TJ =  $10^{12}$  J



# La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

## Fonti energetiche

In merito al loro utilizzo si distinguono fonti di energia primarie e secondarie

- A. Primarie** : quelle presenti in natura prima di avere subito una qualunque trasformazione. Sono fonti primarie:
- le fonti energetiche esauribili (petrolio grezzo, gas naturale, carbone, materiali fissili)
  - le fonti di energia rinnovabili quali energia solare, eolica, idrica, biomasse, geotermica.
- B. Secondarie** : quelle che derivano, in qualunque modo, da una trasformazione di quelle primarie. Sono fonti secondarie, per esempio
- la benzina (perché deriva dal trattamento del petrolio greggio),
  - il gas di città (che deriva dal trattamento di gas naturali),
  - l'energia elettrica (trasformazione di energia meccanica o chimica).

**La più diffusa forma di energia secondaria è l'energia elettrica:**  
è trasportabile economicamente, trasformabile e misurabile



## La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

La crescita della domanda di elettricità sarà, *verosimilmente*, ancora superiore, percentualmente, alla crescita del consumo globale di energia.

L'esaurimento dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) ed il difficile utilizzo delle fonti di energie rinnovabili (solare, eolica, ecc.) nella produzione di energia centralizzata in grado di sopperire ai bisogni dei paesi a forte densità di popolazione (o a paesi con forti concentrazioni locali della popolazione) rende indispensabile (??) lo sviluppo e l'utilizzo di altre fonti di energia, ad alta densità di energia quale l'energia nucleare (sia da **fissione** che da **fusione**).

Su queste fonti di energia primaria (**fissione e fusione nucleare**) si concentreranno ora i nostri sforzi, con particolare riferimento al loro utilizzo per la *produzione di energia elettrica*



# La produzione di energia da reazioni nucleari

Gli albori della fisica atomica e nucleare

La **fisica atomica** è nata con la scoperta dell'elettrone (J.J.Thomson 1897).

A distanza di poco più di 30 anni, con la scoperta del neutrone (Chadwick 1932) nasce la **fisica nucleare**.

- “Grossolanamente” l'atomo (raggio atomico  $R_a \approx 10^{-10}$  m) è composto da **un nucleo centrale** con carica positiva  $+Ze$  delle dimensioni di  $R_N \approx 10^{-15}$  m “attorno” al quale si muovono  $Z$  **elettroni e** (aventi carica negativa  $\approx 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb).
- $R_N \approx R_0 A^{1/3}$  dove  $R_0$  è una costante di valore  $1.2 \times 10^{-15}$  m

**Z** è il **numero atomico** e rappresenta il numero totale di **protoni p** (aventi carica positiva  $\approx 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb) presenti nel nucleo.

Nel nucleo ci sono anche **N=A-Z** particelle neutre chiamate **neutroni n**.

**A** è il **numero di massa** di un atomo.



# La produzione di energia da reazioni nucleari

## Basi fisiche - introduzione



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Nel nucleo è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo. Infatti, neutroni e protoni hanno masse molto più grandi (circa 1800 volte) di quella degli elettroni. La massa del protone è quasi uguale a quella del neutrone.

Se si trascura la piccolissima differenza esistente tra le masse del protone e del neutrone, si può concludere che la massa di un nucleo vale  $Z + N$  volte la massa del protone. La quantità  $Z + N$  s'indica con **A** e si chiama numero di massa.

Come riferimento per le masse atomiche (e nucleari) si è scelto un particolare isotopo del carbonio molto abbondante in natura: il carbonio-12. Nel suo nucleo sono presenti 6 protoni e 6 neutroni; il suo numero di massa  $A$  vale dunque 12.

Come **unità di misura della massa atomica (u.m.a.)** si è scelta la dodicesima parte della massa del carbonio-12.

$$1 \text{ u.m.a. (anche indicata con u)} = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Dalla relazione di Einstein  $E=mc^2$  si ottiene anche **1 u = 931.5 MeV**

**Si ricorda che 1 eV = 1.6 x 10<sup>-19</sup> J. (1 MeV = 10<sup>6</sup> eV)**

Essa è l'energia acquistata da un elettrone **e** sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 Volt.



# La produzione di energia da reazioni nucleari

(massa e carica di e, p, n)



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Electron  
○

$$m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ u}$$

$$e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

Proton

$$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1836.15 m_e = 1.00728 \text{ u}$$

$$e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV}$$

Neutron

$$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1838.68 m_e = 1.00867 \text{ u}$$

$$\text{charge} = 0 \quad m_n c^2 = 939.566 \text{ MeV}$$

L'unità di massa atomica è definita come 1/12 della massa atomica del carbonio



# La produzione di energia da reazioni nucleari

Un po' di terminologia atomica/nucleare

Tutti gli atomi che hanno **uguale Z**, anche se differiscono per il numero di neutroni, danno origine allo **stesso elemento chimico**, hanno in pratica le medesime proprietà e occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi. Per questo motivo atomi con lo stesso numero atomico **Z** sono detti **isotopi** (*appunto perché occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi*).

*Ad esempio: l'elemento chimico idrogeno H ha tre isotopi:*

*H-1, indicato anche  $^1\text{H}$  (nucleo con un p) (Numero di massa  $A=1$ )*

*H-2, indicato anche  $^2\text{H}$  (nucleo con un p e un n) (chiamato **Deuterio D**) (Numero di massa  $A=2$ )*

*H-3, indicato anche  $^3\text{H}$  (nucleo con un p e due n) (chiamato **Tritio T**) (Numero di massa  $A=3$ )*

I primi due sono isotopi **naturali** (cioè esistono in natura) e sono **stabili**.

Il terzo è **artificiale** (prodotto mediante reazioni nucleari) ed è **instabile** o **radioattivo**.

Nuclei con lo stesso valore di  $A$  e *diverso valore di Z* sono chiamati **isobari**.

Con il termine **nuclide** si indica una singola specie nucleare caratterizzata da un numero atomico  $Z$  e da un numero di massa  $A$ .

I **nuclidi** possono essere definiti come nuclei aventi lo stesso numero di neutroni e lo stesso numero di protoni; ciò li distingue dagli **isotopi**, che hanno invece fissato il solo numero di protoni, e quindi hanno un numero di neutroni variabile.



# La produzione di energia da reazioni nucleari

Forza di interazione coulombiana tra nucleoni

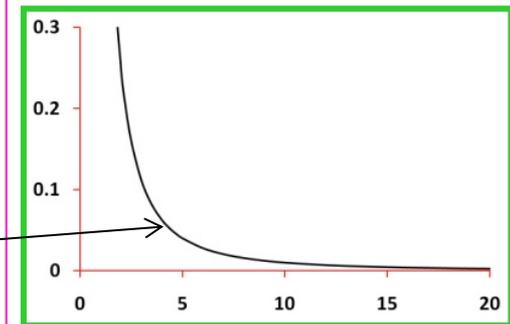
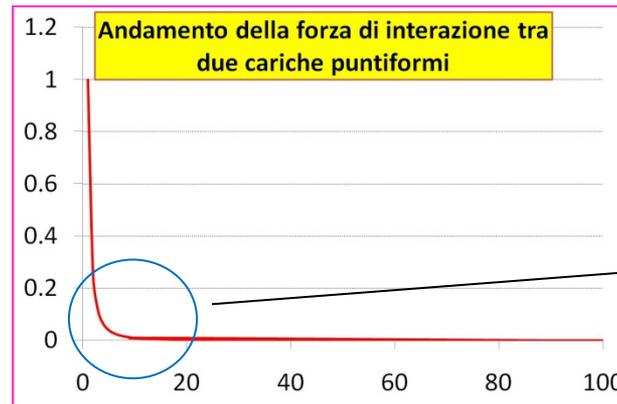
L'esistenza stessa del nucleo atomico ci pone un problema inesplicabile sulla base delle conoscenze della Fisica Classica dei primi del novecento: **come è possibile la stabilità dei nuclei** (più particelle positive che si trovano a distanze molto piccole, dell'ordine di  $10^{-15}$  m ) ?

Sappiamo infatti che tra due cariche elettriche  $Q_1$  e  $Q_2$ , supposte puntiformi, che si trovano ad una distanza  $d$  si esercita una forza (di Coulomb) che vale, in modulo:

$$F = K \frac{|Q_1| |Q_2|}{d^2} \quad (\text{dove } K \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2} \text{ è la costante di Coulomb}).$$

Per distanze molto piccole, quale quella tra due nucleoni del nucleo di un atomo, tale forza diviene molto elevata !

Inoltre, per cariche dello stesso segno essa è repulsiva, cioè le cariche interagenti tendono ad allontanarsi !



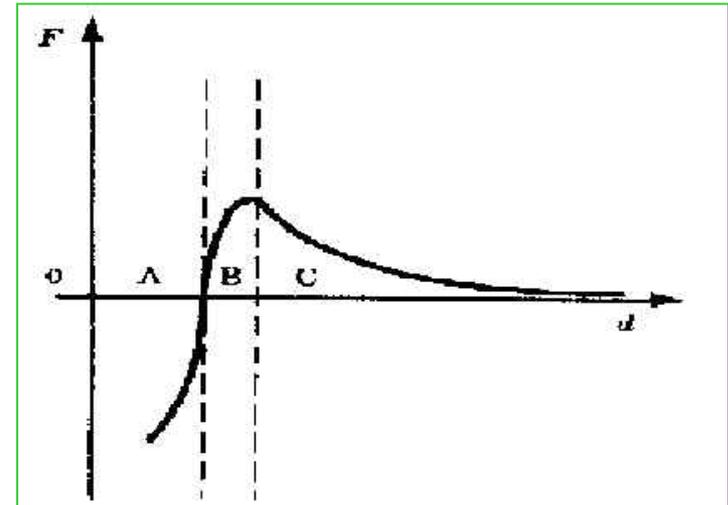


# La produzione di energia da reazioni nucleari

Forze nucleari (a breve raggio d'azione)

La Fisica Nucleare indica la via di una soluzione per spiegare la stabilità dei nuclei atomici: l'esistenza di altre forze (attrattive) tra nucleoni (anche con carica dello stesso segno) chiamate **forze nucleari**

Esse debbono essere intensissime, per poter tenere insieme, a distanza molto piccola, molti protoni con la stessa carica; inoltre debbono essere praticamente inefficienti al di fuori del nucleo atomico stesso, altrimenti della loro esistenza ci saremmo accorti ben prima, così come accadde con le forze gravitazionali ed elettromagnetiche. Saranno attive a distanze  $d < 10^{-15}$  m, ma inefficaci a distanze maggiori.



- Nel tratto C ( $d > 10^{-14}$  m) agiscono solo le forze (repulsive) coulombiane.
- Nel tratto B ( $10^{-15}$  m  $< d < 10^{-14}$  m) si manifestano le forze nucleari che si oppongono a quelle elettriche.
- Nel tratto A ( $d < 10^{-15}$  m) prevalgono le forze nucleari (attrattive).



# La produzione di energia da reazioni nucleari

Forze nucleari (a breve raggio d'azione)



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

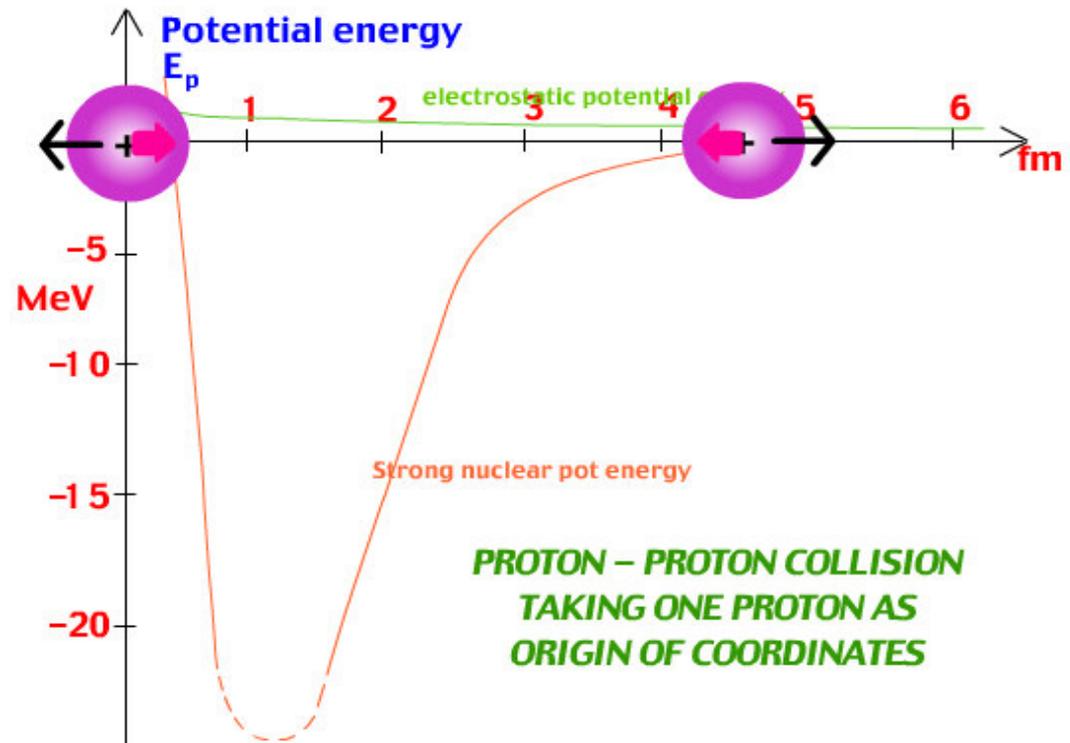
Le forze nucleari sono indipendenti dalla carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni.

Il raggio d'azione delle forze nucleari è valutato dell'ordine del fermi (pari a  $10^{-15}$  m)

Ad una distanza pari a circa 4 fermi le forze nucleari eguagliano le forze elettrostatiche.

A distanze superiori del fermi, le forze nucleari sono attrattive, a valori inferiori sono fortemente repulsive.

## Esempio di interazioni tra due protoni di un nucleo





# La produzione di energia da reazioni nucleari

## Energia di legame

Si osserva che, per qualunque nucleo con più nucleoni (cioè tutti, tranne l'isotopo più leggero dell'idrogeno  $^1\text{H}$ ) *si ha un difetto di massa  $\Delta m = \Sigma m - M$ , cioè:*  
la massa  $M$  del nucleo è minore della somma  $\Sigma m$  delle masse di tutti i nucleoni in esso contenuti.

Poiché massa  $\leftrightarrow$  energia secondo la relazione di Einstein, al difetto di massa  $\Delta m$  corrisponde una energia che è chiamata energia di legame (Binding Energy BE):

$$\Delta E = BE = \Sigma(mc^2) - Mc^2$$

*Esempio per una particella  $\alpha$   
(nucleo di He : 2 p + 2 n)*

	protons	2 x 1.00728 u		Alpha particle
	neutrons	2 x 1.00866 u		
Mass of parts		4.03188 u	Mass of alpha	4.00153 u

1 u = 1.66054 x 10<sup>-27</sup> kg = 931.494 MeV/c<sup>2</sup>

Essa rappresenta l'energia che dovremmo spendere per dividere il nucleo in tutti i suoi nucleoni: dipende dal numero di massa A.

Altra grandezza molto importante è l'energia di legame per nucleone (energia media per separare un nucleone dal nucleo)  $\Delta E_n = BE_n = \Delta E/A$

Mediamente (esclusi i nuclei più leggeri) si ha che l'energia di legame vale circa 8-9 MeV per nucleone: energia che occorre fornire per estrarre un nucleone dal nucleo.

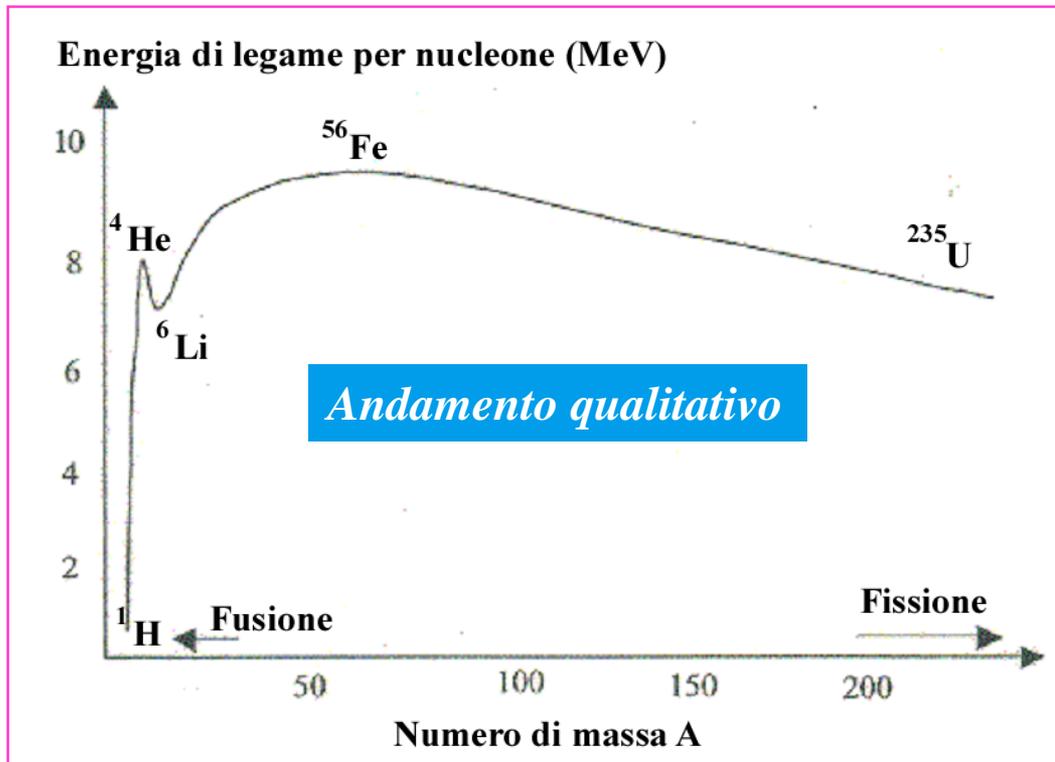


# La produzione di energia da reazioni nucleari

## Energia di legame per nucleone



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI



I nuclei più leggeri e quelli più pesanti hanno valori di  $\Delta E_n$  più bassi e richiedono una minore quantità di energia per poterli separare

I nuclei di massa intermedia hanno i valori di  $\Delta E_n$  più elevati e richiedono una elevata quantità di energia per poterli separare

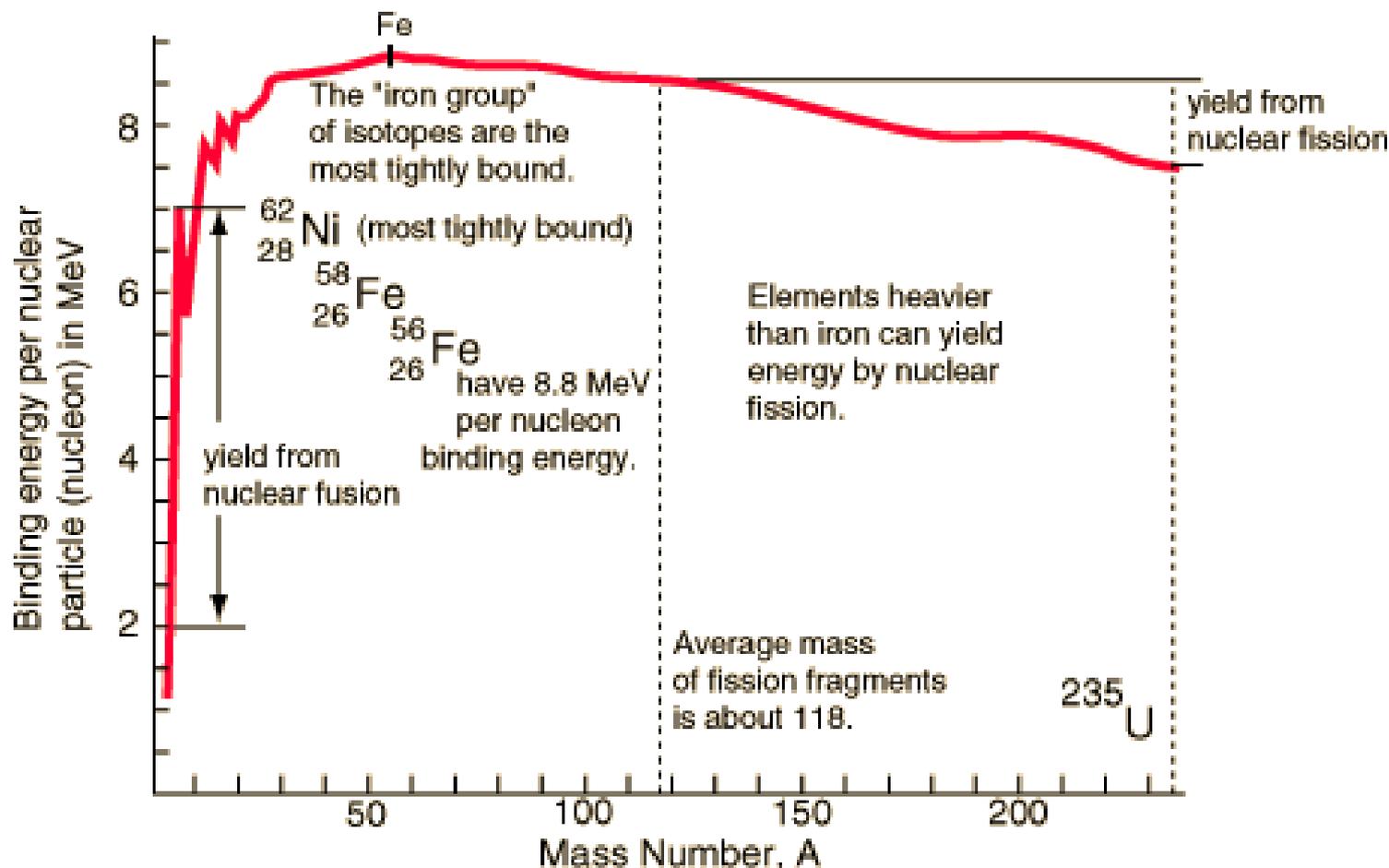


I nucleoni tendono a privilegiare situazioni in cui si trovano ad avere elevati  $\Delta E_n$



# La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia di legame per nucleone





# La produzione di energia da reazioni nucleari

## Le reazioni nucleari



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Col termine **reazione nucleare** si intende un evento nel quale nucleoni vengono cambiati all'interno di un nucleo o scambiati tra nuclei, (come gli elettroni che venivano scambiati tra atomi in una reazione chimica).
- *Anche la radioattività è una forma di reazione nucleare: **decadimento alfa, beta o gamma**.*
- La **radioattività** (*emissione spontanea di particelle e/o radiazioni dal nucleo di un atomo*) è un fenomeno **naturale**. Fu scoperta nel 1896 da **Henri Bequerel** che notò che una lastra fotografica s'anneriva se posta nelle vicinanze di un minerale contenente composti dell'uranio. (*Esiste anche una radioattività indotta o artificiale*)
- **Solitamente** però si considerano reazioni nucleari quelle indotte colpendo un nucleo con un'altra particella.

Le reazioni nucleari possono essere:

1. **esotermiche** (la massa diminuisce e l'energia cinetica aumenta), **DI PARTICOLARE INTERESSE**
2. **endotermiche** (la massa aumenta e l'energia cinetica diminuisce)



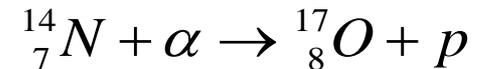
# La produzione di energia da reazioni nucleari

## Le reazioni nucleari



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

### Alcuni esempi di reazioni nucleari



Si ricorda che  $\alpha = {}^4_2\text{He}$  e che  $p = {}^1_1\text{H}$

Due reazioni nucleari rivestono una particolare importanza :

- La reazione di **Fissione** (ad esempio:  $\text{U}^{235} + n \rightarrow \text{Rb}^{93} + \text{Cs}^{140} + 2n$ )
- La reazione di **Fusione** (ad esempio:  $\text{H}^2 + \text{H}^3 \rightarrow \text{He}^4 + n$ )

Entrambe sono accompagnate da elevata produzione di energia termica (utilizzabile per la produzione di energia elettrica che esula dalla disponibilità di combustibili fossili).



# La produzione di energia da reazioni nucleari

## Sezione d'urto nucleare



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

Un parametro caratteristico di ogni reazione nucleare è la **sezione d'urto  $\sigma$** : essa fornisce una indicazione della probabilità che ha tale reazione di avvenire.

La  $\sigma$  rappresenta l'area con cui una particella incidente (“proiettile”) vede il nucleo bersaglio. Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area.

La  $\sigma$  si misura in  $\text{cm}^2$  o barns b, dove  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ .

**La sezione d'urto per una certa reazione nucleare dipende:**

- dal tipo di particella incidente,
- dal nuclide bersaglio,
- dalla energia della particella incidente.

Consideriamo il caso di un neutrone come particella incidente. In generale, la  $\sigma$  decresce con l'aumentare della energia del neutrone. Tuttavia per certi valori di energia la  $\sigma$  può presentare un valore molto elevato. Si dice allora che la sezione d'urto ha una risonanza per quel valor di energia.

