



## **24.05 Energia I**

problema energetico, struttura atomica,  
fissione nucleare

## **06.06 Energia II**

fusione nucleare, centrali nucleari, energie  
rinnovabili

## **07.06 Clima**

sistema climatico, osservazione, modellazione  
e tendenze



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

## LAUREA MAGISTRALE IN FISICA DEL SISTEMA TERRA

HOME

IL CORSO

ISCRIVERSI

STUDIARE

OPPORTUNITÀ

BACHECA

CONTATTI

IT

EN

**COVID-19** - Proseguire in sicurezza le attività - [Le misure dell'Alma Mater](#)







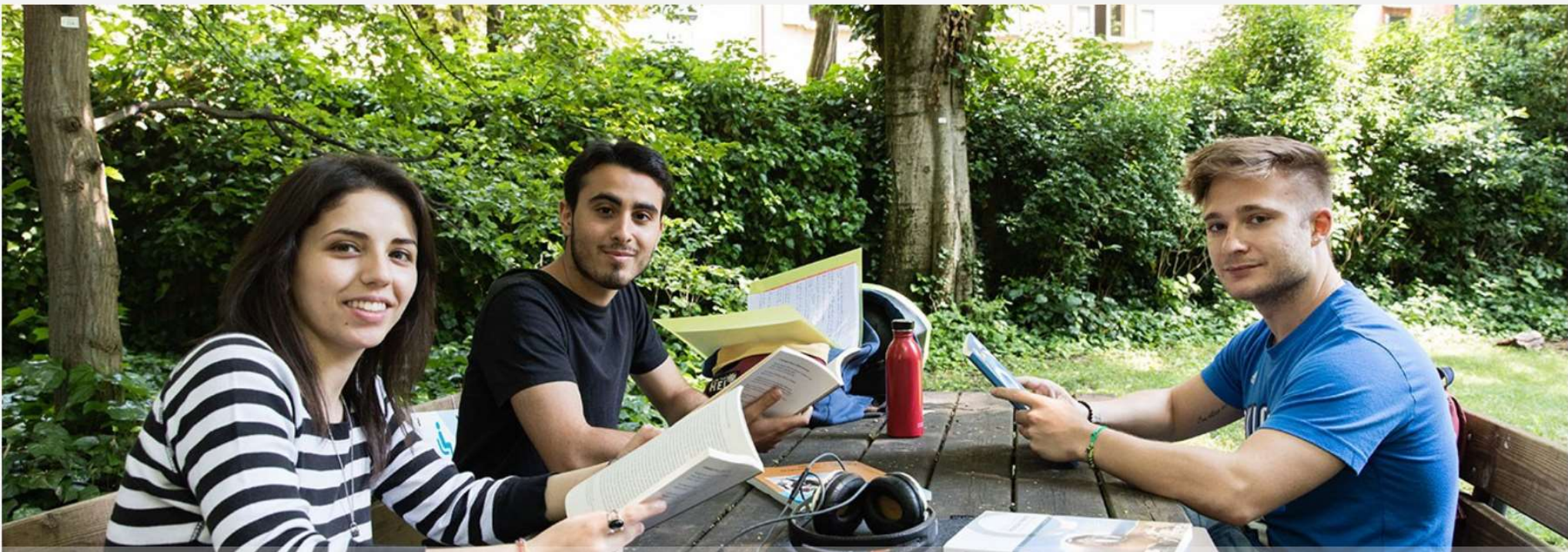
ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

## SECOND CYCLE DEGREE/TWO YEAR MASTER IN SCIENCE OF CLIMATE

[HOME](#) [PROGRAMME](#) [ADMISSION](#) [STUDYING](#) [OPPORTUNITIES](#) [NOTICE BOARD](#) [CONTACTS](#)

[IT](#) [EN](#)

**COVID-19** - Resuming activities safely - [The measures adopted by the University of Bologna](#)





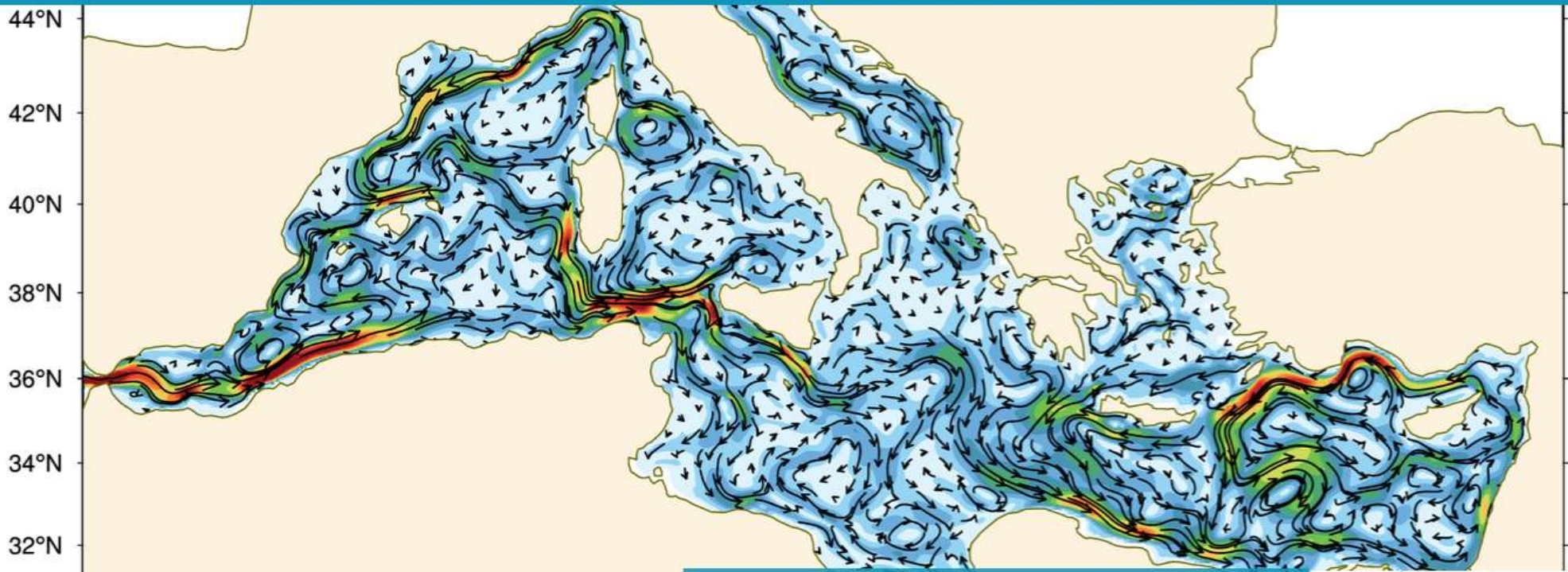


ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

PHD PROGRAMME  
FUTURE EARTH, CLIMATE CHANGE AND SOCIETAL  
CHALLENGES

IT EN

- HOME
  - THE PROGRAM ▾
  - STAFF/LECTURERS
  - COURSES/TRAINING
  - PARTNERS/SPONSORS
  - HOW TO APPLY
  - CONTACTS
- STUDENTS ENROLLED ▾



The Mediterranean Sea ocean currents





FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

# Il problema energetico

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



## unità di misura: energia

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ J}/1 \text{ s}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u.m.a.} = 1.49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$1 \text{ tep} = 41.87 \text{ GJ}$$

$$1 \text{ MTOE} = 4.1868 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 1055.055 \text{ J}$$

## prefissi SI

$$\text{Kilo} = 10^3$$

$$\text{pico} = 10^{-12}$$

$$\text{Mega} = 10^6$$

$$\text{nano} = 10^{-9}$$

$$\text{Giga} = 10^9$$

$$\text{micro} = 10^{-6}$$

$$\text{Tera} = 10^{12}$$

$$1 \text{ Fermi (F)} = 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$



**definizione del problema;**

**le fonti energetiche;**

**i consumi attuali;**

**scenari futuri;**



**definizione del problema;**

**le fonti energetiche;**

**i consumi attuali;**

**scenari futuri;**



# definizione del problema



secondo i nostri attuali modello di **sviluppo**, l'evoluzione dell'umanità non può fare a meno di adeguate **risorse energetiche**;

la crescita della **popolazione** globale implica una crescita della richiesta di energia a **costi sostenibili**;

la crescente diffusione di **tecnologia** e sviluppo industriale implica anch'essa aumento di **fabbisogno** energetico;

l'attuale sistema globale di approvvigionamento energetico ha due limiti: 1) ha un impatto non trascurabile sull'**ambiente** (sistema terrestre), 2) i combustibili si **rinnovano lentamente** ( $10^4$ - $10^6$  anni);

coinvolge aspetti **economici, politici, sociali**;

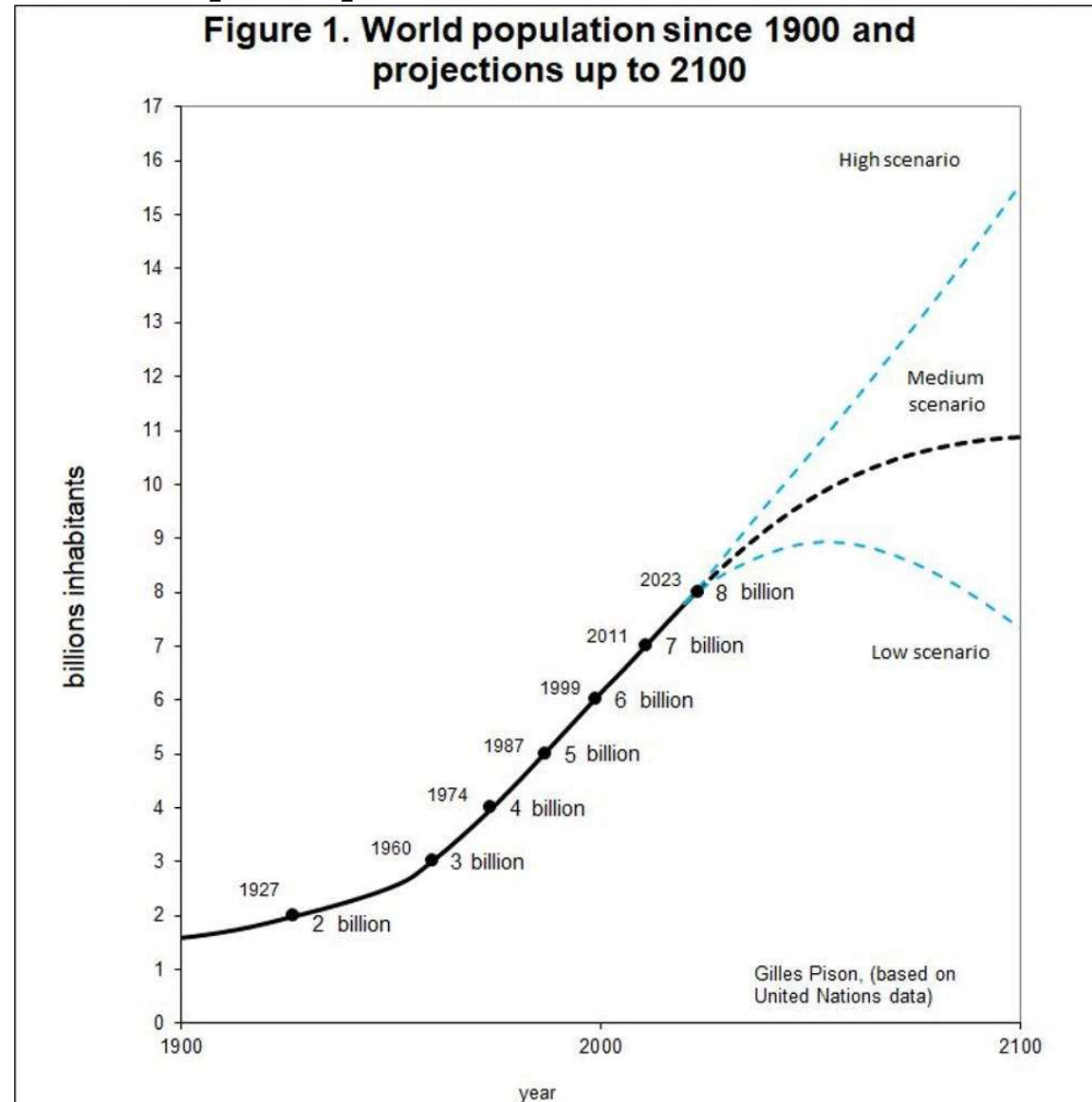
va affrontato a **diverse scale**, con approccio **multidisciplinare**.

# definizione del problema



tutte le prospettive economiche mostrano che i bisogni energetici **aumenteranno** continuamente. L'ampiezza di tali aumenti varia a seconda del tipo di **scenario** considerato comunque dipende da due cause principali:

1) l'aumento della popolazione mondiale, che dovrebbe passare dai 7.9 miliardi attuali a ~~11~~ 10.9.7 miliardi nel 2050



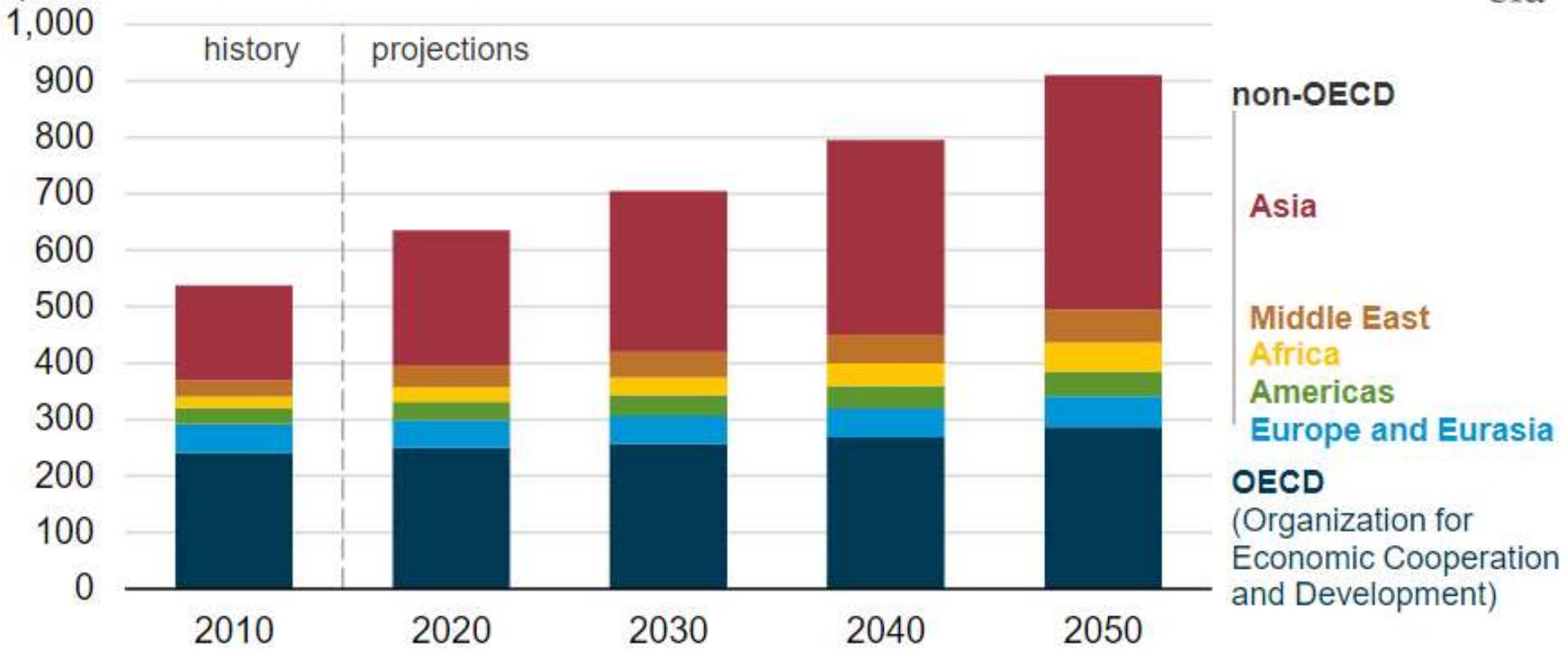
# definizione del problema



2) l'aumento dei bisogni energetici dei paesi in via di sviluppo

### Global primary energy consumption by region (2010-2050)

quadrillion British thermal units



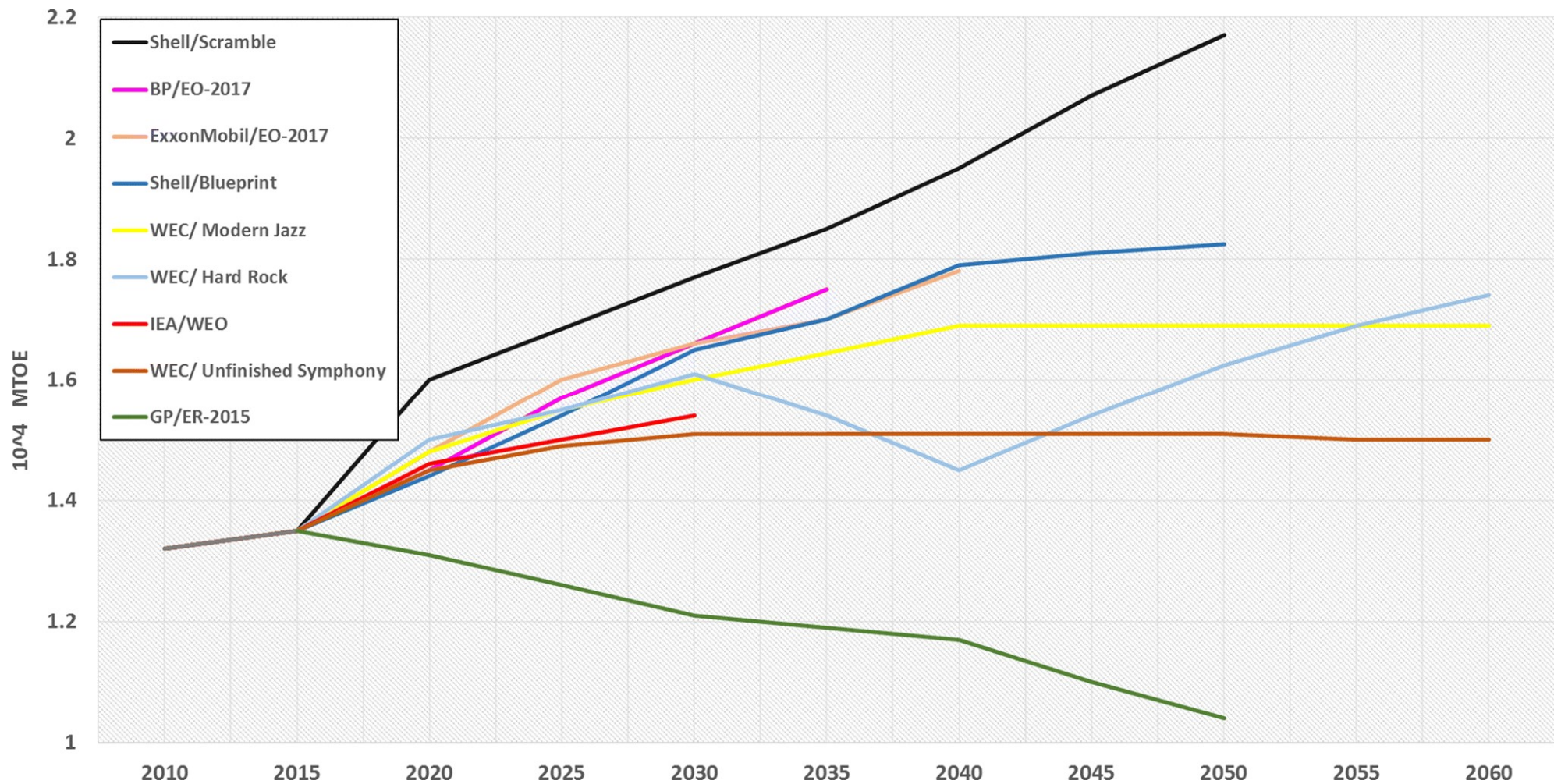
Source: U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2019* Reference case



# definizione del problema

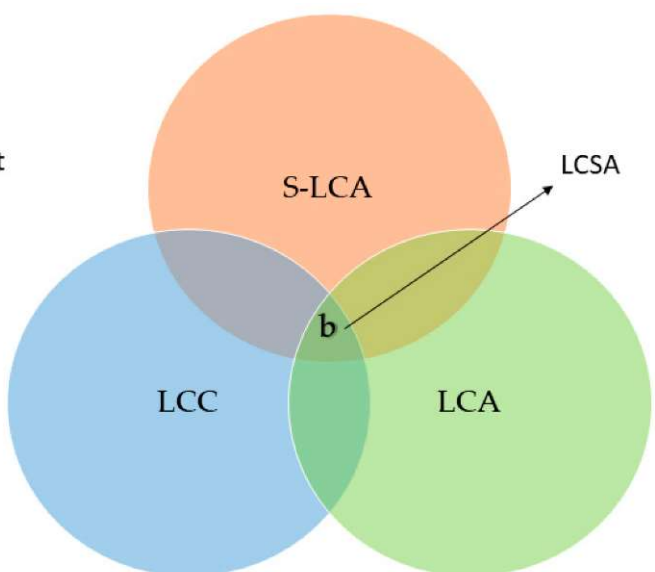
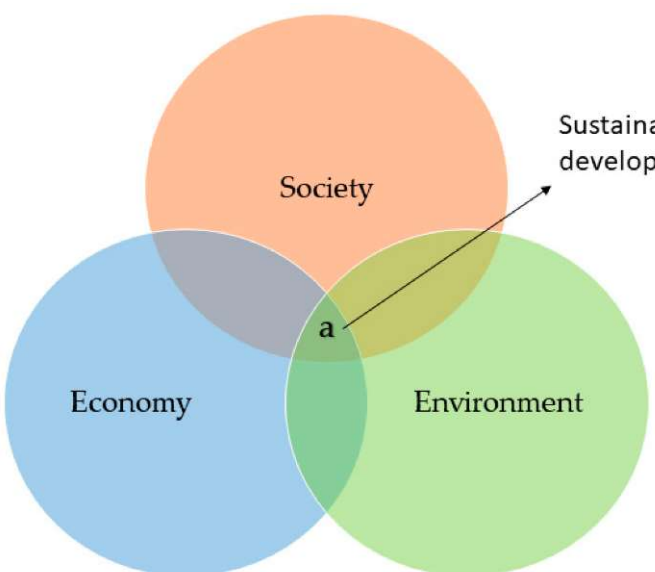


Previsioni difficili per:  
1) no esperimenti,  
2) tempi lunghi,  
3) fattori non controllabili.





# definizione del problema - LCSA

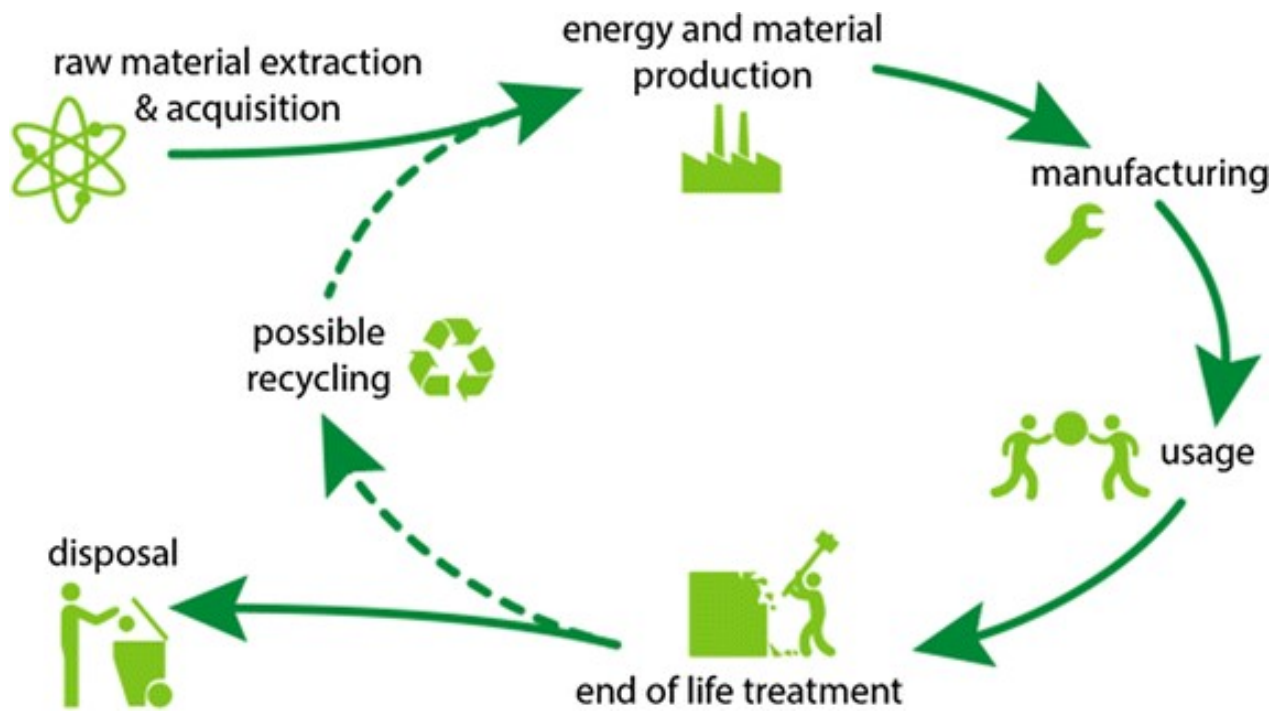


Life Cycle Costing

Life Cycle Assessment

Social Life Cycle Assessment

Life Cycle Sustainability Assessment



# fonti energetiche



combustione di idrocarburi fossili (olio, carbone, gas) in centrali termoelettriche;

fissione nucleare (U, P) in centrali termonucleari;

fusione nucleare (H+D) in ITER;

energia solare (1): pannelli fotovoltaici;

energia solare (2): centrali termosolari;

energia eolica da turbine in parchi eolici;

energia idroelettrica sfruttando flussi d'acqua naturali o forzati;

energia geotermica sfruttando il calore proveniente dal sottosuolo;

energia marina estraibile dai flussi di acqua (correnti, onde, maree) o attraverso i gradienti (termico, salino);

energia da biomasse (3 generazioni).



Distinguiamo le fonti energetiche in primarie e secondarie:

Primarie : quelle **presenti** in natura prima di avere subito una qualunque trasformazione.

Sono fonti primarie:

- le fonti energetiche lentamente rinnovabili (petrolio grezzo, gas naturale, carbone),
- le fonti di energia rinnovabili quali energia solare, eolica, idrica, biomasse, geotermica.

Secondarie : quelle che derivano, in qualunque modo, da una **trasformazione** di quelle primarie.

Sono fonti secondarie:

- 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).

L'energia secondaria più diffusa e quelle **elettrica**: è trasportabile, immagazzinabile, misurabile (vendibile, tassabile).

# fonti energetiche



Densità energetica (quantità di energia immagazzinata in un dato sistema o volume dello spazio per unità di volume o per unità di massa) delle diverse fonti: è  $10^6$  volte maggiore per sorgenti nucleari rispetto alle sorgenti fossili.

La differenza fondamentale tra sorgenti fossili e sorgenti nucleari è che le prime rilasciano energia attraverso reazioni **chimiche** (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 (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

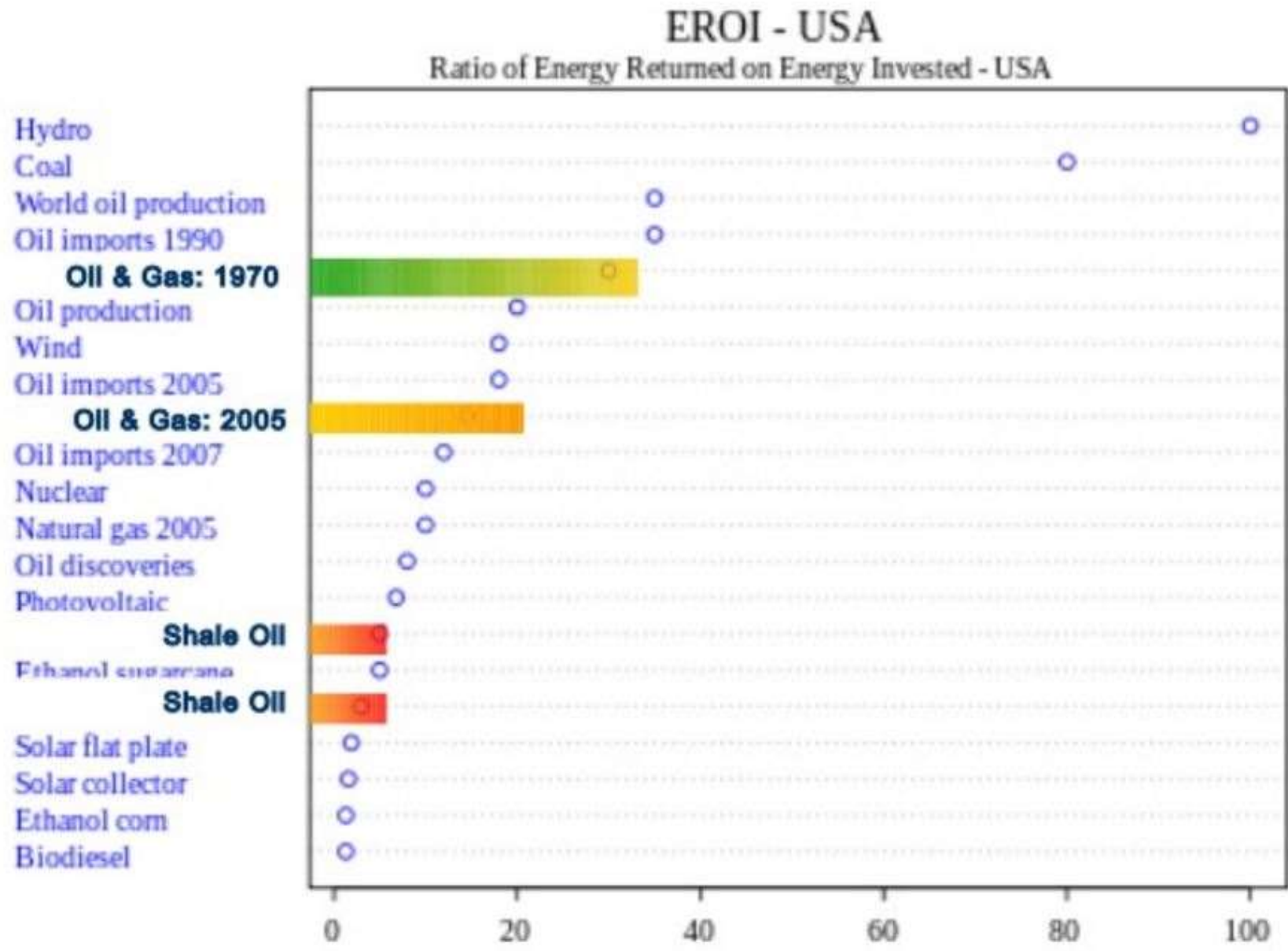
fissione  $\text{U}^{235}$







## Energy Returned on Energy Invested



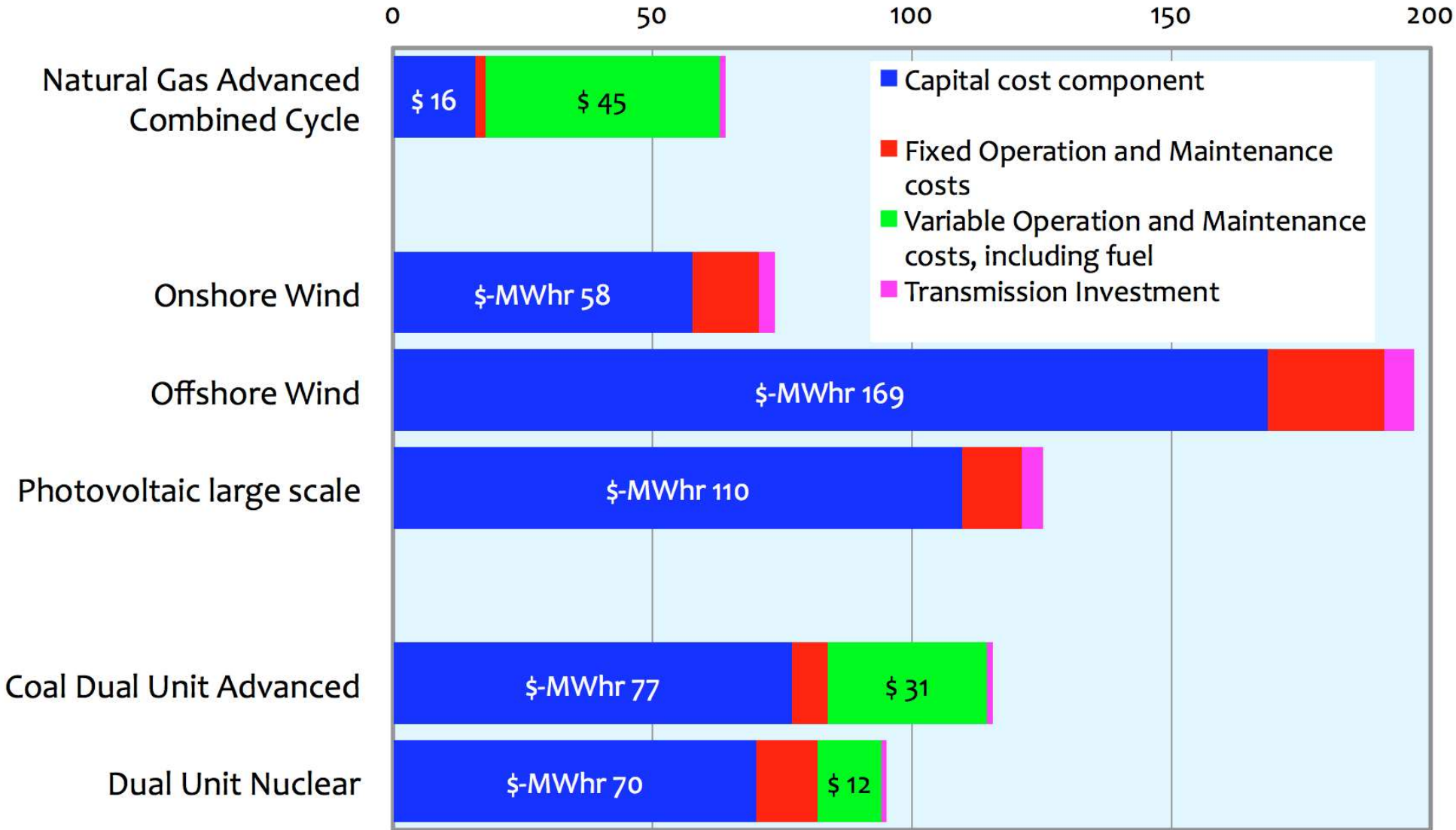
REF Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. (2010). **Year In review EROI or energy return on (energy) invested**. *Annals of the New York Academy of Sciences*

# fonti energetiche



## Costi della produzione dell'energia

US EIA data compative costs of electricity generation: \$ / MW hr



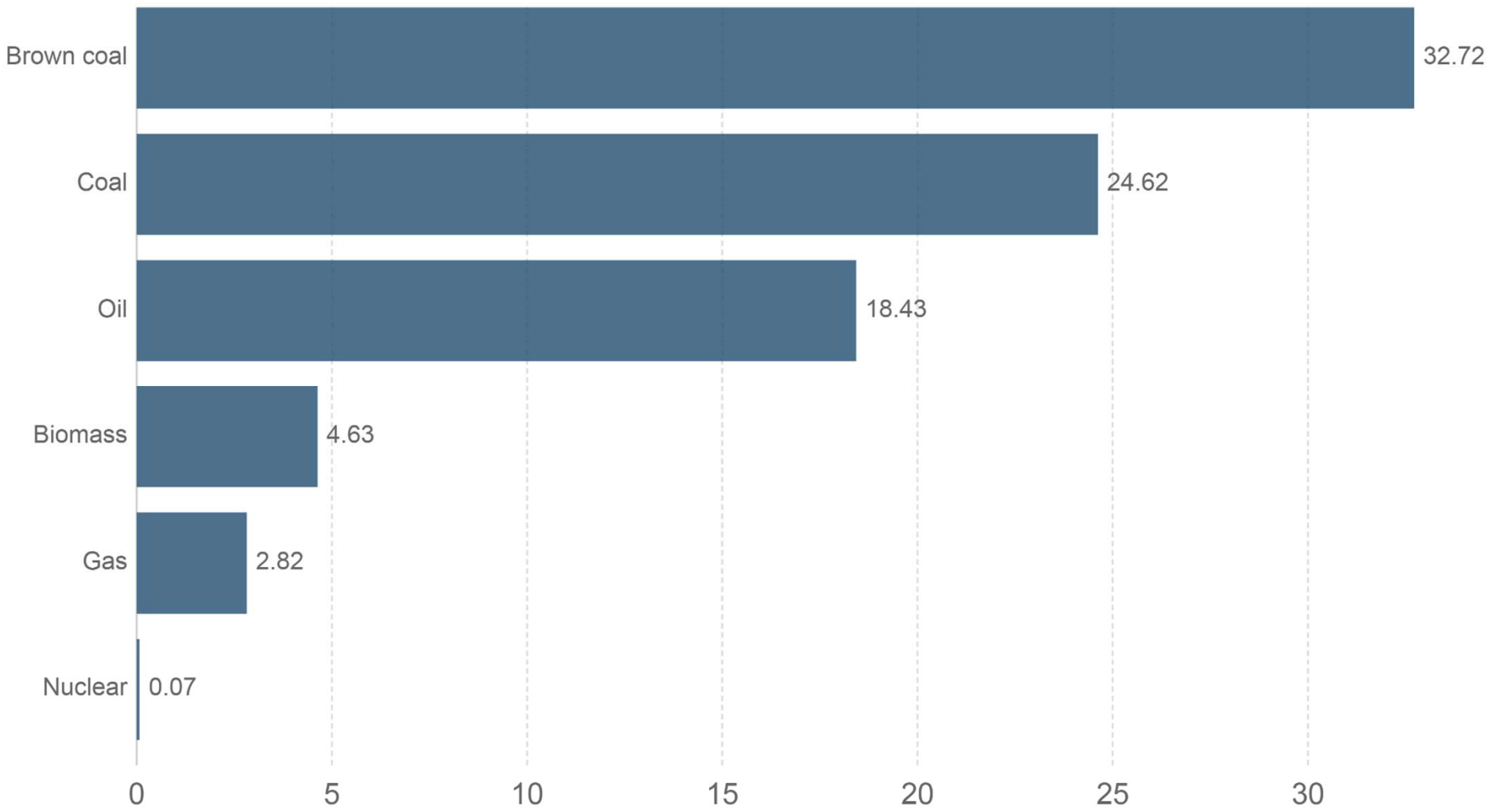


## Sicurezza nella produzione dell'energia



### Death rates from energy production per TWh

Death rates from air pollution and accidents related to energy production, measured in deaths per terawatt hours (TWh)



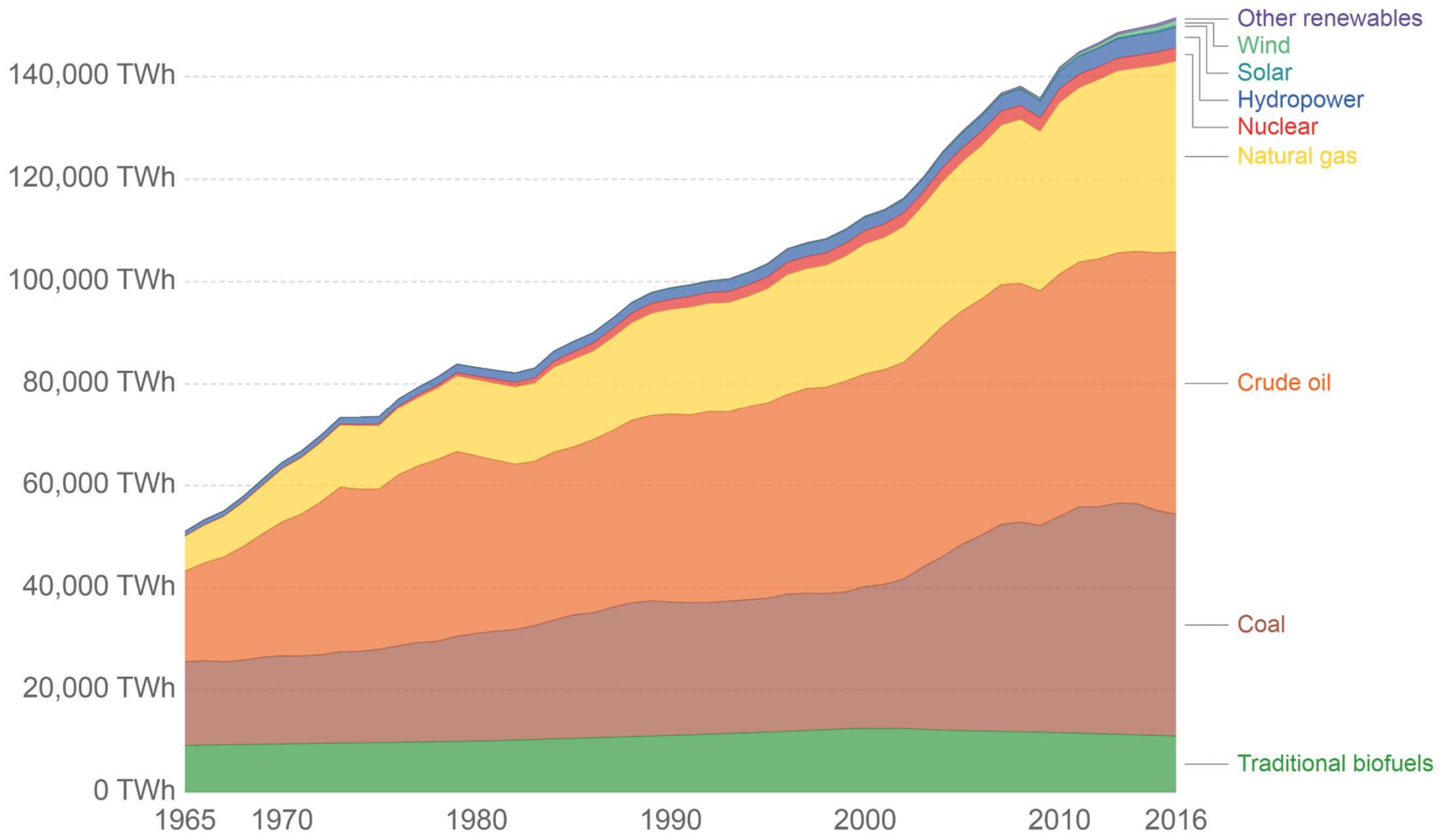
Source: Markandya and Wilkinson (2007) [OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/](http://OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/) • CC BY-SA  
Note: Figures include deaths resulting from accidents in energy production and deaths related to air pollution impacts. Deaths related to air pollution are dominant, typically accounting for greater than 99% of the total.



## Uso delle diverse fonti energetiche a scala globale

### Global primary energy consumption

Global primary energy consumption by source, measured in terawatt-hours (TWh).



Source: Vaclav Smil (2017), Energy Transitions: Global and National Perspectives and BP Statistical Review of World Energy  
OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/ • CC BY-SA

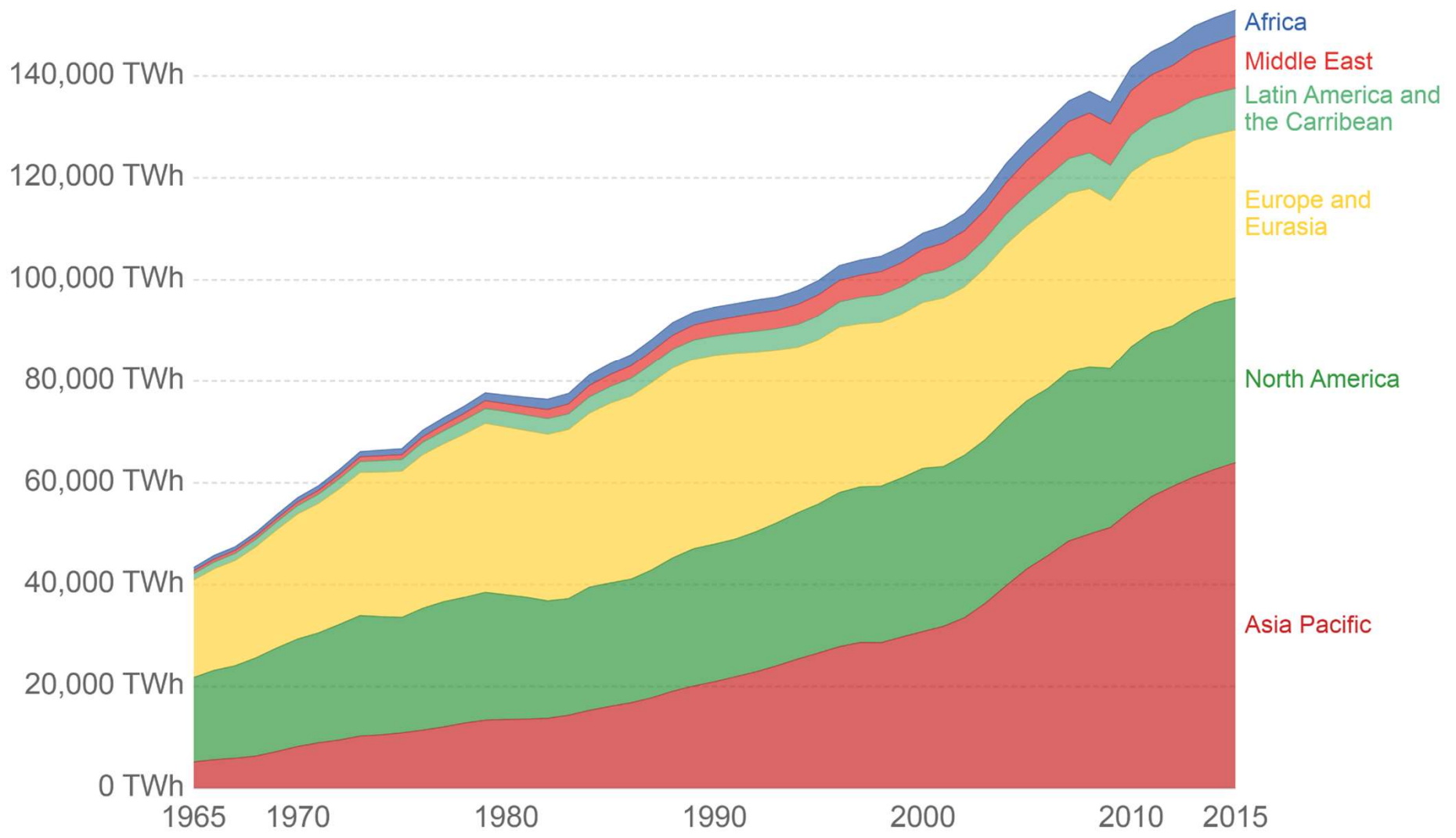




# Consumo energetico per macroregioni

## Primary energy consumption by region

Global energy consumption by region, measured in terrawatt-hours (TWh). Note that this data includes only commercially-traded fuels (coal, oil, gas), nuclear and modern renewables used in electricity production. As such, it does not include traditional biomass sources.



Source: BP Statistical Review 2016

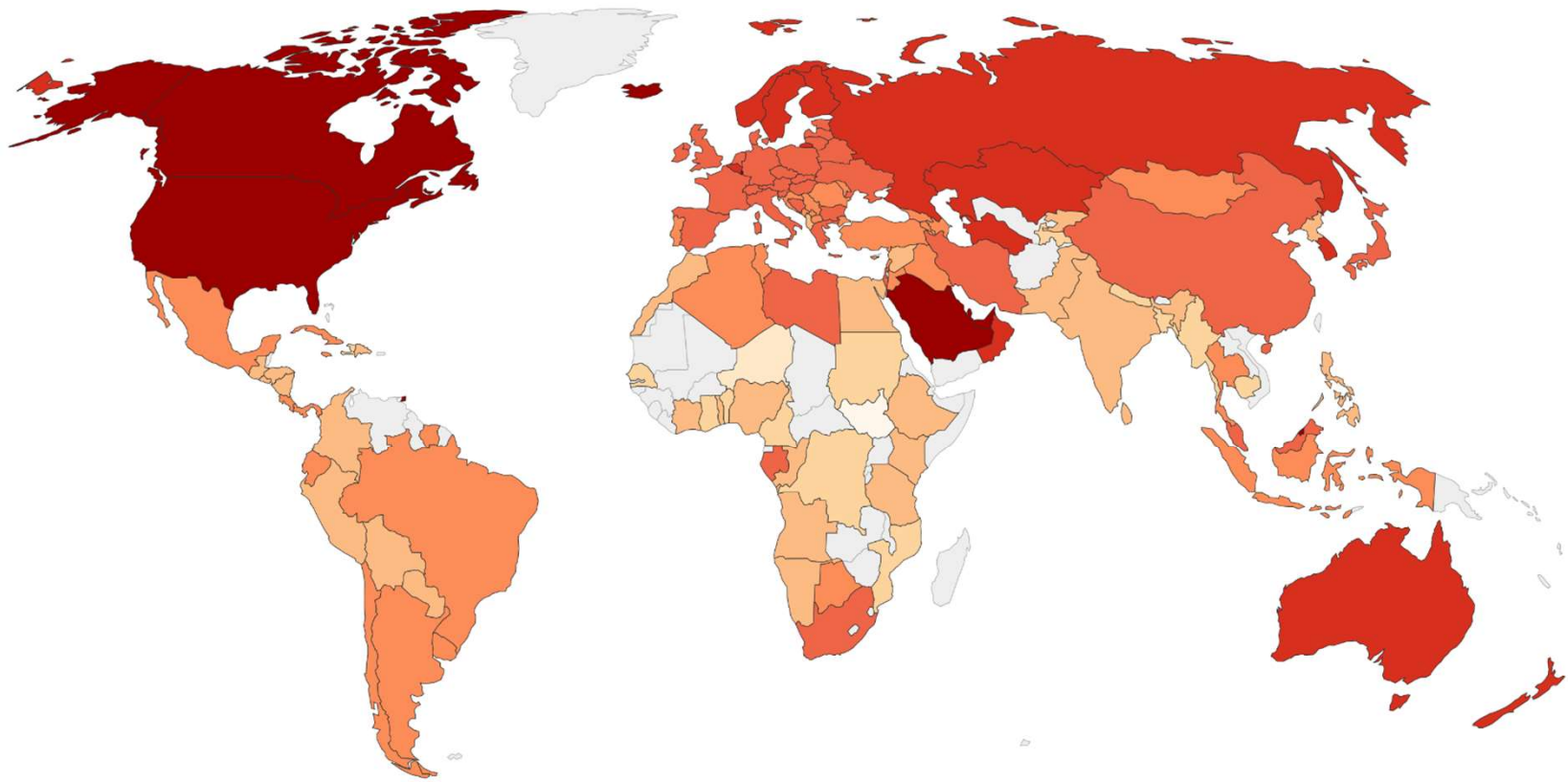
# consumi

## Consumo energetico medio per abitante



### Energy use per capita, 2015

Annual average per capita energy consumption is measured in kilowatt-hours per person per year.



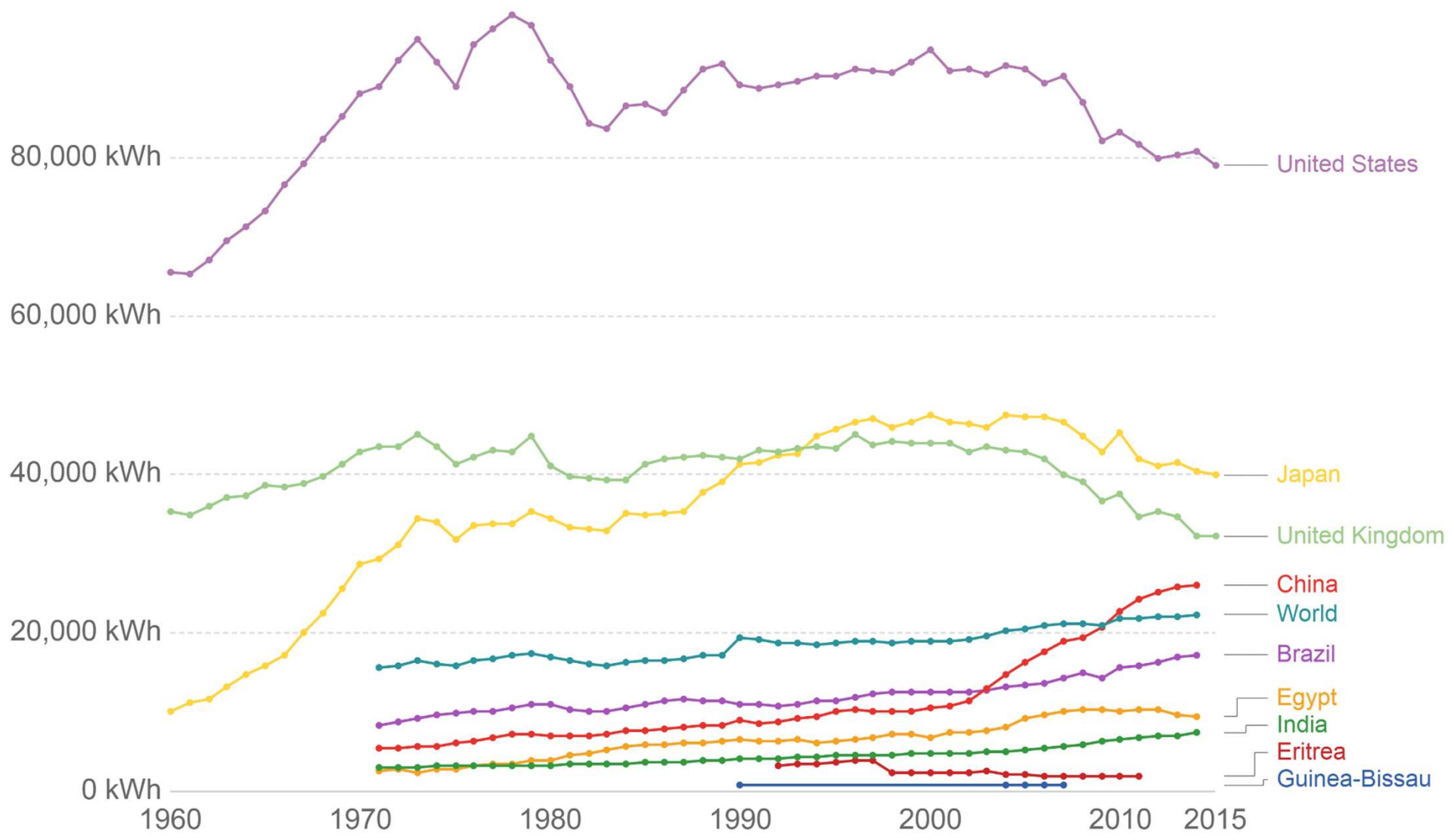
Source: International Energy Agency (IEA) via The World Bank  
OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/ • CC BY-SA



## Variazione del consumo energetico medio per abitante

### Energy use per capita

Annual average per capita energy consumption is measured in kilowatt-hours per person per year.



Source: International Energy Agency (IEA) via The World Bank  
OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/ • CC BY-SA



Fondato nel 1923 è costituito da oltre **90** Paesi Membri che aderiscono all'organizzazione attraverso Comitati Nazionali rappresentativi delle **realità energetiche** dei Paesi Membri. L'Organizzazione è accreditata presso le Nazioni Unite ha carattere **no profit**, non governativo, non commerciale e non allineato.

«To promote the sustainable supply and use of energy for the greatest benefit of all people»

- realizza **studi**, e **ricerche** in campo energetico i cui risultati vengono divulgati e presentati a livello internazionale,
- pubblica una **dichiarazione** su un tema energetico di particolare importanza con cui esprime la sua visione e le sue raccomandazioni,
- organizza incontri, seminari e **convegni** sulle tematiche di maggior interesse in campo energetico, collabora con Istituzioni internazionali e supporta i **policy-makers** mondiali,
- organizza ogni tre anni il **Congresso Mondiale dell'Energia**.



# scenari futuri

## World Energy Council



Entro il **2050** la domanda globale di energia primaria salirà di un valore compreso tra il 27 e il **61%**. E' quanto emerso dall'ultimo World Energy Trilemma, rapporto che valuta per 129 Paesi nel Mondo gli aspetti fondamentali del concetto di “sostenibilità energetica”.

Non è solo questo dato a preoccupare: nel mondo infatti, oltre un miliardo di persone vive ancora **senza elettricità**, mentre quasi tre miliardi di esseri umani cucinano con metodi ancora rudimentali.

### World Energy Trilemma:

“energy **sustainability** is based on three core dimensions – energy **security**, energy **equity**, and **environmental sustainability**”



Gli studi del **WEC** mostrano tre possibili scenari per il 2060:

**modern jazz** il mercato stesso fornirà per vie imprenditoriali l'accesso all'energia a basso costo tramite l'innovazione tecnologica.

**unfinished symphony** un approccio governativo alla questione, il più incisivo, che tramite la coordinazione politica dei vari stati del mondo permetterebbe una pianificazione a lungo termine e la salvaguardia del clima planetario.

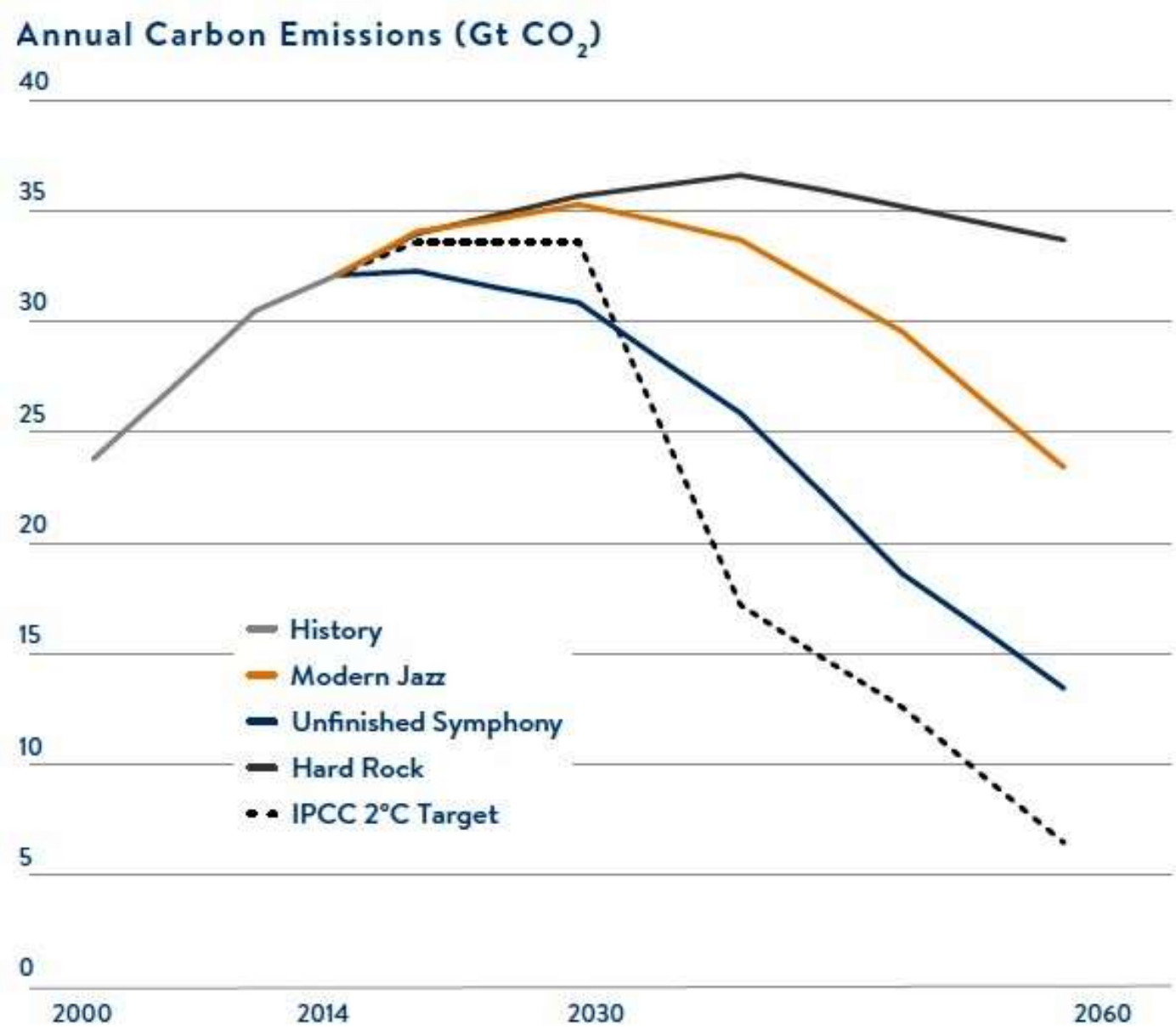
**hard rock** scenario frammentato, locale, dove si cerca sicurezza energetica senza però scendere a compromessi globali, politici o economici.

Tutti gli scenari portano a prevedere:

- il fabbisogno energetico aumenterà la sua crescita
- il fabbisogno energetico fossile globale aumenterà fino al 2030
- solare ed eolico saranno le rinnovabili più usate



### Previsioni nelle emissioni di CO<sub>2</sub> per i vari scenari

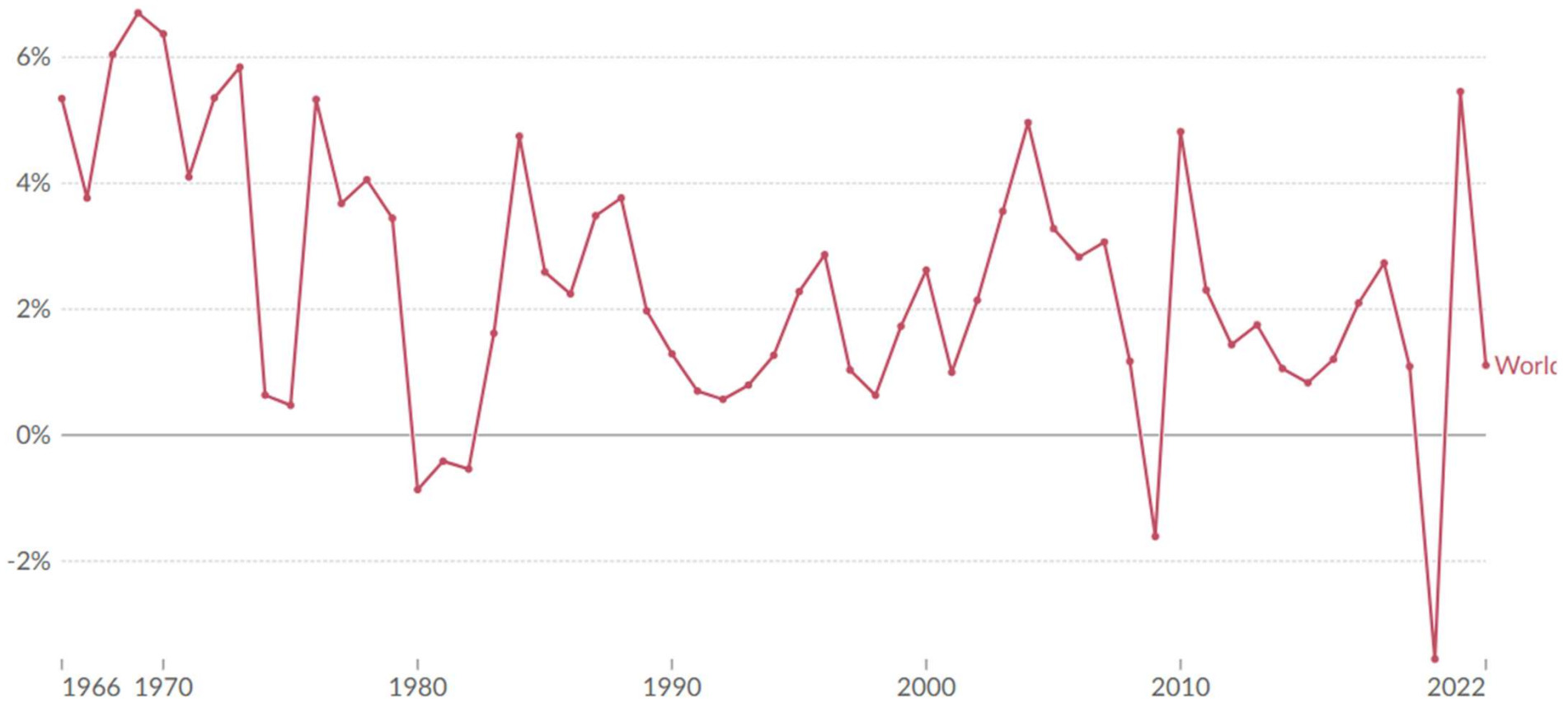


# scenari futuri – imprevisti



International Energy Agency

## Impatto delle crisi globali sul consumo energetico



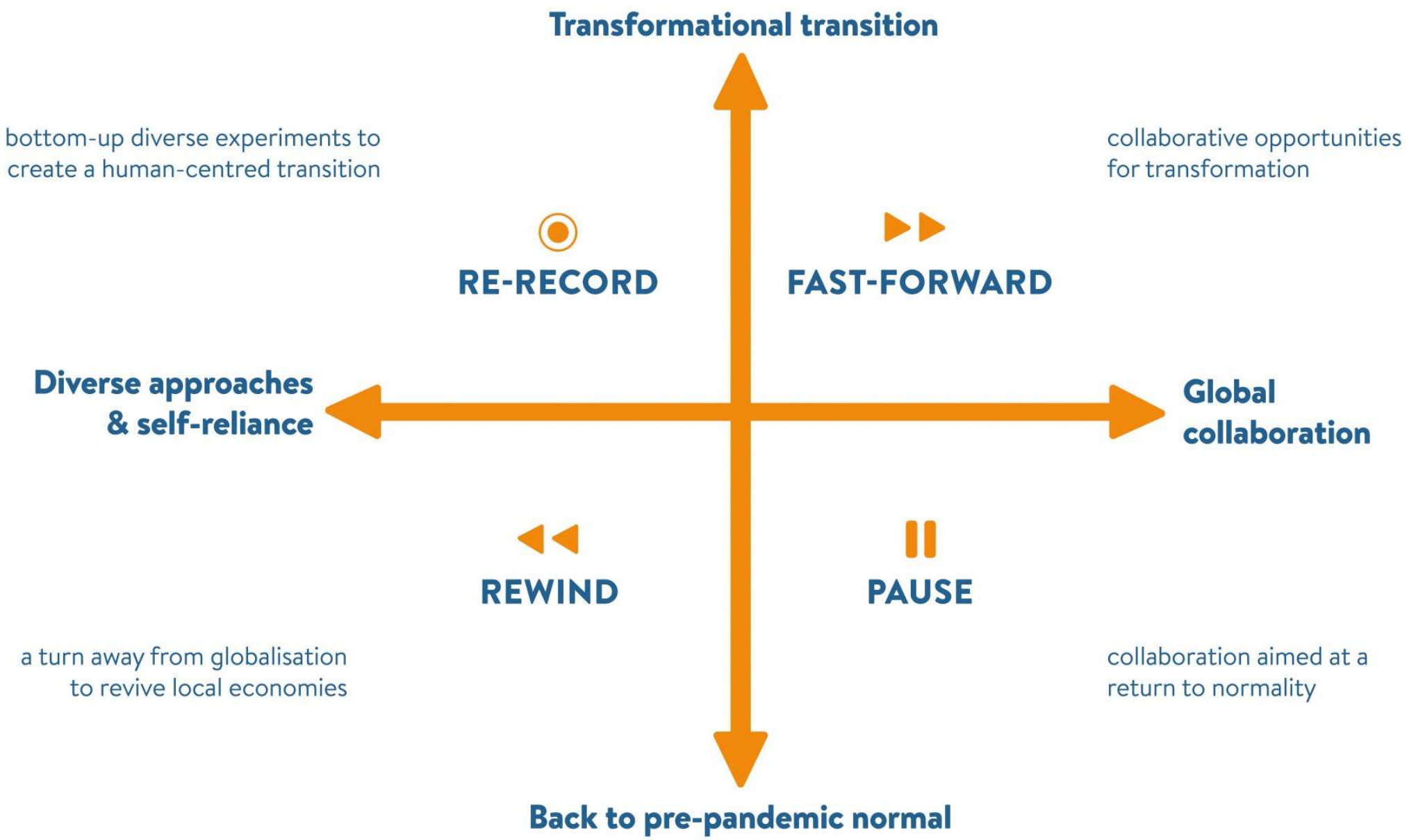


# scenari futuri – post epidemia

World Energy Council



Diversi scenari per l'uscita dall'emergenza



# scenari futuri – post guerra (?)



Se attuate quest'anno, le misure qui proposte potrebbero ridurre le importazioni di gas russo di oltre un terzo, con ulteriori opzioni temporanee per portare tali riduzioni fino a ben oltre la metà degli attuali consumi e, nel contempo, diminuire le emissioni inquinanti.

### Azione 1



#### Non firmare alcun nuovo contratto di fornitura di gas con la Russia

Impatto: approfittare dell'imminente scadenza dei contratti a lungo termine con la Russia ridurrà i livelli minimi contrattuali di "take-or-pay" per le importazioni russe e consentirà una maggiore diversificazione delle forniture.

### Azione 2



#### Sostituire le forniture di gas russo con gas proveniente da fonti alternative

Impatto: incremento di circa 30 miliardi di metri cubi la fornitura di gas proveniente da fonti non russe.

### Azione 3



#### Introdurre obblighi minimi di stoccaggio del gas per aumentare la resilienza del mercato

Impatto: aumento della resilienza del sistema del gas, sebbene i fabbisogni di iniezioni più robuste per rimpinguare i livelli di stoccaggio nel 2022 incrementeranno la domanda di gas e determineranno un aumento dei prezzi.

### Azione 4



#### Accelerare la realizzazione di nuovi progetti eolici e solari

Impatto: ulteriori 35 TWh generati da nuovi progetti nel settore delle rinnovabili nel corso del prossimo anno, che si aggiungono al già previsto aumento della generazione da queste fonti, riducendo il consumo di gas di 6 miliardi di metri cubi.

### Azione 5



#### Massimizzare la generazione dalle attuali fonti dispacciabili a basse emissioni: bioenergia e nucleare

Impatto: ulteriori 70 TWh generati dalle attuali fonti dispacciabili a basse emissioni, riducendo di 13 miliardi di metri cubi il consumo di gas per l'elettricità.

### Azione 6



#### Attuare misure a breve termine per proteggere dal caro prezzi dell'elettricità i consumatori vulnerabili

Impatto: riduce gli importi delle bollette per i consumatori anche quando i prezzi del gas naturale rimangono elevati, rendendo disponibili fino a 200 miliardi di euro per ammortizzare gli impatti sulle fasce di consumatori vulnerabili.

### Azione 7



#### Accelerare la sostituzione delle caldaie a gas con pompe di calore

Impatto: risparmio di ulteriori 2 miliardi di metri cubi di gas per riscaldamento in un anno.

### Azione 8



#### Accelerare gli interventi di efficientamento energetico degli edifici e dell'industria

Impatto: riduce il consumo di gas per riscaldamento di ulteriori 2 miliardi di metri cubi circa in un anno, abbassando il costo delle bollette, migliorando i livelli di comfort e potenziando la competitività industriale.

### Azione 9



#### Incoraggiare i consumatori a regolare temporaneamente il termostato su temperature più basse

Impatto: ridurre di appena 1°C la temperatura sul termostato degli impianti di riscaldamento degli edifici farebbe diminuire la domanda di gas di circa 10 miliardi di metri cubi all'anno.

### Azione 10



#### Intensificare gli sforzi volti a diversificare e decarbonizzare le fonti di flessibilità del sistema elettrico

Impatto: una forte spinta all'innovazione nel breve termine può, nel tempo, attenuare la profonda interrelazione tra la fornitura di gas naturale e la sicurezza dell'approvvigionamento elettrico in Europa. I sistemi di segnalazione dei prezzi dell'elettricità in tempo reale possono favorire una domanda più flessibile, riducendo altresì i picchi, costosi e ad alta intensità di gas.

## International Energy Agency

IEA (2022), A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas, IEA, Paris  
<https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>



- Interesse **globale** (clima, sviluppo).
- Implicazioni **sociali** economiche e politiche (esigenze).
- Scenari **incerti** (previsioni difficili).
- Leggi del **mercato** (stato/privati).
- Ruolo della **ricerca** scientifica (ottimizzazione, novità).
- **Imprevisti...**



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

# Cenni di fisica nucleare

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





## unità di misura: energia

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ J/1 s}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u.m.a.} = 1.49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$1 \text{ tep} = 41.87 \text{ GJ}$$

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 1055.055 \text{ J}$$

## prefissi SI

$$\text{Kilo} = 10^3$$

$$\text{femto} = 10^{-15}$$

$$\text{Mega} = 10^6$$

$$\text{pico} = 10^{-12}$$

$$\text{Giga} = 10^9$$

$$\text{nano} = 10^{-9}$$

$$\text{Tera} = 10^{12}$$

$$\text{micro} = 10^{-6}$$

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



**modello atomico e nucleare;**

**le forze e l'energia;**

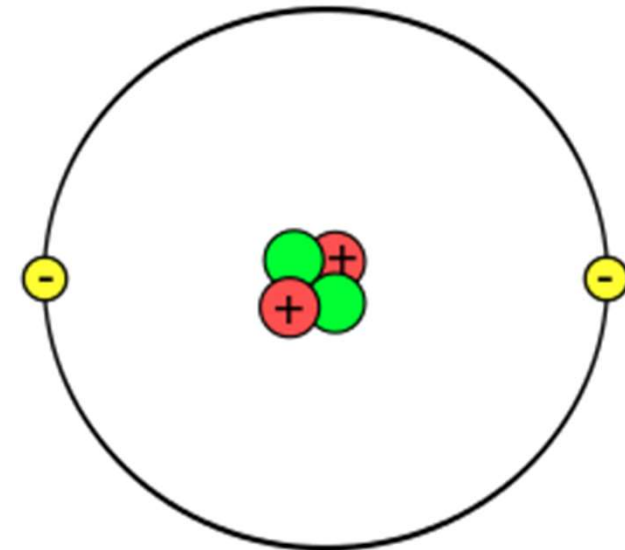
**le reazioni nucleari.**

# modello atomico 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.

L'atomo, secondo il **modello** che useremo, ha un raggio  $R_a \approx 10^{-10}$  m, ed è composto da un **nucleo centrale**, formato da Z particelle (protoni) con carica positiva  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C, di raggio  $R_N \approx 10^{-15}$  m attorno al quale si muovono Z elettroni, aventi carica negativa -e.



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

Nel nucleo ci sono anche  $N=A-Z$  particelle neutre chiamate neutroni, dove **A** è il numero di massa di un atomo.

$R_N \approx R_0 A^{1/3}$  dove  $R_0$  è una costante di valore  $1.2 \times 10^{-15}$  m (=1.2 fm)

# modello atomico e nucleare



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 è circa **Z + N volte la massa del protone**.

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** è dunque 12.

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

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



# modello atomico e nucleare



<p>Electron ○</p>	$m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ u}$ $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$
<p>Proton ○</p>	$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1836.15 m_e = 1.00728 \text{ u}$ $e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV}$
<p>Neutron ○</p>	$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1838.68 m_e = 1.00867 \text{ u}$ charge = 0 $m_n c^2 = 939.566 \text{ MeV}$

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

dalla relazione di Einstein  $E=mc^2$  si ottiene anche  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$   
ove  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ )



Tutti gli atomi che hanno **uguale Z**, anche se differiscono per il numero di neutroni, danno origine allo **stesso elemento chimico** (hanno le medesime proprietà e occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi).

Atomi con lo stesso Z sono detti **isotopi**, l'elemento chimico idrogeno H ha tre isotopi:

H-1,  $^1\text{H}$  nucleo con un protone ( $A=1$ )

H-2,  $^2\text{H}$  nucleo con un protone e un neutrone: Deuterio D ( $A=2$ )

H-3,  $^3\text{H}$  nucleo con un protone e due neutroni: Tritio T ( $A=3$ )

$^1\text{H}$  e  $^2\text{H}$  sono isotopi naturali e sono stabili,  $^3\text{H}$  è artificiale (reazioni nucleari) ed è instabile o radioattivo. Nuclei con lo stesso A e diverso Z sono chiamati **isobari**.

Con il termine **nuclide** si indica una singola specie nucleare caratterizzata da Z ed A: ciò li distingue dagli isotopi, che hanno invece fisso il numero di protoni ed il numero di neutroni variabile.



L'esistenza stessa di un nucleo atomico stabile 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 puntiformi  $q_1$  e  $q_2$ , che si trovano ad una distanza  $d$  nel vuoto si esercita una forza (di **Coulomb**) che vale, in modulo:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{d^2}$$

ove  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$  è la costante di Coulomb in SI.

Per distanze piccole la forza repulsiva è molto elevata, e diverge per  $d \rightarrow 0$ .



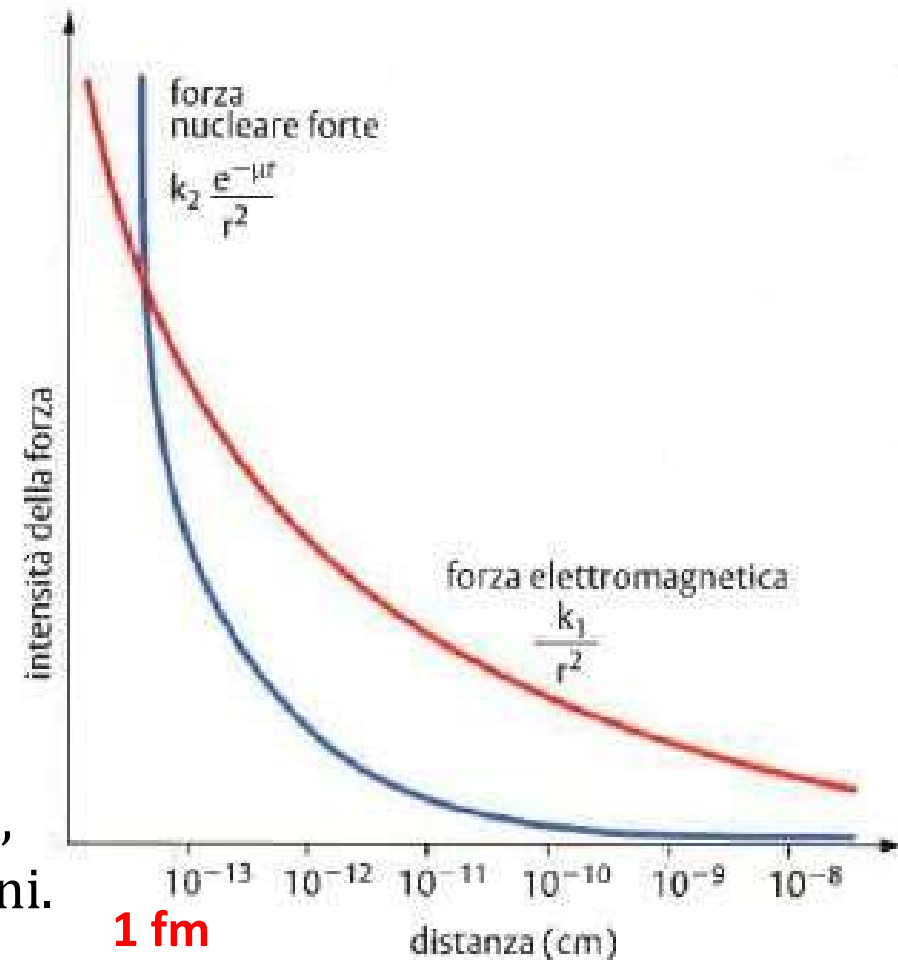
La Fisica Nucleare (Ettore Majorana) indica la via di una soluzione per spiegare la stabilità dei nuclei atomici: l'esistenza di altre forze attrattive tra nucleoni (anche con carica dello stesso segno) chiamate **forze nucleari** o **interazione nucleare forte**.

Esse devono essere:

- **molto intense**, per poter tenere insieme, a distanza piccolissima, molti protoni con la stessa carica,
- **inefficaci** al di fuori del nucleo atomico stesso.

Sono attive a distanze  $d < 10^{-15}$  m, ma inefficaci a distanze maggiori.

Sono **indipendenti** dal segno della carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni.



# forze ed energia



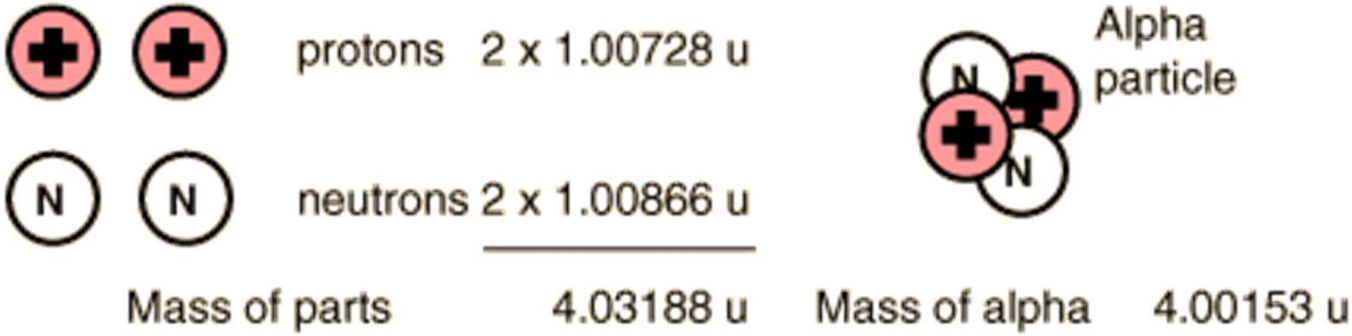
Si **osserva** che, per qualunque nucleo con più nucleoni si ha un difetto di massa  $\Delta\mathcal{M} = \Sigma m - M > 0$ , cioè:

la massa **M** del nucleo è **minore** della somma  $\Sigma m$  delle masse di tutti i nucleoni in esso contenuti.

Data l'equivalenza tra massa ed energia, secondo la relazione di **Einstein**, al difetto di massa  $\Delta\mathcal{M}$  corrisponde quindi una energia che è chiamata energia di **legame** (Binding Energy BE):

$$\Delta E = BE = \Sigma(mc^2) - Mc^2 = \Delta\mathcal{M}c^2$$

Esempio: nucleo di He  
(2 protoni+2 neutroni)



$$\Delta\mathcal{M} = 0.03035 \text{ u}$$

$$\Delta E = 4.5358 \text{ pJ}$$

$$= 28.3134 \text{ MeV}$$

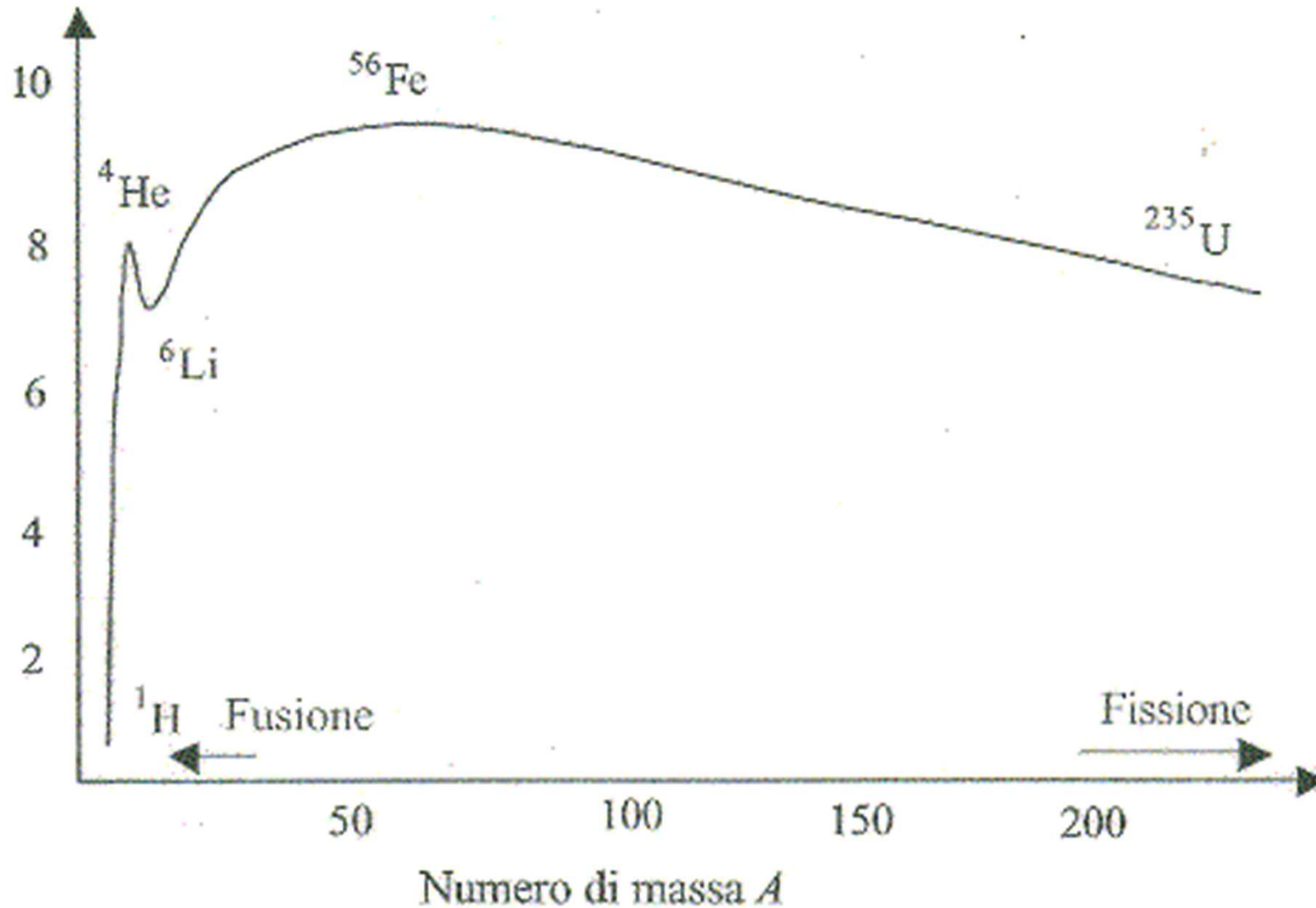
$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$$



# forze ed energia



Energia di legame per nucleone (MeV)



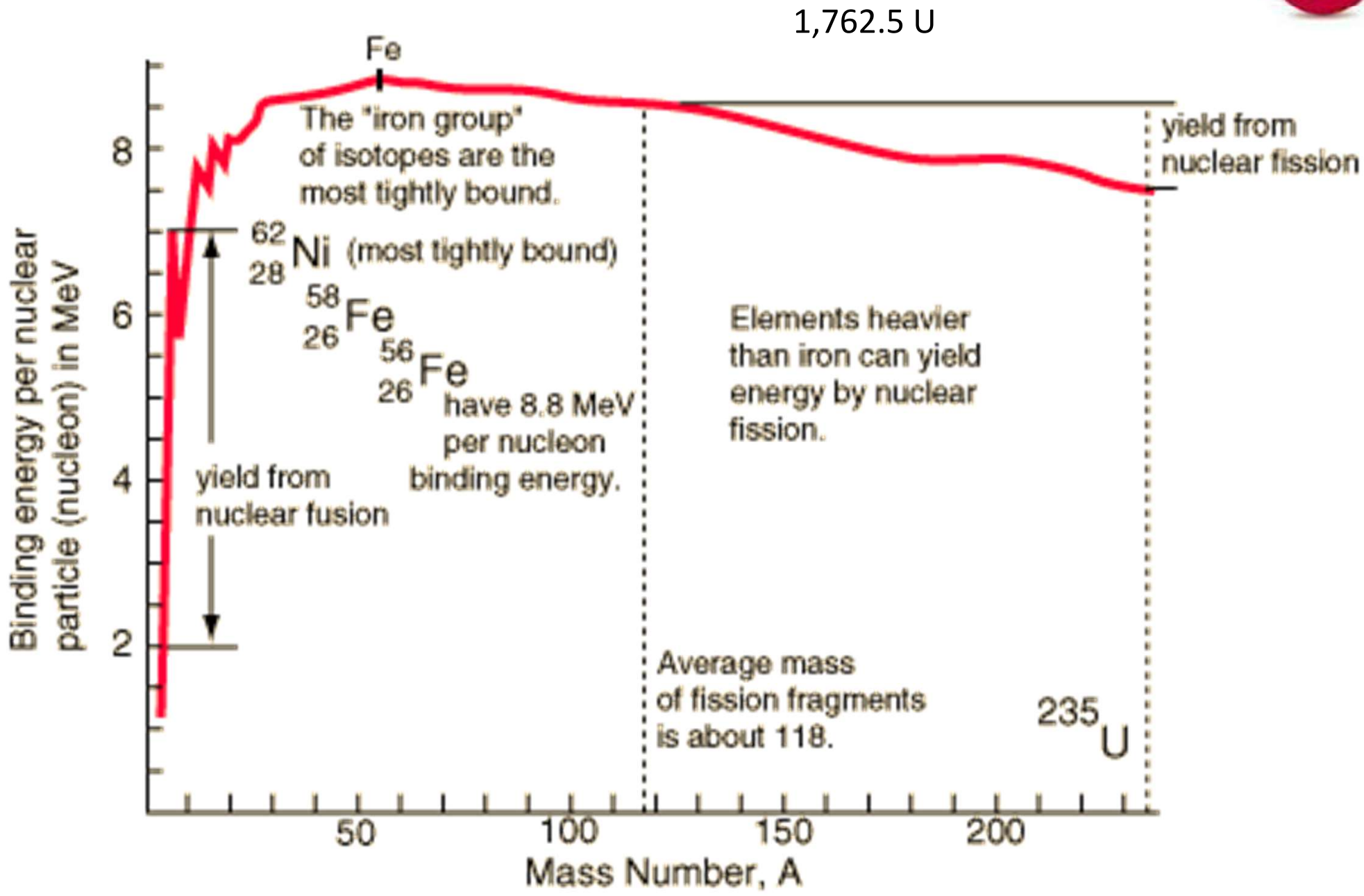
Mediamente (esclusi i nuclei più leggeri) si ha che l'energia di legame vale circa 8-9 MeV per nucleone: energia che occorre fornire per estrarre un nucleone dal nucleo.

# forze ed energia



- il Fe ( $A=56=30n+26p$ ) è il nucleo più stabile (richiede l'energia massima per estrarre un nucleone),
- gli elementi più leggeri, all'aumentare di  $A$ , aumentano l'energia di legame per nucleone, mentre gli elementi più pesanti l'energia diminuisce all'aumentare di  $A$ ,
- l'energia di legame per nucleone è l'energia che devo spendere per estrarre un nucleone dal nucleo,
- per ottenere energia (reazioni esoterme) dovremmo produrre reazioni che portano da uno stato ad energia di legame inferiore ad uno con energia di legame superiore (quindi più stabili):
  - **fusione** per elementi più leggeri del Fe
  - **fissione** per elementi più pesanti del Fe

# forze ed energia



# reazioni nucleari



Col termine **reazione nucleare** si intende un evento nel quale il numero di nucleoni all'interno di un **nucleo viene variato**, tramite aggiunta, estrazione o scambio 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 (nuclei di He), beta (elettroni) o gamma (fotoni). L'emissione spontanea di particelle e/o radiazioni dal nucleo di un atomo è un fenomeno **naturale**, scoperto nel 1896 da Henri Becquerel che notò che una lastra fotografica s'anneriva se posta nelle vicinanze di un minerale contenente composti dell'uranio.

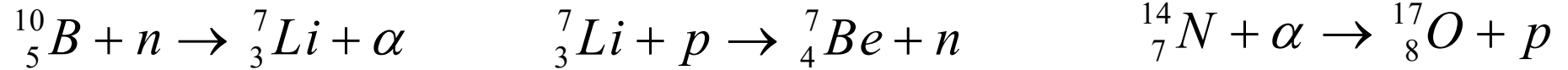
Le reazioni nucleari possono essere:

- esotermiche (la massa diminuisce e l'energia cinetica aumenta),
- endotermiche (la massa aumenta e l'energia cinetica diminuisce).

# reazioni nucleari



alcune reazioni nucleari



Due reazioni nucleari rivestono una **particolare importanza** per la produzione di energia:

Reazione di **Fissione**:  $U^{235} + n \rightarrow Rb^{93} + Cs^{140} + 3n$  (+200 MeV)

Reazione di **Fusione**:  $H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$  (+17.6 MeV)





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).

Infatti, per oggetti macroscopici è l'area (sezione dell'oggetto) perpendicolare alla direzione della particella incidente.

Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area: 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:

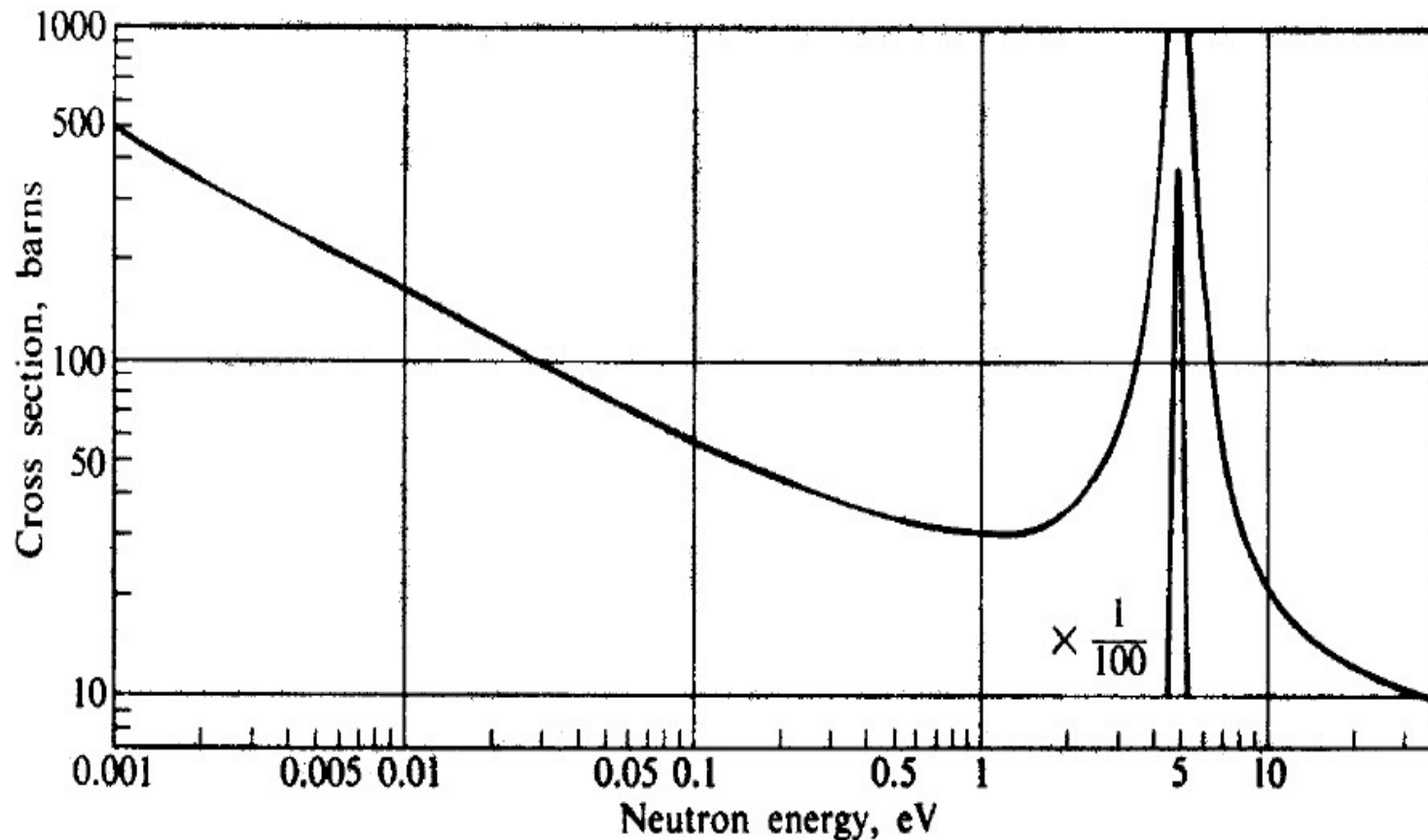
- dal tipo di particella incidente,
- dal nuclide bersaglio,
- dalla energia della particella incidente.

# reazioni nucleari



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.

Esempio:  $\sigma$  di un neutrone da parte di un nucleo di  $^{197}\text{Au}$





1. assumiamo una struttura atomica di tipo planetario (nucleo piccolo, pesante e positivo, ed elettroni leggeri e negativi in orbita),
2. i nucleoni sono legati tra loro dalla forza nucleare forte,
3. la massa dei nucleoni legati differisce dalla massa dei nucleoni isolati,
4. per ogni nucleo si definisce l'energia di legame per nucleone,
5. per ottenere energia da una trasformazione nucleare, occorre:
  - rompere nuclei più pesanti del Ferro
  - oppure
  - fondere nuclei più leggeri del Ferro,
6. una reazione nucleare avviene tramite urti, la cui probabilità dipende dalle caratteristiche del sistema.



**FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI**

# Energia dalle reazioni nucleari

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



**reazione di fusione;**

**reazione di fissione;**

**reattori nucleari a fissione;**

**il progetto ITER.**



# reazioni nucleari: fusione



Affinché avvenga una reazione di fusione nucleare è necessario che i due nuclei si **avvicinino** a distanze equivalenti alle dimensioni del nucleo.

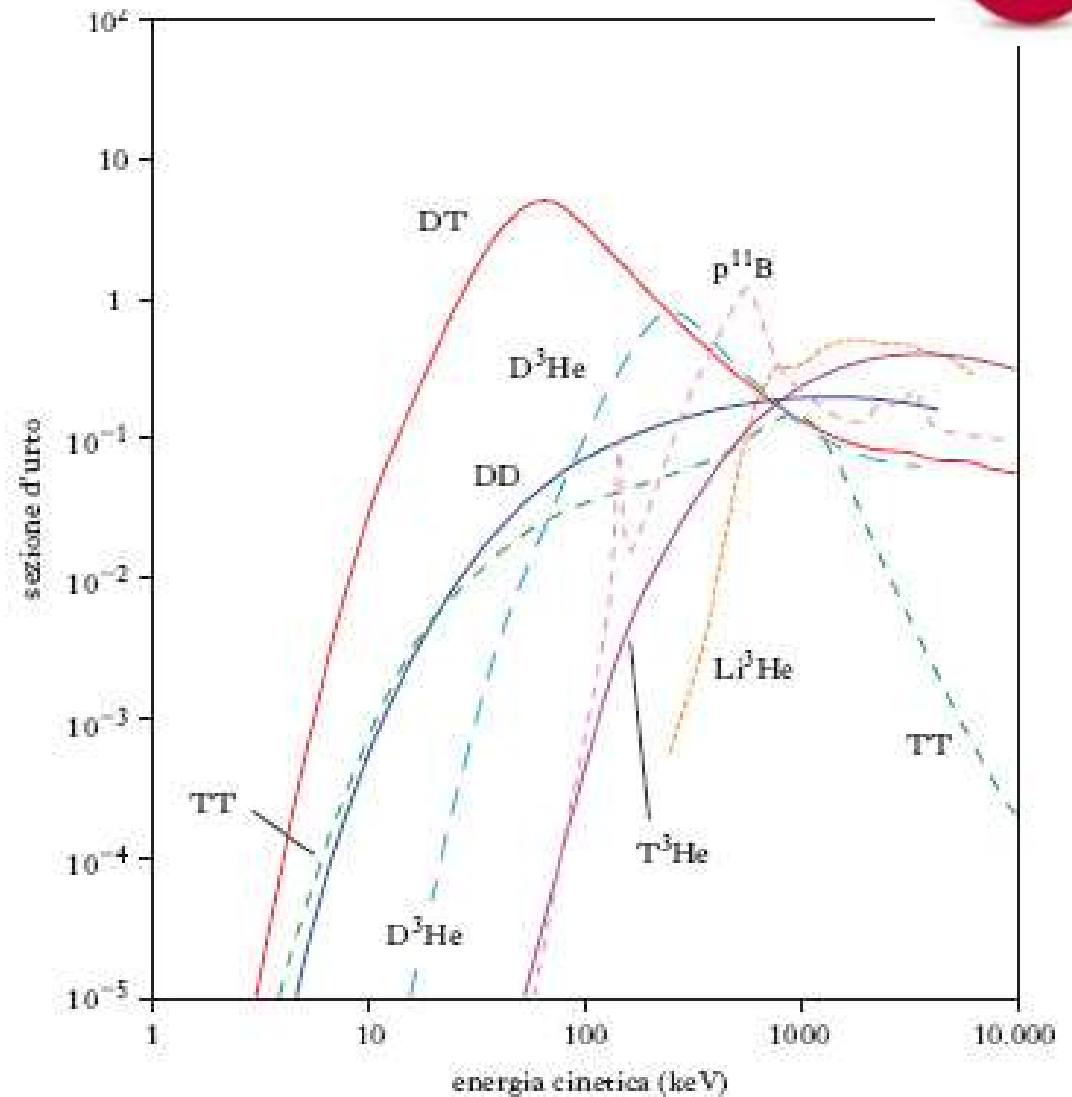
Poiché essi sono entrambi carichi positivamente, tenderanno a respingersi senza interagire. Esiste cioè una **barriera energetica** che impedisce la loro interazione (cioè la fusione).

Occorrerà allora fornire ai due nuclei una **energia sufficiente** per superare tale barriera e farli arrivare ad una distanza così piccola dove predominino le forze nucleari, in grado di superare la repulsione elettrostatica.

La probabilità di superare tale barriera è, anche in questo caso, quantificata dalla **sezione d'urto di fusione** che è funzione dell'energia posseduta dai nuclei interagenti. Più grande è tale grandezza, più elevata è la probabilità di interazione tra i due nuclei leggeri.

Si può rendere elevata tale probabilità facendo sì che la velocità con cui i nuclei leggeri si urtano sia molto alta: cioè la loro energia cinetica (e quindi la **temperatura**) deve essere molto elevata.

# reazioni nucleari: fusione



Appare evidente, osservando gli andamenti delle sezioni efficaci di varie reazioni possibili, che la reazione tra **D** e **T** è quella che presenta valori elevati anche per valori non estremamente elevati di energia: essa è pertanto più facilmente realizzabile.

# reazioni nucleari: fusione



Per ottenere in laboratorio reazioni di fusione è necessario, ad esempio, portare una miscela di deuterio e trizio a **temperature elevatissime** (100 milioni di gradi corrispondenti ad energie di circa 10 keV) per tempi sufficientemente lunghi. In tal modo i nuclei hanno tempo di fare molte **collisioni**, aumentando la probabilità di dar luogo a reazioni di fusione.

A temperatura ordinaria un gas è costituito da particelle (atomi o molecole) neutre; viceversa a temperatura superiore a qualche eV (cioè qualche migliaio di gradi), poiché le singole particelle tendono a dissociarsi negli elementi costitutivi (ioni positivi, cioè nuclei, ed elettroni) il gas si trasforma in una miscela di particelle cariche, cioè un **plasma**.

Due domande:

- quanta energia serve per scaldare il plasma?
- come contengo il plasma?

# reazioni nucleari: fusione



Vista la enorme quantità di energia necessaria a **scaldare** il plasma, dobbiamo valutare se la reazione di fusione produce una quantità di energia superiore a quella **spesa** per innescarla.

Il fattore di **guadagno Q** della fusione è definito come il rapporto fra la potenza nucleare  $P_N$  prodotta in un reattore nucleare a fusione e la potenza di riscaldamento  $P_H$  spesa per mantenere il plasma in equilibrio e per riscaldarlo, cioè per mantenere il reattore in uno stato **stazionario**:

$$Q = P_N / P_H.$$

La condizione  $Q = 1$  (condizione minima per mantenere attiva la reazione di fusione) è detta condizione di **pareggio** o di *breakeven*.

E' necessario quindi ottenere  $Q > 1$ , in cui la potenza immessa viene completamente trasformata in potenza da fusione perché inevitabili processi di **perdita** di potenza nel plasma (conduzione termica, Bremsstrahlung, ecc.) sono **irreversibili** e, se non adeguatamente bilanciati da un eccesso di potenza in ingresso, portano allo **spegnersi** della reazione di fusione.

# reazioni nucleari: fusione



La condizione ideale è quella in cui il plasma si **autosostiene**, senza la necessità di immettere potenza dall'esterno (in modo simile a quanto succede nel sole e nelle altre stelle): questa condizione implica  $P_H = 0$  e corrisponde a  $Q = \infty$ , ed è detta **condizione di ignizione**.

Criterio di ignizione ci dice quali sono le **condizioni** di esercizio dell'ipotetica centrale a fusione per ottenere le condizioni di ignizione.

$$n\tau_E T \geq 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$

$n$	numero di particelle per unità di volume	$\approx 1.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$
$\tau_E$	tempo di confinamento del plasma	$\approx 1 \text{ s}$
$T$	temperatura del plasma	$\approx 20 \text{ keV} = 232 \cdot 10^6 \text{ K}$

**progetto ITER**

Il plasma va confinato per un tempo sufficientemente lungo, ci sono due tre opzioni: confinamento **magnetico**, confinamento **inerziale** e «**proiettile**».





## Confinamento magnetico

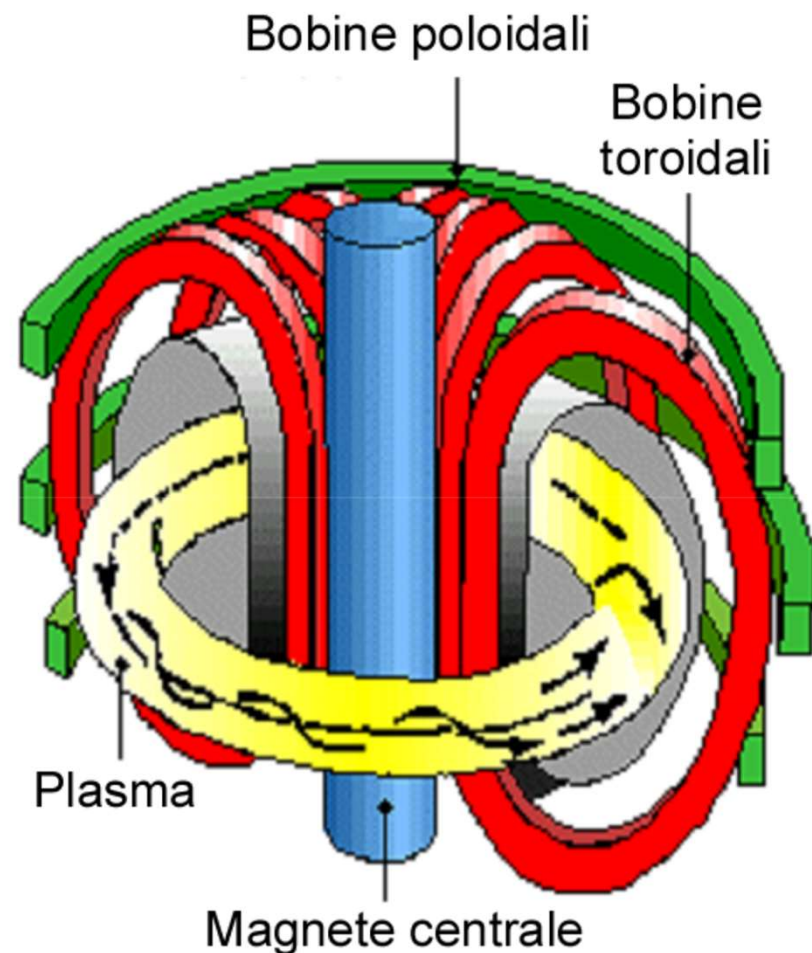
Il plasma è composto da particelle cariche che in presenza di un campo magnetico di intensità  $B$  sono sottoposte alla **forza di Lorenz**:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Creando un campo magnetico di forma opportuna si può fare in modo che le particelle restino confinate in uno spazio ristretto senza interagire con altro materiale.

Si fa in modo che le particelle di plasma si muovano secondo traiettorie **elicoidali**, grazie ad un campo magnetico toroidale ed uno poloidale, generati da potenti **elettromagneti**. Una tale struttura è detta **Tokamak**.

$$B \approx 3.5 - 12 \text{ T}$$
$$i \approx 15 \text{ MA}$$



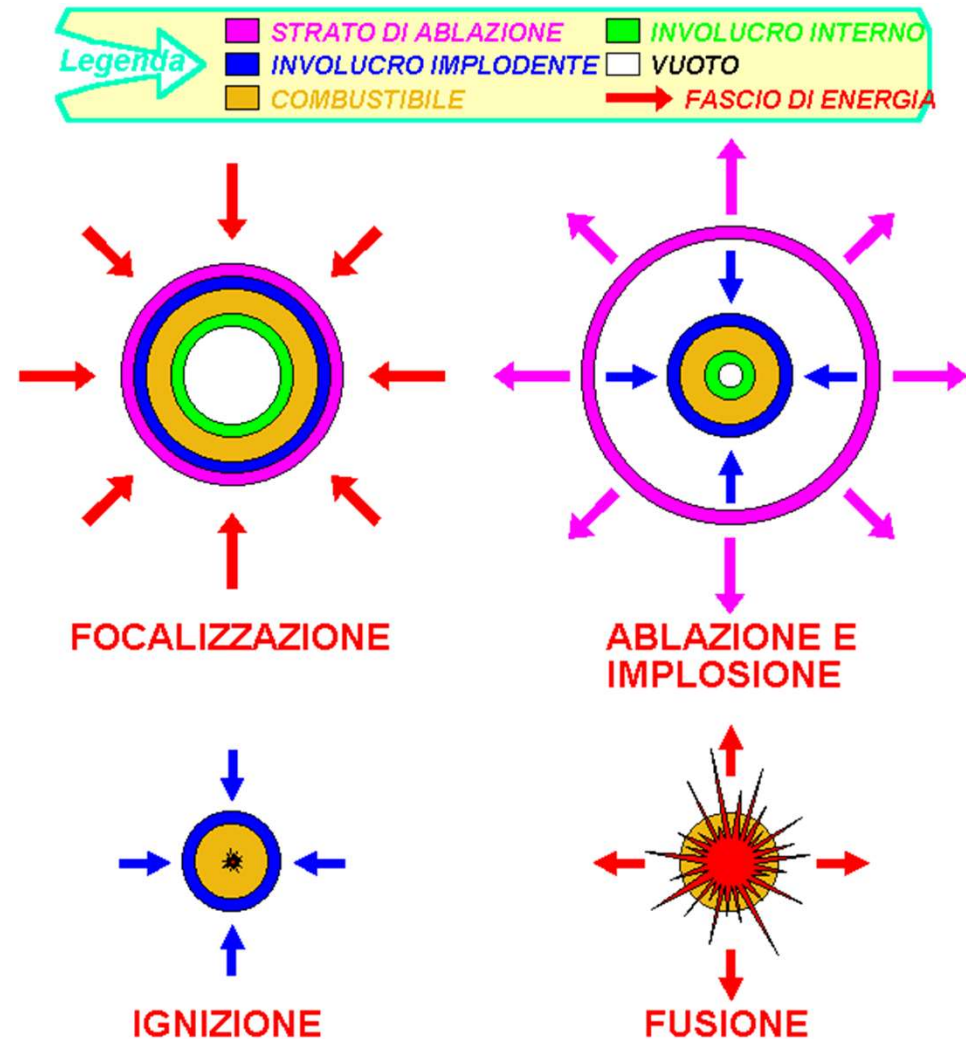
# reazioni nucleari: fusione



## Confinamento inerziale

Una sferetta di combustibile (circa 0.1 mg di D + T, allo stato solido per la temperatura criogenica) di circa 2 mm di diametro che viene fortemente **compressa** (a più di mille volte la densità di un liquido) fino a che nel suo centro non si **innesca** la reazione di fusione (ignizione), che si propaga nel combustibile freddo circostante.

La compressione può avvenire attraverso fasci di luce laser, elettroni o ioni che causa la vaporizzazione istantanea del guscio della sfera. Per la **conservazione della quantità di moto** la parte interna contenente il combustibile viene compressa.



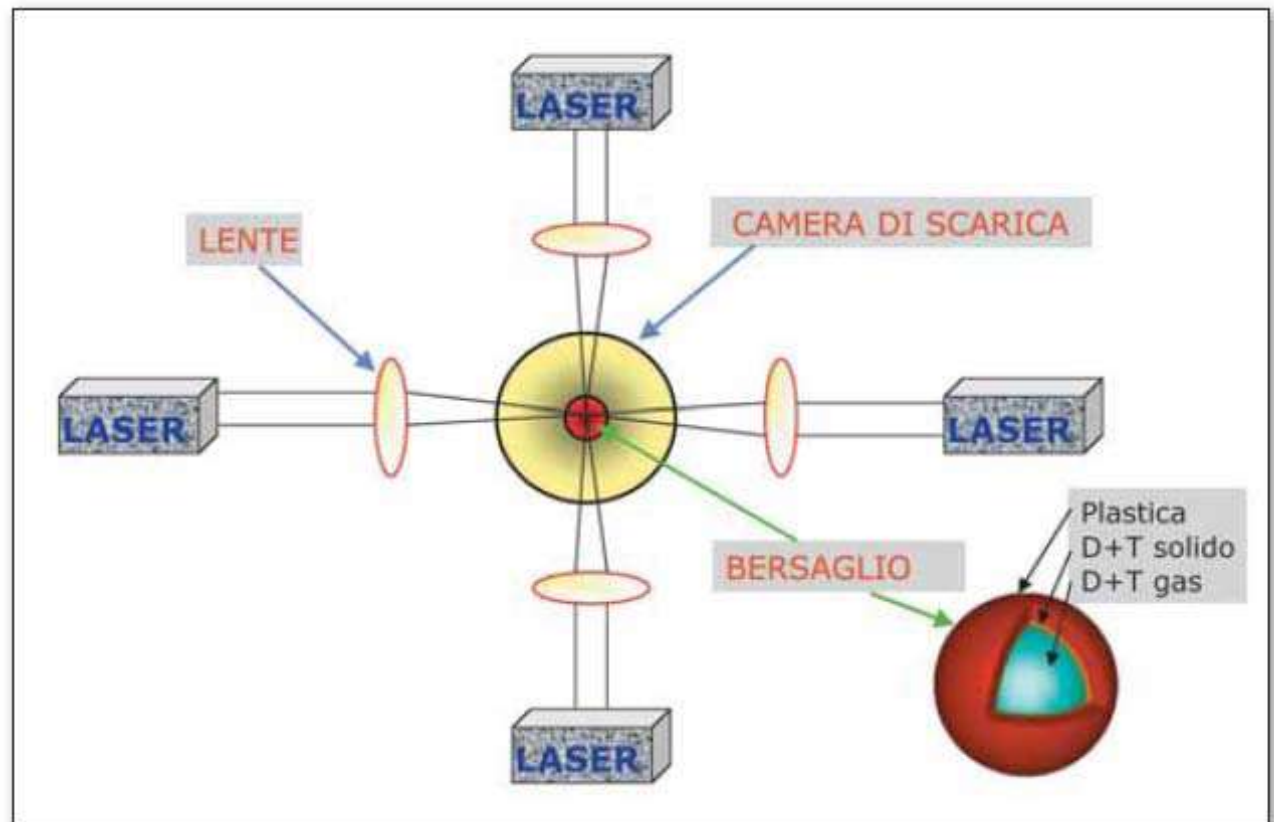
## Confinamento inerziale

L'energia per comprimere e riscaldare il combustibile viene somministrata allo strato esterno del bersaglio usando prevalentemente raggi di luce **laser** ad alta energia ( $10^{18}$ – $10^{19}$  Wm<sup>-2</sup>).

L'ignizione dura fintanto che il combustibile rimane confinato dalla propria inerzia. Il confinamento inerziale è stazionario

$$n \approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$$

$$\tau_E \approx 10^{-11} \text{ s.}$$



Nel 2013, presso il NIF del Laboratorio di Livermore negli Stati Uniti viene per la prima volta raggiunto il **punto di pareggio** con la tecnica di fusione a confinamento inerziale.

# reazioni nucleari: fusione



Il confinamento magnetico in genere fornisce:

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

Il confinamento inerziale in genere fornisce:

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

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

# reazioni nucleari: fusione



La First Light Fusion, spinoff dell'Università di Oxford, ha collaudato un **nuovo approccio** per ottenere la fusione, più semplice ed economico, definito **“a proiettile”**, certificando la produzione di neutroni coerenti con quelli ottenuti dalla fusione del deuterio adottato negli altri sistemi, anche se in numero limitato (circa 50)

«la fusione a proiettile rappresenta una nuova via più semplice ed efficiente dal punto di vista energetico e presenta un rischio fisico inferiore» e una spesa **di 45 milioni di sterline** mentre il progetto internazionale Iter richiede un investimento **di 20 miliardi di dollari**.

Viene sparato un proiettile contro un bersaglio costituito di pastiglie di deuterio alla velocità di 23.400 km/h. L'impatto genera una serie di onde d'urto ed effetti di cavitazione che insieme intensificano l'effetto della pressione **passando da 100 GPa a 100 TPa**, innescando la reazione di fusione. L'energia termica è assorbita da uno strato di litio metallico di un metro di spessore. Da qui, con uno scambiatore di calore, si azionano le turbine da cui ricavare elettricità.

# reazioni nucleari: fusione



Secondo la First Light Fusion ogni bersaglio può generare energia per alimentare il fabbisogno elettrico di una casa media per due anni. In una centrale commerciale il fenomeno si può produrre ogni **30 secondi** consentendo all'impianto di raggiungere una potenza di 744 MW (per confronto il reattore a fissione AP1000 prodotto da Toshiba-Westinghouse Electric Company genera 1154 MW).

E' in programma la costruzione di un impianto pilota commerciale del costo di 1 miliardo di dollari in grado di produrre 150 MW che dovrebbe essere pronto per il **2030/40**.

«In realtà non sono state fornite ulteriori informazioni dettagliate sulla precisione con cui questi neutroni siano stati misurati, o sulla conformazione **reale** dell'esperimento, e che ci aspettiamo a breve su qualche rivista internazionale con lavori sottoposti a peer-review. L'esperimento fornisce, comunque, risultati **incoraggianti** verso questo tipo di approccio di fusione inerziale, che chiaramente necessita di ulteriori ed importanti conferme»





## Come si scalda il plasma?

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

# reazioni nucleari: fusione nel Sole



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

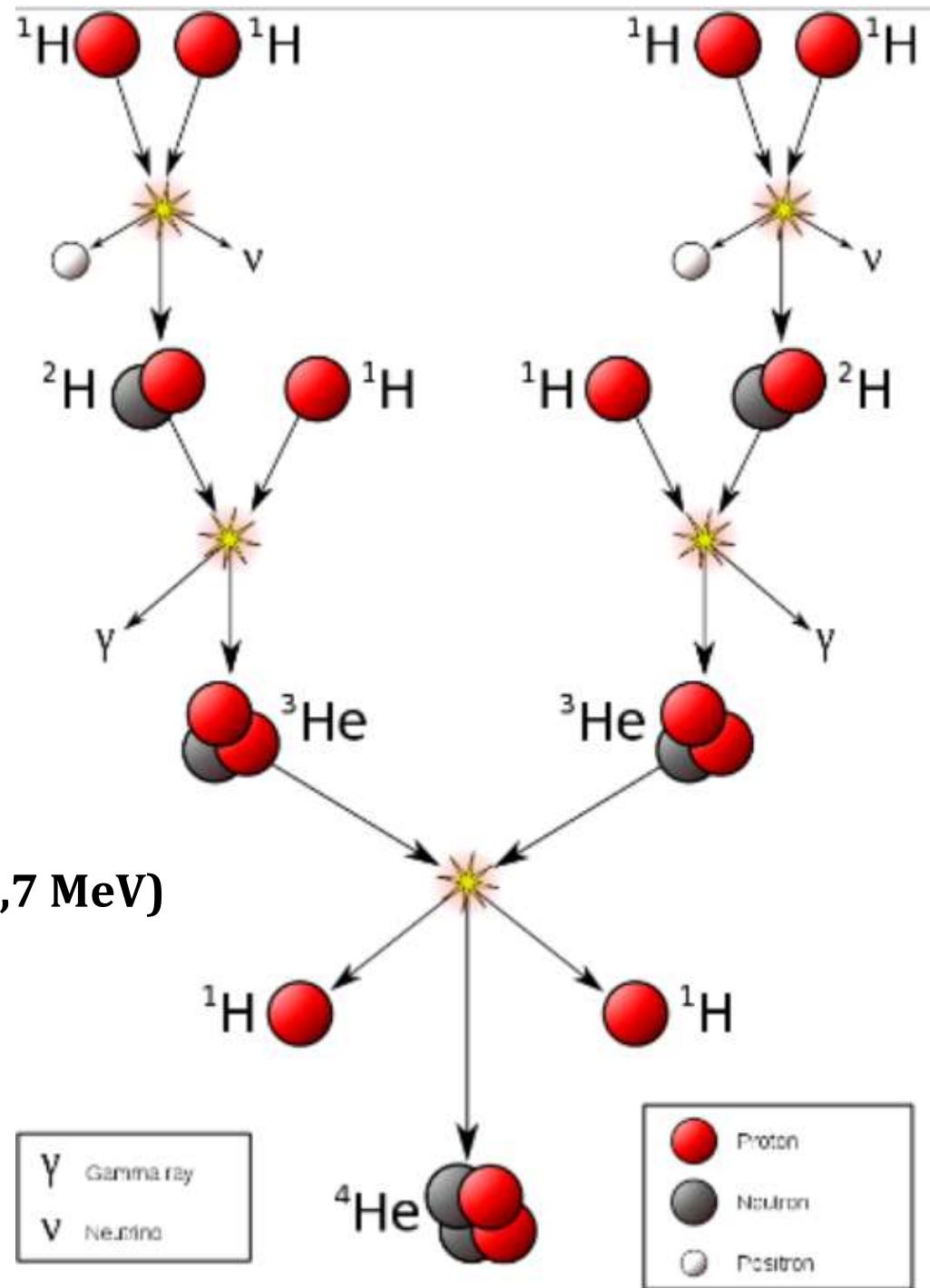
temperatura  $\sim 15.7 \cdot 10^6 \text{ K}$ , densità  $\sim 1.5 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$

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

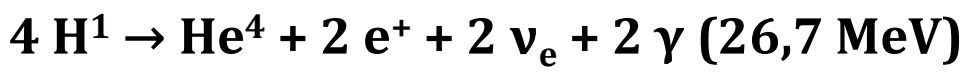
Ciò rende possibile la fusione di circa  $3.5 \cdot 10^{38}$  protoni al secondo

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

# reazioni nucleari: fusione nel Sole



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



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



**FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI**

## 24.05 Energia I

problema energetico, struttura atomica,  
fissione nucleare

## 06.06 Energia II

fusione nucleare, centrali nucleari, energie  
rinnovabili

## 07.06 Clima

sistema climatico, osservazione, modellazione  
e tendenze

# riassunto della lezione del 29.05



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

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

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

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

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

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

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

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