

# Indagini sul centro del sole e sulla creazione di particelle di materia

*Ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso si investiga l'infinitamente grande e l'infinitamente piccolo, proseguendo sulla traccia di studi antichi. Tra i temi di studio più interessanti ci sono i due che ci accingiamo a presentare, che sono collegati da un curioso ed inaspettato fattore comune: il neutrino.*

Francesco VISSANI, Laboratori del Gran Sasso  
Programma INFN per Docenti, 18 ottobre 2022

# l'antica Grecia su terra e corpi celesti

<b>Parmenide</b>	<i>510/540 - 450 aC</i>	Terra sferica
<b>Anassagora</b>	<i>496 - 428 aC</i>	costituzione corpi celesti
<b>Aristarco</b>	<i>310 - 230 aC</i>	eliocentrismo
<b>Eratostene</b>	<i>267 - 194 aC</i>	misura accurata Terra
<b>Ipparco</b>	<i>190 - 120 aC</i>	trigonometria, astronomia

# l'antica Grecia sulla materia

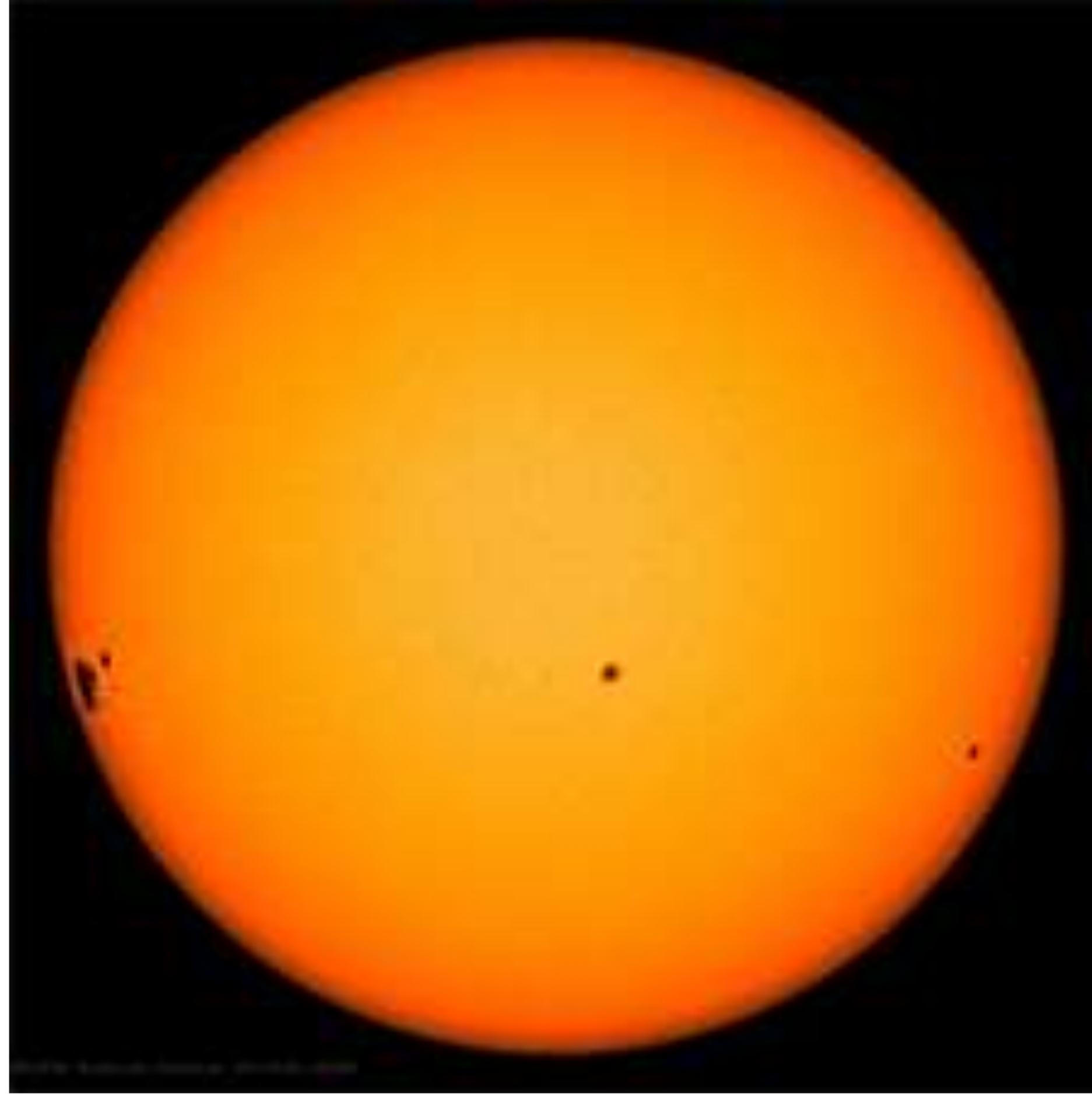
<b>Empedocle</b>	<i>V sec. aC</i>	pluralità elementi
<b>Leucippo</b>	<i>V sec. aC</i>	atomi ( <i>arché</i> )
<b>Euclide</b>	<i>IV sec. aC</i>	ottica
<b>Ctesibio</b>	<i>III sec. aC</i>	pneumatica
<b>Archimede</b>	<i>287 - 212 aC</i>	idrostatica, meccanica
<b>Filone</b>	<i>280 - 220 aC</i>	meccanica, automi

chimica? - metallurgia, colori, corde e tessuti, tecnologie alimentari (reperimento, conservazione, distribuzione, trasformazione), medicina e farmacologia ...

# **1:- le osservazioni del centro del sole**

# IL SOLE

*di cosa è fatto?*  
*come funziona?*  
*quanto durerà?*



$$E = L \times T$$

**energia  
spesa dal Sole**

***E***

**=**

***L***

**×**

***T***

**età  
del Sole**

**potenza erogata  
(luminosità solare)**

# ipotesi sulla natura dell'energia del sole

- se il Sole letteralmente **bruciasse** - p.e., benzina e ossigeno - l'età non supererebbe qualche migliaio di anni

# ipotesi sulla natura dell'energia del sole

- se il Sole letteralmente **bruciasse** - p.e., benzina e ossigeno - l'età non supererebbe qualche migliaio di anni
- se il calore del Sole venisse da **comete e meteore**, come pensava Kelvin nell'ottocento, potrebbe avere una età nell'ordine di decine di milioni di anni

# ipotesi sulla natura dell'energia del sole

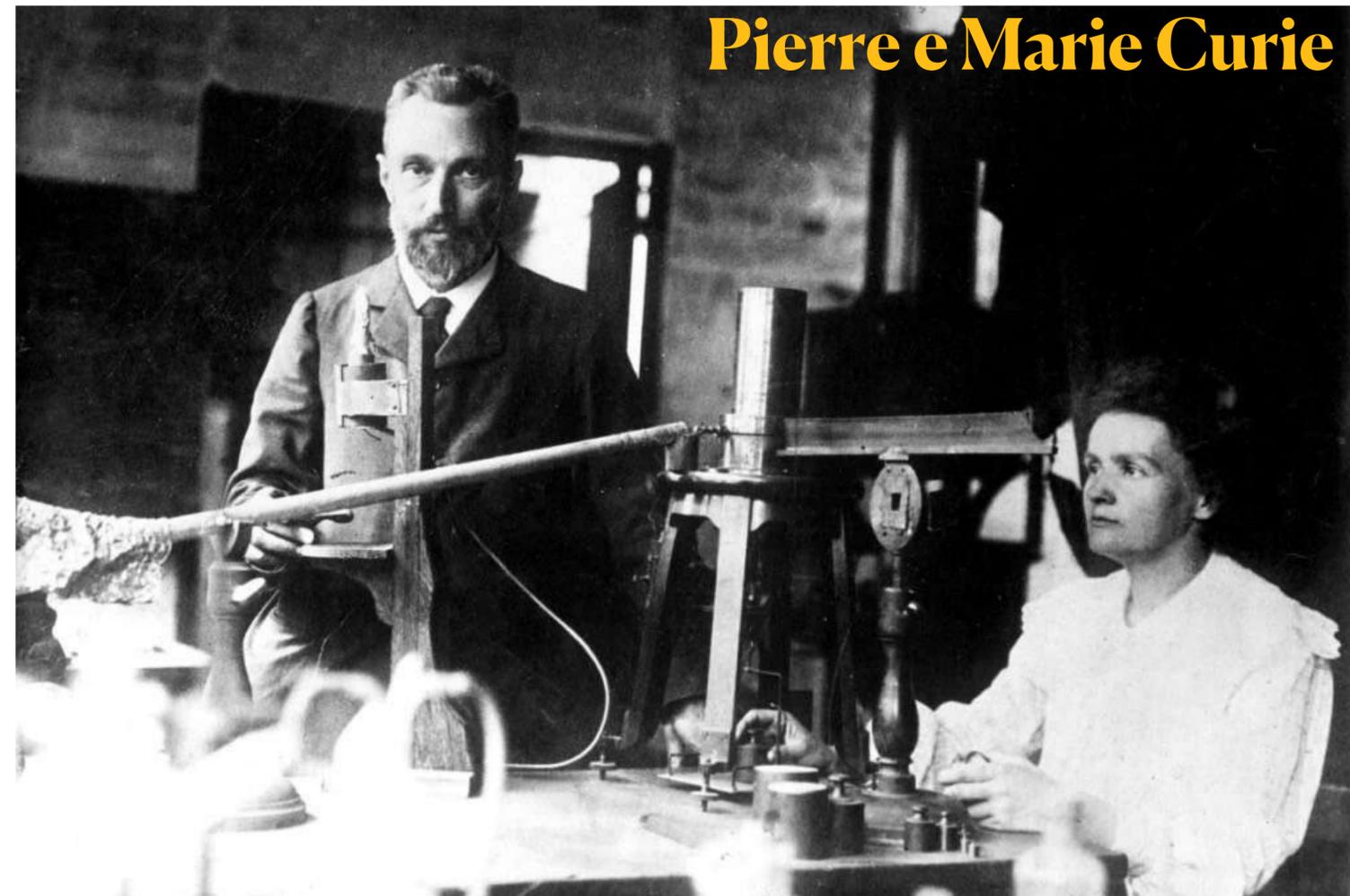
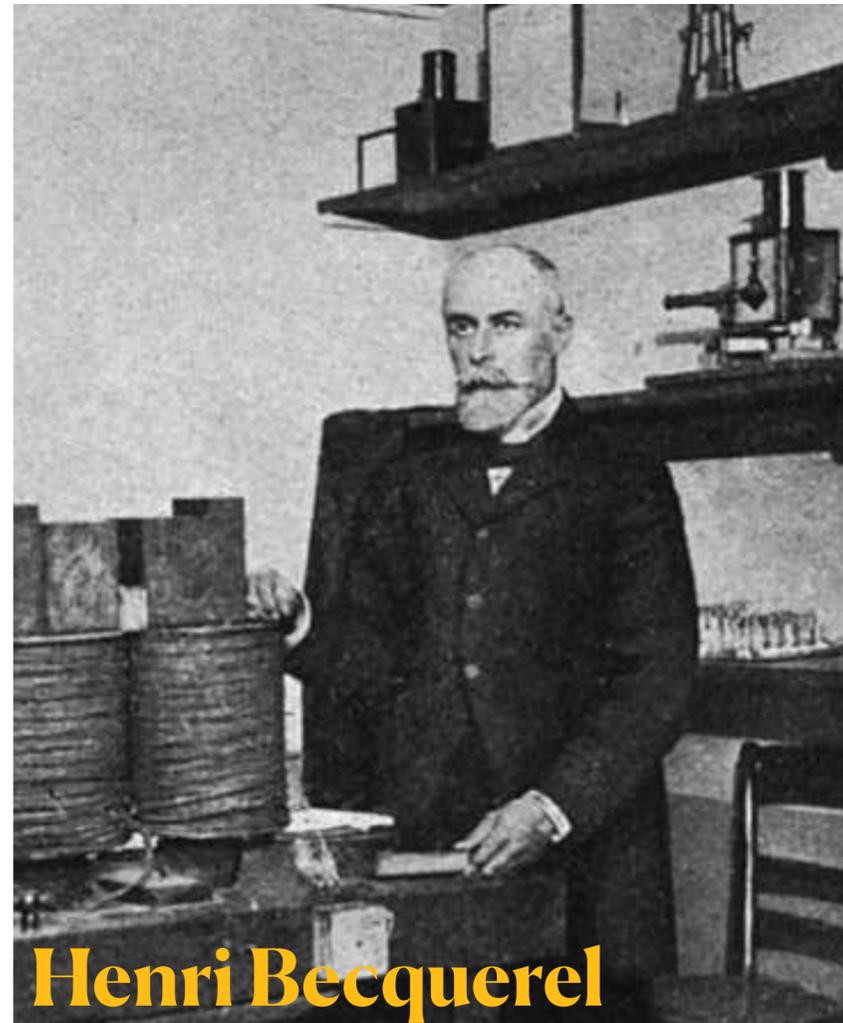
- se il Sole letteralmente **bruciasse** - p.e., benzina e ossigeno - l'età non supererebbe qualche migliaio di anni
- se il calore del Sole venisse da **comete e meteore**, come pensava Kelvin nell'ottocento, potrebbe avere una età nell'ordine di decine di milioni di anni
- ma, a detta di Darwin, i processi geologici e biologici sulla Terra hanno impiegato non meno di diverse **centinaia di milioni** di anni

# ipotesi sulla natura dell'energia del sole

- se il Sole letteralmente **bruciasse** - p.e., benzina e ossigeno - l'età non supererebbe qualche migliaio di anni
- se il calore del Sole venisse da **comete e meteore**, come pensava Kelvin nell'ottocento, potrebbe avere una età nell'ordine di decine di milioni di anni
- ma, a detta di Darwin, i processi geologici e biologici sulla Terra hanno impiegato non meno di diverse **centinaia di milioni** di anni

*a fine '800, si capisce che Darwin aveva ragione (e Kelvin torto)*

**si scoprono i fenomeni radioattivi**  
**che hanno energie enormemente superiori a quelle chimiche**



# “il giorno del giudizio è rimandato”

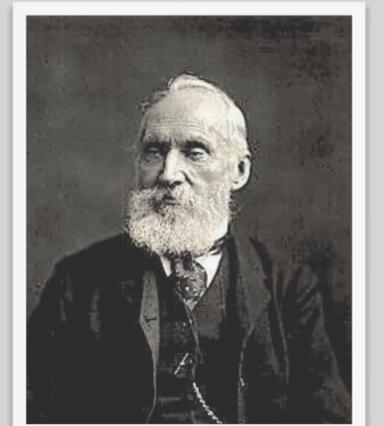
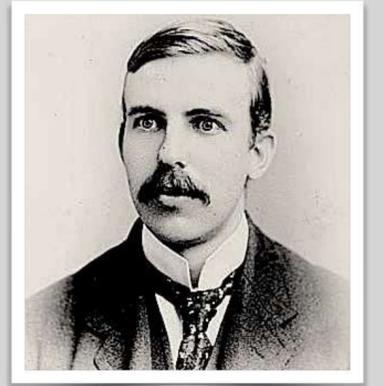
## The New York Times

### DOOMSDAY POSTPONED.

Prof. RUTHERFORD, in his article in the February Harper's Magazine on "Radium—the Cause of the Earth's Heat," says that Lord KELVIN's remark that inhabitants of the earth cannot continue to enjoy the light and heat essential to their life for many million years longer became "almost prophetic" when KELVIN added, "unless sources now unknown to us are prepared in the great storehouse of creation." Previous to the discovery of radium Lord KELVIN showed that ordinary chemical action was not sufficient to explain the presence of the in-

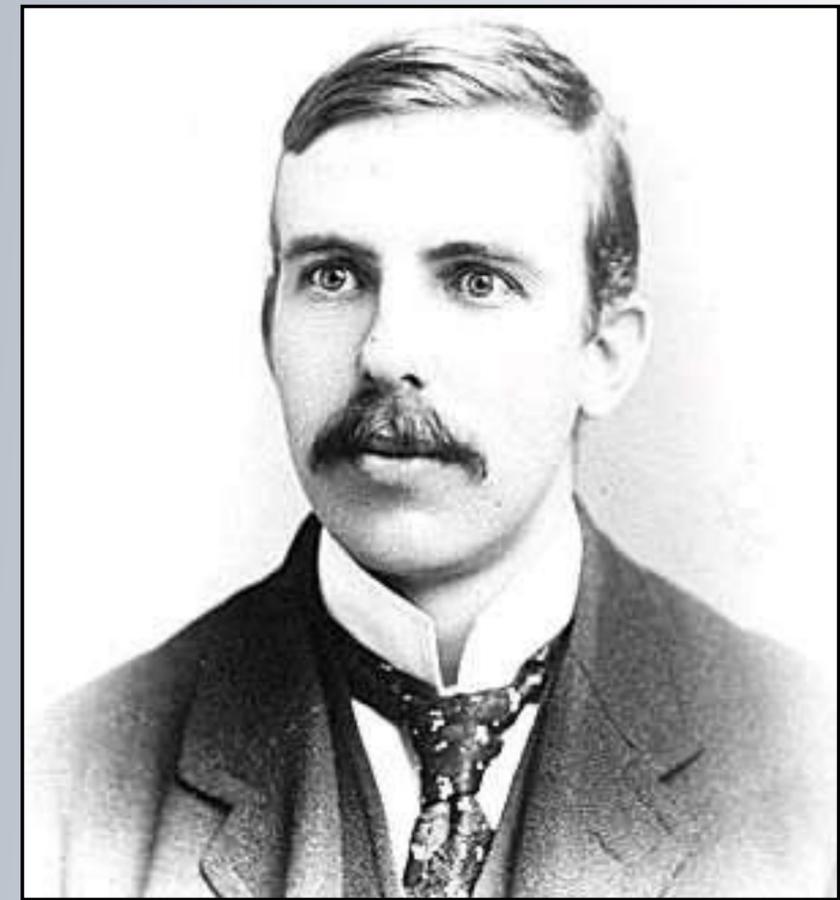
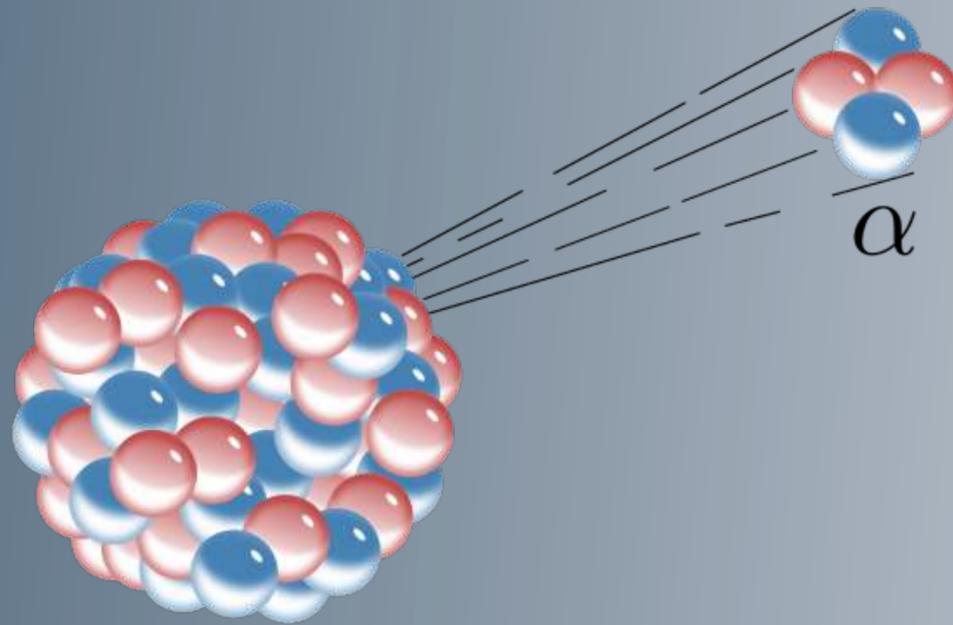
Jan 29, 1905

*Il prof. Rutherford, nel suo articolo sul "Radio: la ragione del calore terrestre", sostiene che le parole di Lord Kelvin, per cui non potremo continuare a godere di luce e calore per molti milioni di anni, diventano "quasi profetiche" quando aggiunge "a meno che non siano state approntate fonti d'energia sconosciute nel grande scrigno della creazione".*





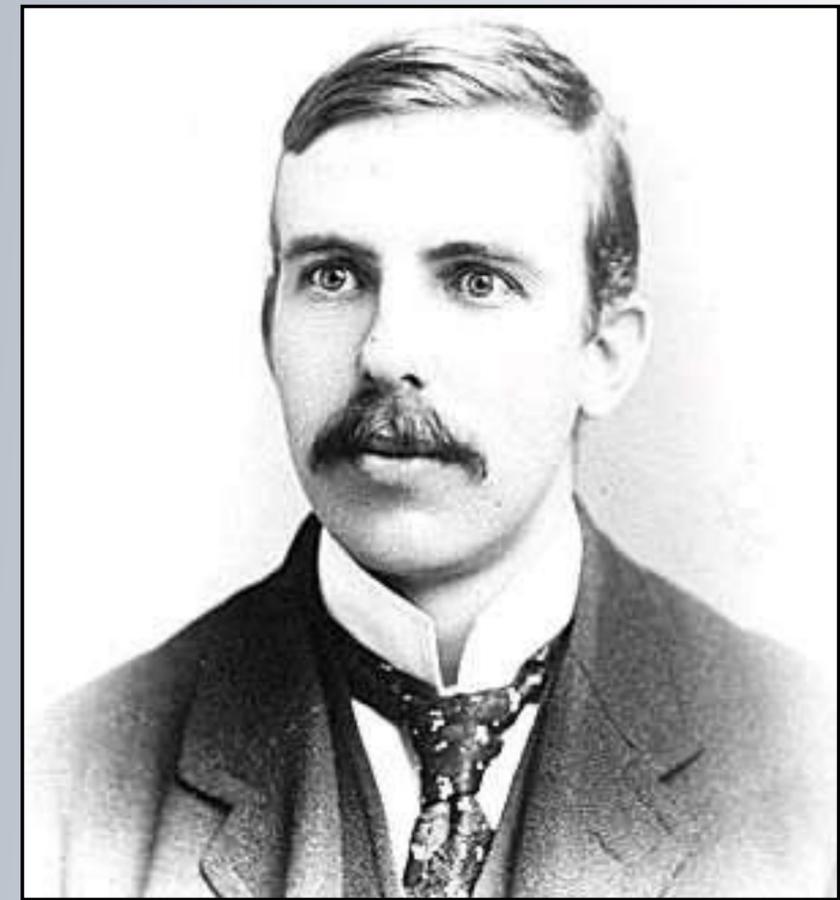
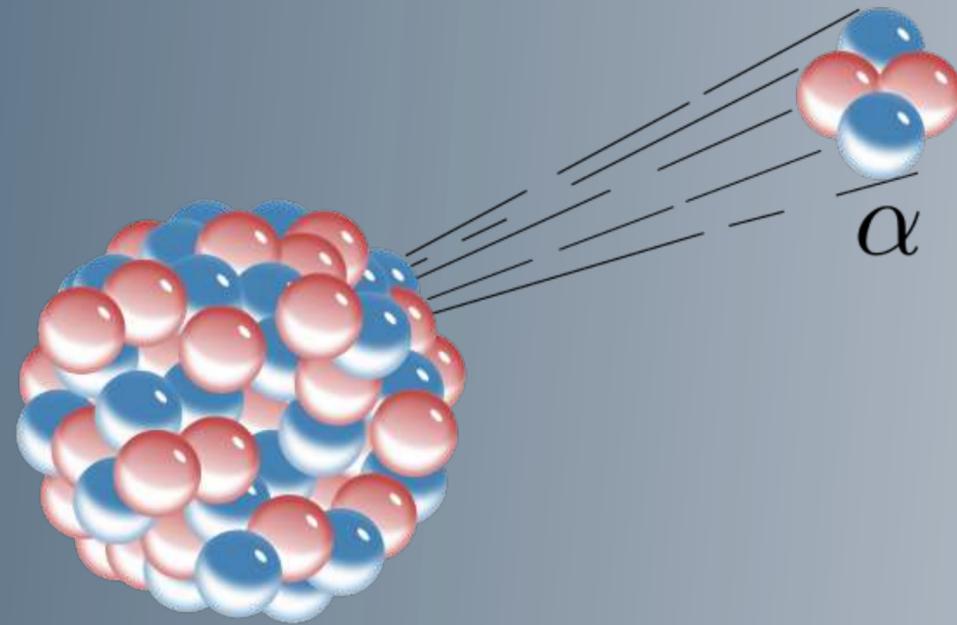
F. Soddy



E. Rutherford



F. Soddy

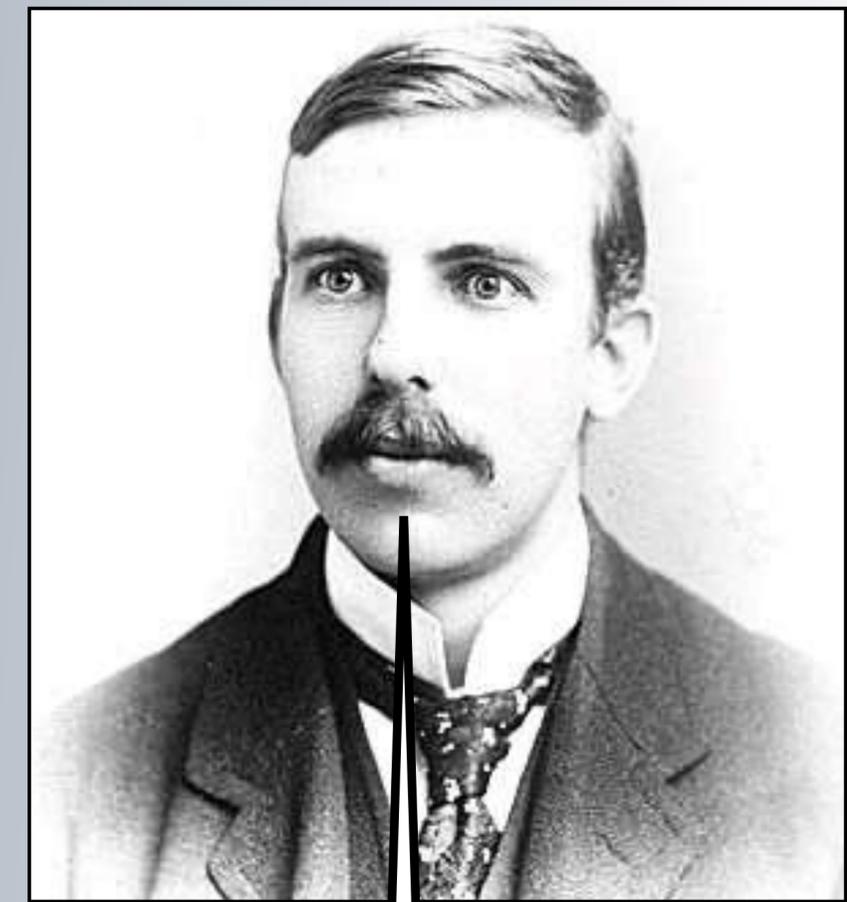
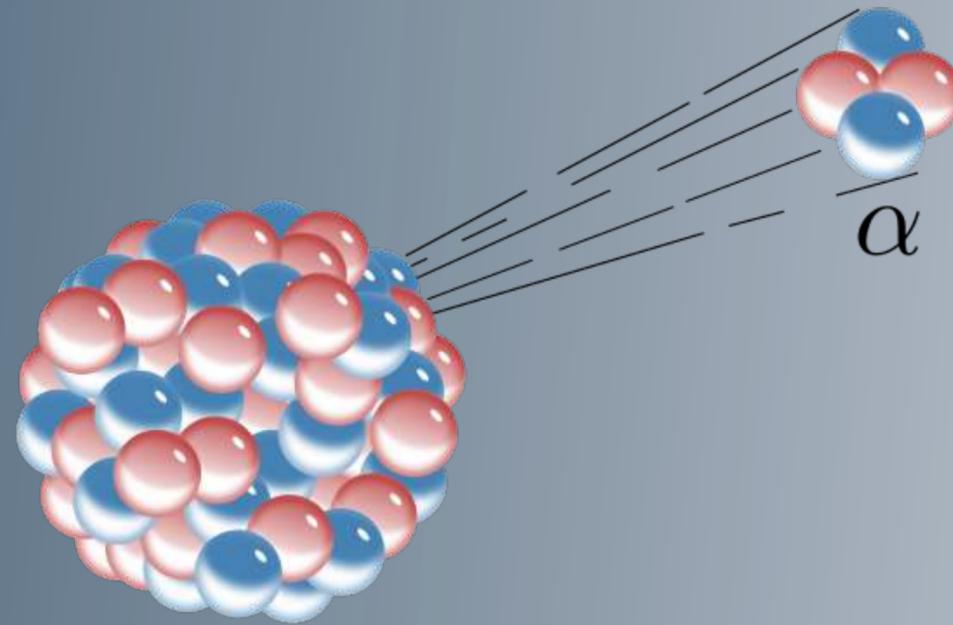


E. Rutherford

“Rutherford, ma  
questa è una  
trasmutazione!”



F. Soddy



E. Rutherford

“Rutherford, ma questa è una trasmutazione!”

“Non chiamarla così, Soddy, per la miseria. Ci chiameranno *alchimisti* e ci faranno fuori!”

*The*  
**NEWER  
ALCHEMY**

BY  
LORD  
RUTHERFORD

---

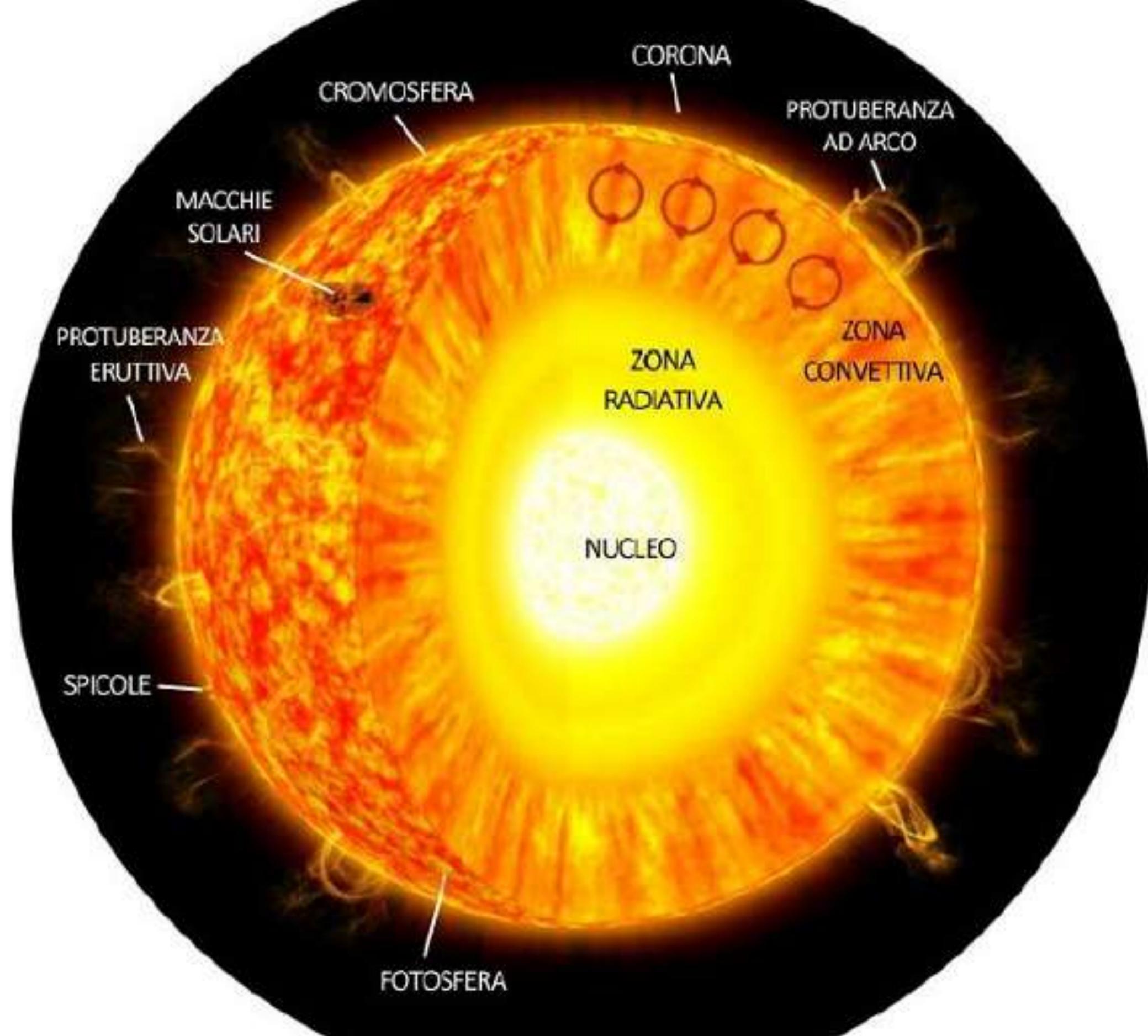
The TRANSMUTATION OF ELEMENTS, how it  
has been accomplished, and what it means

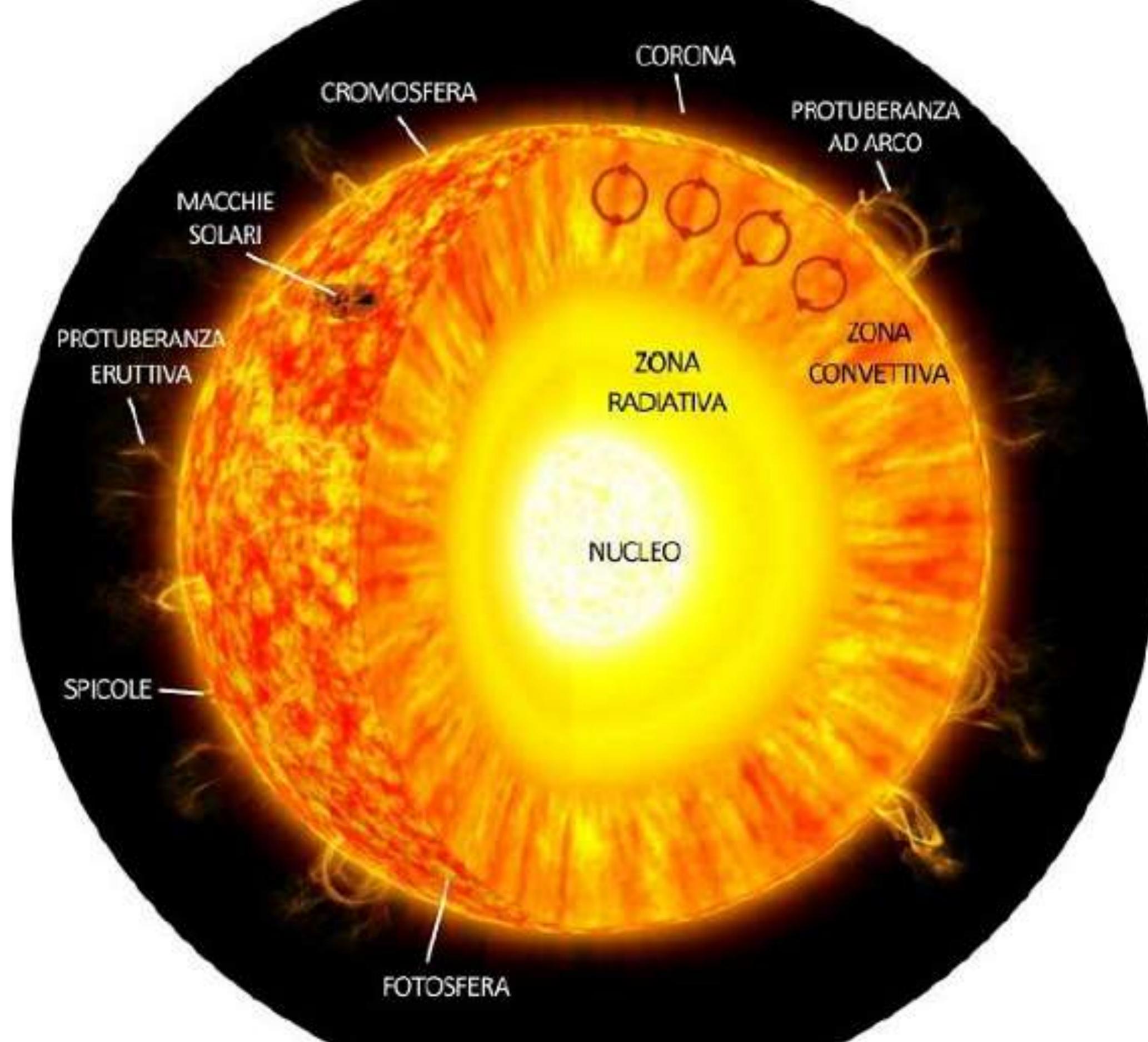
---

CAMBRIDGE

**1937**

**dalla conoscenza del nucleo  
dell'atomo abbiamo ottenuto  
un modello del sole  
(e delle altre stelle)**





NB Il centro del Sole viene chiamato "nucleo" dagli astronomi. Spero che questo non confonda nessuno; durante tutto il seminario rimpiazzo questo termine tecnico col termine "centro del sole", e parlo di nucleo sempre e solo in riferimento al nucleo dell'atomo

# Il modello del Sole

Dalla fisica del nucleo è stato sviluppato un modello teorico del centro del sole.

L'accurato modello di John Bahcall (anni '60) ha svolto un ruolo assai importante.



AUG 26 1964

BNL 8217

MASTER

## On the Problem of Detecting Solar Neutrinos

JOHN N. BAHCALL\*

California Institute of Technology, Pasadena, California

and

RAYMOND DAVIS, JR.†

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

### LEGAL NOTICE

This report was prepared as an account of Government sponsored work. Neither the United States, nor the Commission, nor any person acting on behalf of the Commission: A. Makes any warranty or representation, expressed or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this report, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report may not infringe upon privately owned rights; or B. Assumes any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report. As used in the above, "person acting on behalf of the Commission" includes any employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor, to the extent that such employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor prepares, writes, or provides access to, any information pursuant to his employment or contract with the Commission, or his employment with such contractor.

The evidence supporting the theory of nuclear energy generation in stars is indirect. This evidence is based largely upon observations of electromagnetic radiation emitted from the surface of stars and upon theoretical stellar models that have not been subject to independent experimental tests. It is interesting, therefore, to try to think of a way of testing directly the theory of stellar energy generation in stars. In order to make such a test, one would like to be able to "see"

# Il modello del Sole

Dalla fisica del nucleo è stato sviluppato un modello teorico del centro del sole.

L'accurato modello di John Bahcall (anni '60) ha svolto un ruolo assai importante.



AUG 26 1964

BNL 8217

MASTER

## On the Problem of Detecting Solar Neutrinos

JOHN N. BAHCALL\*

California Institute of Technology, Pasadena, California

and

RAYMOND DAVIS, JR.†

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

### LEGAL NOTICE

This report was prepared as an account of Government sponsored work. Neither the United States, nor the Commission, nor any person acting on behalf of the Commission:  
A. Makes any warranty or representation, expressed or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this report, or that the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report may not infringe upon privately owned rights; or  
B. Assumes any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method, or process disclosed in this report.  
As used in the above, "person acting on behalf of the Commission" includes any employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor, to the extent that such employee or contractor of the Commission, or employee of such contractor prepares, writes, or provides access to, any information pursuant to his employment or contract with the Commission, or his employment with such contractor.

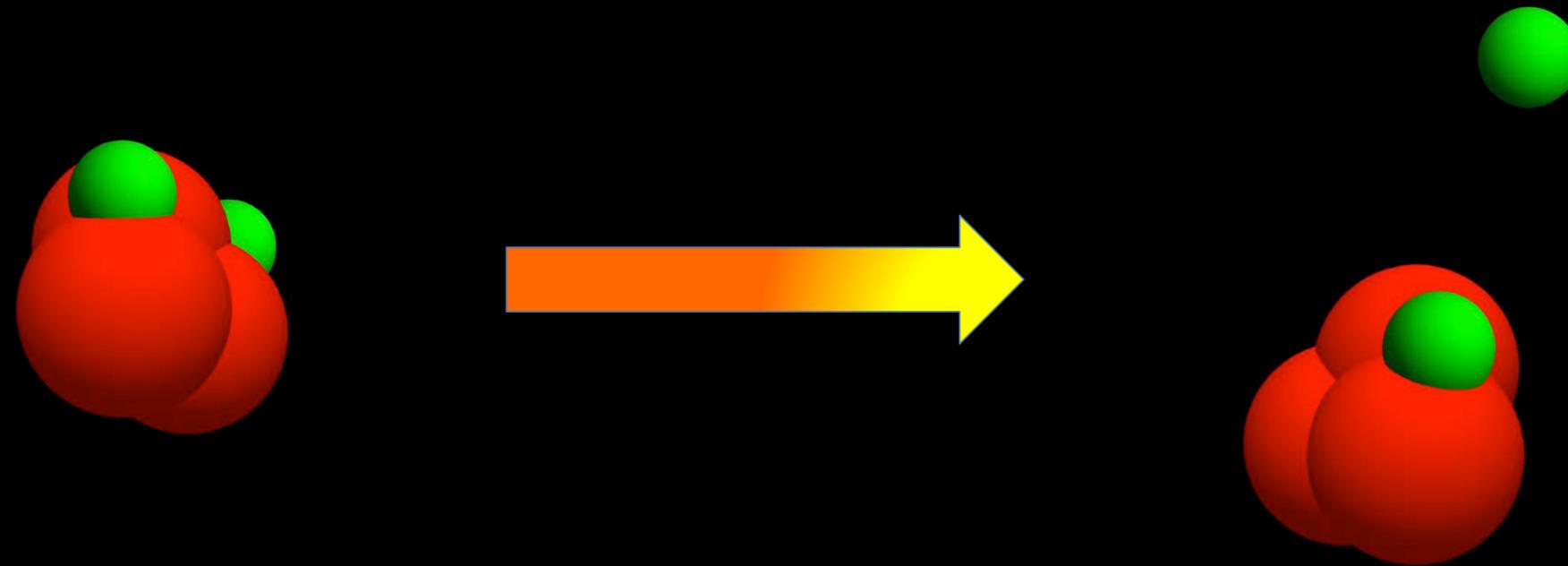
The evidence supporting the theory of nuclear energy generation in stars is indirect. This evidence is based largely upon observations of electromagnetic radiation emitted from the surface of stars and upon theoretical stellar models that have not been subject to independent experimental tests. It is interesting, therefore, to try to think of a way of testing directly the theory of stellar energy generation in stars. In order to make such a test, one would like to be able to "see"

**cosa sono questi “neutrini” prodotti nelle  
reazioni nucleari?**

**facciamo un passo indietro nel tempo per capirlo bene**

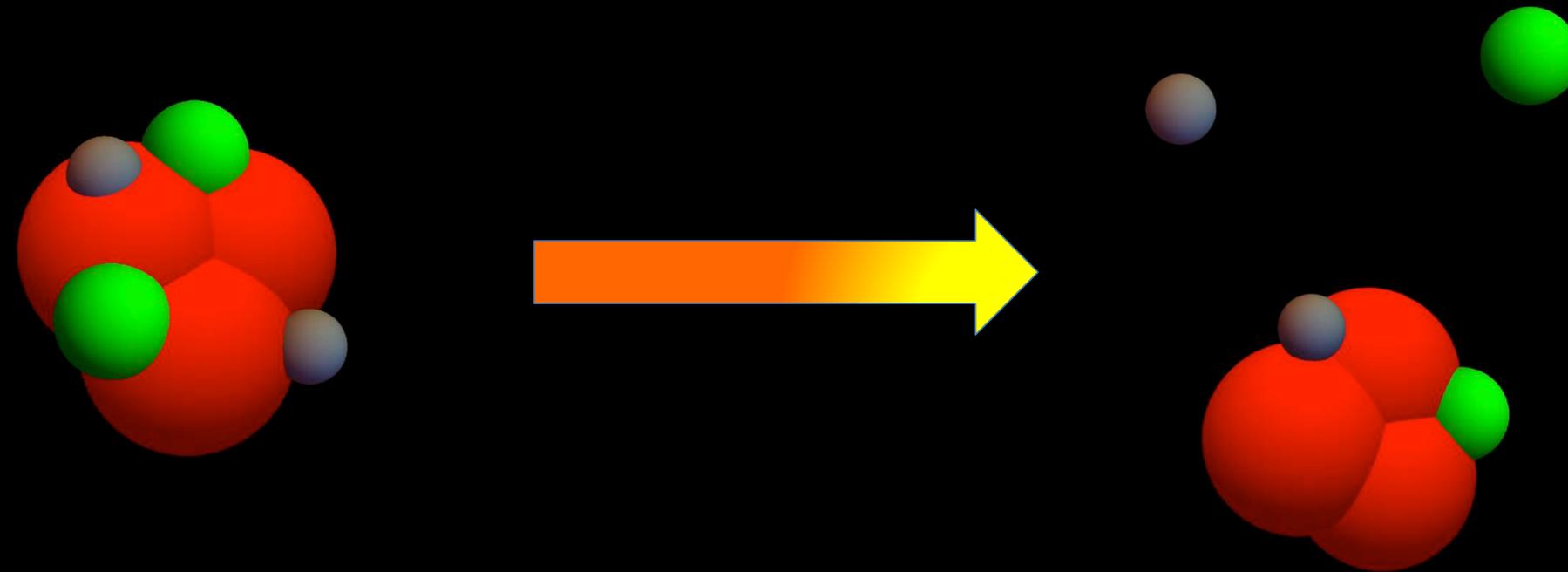
**(un viaggio nella storia in compagnia di Pauli, Fermi, Pontecorvo...)**

fino al 1930 si credeva che i nuclei fossero fatti di **protoni** ed **elettroni**  
— *ma l'elettrone emesso non aveva l'energia prevista!* —



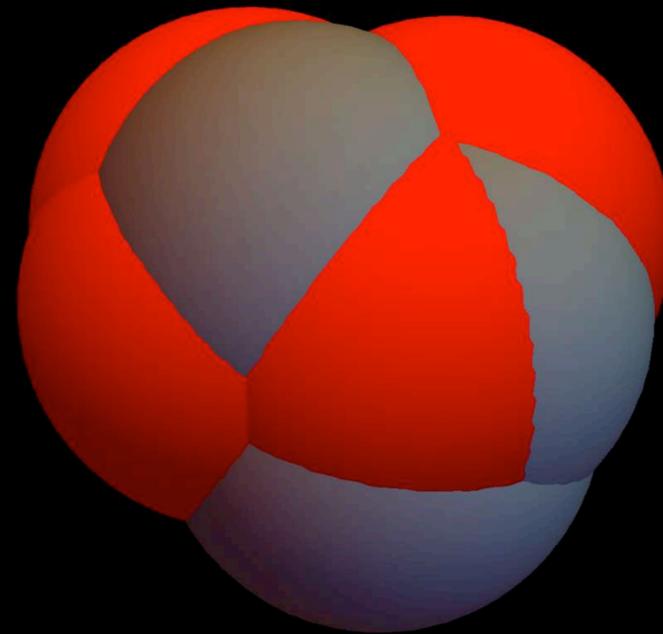
il modello originario dei processi di emissione di elettroni  
(radioattività di tipo  $\beta$ )

# Pauli si chiese se l'energia mancante fosse rubata da una particella quasi invisibile (1930)



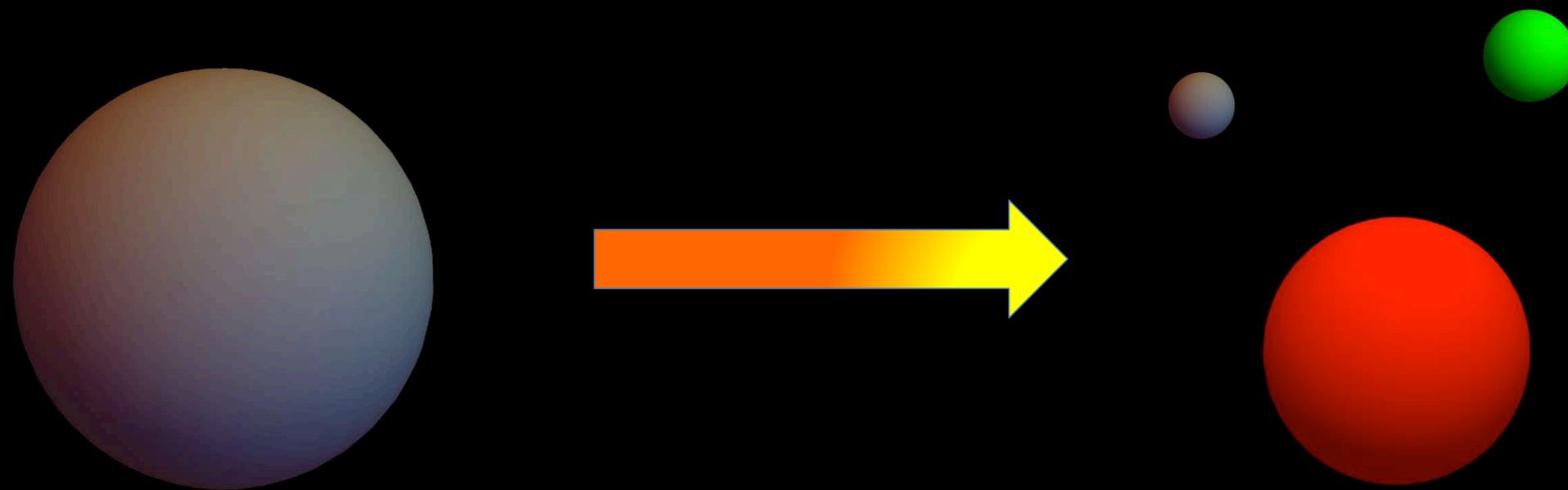
**in questo modo si iniziò a parlare di neutrini**  
(pur nel contesto di un modello del nucleo oggi superato)

oggi sappiamo che i nuclei sono **protoni** & neutroni



(ma solo perché nel 1932 si scopre il neutrone :)

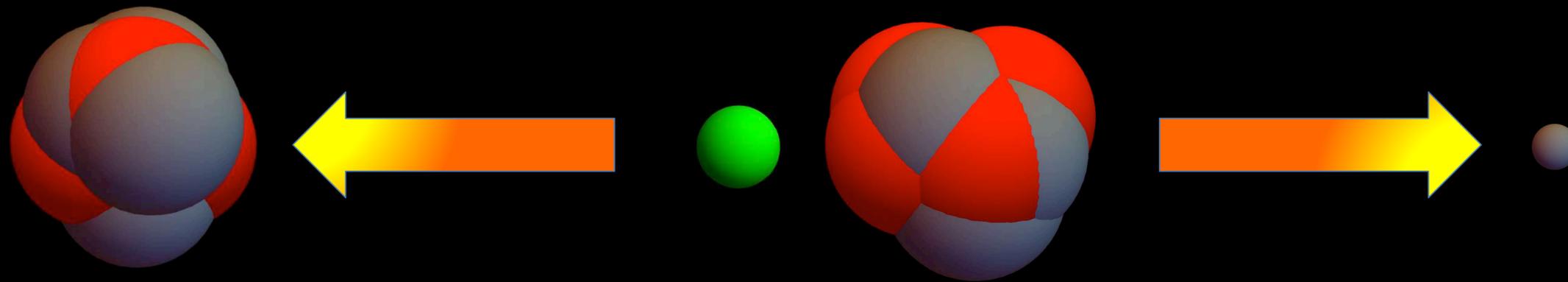
**nel 1933, Enrico Fermi mette insieme i pezzi del puzzle**



**il neutrone scompare, e compaiono  
un protone, un elettrone ed un (anti)neutrino**

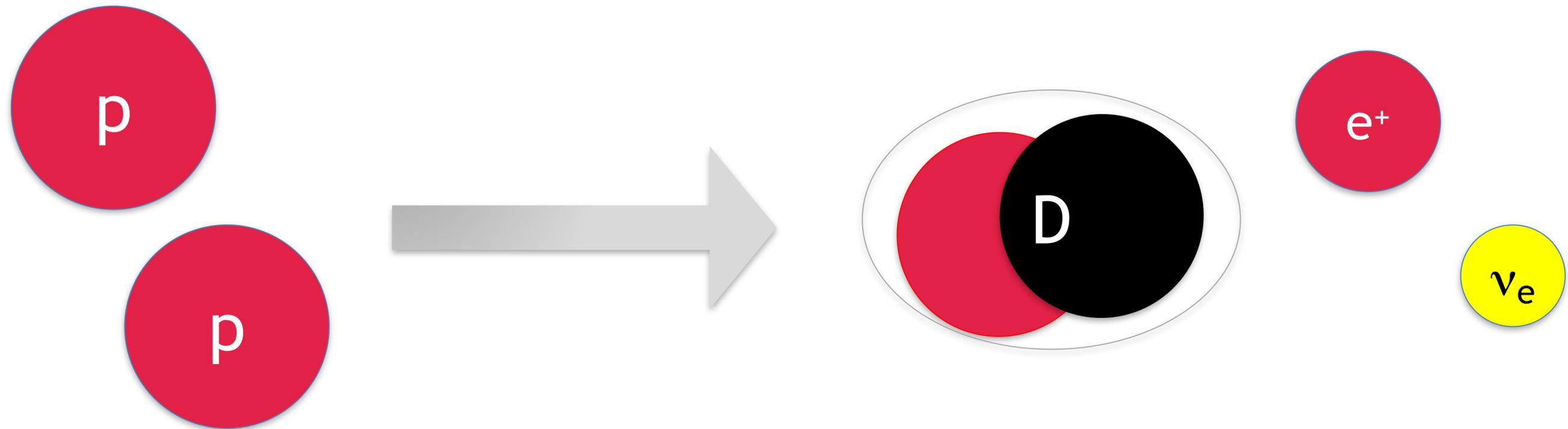
# il neutrino esiste davvero!

(Wick '34, Allen '42)

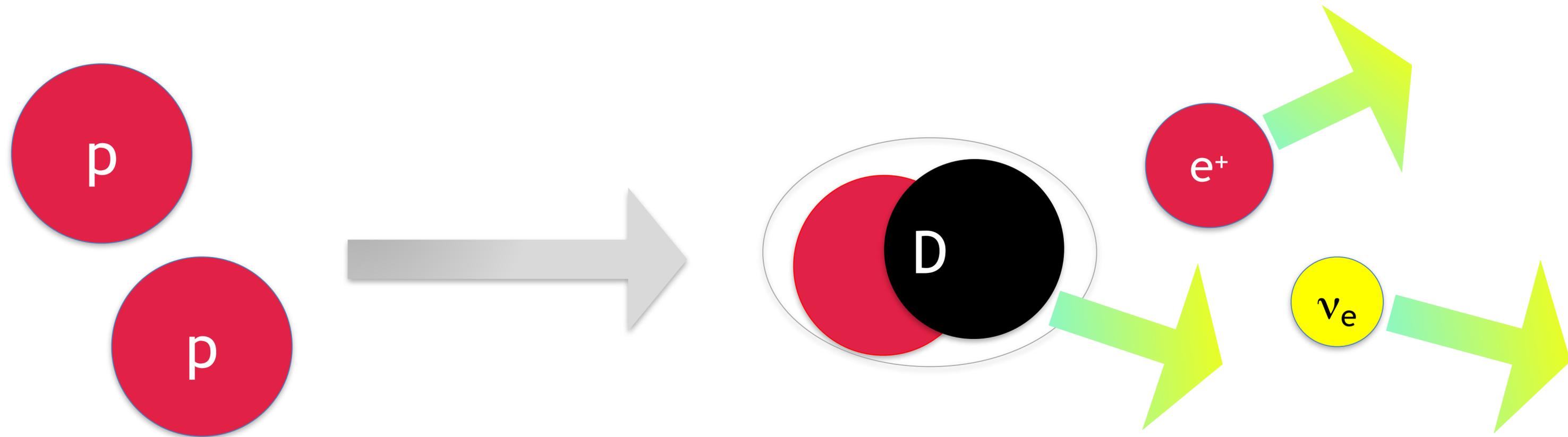


**nel nostro caso,  
ovvero, nel centro del sole  
ci aspettiamo che:**

# 2 nuclei di idrogeno si combinano formando deuterio

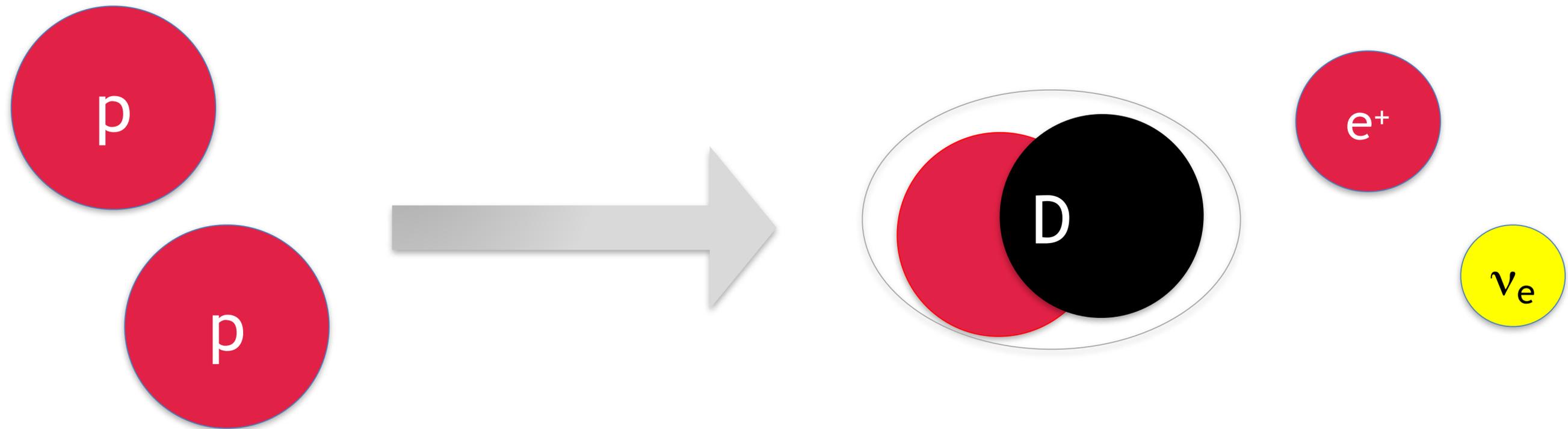


# 2 nuclei di idrogeno si combinano formando deuterio



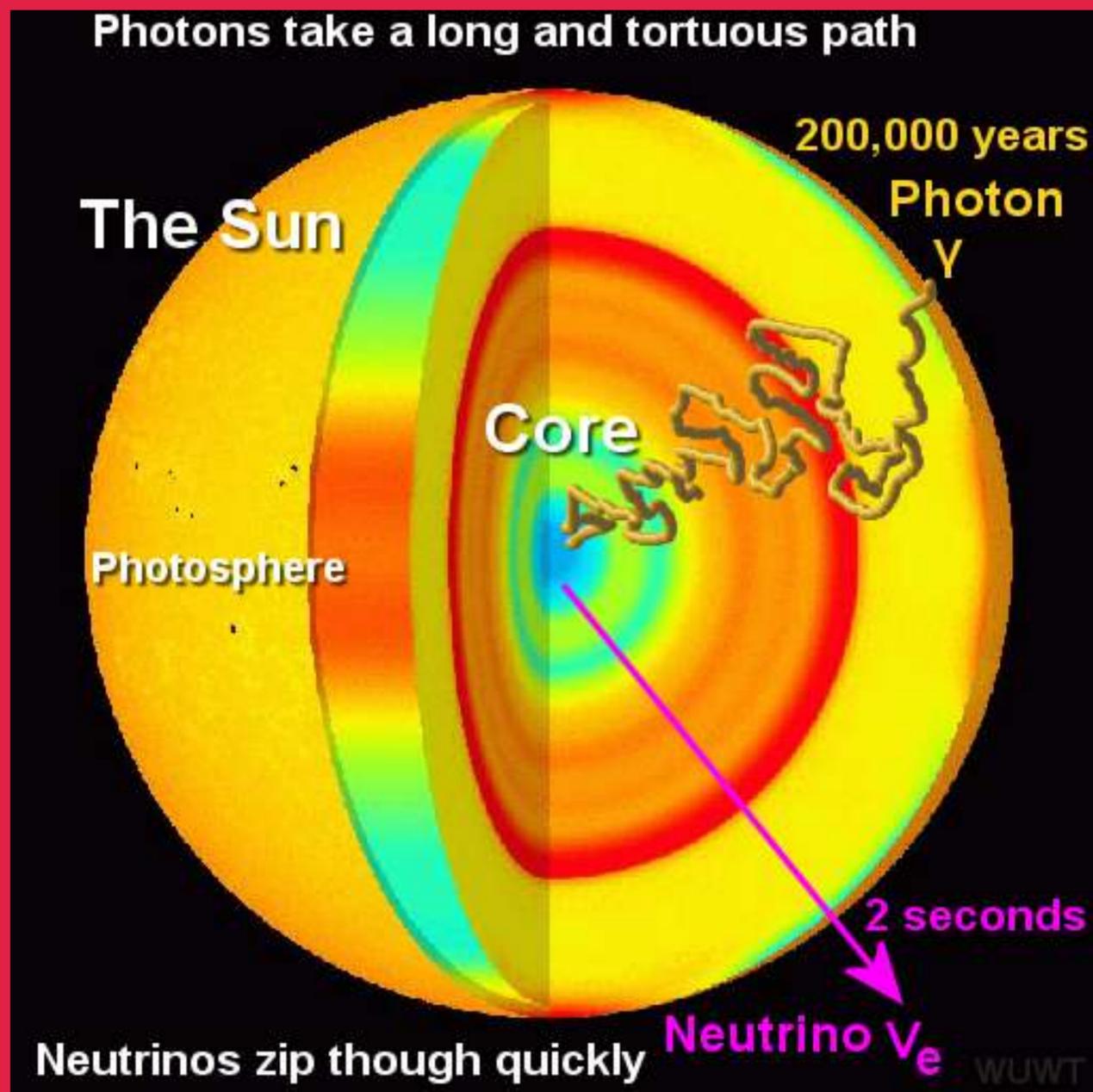
l'eccesso di massa diventa energia:  $E = mc^2$

# 2 nuclei di idrogeno si combinano formando deuterio



**ed un neutrino è inevitabilmente prodotto!!!**

se il sole è davvero un reattore nucleare, deve emettere tanta luce e tanti neutrini



4.

$^{35}_{17}\text{Cl}$  by absorption of a neutrino and emission of an electron; however, the disintegration leading to  $^{35}_{18}\text{A}$  is a priori much less probable than the one leading to  $^{35}_{16}\text{S}$  because the maximum energy of  $\beta$ -rays from  $^{35}_{18}\text{A}$  is as high as 4.4 MeV.

The mean free path of neutrinos against chlorine in  $\text{C Cl}_4$  will depend strongly on the energy of the neutrinos and on the type of the transition involved in the inverse  $\beta$ -ray process; actually, it is improbable<sup>(3)</sup> that the mean free path will be much smaller than  $10^{19}$  cm., although it might be several orders of magnitude bigger than this value. If we assume a mean free path of  $10^{19}$  cms., the production of  $^{35}_{16}\text{S}$  would be observable by using a volume of  $\text{C Cl}_4$  of the order of cubic meters and a radioactive source having an intensity of the order of  $10^{17}$  neutrinos per second. Such extremely intense source does not go much beyond the present technical facilities ("hot" metal from pile).

A survey of the possible "background effects", i.e. of the effects, (other than inverse  $\beta$  process induced by neutrinos) which might produce the radioactive atoms looked for, show that no serious trouble should arise if adequate care is taken and necessary control experiments are performed.

Thanks are due to Dr. Pryce for very useful discussion and advice.

B. Pontecorvo.

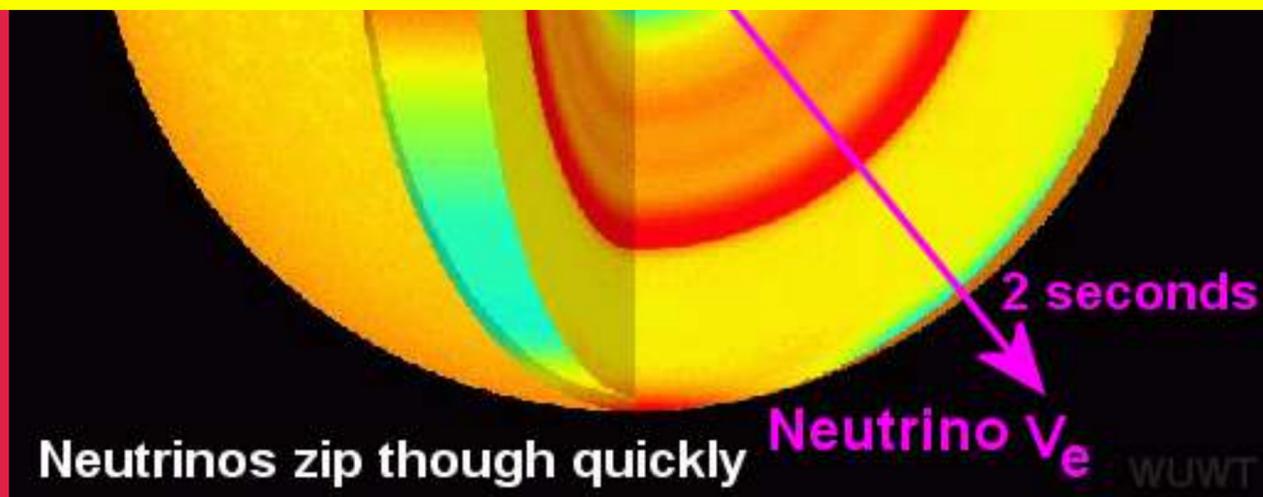
Note: Dr. Pryce pointed out to the author that the flux of neutrinos from the sun is quite considerable. Actually, the flux of neutrinos received from the sun at the earth's surface may be estimated to be of the order of  $10^{10}$  neutrinos/sec./cm.<sup>2</sup>, providing Bethe's carbon cycle is assumed as the source of energy of the sun.

Pontecorvo (1945-1946)

se il sole è davvero un reattore nucleare, deve emettere tanta luce e tanti neutrini

4.  
 $^{35}_{17}\text{Cl}$  by absorption of a neutrino and emission of an electron: however, the disintegration leading to  $^{35}_{18}\text{A}$  is a priori much less probable than the one leading to  $^{35}_{16}\text{S}$  because the maximum energy of  $\beta$ -rays from  $^{35}_{18}\text{A}$  is as high as 4.4 MeV.  
The mean free path of neutrinos against chlorine in  $\text{C Cl}_4$  will depend strongly on the energy of the neutrinos and on the type of the transition

possiamo mica vederli?  
possiamo mica osservare direttamente il centro del Sole?

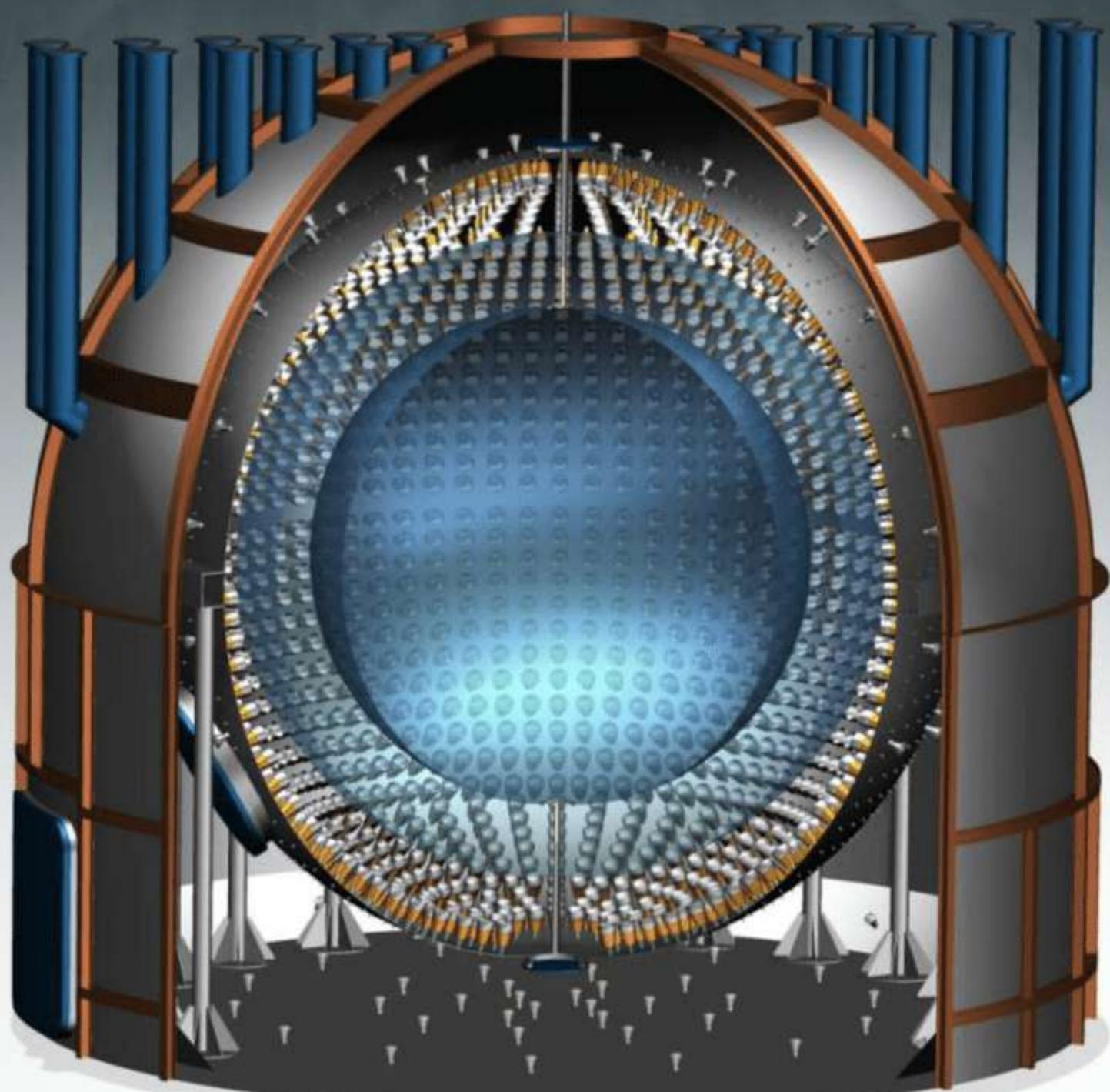


B. Pontecorvo.

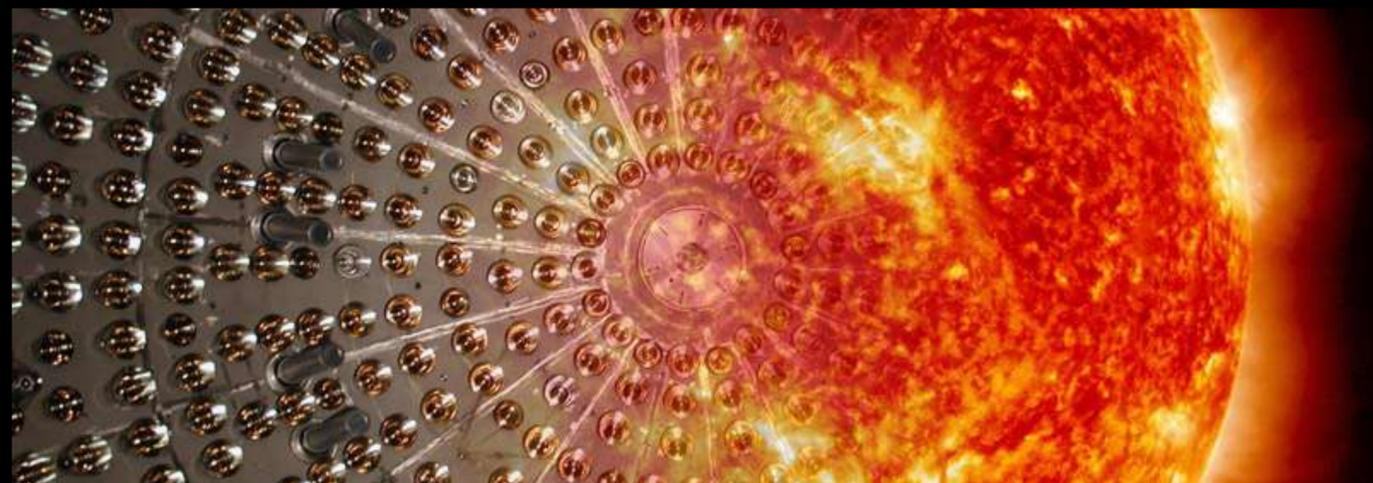
Note: Dr. Pryce pointed out to the author that the flux of neutrinos from the sun is quite considerable. Actually, the flux of neutrinos received from the sun at the earth's surface may be estimated to be of the order of  $10^{10}$  neutrinos/sec./cm.<sup>2</sup>, providing Bethe's carbon cycle is assumed as the source of energy of the sun.

Pontecorvo (1945-1946)

**Sì: l'abbiamo fatto!!!**

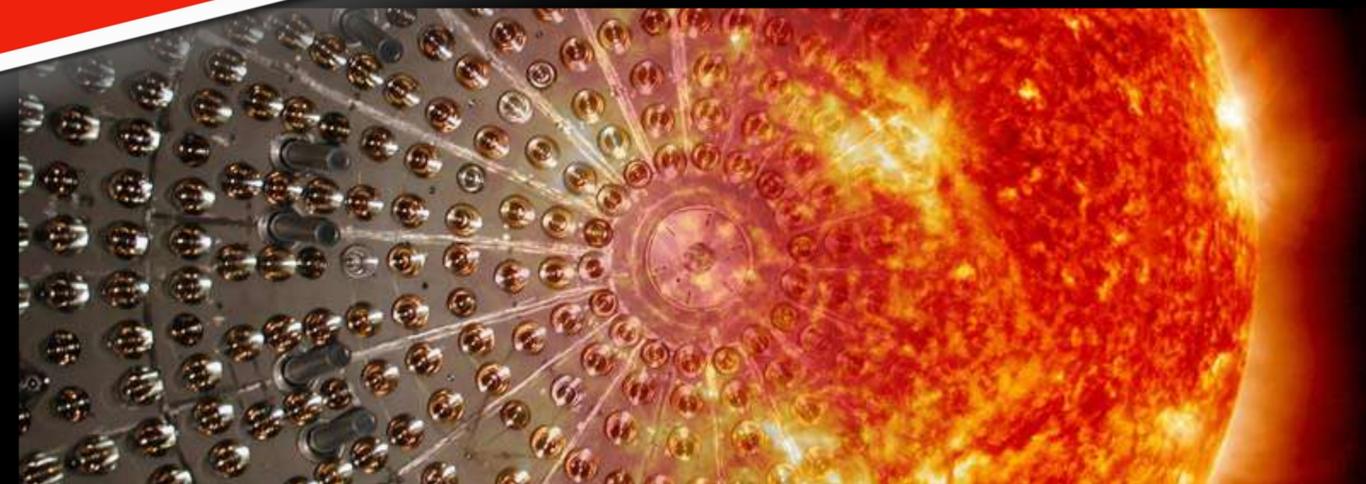


© A. Brigatti  
R. Lombardi



**Sì: l'abbiamo fatto!!!**

**Borexino, presso il  
lab del Gran Sasso**



# (risultati pubblicati sulle riviste più blasonate)

**nature**

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾ [Subscribe](#)

---

[nature](#) > [articles](#) > article

[Published: 27 August 2014](#)

## Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

[Borexino Collaboration](#)

[Nature](#) **512**, 383–386 (2014) | [Cite this article](#)

15k Accesses | 211 Citations | 399 Altmetric | [Metrics](#)

### Abstract

---

In the core of the Sun, energy is released through sequences of nuclear reactions that convert hydrogen into helium. The primary reaction is thought to be the fusion of two protons with

**nature**

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾

---

[nature](#) > [articles](#) > article

Article | [Published: 25 November 2020](#)

## Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun

[The Borexino Collaboration](#)

[Nature](#) **587**, 577–582 (2020) | [Cite this article](#)

12k Accesses | 63 Citations | 902 Altmetric | [Metrics](#)

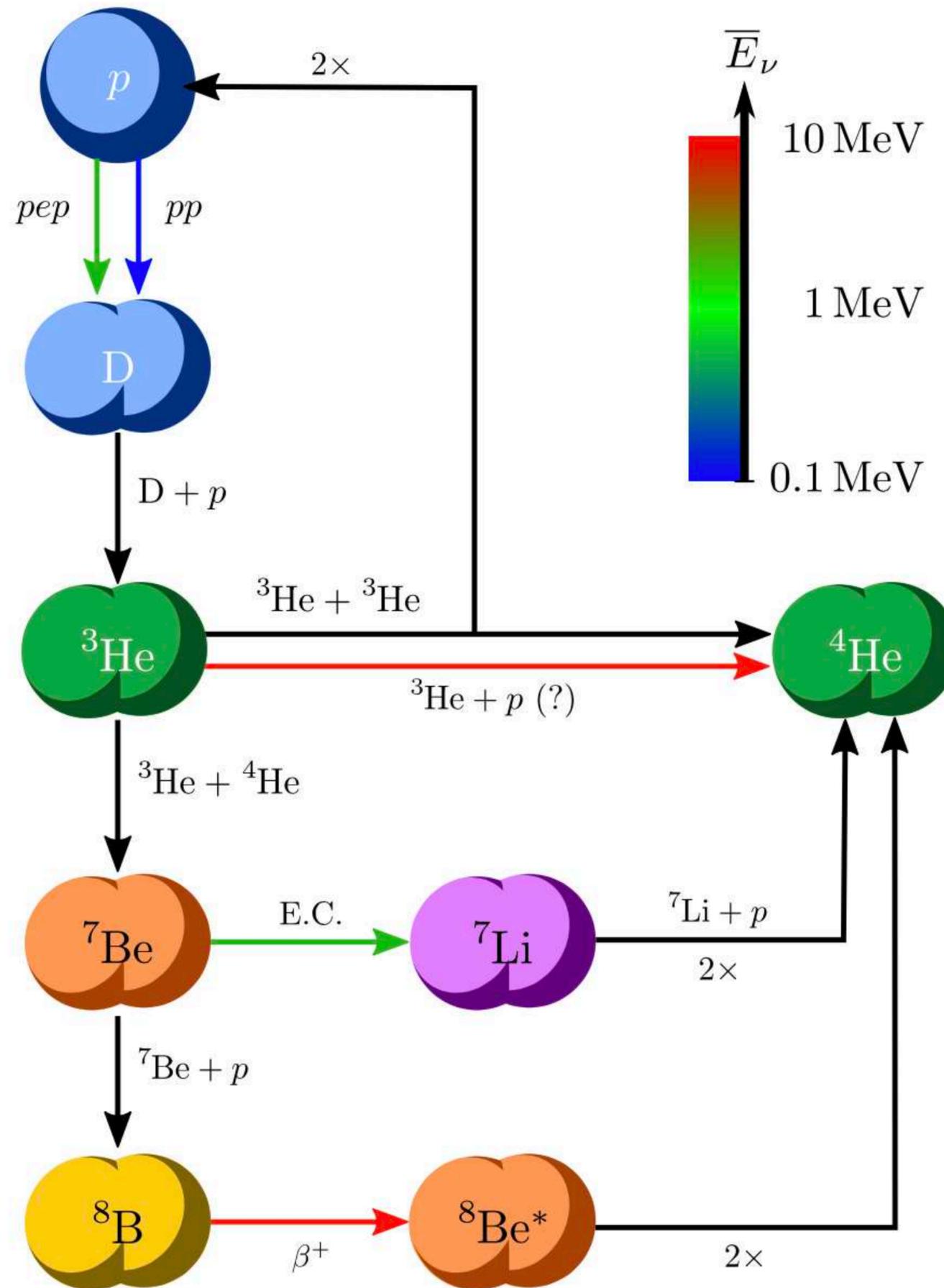
### Abstract

---

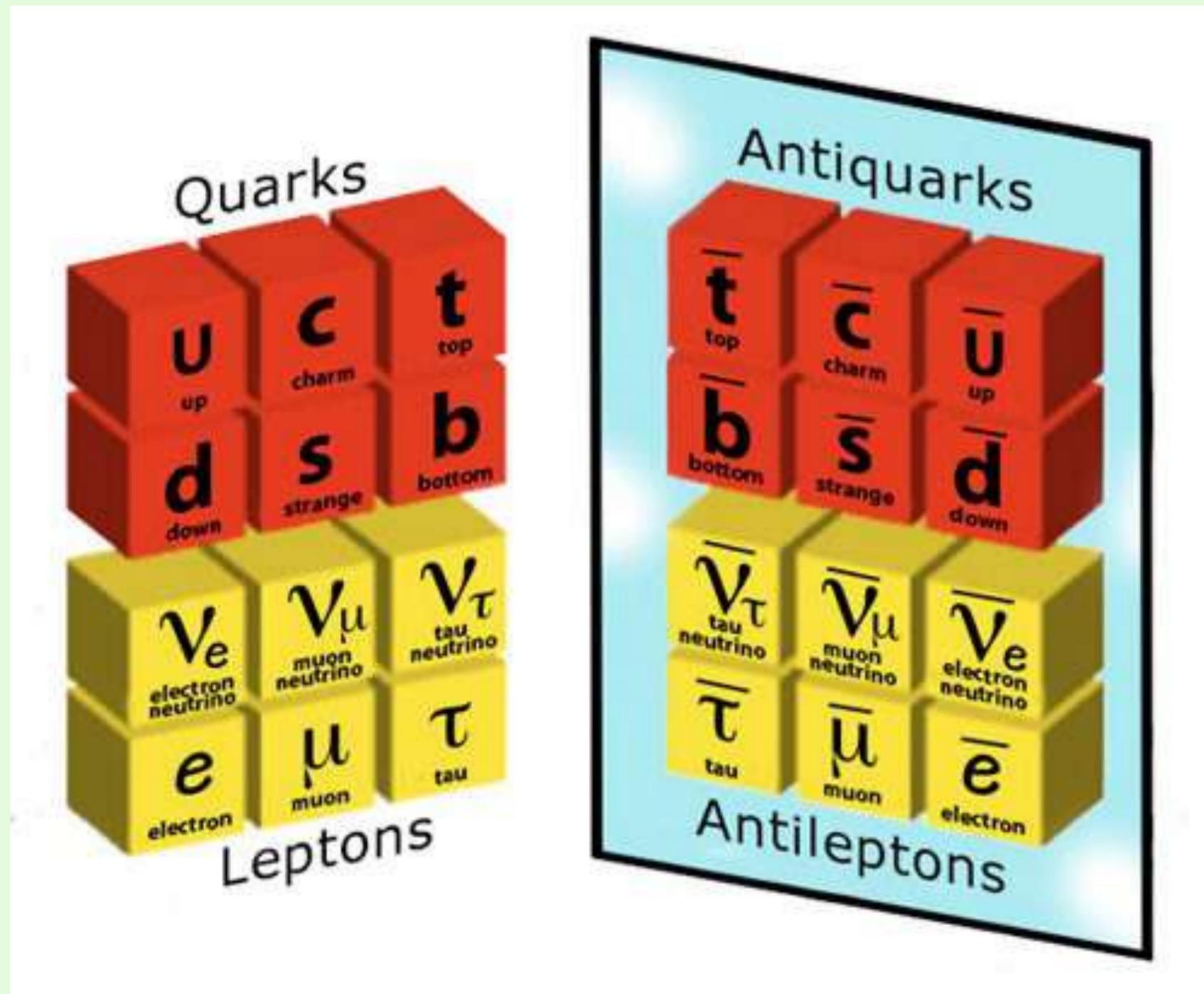
For most of their existence, stars are fuelled by the fusion of hydrogen into helium. Fusion proceeds via two processes that are well understood theoretically: the proton–proton (*pp*)

# la catena pp

il codice dei colori nelle frecce (inserto in alto a dx) indica le energie dei neutrini corrispondenti



# **2:- perché la ricerca di creazione di particelle**



Lo schema evidenzia che

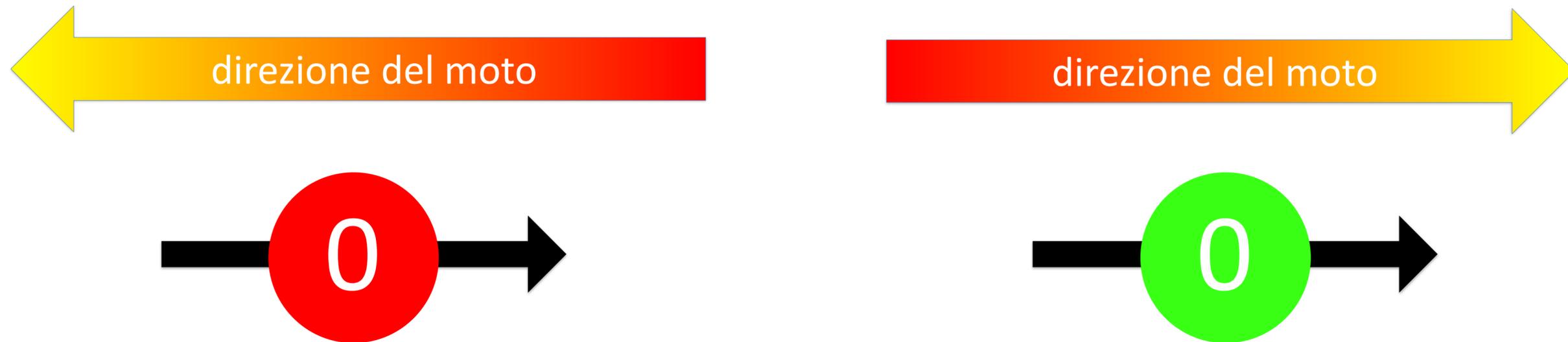
*Le particelle di materia  
hanno una controparte  
di antimateria*

ma solleva una domanda:

**cosa distingue neutrini  
ed antineutrini? non  
certo la carica elettrica!**

# cosa sappiamo su neutrini ed antineutrini

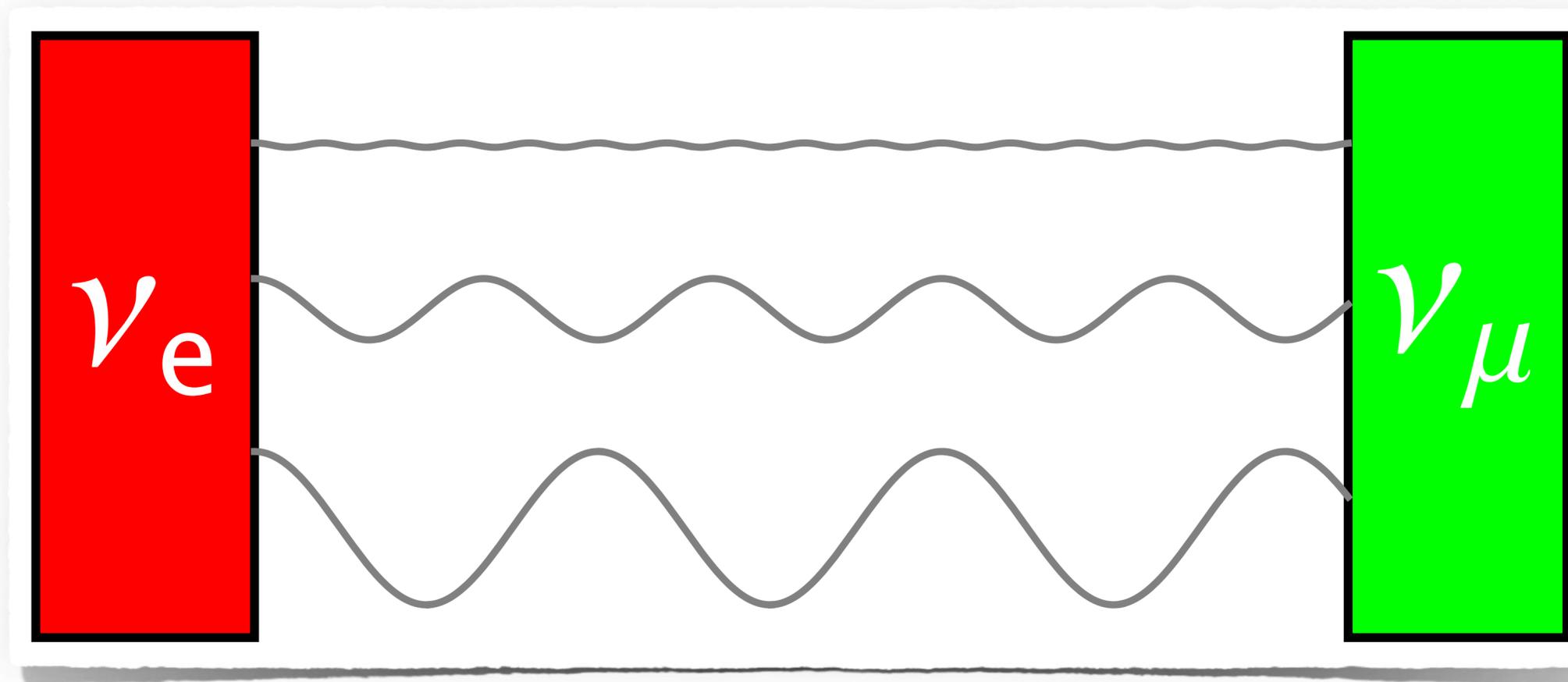
neutrini ed antineutrini si diversificano per la direzione relativa tra spin e velocità



In effetti, secondo la teoria corrente il neutrino **non ha massa** ed allora viaggerebbe sempre ed esattamente alla velocità della luce.

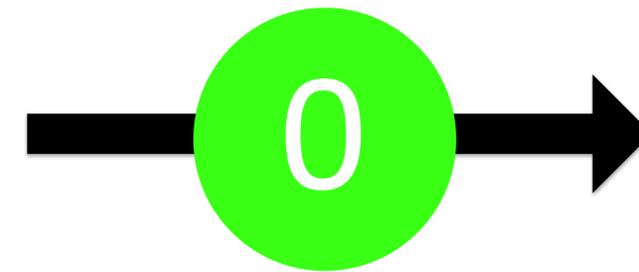
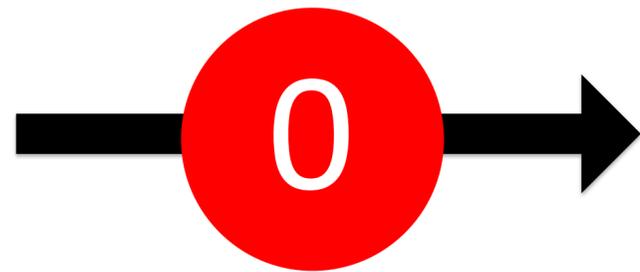
**ma il neutrino ha una massa, seppure piccolissima.**

**È dimostrato dal fatto che onde di neutrini di vario tipo si trasformano tra di loro**

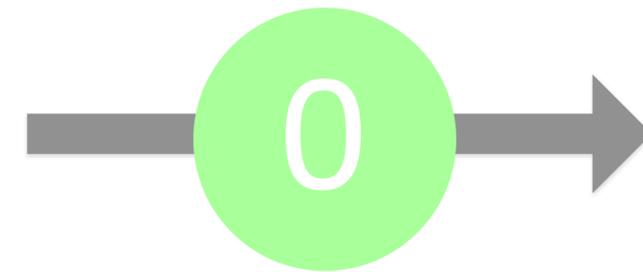
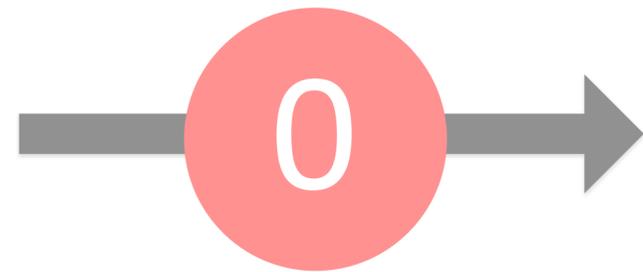


**teoria delle oscillazioni**, B. Pontecorvo (1957-1967); **mescolamento neutrini**, Y. Katayama, K. Matumoto, S. Tanaka, E. Yamada (1962), Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata (1962) M. Nakagawa, H. Okonogi, S. Sakata, A. Toyoda (1963). **Premio Nobel in fisica 2015.**

**ma allora i neutrini non si muovono alla velocità della luce e potrebbero fermarsi!**



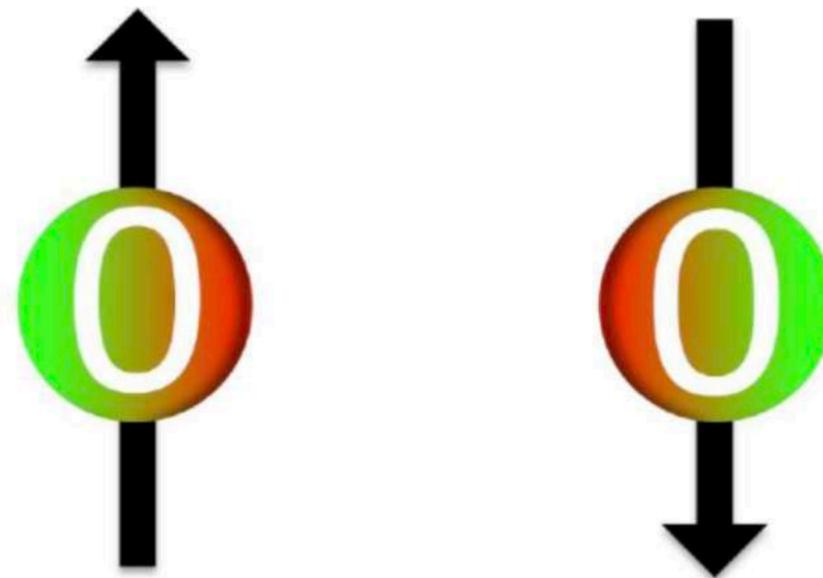
**i neutrini e gli antineutrini *veloci* sono distinti**



**e se li guardassimo dopo averli fermati?**

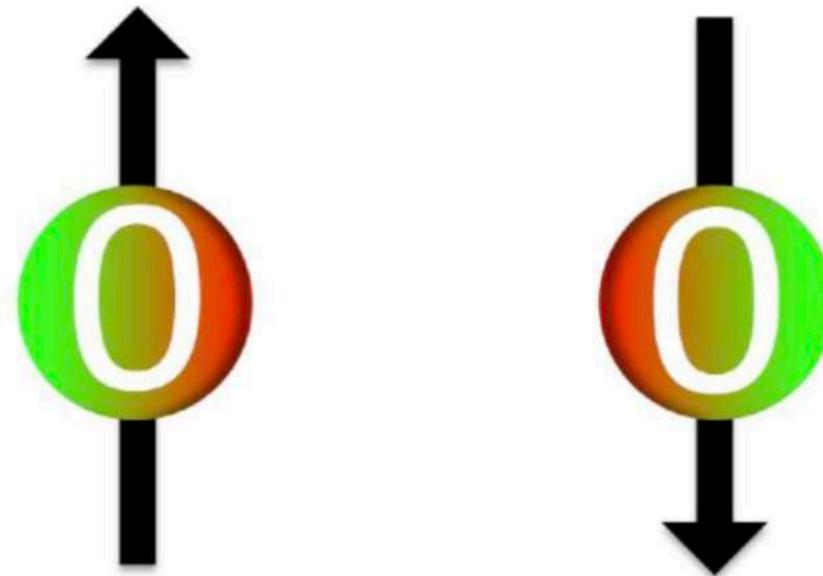


**ecco cosa succederebbe:**



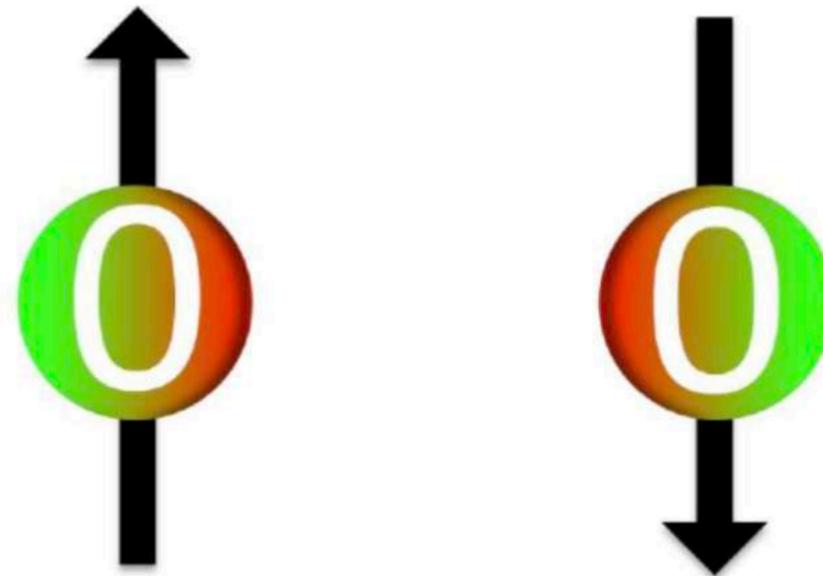


**sembrano - e per Majorana, sono - uguali**



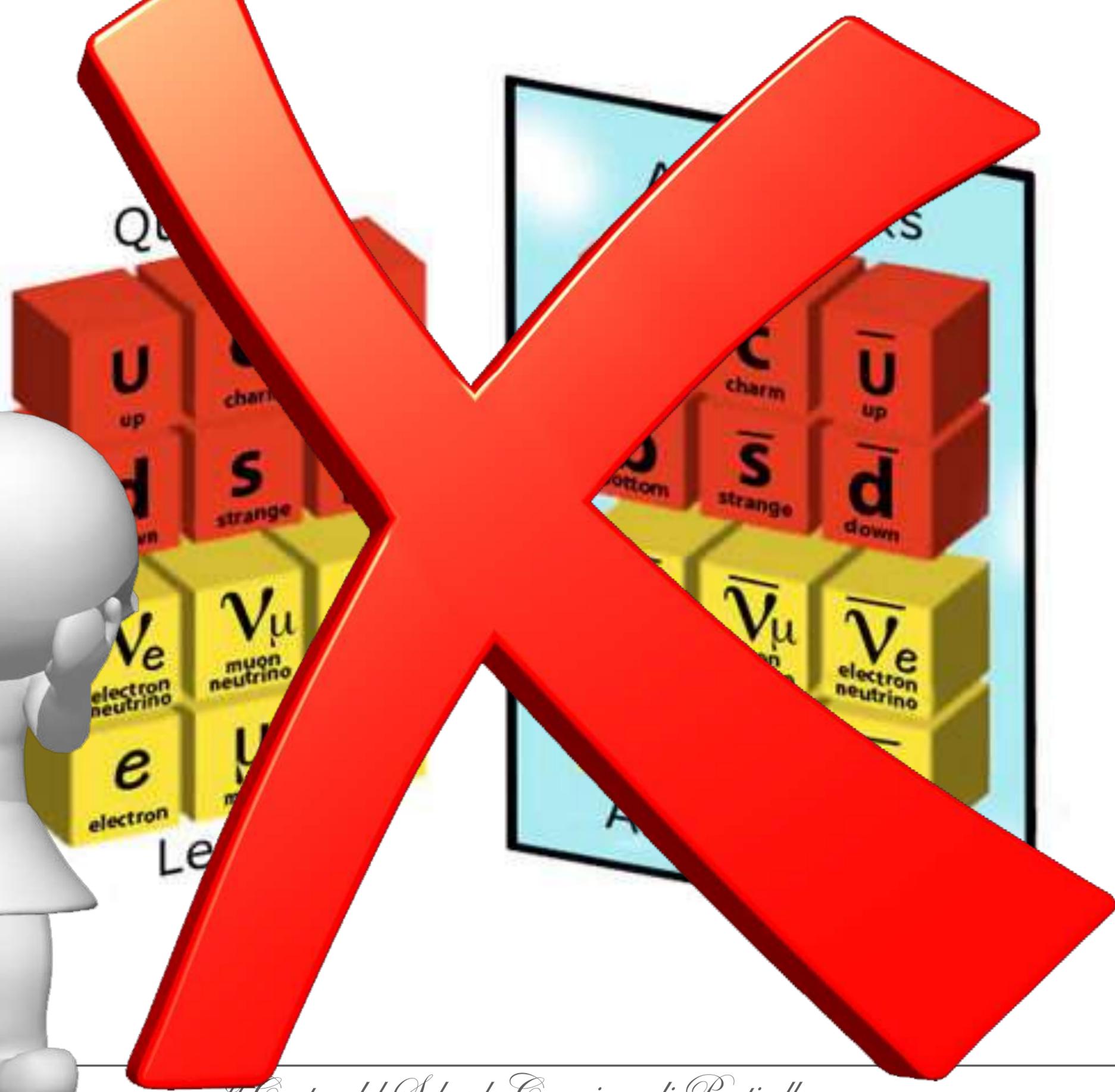
# il neutrino di Majorana è particella e antiparticella

---



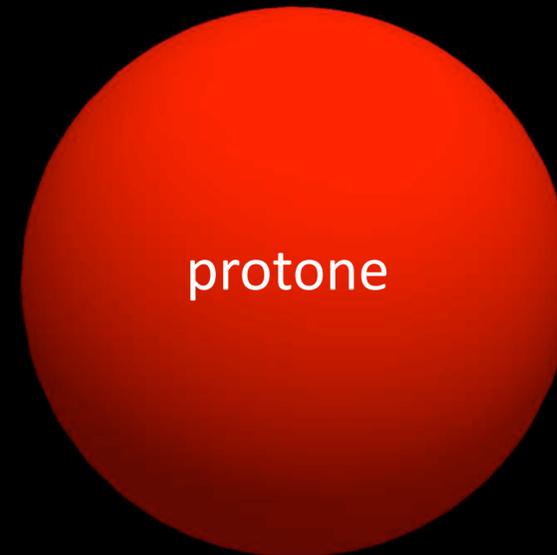
il neutrino di Majorana, unico tra le particelle di materia, somiglierebbe un po' ad Orfeo - in grado di essere tra i vivi ma anche tra i morti



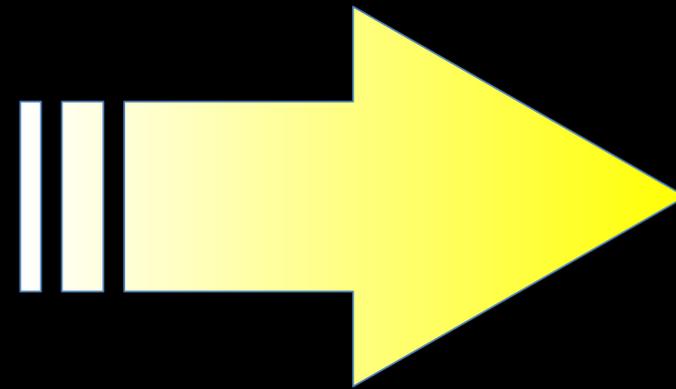




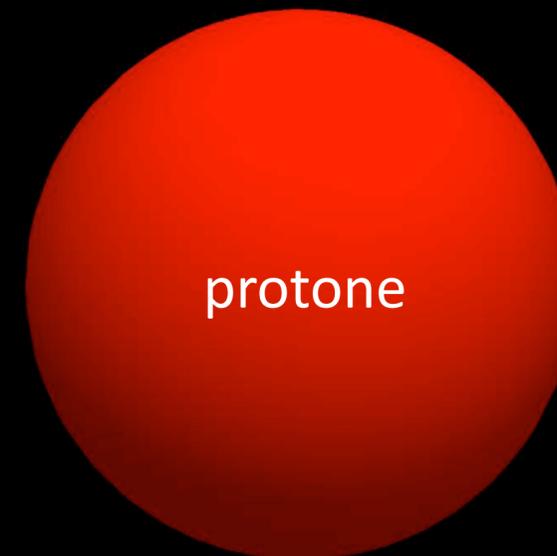
neutrone



protone



neutrone



protone



elettrone

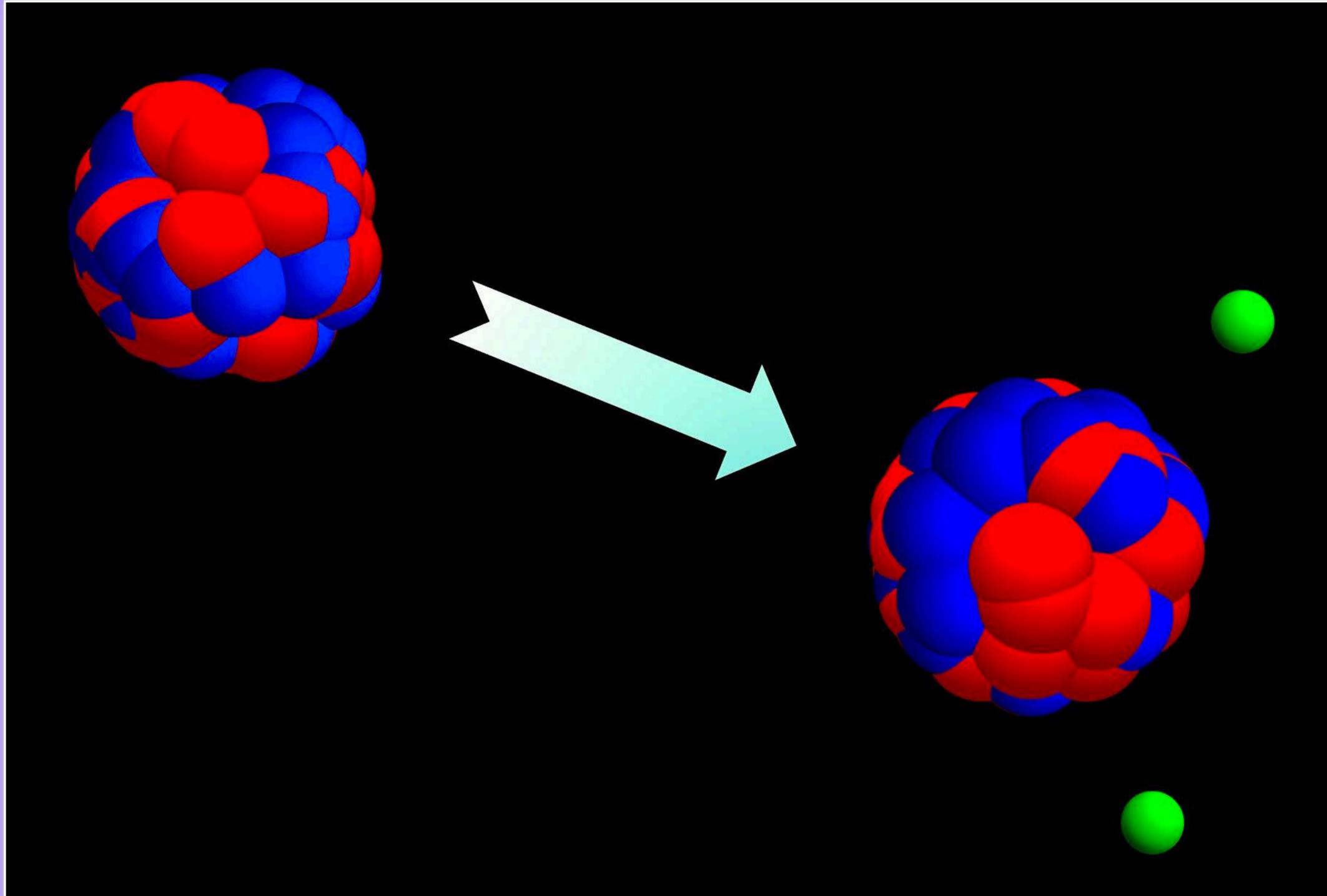


**neutrini e  
antineutrini  
si cancellano**



elettrone

**se i neutrini/antineutrini si annichilano, ci troveremmo 2 elettroni in più**



**si possono creare 2 elettroni**  
**mentre il numero di particelle nel nucleo non cambia**

**tali trasformazioni, previste dalla teoria di Majorana, sono oggetto di vivaci ricerche**



# sommario

- ★ Abbiamo ragionato di due linee di ricerca del laboratorio del Gran Sasso legate dal ruolo che gioca una interessante particella: il **neutrino**.
- ★ I risultati di Borexino sono impressionanti. Hanno permesso di validare i modelli del **centro del sole**, la sua composizione ed il suo funzionamento.
- ★ La teoria di Majorana del neutrino motiva la ricerca di processi di **creazione di elettroni** in molti laboratori in giro per il mondo. Al momento, non siamo secondi a nessuno.

**Grazie a tutti!**

# commenti metodologici

particelle, trottole e spin

supponiamo che l'elettrone sia una pallina che gira su sé stessa

$$\frac{\hbar}{2} \approx mvr \Rightarrow v \approx \frac{\hbar}{2mr}$$

# commenti metodologici

## particelle, trottole e spin

supponiamo che l'elettrone sia una pallina che gira su sé stessa

$$\frac{\hbar}{2} \approx mvr \Rightarrow v \approx \frac{\hbar}{2mr}$$

se fosse piena di carica elettrica avremmo

$$\frac{e^2}{r} \approx mc^2$$

# commenti metodologici

## particelle, trottole e spin

supponiamo che l'elettrone sia una pallina che gira su sé stessa

$$\frac{\hbar}{2} \approx mvr \Rightarrow v \approx \frac{\hbar}{2mr}$$

se fosse piena di carica elettrica avremmo

$$\frac{e^2}{r} \approx mc^2$$

ne seguirebbe che la sua velocità vale

$$v \approx \frac{\hbar}{2mr} \approx \frac{\hbar c^2}{2e^2} \approx 70 c$$

# commenti metodologici

## particelle, trottole e spin

supponiamo che l'elettrone sia una pallina che gira su sé stessa

$$\frac{\hbar}{2} \approx mvr \Rightarrow v \approx \frac{\hbar}{2mr}$$

se fosse piena di carica elettrica avremmo

$$\frac{e^2}{r} \approx mc^2$$

ne seguirebbe che la sua velocità vale

$$v \approx \frac{\hbar}{2mr} \approx \frac{\hbar c^2}{2e^2} \approx 70 c ???$$

conclusione: l'elettrone *non* è una pallina che gira su sé stessa (Pauli)

# commenti metodologici

alcuni casi relativi alla teoria e pratica della conoscenza

questo non significa che ragionare in termini di analoghi classici sia del tutto inutile. P.e.:

- ★ *Planck (1900) pensava alla emissione di radiazione in termini di **oscillatori classici**.*
- ★ *Nel 1911, Rutherford stima (correttamente) la **grandezza del nucleo** usando argomenti classici.*
- ★ *L'**atomo di Bohr** (1913) è perfettamente valido per capirne le dimensioni o gli aspetti generali del comportamento in campo magnetico; ed è insegnato anche in corsi universitari.*
- ★ *Nella discussione dello **spin**, Goudsmit e Uhlenbeck anticipano i progressi formali di Pauli (1925).*
- ★ *Nel 1930, Pauli stesso concepisce il **neutrino**, anche se in un modo che oggi consideriamo inaccurato.*
- ★ *ecc. ecc.*

# commenti metodologici

## alcuni principi generali

- Bisogna stare attenti a non confondere i **modelli** con la realtà. I modelli descrivono in modo efficace un certo numero di fatti (e non altri), ma non sono la realtà.
- Inoltre, la **storia** è una preziosissima fonte di ispirazione. Se le migliori menti dell'umanità hanno usato certe approssimazioni o affrontato certe difficoltà, non è chiaro che le possiamo (e neanche che le dobbiamo) evitare del tutto ai nostri studenti.
- Queste considerazioni valgono al massimo grado anche dal punto di vista **didattico**: i testi di Enrico Fermi sono esemplari da questo punto di vista.

# commenti metodologici

illustrazione di un punto importante e/o esercizio per i docenti

- &· *la storia non è ovvia da leggere, da capire, da raccontare.*
- &· *si vedano i tre esempi della pagina seguente, e volendo, si azzardi una spiegazione delle sorprendenti parole di tre grandissimi scienziati: Millikan, Einstein, Rutherford - attenzione alle date.*
- &· *se vi va di ragionarne insieme, scrivetemi: [vissani@lngs.infn.it](mailto:vissani@lngs.infn.it)*

Non c'è alcuna probabilità che l'uomo possa mai sfruttare la potenza dell'atomo. L'ipotesi fantasiosa di utilizzare l'energia atomica quando il carbone sarà esaurito è un sogno utopico del tutto privo di fondamento scientifico, un'idea infantile.

**- Robert Millikan, 1928**

Non abbiamo la minima indicazione che (l'energia nucleare) sarà mai ottenibile. Questo significherebbe che l'atomo possa essere frantumato a piacimento.

**- Albert Einstein, 1932**

Chiunque creda di ottenere energia dalla trasformazione di questi atomi sta parlando di fandonie.

**- Ernest Rutherford, 1933**