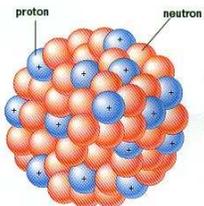


2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni



Sergio Scopetta

Dipartimento di Fisica dell'Università di Perugia



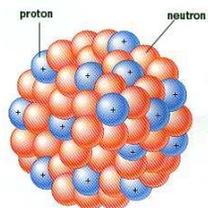
Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.1/30

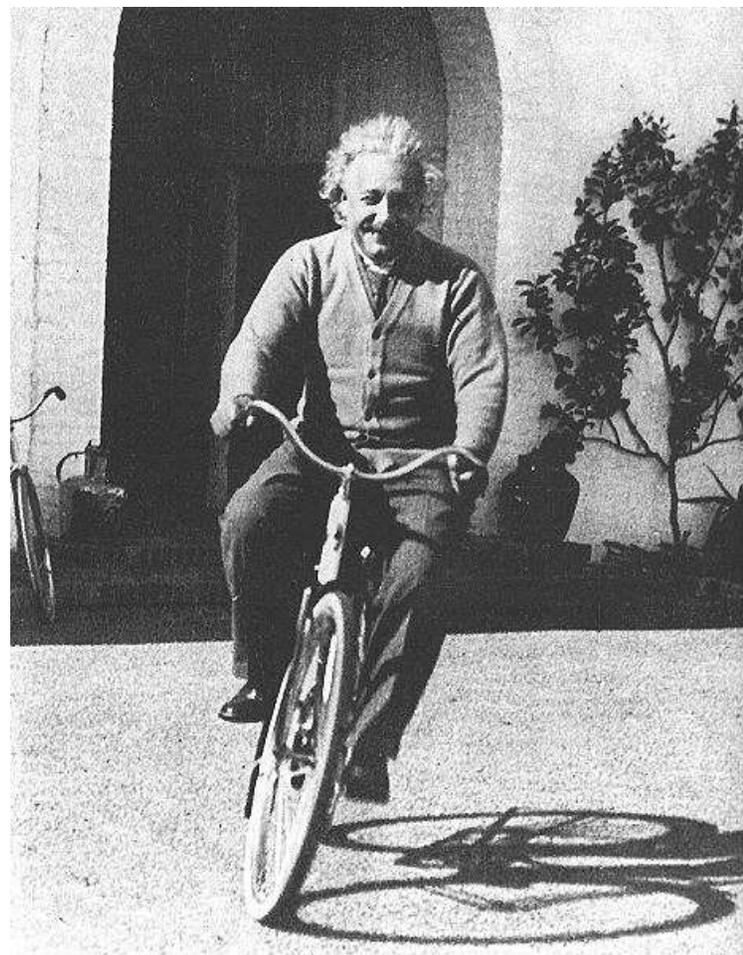
Divulgazione: una sfida difficile

Consiglio di A. Einstein:

*“Make things
as simple as possible,
but not simpler”*



Maggio 2011



... Consiglio non sempre ascoltato!

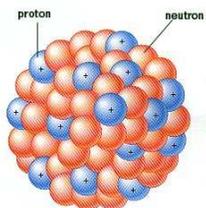
Ad esempio, ho sentito un famoso fisico dire in TV che, per immaginare com'è fatto un atomo, si può pensare ad una mela



Ora, la mela ha una lunga tradizione simbolica...



In Fisica, poi, ricorre in continuazione...

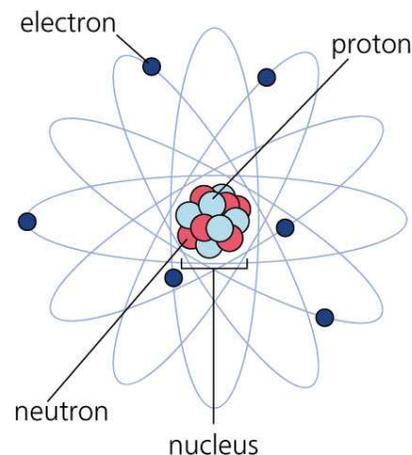
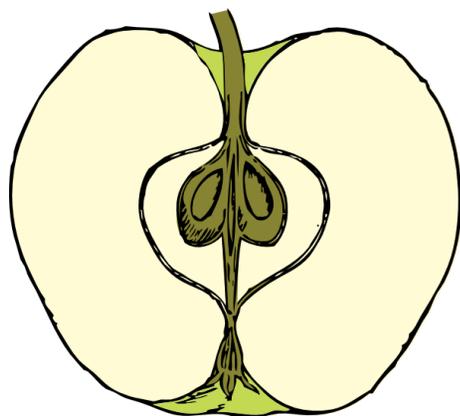


Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.3/30

... ma un atomo non somiglia ad una mela!

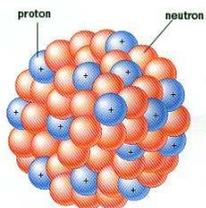
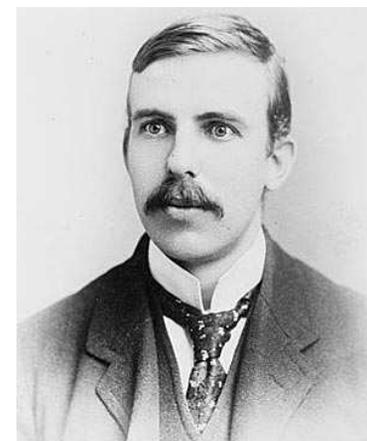
Dirlo è fuorviante: tutti capiscono, ma capiscono una cosa sbagliata!



La mela ha densità costante. L'atomo è essenzialmente vuoto!

Ciò che lo rende massivo è un minuscolo, densissimo cuore: il NUCLEO

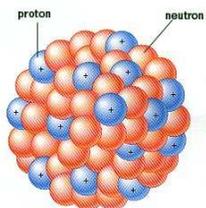
Ora, l'uomo che ha svelato che un atomo è diverso da una mela, è stato Lord Rutherford, esattamente cento anni fa.



Maggio 2011

Sommario

- **Rutherford, cent'anni fa**
- **L'eredita' di Rutherford**
(esperimenti recenti, nuovi e nuovissimi)
- **La prima lezione di Fisica Nucleare**
(Energia di legame, stabilità nucleare)
- **Chi ha paura della Fisica Nucleare?**
- **La Fisica Nucleare e la nostra vita (futura)**
(terapia adronica, energia da fusione nucleare, visione del mondo)



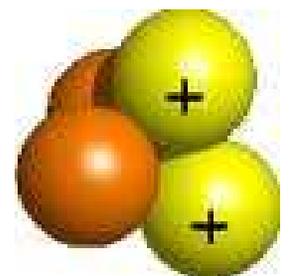
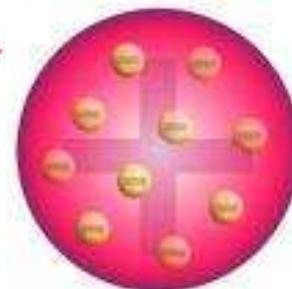
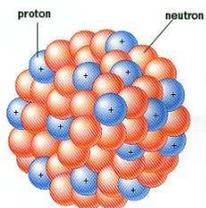
Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.5/30

Rutherford, cent'anni fa

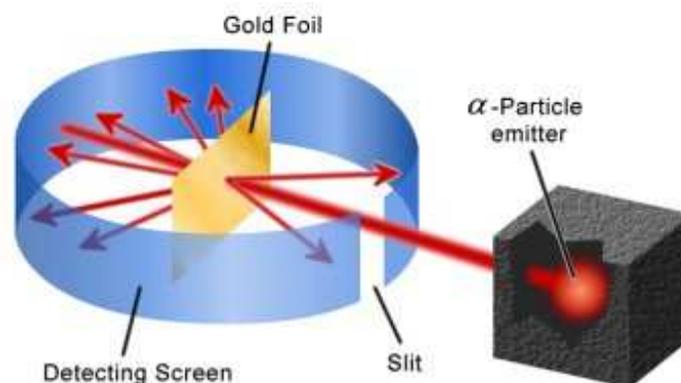
- In realtà, Rutherford non scoprì che l'atomo è diverso da una mela: scoprì che non è un panettone!
Ovvero confutò il modello atomico di Thomson: elettroni piccoli, leggeri, negativi (uvetta), persi in una pasta omogenea (positiva) .
Non si pensi che l'idea fosse balzana: anche il panettone ha la sua dignità in Fisica.

- Rutherford sparò particelle α contro una lamina sottile di oro.
Ora sappiamo che sono nuclei di Elio (${}^4_2\text{He}$) : allora si conosceva solo il rapporto carica/massa!

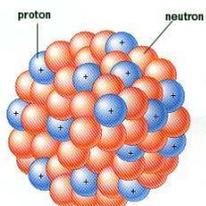


Rutherford, cent'anni fa

- Le particelle α , di energia erano prodotte da una sorgente radioattiva. Avevano energia cinetica $T \simeq 5 \text{ MeV} = 5 \cdot 10^6 \text{ eV} \simeq 0.1\%$ Energia di massa; Se io avessi un'energia cinetica comparabile, andrei a 1000 Km/s !!!



- Se le α avessero incontrato atomi “di Thomson”, avrebbero subito solo minime deviazioni: l'unica interazione importante è con gli e negativi e, se l'urto è elastico (T si conserva!), le pesanti α sono appena deviate dai leggeri e .

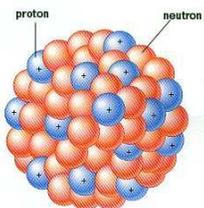
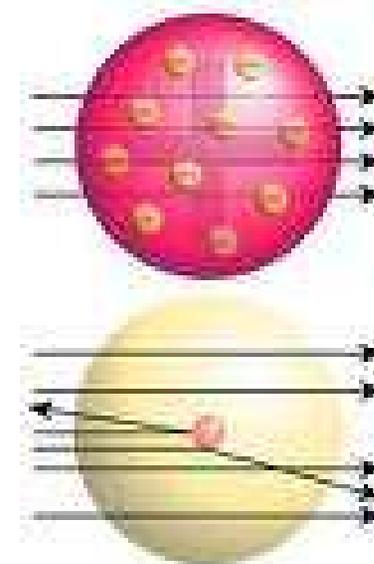
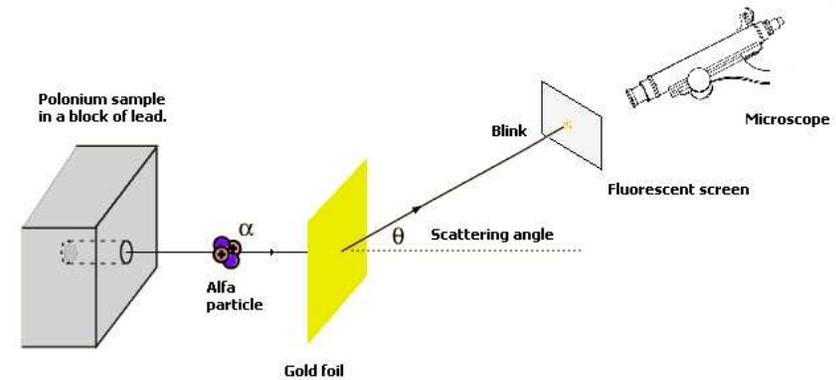


- Ora, Rutherford (e Geiger, Marsden...) osservarono, OTTICAMENTE, le α tornare, rare volte, indietro... A volte ritornano \rightarrow l'atomo non è un panettone!

Rutherford, cent'anni fa

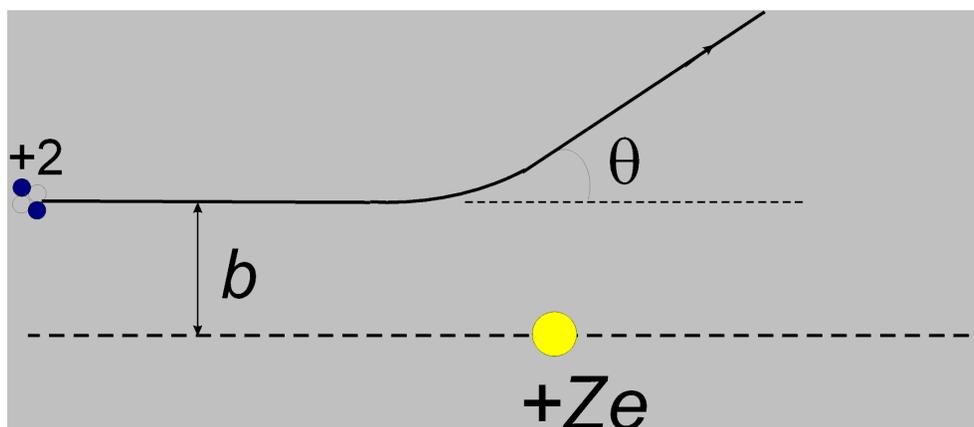
- Allora Rutherford, che non amava la matematica (ma la sapeva usare!), fece un calcolo. Semplice.
- Suppose che la materia positiva fosse concentrata in un nucleo, pesante. E che l'interazione fosse coulombiana.
- **A volte**, la particella alpha **ritornano**. Indietro! secondo la legge:

$$N(\theta) \propto \frac{N_{\alpha} Z^2 e^4}{T^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

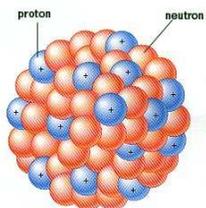


Maggio 2011

Rutherford, cent'anni fa, ebbe fortuna!



- Il calcolo di Rutherford era classico.
In Meccanica Quantistica non ci sono traiettorie.
- Per sistemi "piccoli", la Meccanica è Quantistica.
- Facendo un calcolo quantistico, per una casualità più unica che rara, (ad ogni ordine in teoria delle perturbazioni, o facendo il calcolo esatto), si trova lo stesso risultato classico!
- Se così non fosse, la scoperta del nucleo non sarebbe avvenuta in questo modo!



Maggio 2011

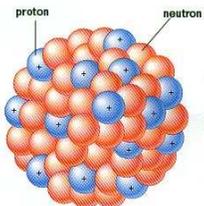
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.9/30

Forse non tutti sanno che...

- Rutherford era neozelandese! Ma è sepolto a Westminster...



- Era molto orgoglioso di essere un fisico:
"All science is either Physics or stamp collecting."
Ma vinse il premio Nobel per la Chimica (1908)!
(per studi sulla Chimica degli elementi radioattivi: $\alpha = \text{He}$ ionizzato)
- Non amava la matematica e i fisici teorici
(e io sono un mezzo teorico...)

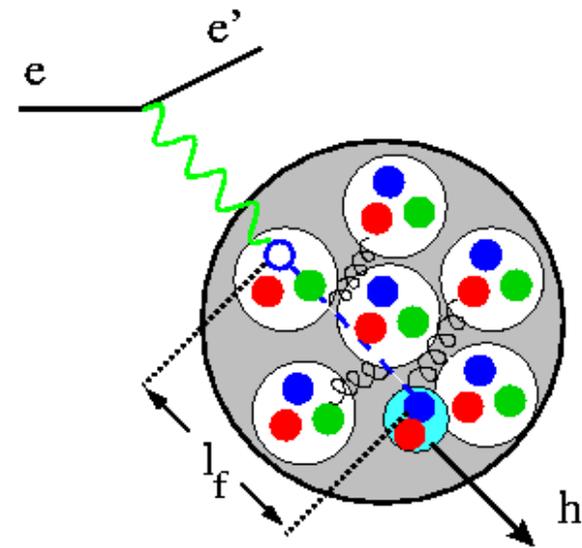
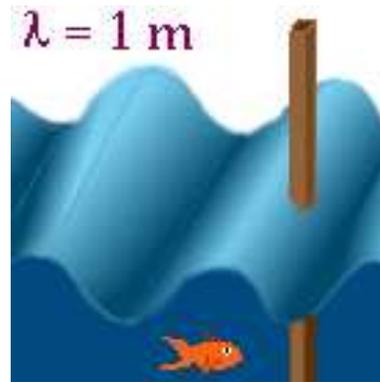


L'eredità di Rutherford

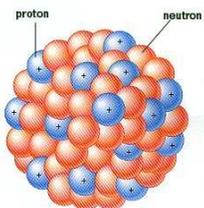
- L'esperimento di Rutherford ci ha insegnato che, per svelare dettagli sempre più fini della struttura della materia, si deve aumentare l'energia della sonda.

Quantisticamente:

$$\lambda \simeq h/p$$



- Ogni volta che si osserva una diffusione a grandi angoli, si evidenzia una sottostruttura

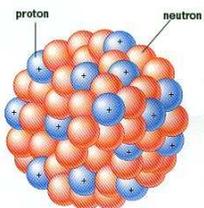


Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.11/30

L'eredità di Rutherford

- Rutherford, nel 1911, con α di $T \simeq 10$ MeV, vedeva il nucleo puntiforme.
Risoluzione: $10^{-14}m$
- Anni '40, $T \simeq 100$ MeV, si vede la struttura in protoni (e neutroni) ($10^{-15}m$)
- Anni '50, $T \simeq 10^3$ MeV= 1 GeV, si vede la struttura del protone (e del neutrone) ($10^{-16}m$)
- Anni '60-'70, $T \simeq 10$ GeV, si vede quark puntiformi nel protone (e nel neutrone) ($10^{-17}m$)
- Oggi, LHC... struttura di quark ed elettroni? ($< 10^{-18}m$)



Scale in m:

$10^{-10}m$

atom

$10^{-14}m$

nucleus

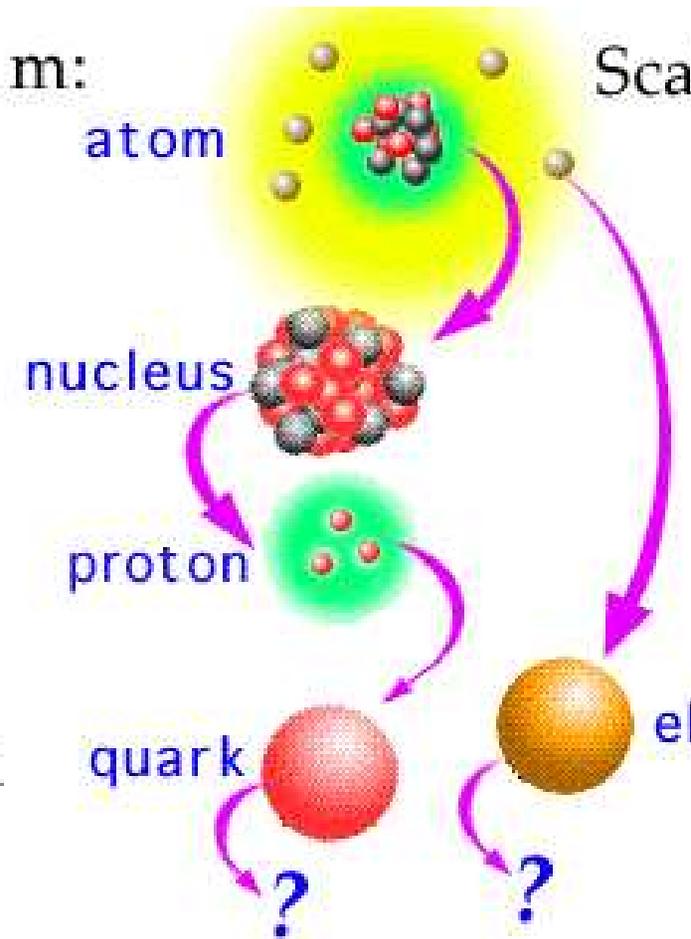
$10^{-15}m$

proton

$\leq 10^{-18}m$

quark

Scale



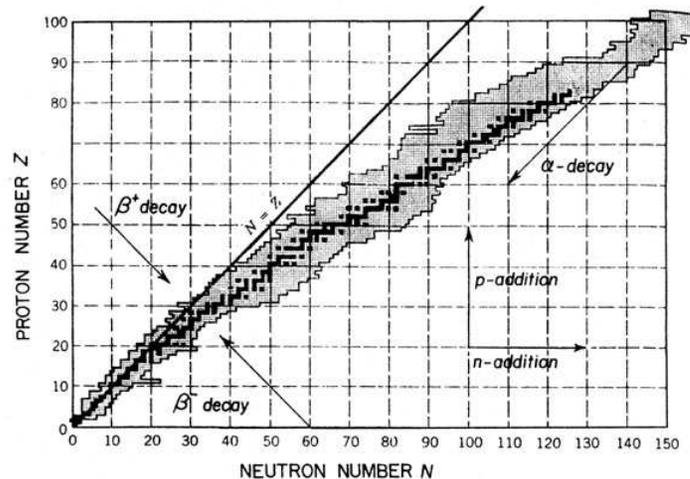
Altra eredità di Rutherford: 7 premi Nobel tra i suoi allievi!!!

Maggio 2011

2011

: la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.12/30

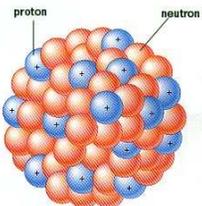
1^a Lezione: Carta dei nuclei stabili



- Si conoscono circa 1000 diversi nuclei. Solo 300 sono **stabili** (in nero) (Numero degli elementi noti, 107). Come si spiega la carta?
- Certamente i neutroni (Chadwick, 1934) danno stabilità.
- Un concetto importante: **Energia di legame, E_A** : energia minima che è necessario fornire a un nucleo con A nucleoni (protoni e neutroni, $A = N + Z$) e massa M_A , per scinderlo nei suoi costituenti (con massa m):

$$M_A c^2 + E_A = m_1 c^2 + \dots m_A c^2$$

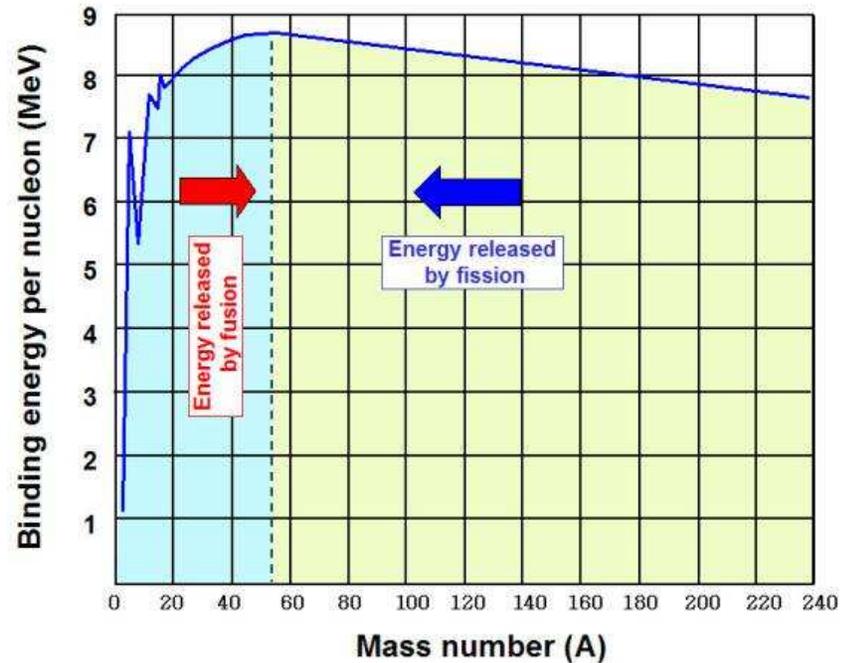
I nuclei più stabili hanno E_A maggiore!



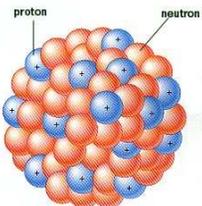
1^a Lezione: l'energia di legame



$E_A/A \simeq 8 \text{ MeV}$
 ($\simeq 1\%$ dell'energia di massa):
 sistemi MOLTO legati
 (atomo, $\simeq 0.001\%$)



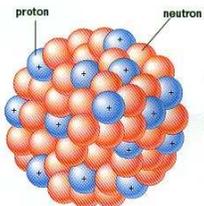
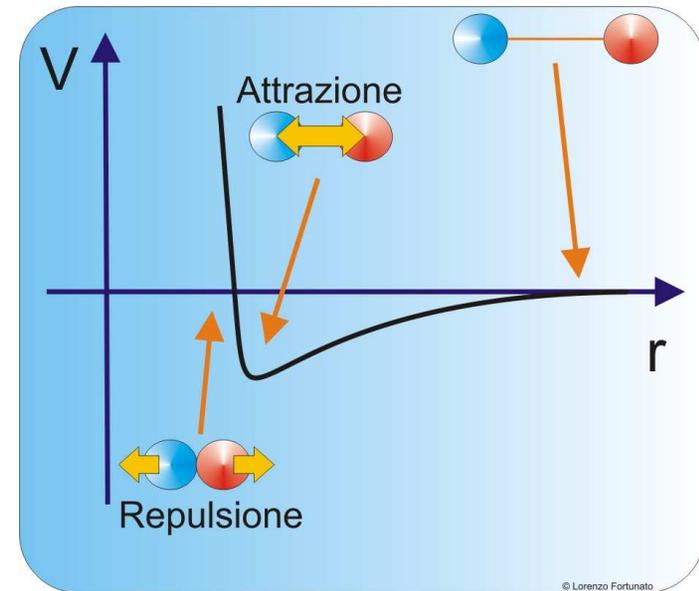
nucleo	E_A [MeV]	E_A/A [MeV]	$E_A/n^{\circ} \text{coppie}$ [MeV]
${}^2_1\text{H}$	$\simeq 2$	$\simeq 1$	$\simeq 2$
${}^4_2\text{He}$	$\simeq 27$	$\simeq 7$	$\simeq 4$
${}^{16}_8\text{O}$	$\simeq 128$	$\simeq 8$	$\simeq 1$



Un nucleone interagisce solo con i suoi vicini
 \Rightarrow **FORZE NUCLEARI A CORTO RAGGIO (10^{-15} m!)**

1^a Lezione: forze nucleari

- La forza è più intensa dove il potenziale è più ripido;
La forza è attrattiva (repulsiva) dove il potenziale è negativo (positivo).
- Le stesse per protone-neutrone, protone-protone... (quasi...)
- Nel CORTO RAGGIO in cui sono attive, più intense della repulsione elettrica tra i protoni (ovvio...)
- CORTO RAGGIO: molto difficili da studiare (esperimenti di urto)



1^a Lezione: l'instabilità nucleare



a), b): nuclei **stabili**

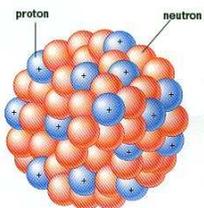
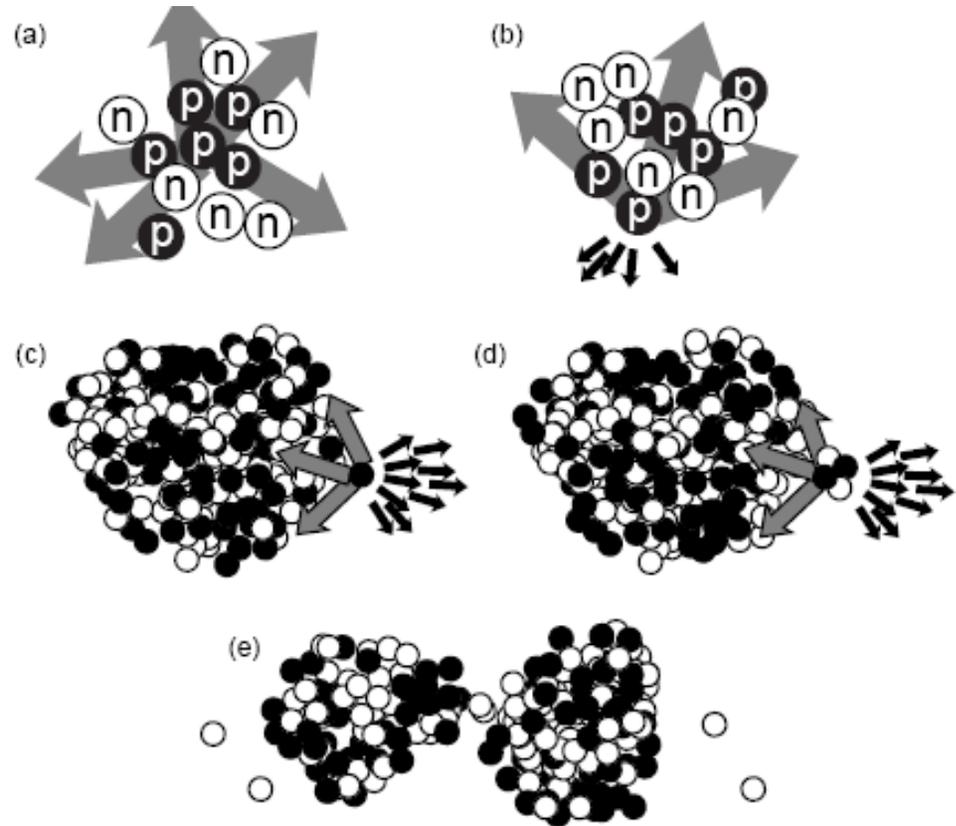


c) emissione di protoni
(rara)

d) emissione α



d) fissione spontanea
(rara)

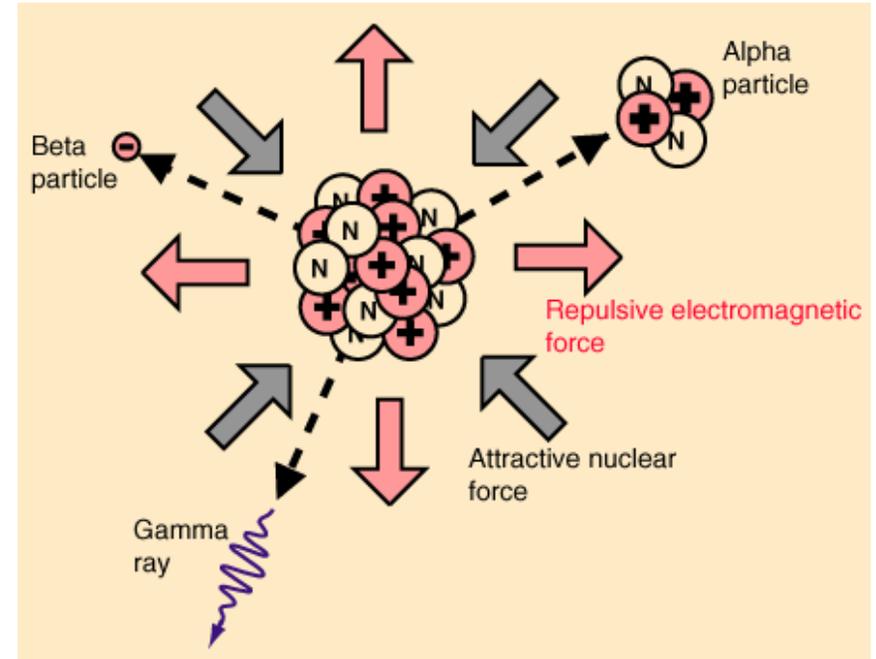


Maggio 2011

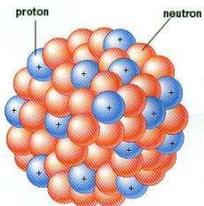
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.16/30

1^a Lezione: Radioattività

- dallo studio del delicato equilibrio nucleare emerge che particelle α (${}^4_2\text{He}$)
 β (elettroni)
 γ (radiazione elettromagnetica di alta energia) sono **NATURALMENTE** emesse



- Sono buone o cattive?
La Natura è madre o matrigna?
- Non chiedetelo a noi...



Maggio 2011

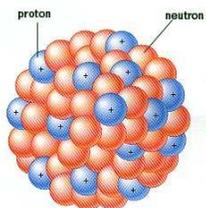
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.17/30

Esempio: Risonanza Magnetica Nucleare

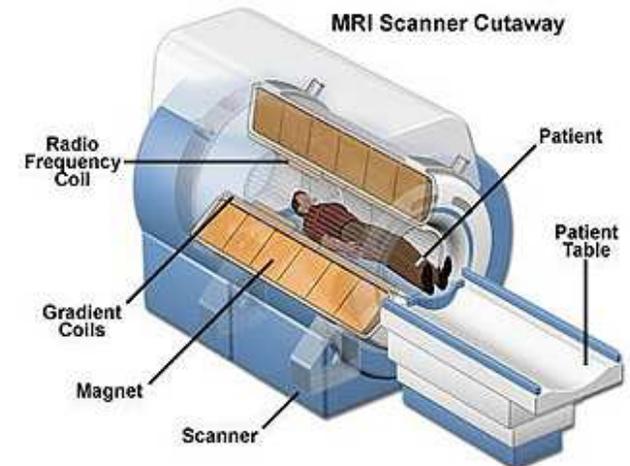
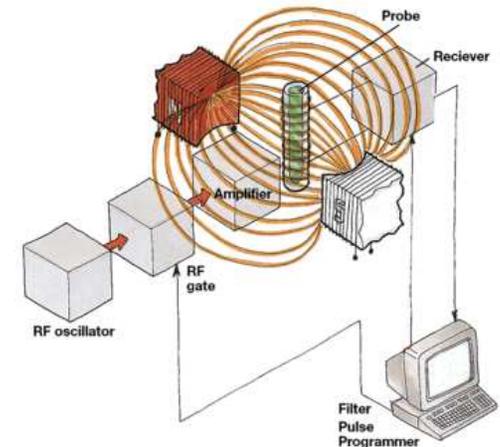
- Rabi (anni '30, Nobel 44)
Studi di fisica nucleare fondamentale
- Bloch & Purcell (anni '40, Nobel 52)
Studi di fisica della materia
- Lauterbur & Mansfield (Nobel MEDICINA 2003)
Applicazioni diagnostiche

Ormai viene chiamata **Risonanza Magnetica.**
E BASTA.

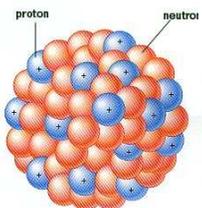
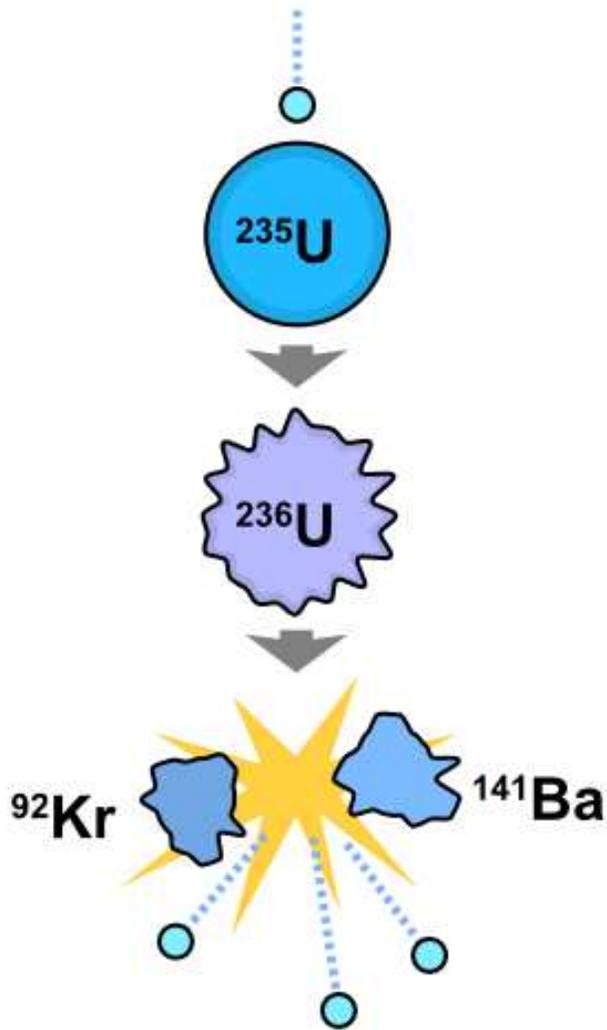
Per non spaventare i pazienti...



Maggio 2011



Chi ha paura della Fisica Nucleare?

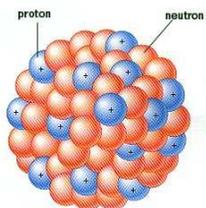
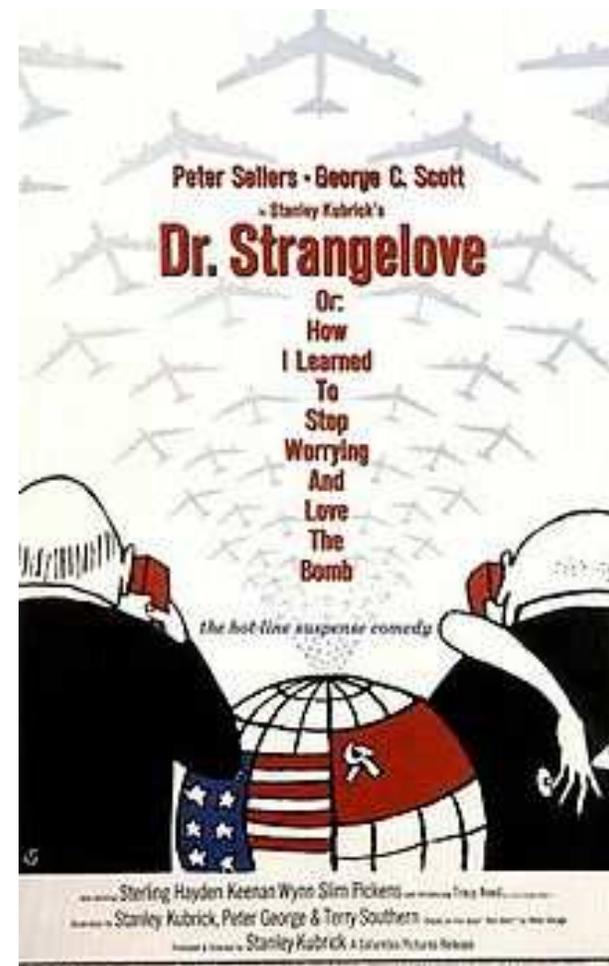


Maggio 2011



Chi ha paura dei Fisici Nucleari?

.. Io non dico che dovremmo
"smettere di preoccuparci"..
Tantomeno che dovremmo "amare la bomba"!
Ma che le cose andrebbero valutate
laicamente, sì, fatemelo dire, per favore



Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.20/30

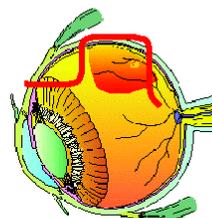
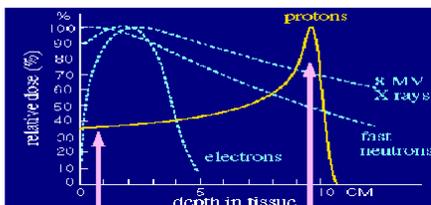
Le radiazioni fanno male? Dipende...

A facility for the treatment of ocular tumours with 62 MeV proton beams

CATANA

Total > 210 patients

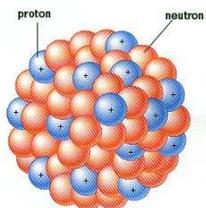
Treatment of choroidal melanoma: about 300 new cases/year in Italy



LNS Superconducting Cyclotron is the only machine in Italy and South Europe used for protontherapy

CATANA è una macchina installata presso i **Laboratori Nazionali del Sud** dell'**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**, a **Catania**.

Rispetto alla radioterapia “tradizionale” (raggi X e γ), l’uso di **protoni**, data la loro **massa**, consente il **deposito localizzato dell’energia**, con minore danno ai tessuti sani. Ideale per il trattamento dei carcinomi del bulbo oculare.



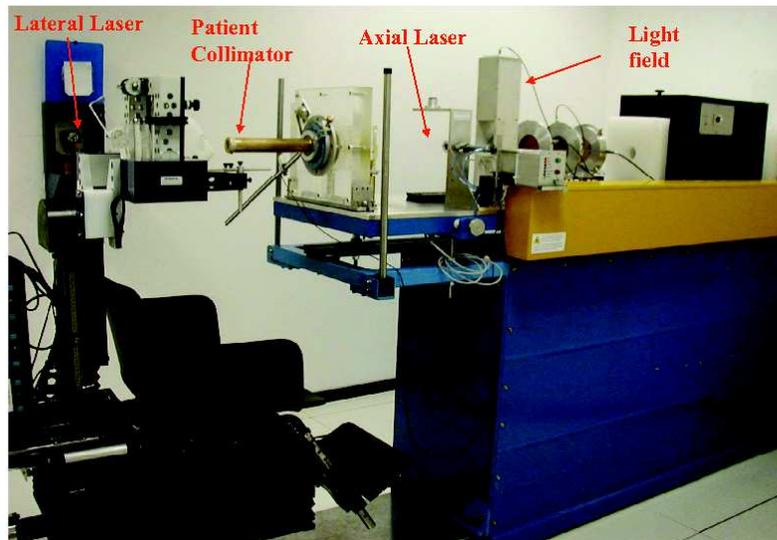
Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.21/30

Le radiazioni fanno male? Dipende...

CATANA

The treatment beam line

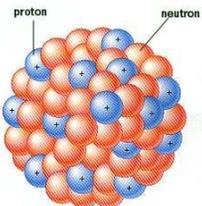


“Quando il fisico nucleare diventa oculista...”

Nel 95 % dei casi, i pazienti guariscono e non perdono l'occhio

Nel 50 % dei casi, mantengono la visione

Numeri importanti, no?



Maggio 2011

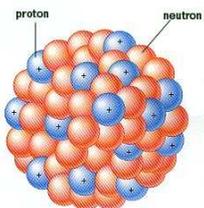
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.22/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

Stato e prospettive delle ricerche sull'energia da fusione

Francesco Romanelli
EFDA Leader and JET Leader
European Fusion Development Agreement (EFDA)
Perugia, 28 Aprile 2011

Le diapositive che seguono sono tratte da un seminario tenuto da **Francesco Romanelli**, leader del maggiore esperimento di fusione a confinamento magnetico al mondo (Oxford (UK), UE), **JET**, qualche settimana fa, da noi, al Dipartimento di Fisica.

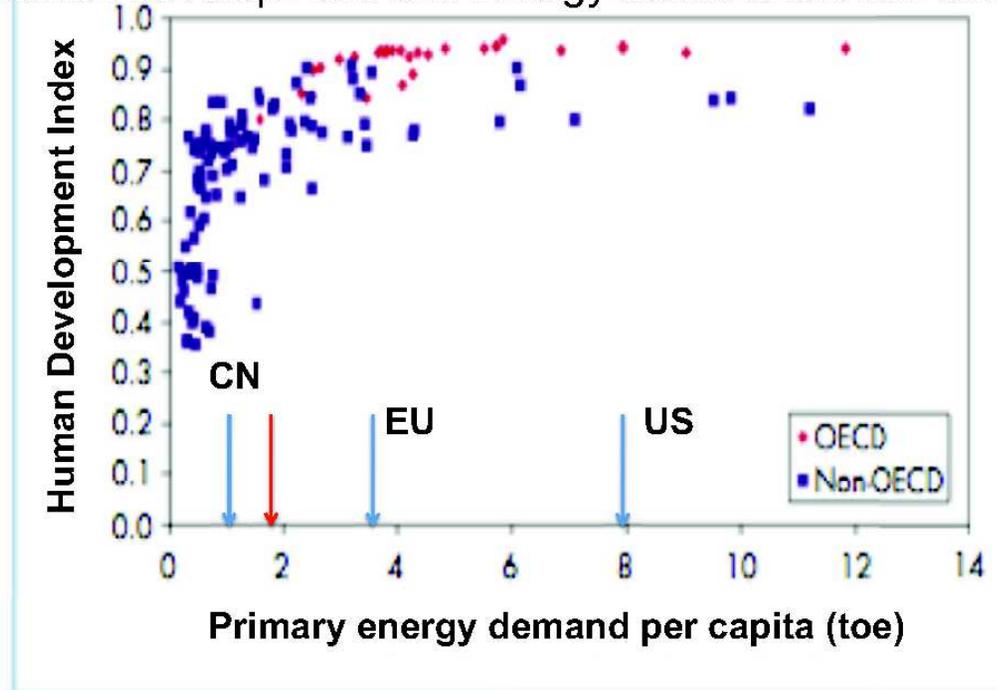


Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.23/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

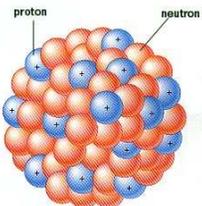
Human development and Energy demand are correlated



Source: IEA analysis; UNDP (2004).

La qualità, e la **durata** stessa della vita crescono con l'energia disponibile (fino a saturazione).

Un paese in via di sviluppo deve disporre di più energia: entro il 2050, la richiesta di energia raddoppierà



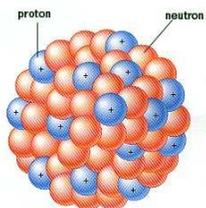
Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.24/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...



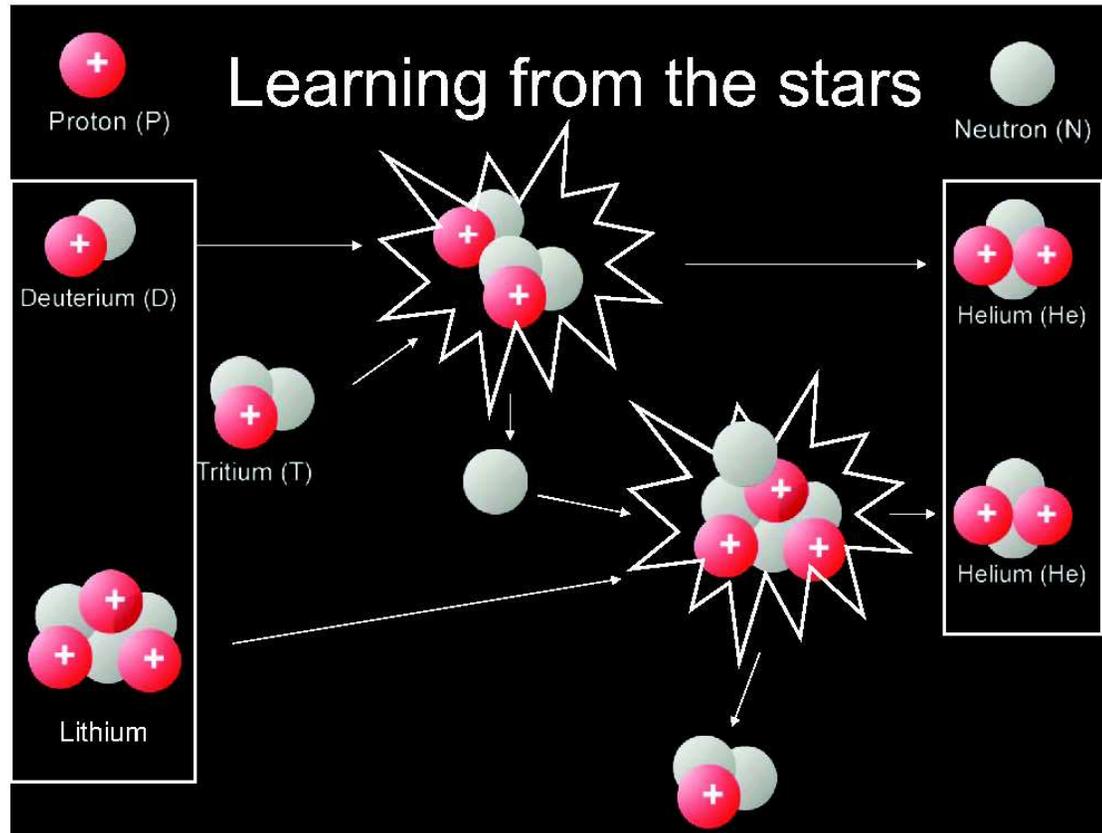
La Fusione nucleare è una fonte illimitata e disponibile per tutti, non produce gas serra, è intrinsecamente sicura, non produce scorie... **Ancora un sogno?**



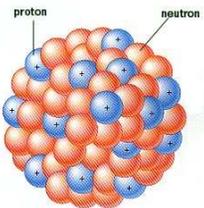
Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.25/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...



La reazione di fusione è la Deuterio-Trizio (catalizzata dal Litio).
Nel Sole avviene un'altra catena di reazioni (catena p-p).
Ma il Sole è "poco efficiente" (1 m^3 di Sole produce 100 W)!



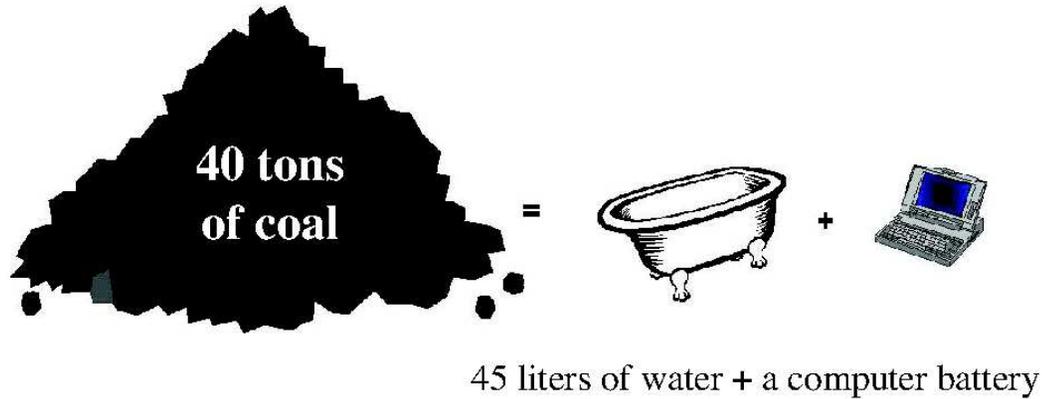
Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.26/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

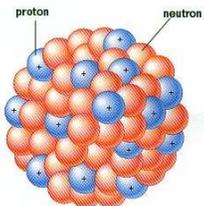


Electricity consumption for 30 years
by a single EU person.



In un litro di acqua di mare ci sono:

- * Circa 24 mg di deuterio;
- * Circa 0.2 - 0.3 mg di litio;

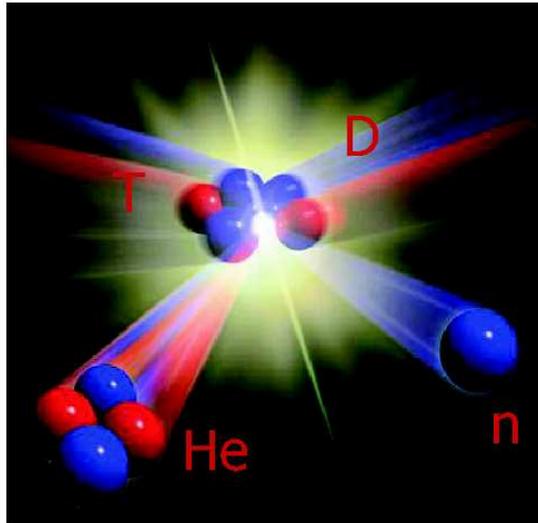


Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.27/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

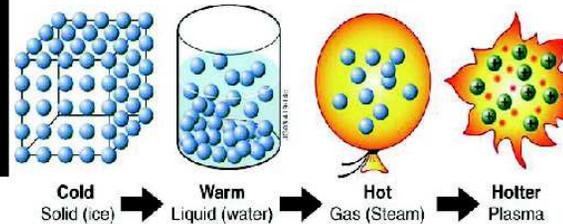
How to make fusion?



Reacting nuclei are charged
⇒ they repel each other

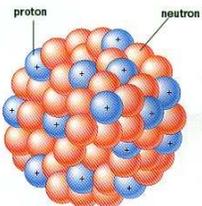
Heat nuclei up to 200 Million °C

Matter is in the *plasma* state



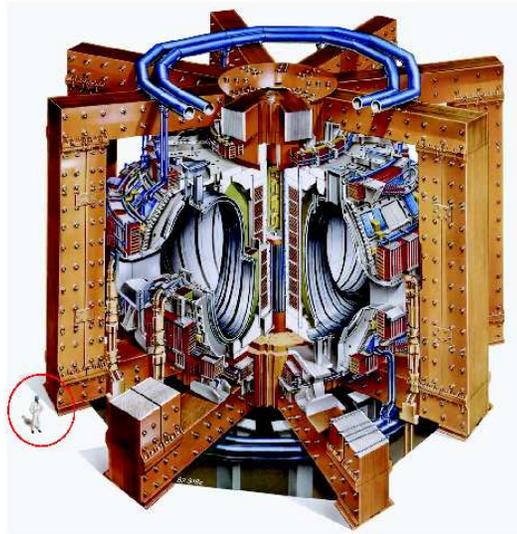
* I nuclei, per fondersi, devono giungere molto vicini (ricordate la lezione? Le interazioni sono a corto raggio!).

* Ma sono carichi! Si respingono elettricamente!!!



L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

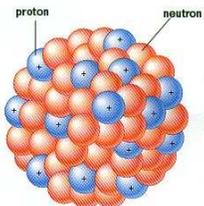
How to confine a plasma?



**Joint European Torus
(JET)**

- **Intense magnetic field**
(100000 x the earth magnetic field)
- **Toroidal shape**
- In addition:
 - External heating methods
 - Advanced diagnostic systems

JET (Oxford (UK), UE) è il maggiore esperimento di fusione nucleare a confinamento magnetico al mondo

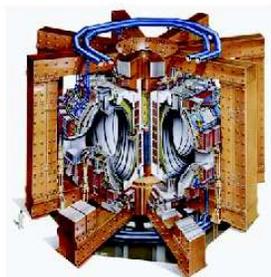


Maggio 2011

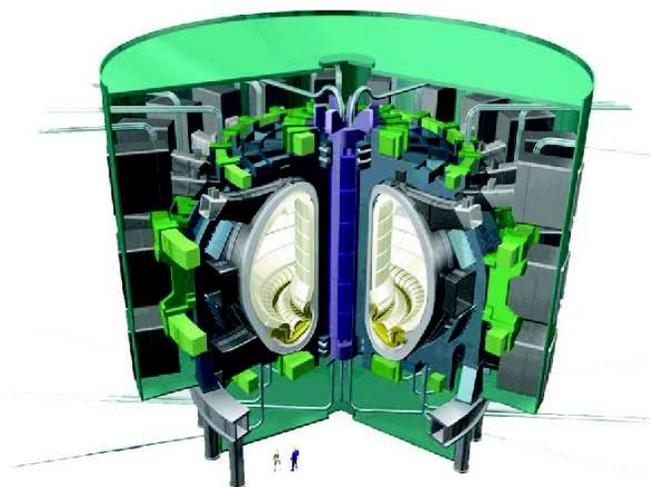
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.29/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

How to confine a plasma?

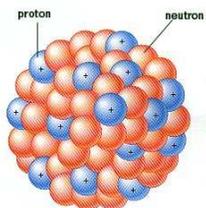


Joint European Torus
(JET)



ITER

Il progetto ITER sarà un'evoluzione di JET... Più GRANDE

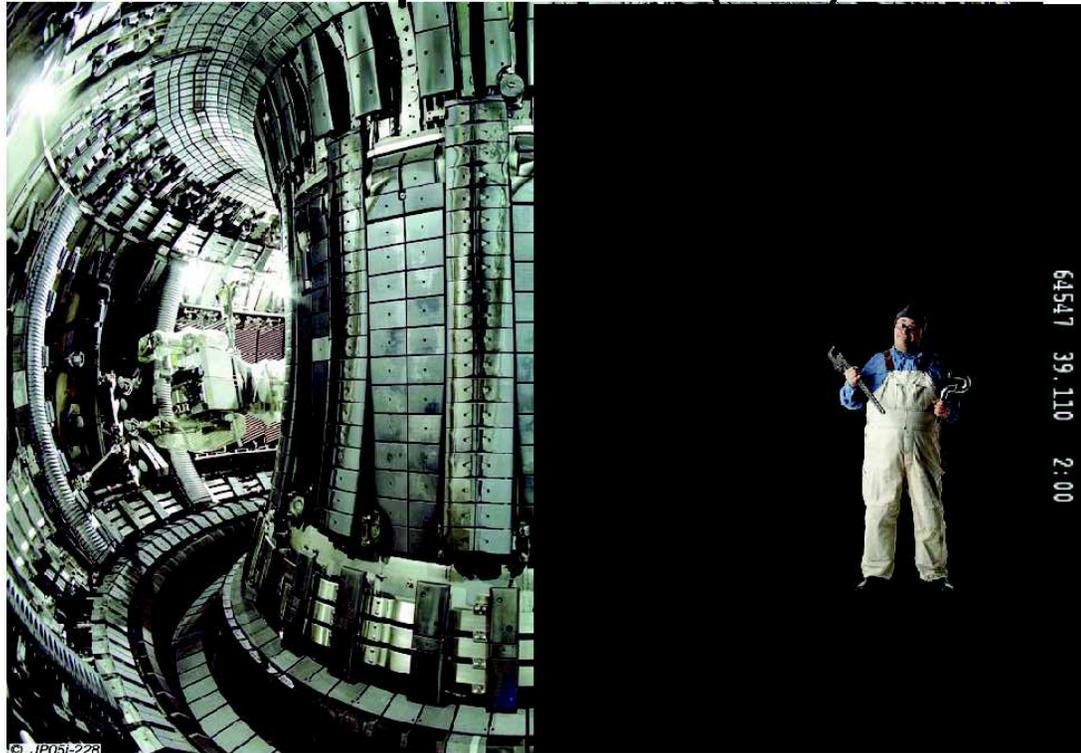


Maggio 2011

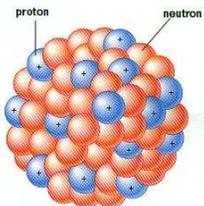
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.30/30

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

The Joint European Torus (JET)



Queste sono le dimensioni, già ragguardevoli, di JET...

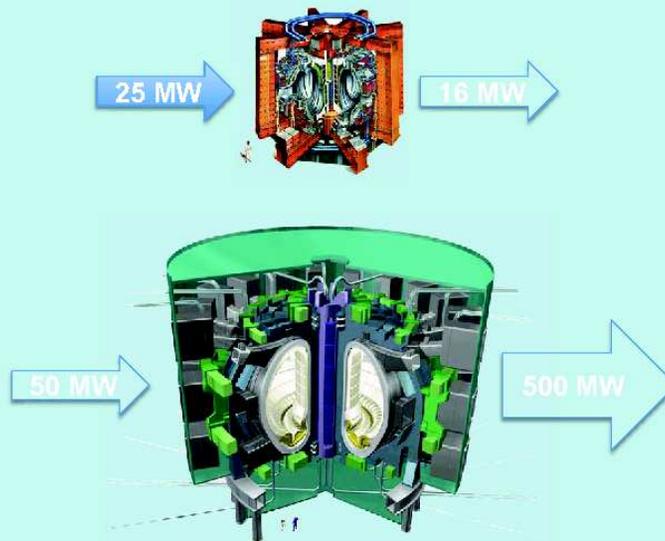


Maggio 2011

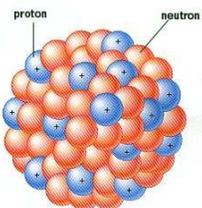
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.31/36

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

Challenge 2: Reduce the energy losses



Ma è necessario costruire macchine più grandi. JET consuma più di quanto produce: l'energia prodotta aumenta con il volume, l'energia persa, con la superficie. Macchine più grandi sono vantaggiose.



Maggio 2011

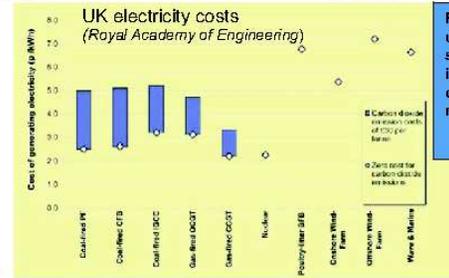
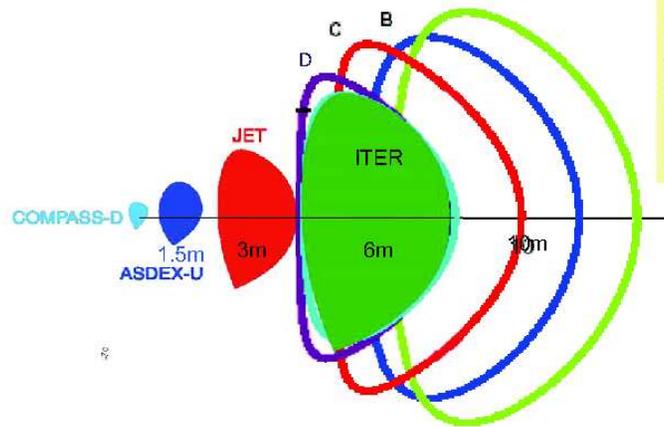
2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.32/36

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

Fusion Power Plant



Step ladder approach_A



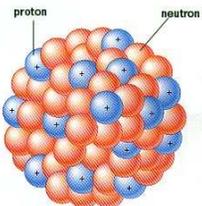
Cost of electricity from fusion expected to be competitive with other sources (IEA Levelised Cost Approach)

ITER is a moderate extrapolation from JET (x2)

The Power Plant (1.5GWe) expected to be a moderate extrapolation from ITER (x1-1.5) depending on the assumptions on physics and technology solutions (A=conservative; D=advanced)

EFDA Power Plant Conceptual Study

Una centrale a fusione sarà un po' più grande...

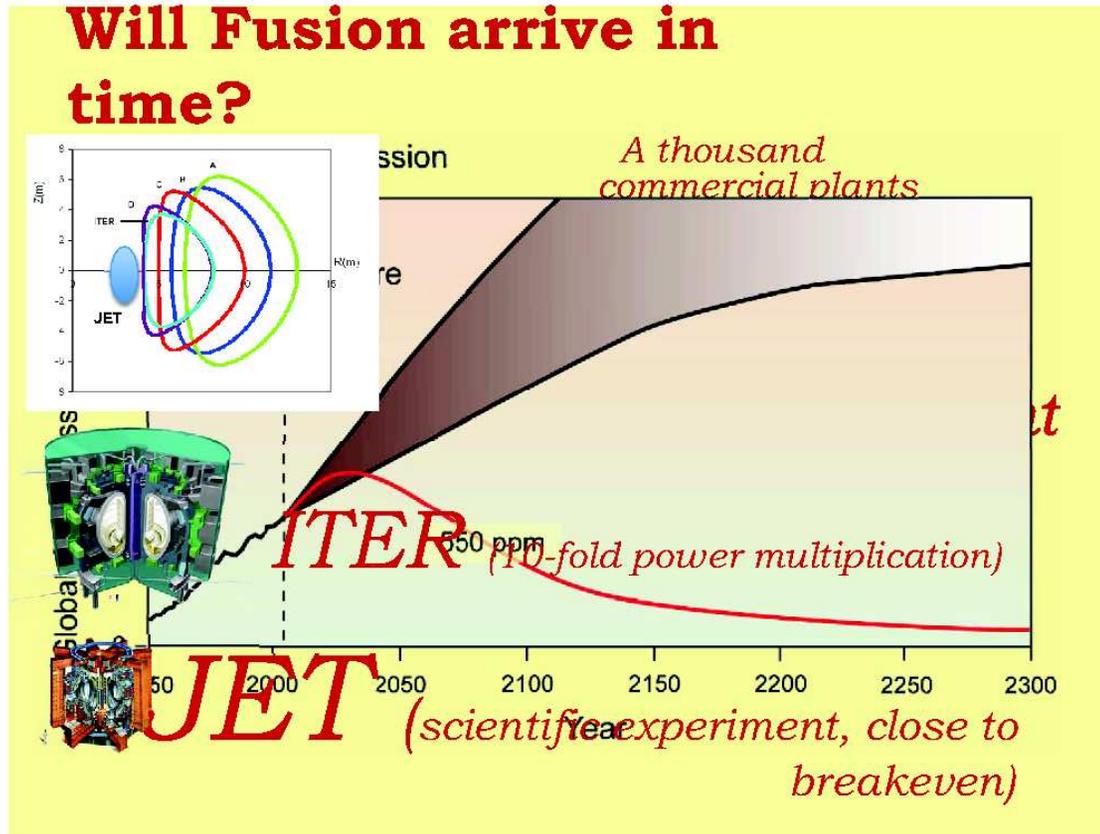


Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.33/36

L'energia nucleare è pericolosa? Dipende...

Will Fusion arrive in time?

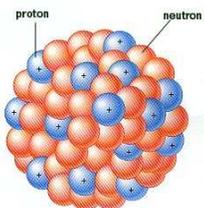


JET, un esperimento scientifico, ha avuto successo.

ITER sarà produttivo nel 2026...

Un prototipo di centrale commerciale? Nel 2040, forse...

Se si finanziasse un po' più...

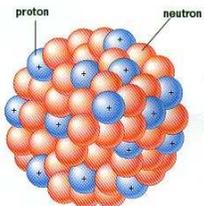


Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.34/36

Conclusioni

- **Il nucleo dell'atomo, come tutte le cose di natura, è bello**
- **La Fisica Nucleare è bella**
- **La Fisica Nucleare potrebbe “salvarci”**
- **Noi, comunque, la studiamo perchè è bella!
(I Fisici si divertono, sempre!)**



Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.35/36

Divulgazione: una sfida perduta?

È certo ora di terminare:

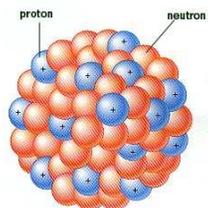
*“Se un seminario dura tre quarti d’ora,
nel primo ascoltano tutti,
nel secondo solo gli specialisti,
nel terzo... Neanche chi parla!”*

E. Fermi



Troppo divulgativo? Domande! Ora, oppure a:

sergio.scopetta@pg.infn.it



Maggio 2011

2011 : la Fisica Nucleare compie cent'anni – p.36/3