

# Majorana e la moderna fisica delle particelle

Napoli, 14 Giugno 2012

Riccardo Barbieri  
SNS and INFN, Pisa

# Articoli pubblicati

- ◇ (1) G. Gentile and E. Majorana, “Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell’elettrone rotante e sulla intensità delle righe del Cesio”, in Rendiconti dell’Accademia dei Lincei Vol.8 (1928) p.229
- ◇ (2) E. Majorana, “Sulla formazione dello ione molecolare di He”, in Il Nuovo Cimento Vol.8 (1931) p.22
- ◇ (3) E. Majorana, “I presunti termini anomali dell’Elio”, in Il Nuovo Cimento Vol.8 (1931) p.78
- ◇ (4) E. Majorana, “Reazione pseudopolare fra atomi di Idrogeno”, in Rendiconti dell’Accademia dei Lincei Vol.13 (1931) p.58
- ◇ (5) E. Majorana, “Teoria dei tripletti P’ incompleti”, in Il Nuovo Cimento Vol.8 (1931) p.107
- ◇ (6) E. Majorana, “Atomi orientati in campo magnetico variabile”, in Il Nuovo Cimento Vol.9 (1932) p.43
- ✓ (7) E. Majorana, “Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario”, in Il Nuovo Cimento Vol.9 (1932) p.335
- ◆ (8) E. Majorana, ““ Uber die Kerntheorie”, in Zeitschrift f’ur Physik Vol.82 (1933) p.137; “Sulla teoria dei nuclei”, in La Ricerca Scientifica Vol.4 (1933) p.559
- ✓ (9) E. Majorana, “Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone”, in Il Nuovo Cimento Vol.14 (1937) p.171

# Particle Physics in one page

(on June 2012)

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\sim SM} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i\bar{\Psi} \not{D}\Psi \\ & + |D_\mu h|^2 - V(h) \\ & + \Psi_i \lambda_{ij} \Psi_j h + h.c. \\ & + N_i M_{ij} N_j\end{aligned}$$

The gauge sector

The EWSB sector

The flavour sector

The  $\nu$ -mass sector

(if Majorana)

+

Dark Matter ✓

Baryon Asymmetry ✓

Dark Energy

(to a large extent orthogonal  
to current knowledge  
of particle physics)

# La tavola moderna di Mendeleev



$\Psi =$

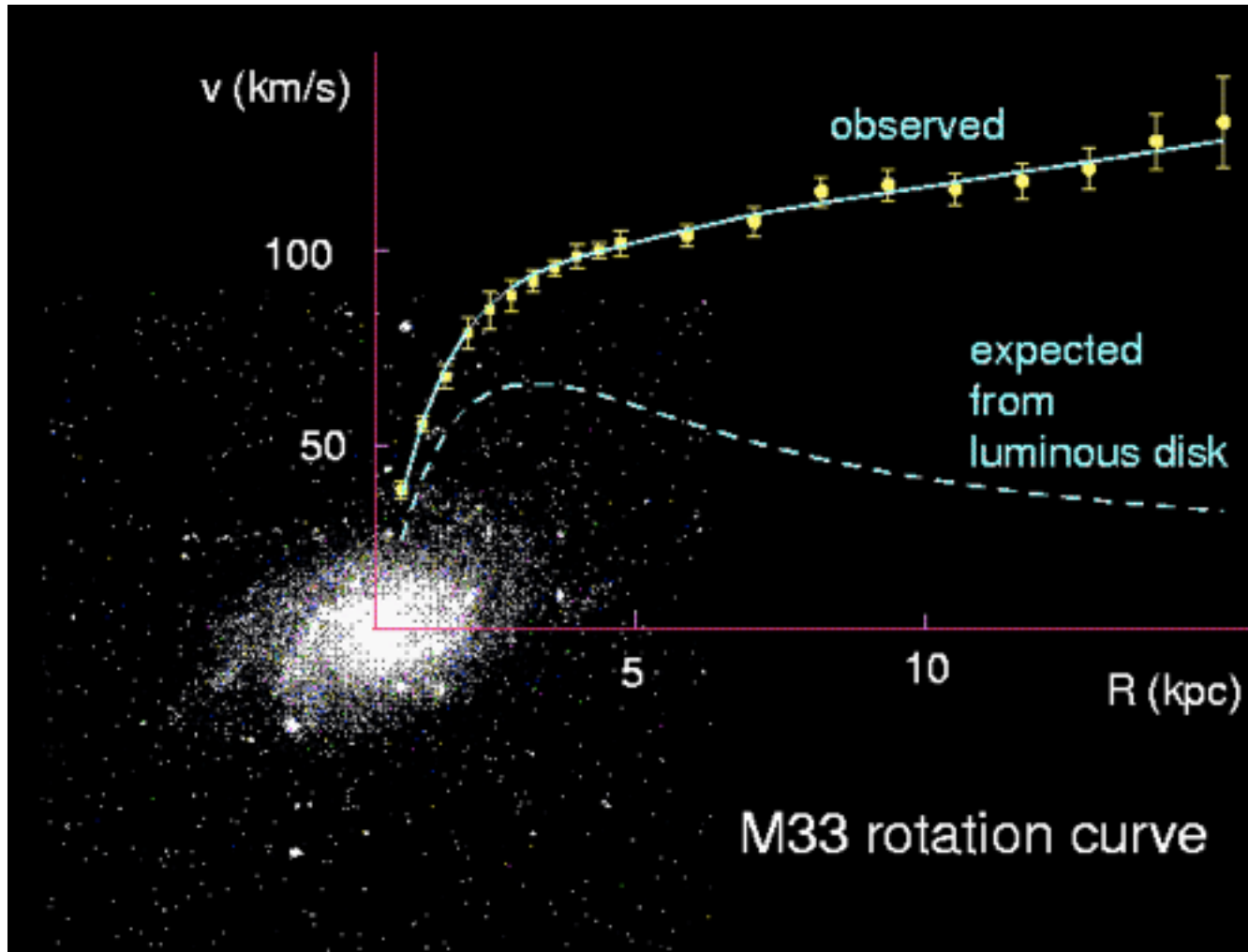
u	d	e 1897	$\nu_e$ 1956
c 1974	s	$\mu$ 1937	$\nu_\mu$ 1962
t 1994	b 1977	$\tau$ 1975	$\nu_\tau$ 2000

“fermioni”

= quark + leptoni

# La velocità delle galassie nei clusters

l'argomento originale di Zwicky (1930)

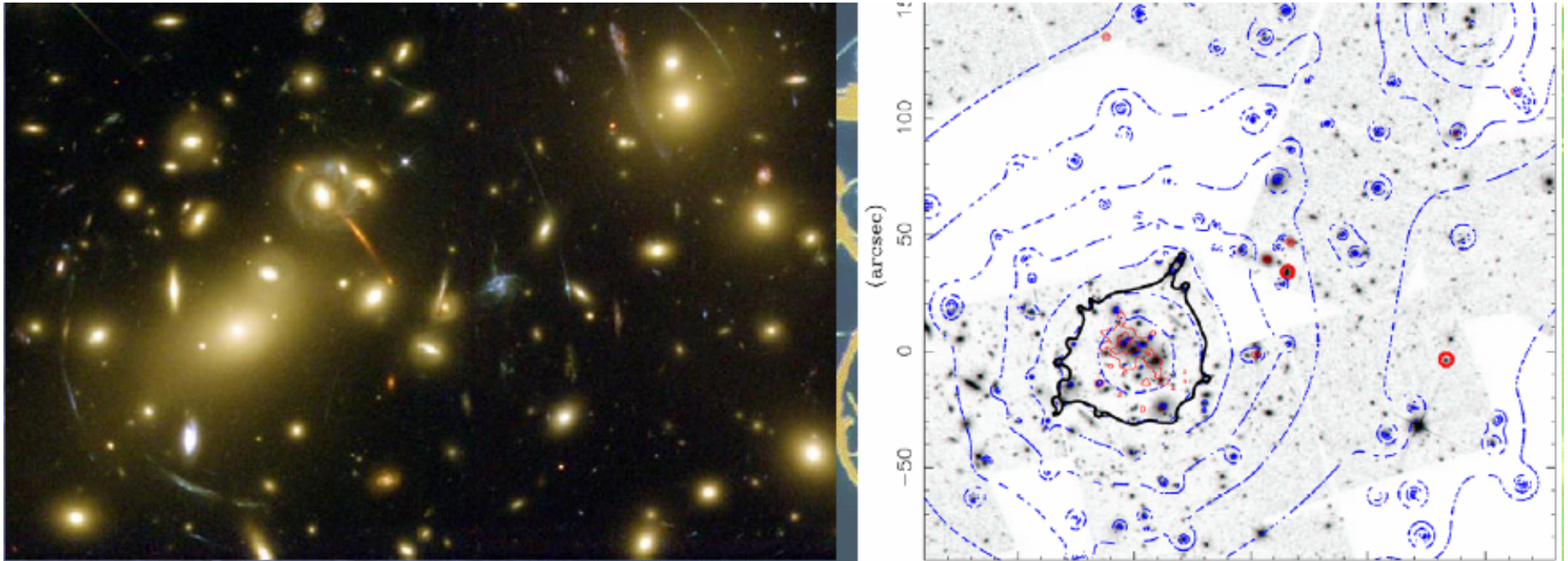


$$v^2 = G \frac{M(r)}{r}$$

# Il lensing gravitazionale

(A)

(B)



Dalla deflessione della luce da parte della gravita' prodotta dalla materia oscura (A) ai suoi contorni di densita' (B)

# L'asimmetria materia-antimateria dell'universo e il fatto di B e/o L

La stabilita' del protone:  $\tau_p > 10^{33}$  *anni*  
spiegata dalla conservazione del numero barionico

$$B_p, B_n, \text{ etc} = 1$$

$$B_{\bar{p}}, B_{\bar{n}}, \text{ etc} = -1$$

$$L_e, L_\nu, \text{ etc} = -1$$

$$L_{\bar{e}}, L_{\bar{\nu}}, \text{ etc} = 1$$

I processi noti conservano B ed L

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

$$p + \bar{p} \rightarrow e^+ + e^-$$

Se la conservazione di B fosse esatta,  
nessuna asimmetria materia-antimateria sarebbe generata

# L'asimmetria barionica dell'universo

1. C'è solo materia e non antimateria nell'universo attuale  
materia = barioni (quark, protoni, nuclei)
2. Il rapporto fra barioni e fotoni è circa costante nel tempo  
Adesso (dalla CMB e dalla Bariogenesi):

$$\eta_B \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 6 \cdot 10^{-10}$$

3. Nell'universo primordiale (  $T \gtrsim 10^{12} K^0 \approx 100 MeV$  )  
dalla creazione e annichilazione di coppie quark-antiquark

$$n_q, n_{\bar{q}} \approx n_\gamma$$

Da cui:

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \approx 10^{-9}$$

Come si è prodotto questo eccesso nella evoluzione cosmologica?



# Spinori di Dirac, Weyl e Majorana

(1928)

(1935)

(1937)

D

$$\begin{matrix} e^{\uparrow\downarrow} \\ \bar{e}^{\uparrow\downarrow} \end{matrix}$$

4 gradi di liberta'  $m \neq 0$   $\bar{e} = C(e)$   
compatibile con una carica conservata

W

$$\begin{matrix} e^{\rightarrow} \\ \bar{e}^{\leftarrow} \end{matrix}$$

2 gradi di liberta'  $m = 0$   $\bar{e} = C(e)$   
compatibile con una carica conservata

M

$$\nu^{\uparrow\downarrow} \equiv \bar{\nu}^{\uparrow\downarrow}$$

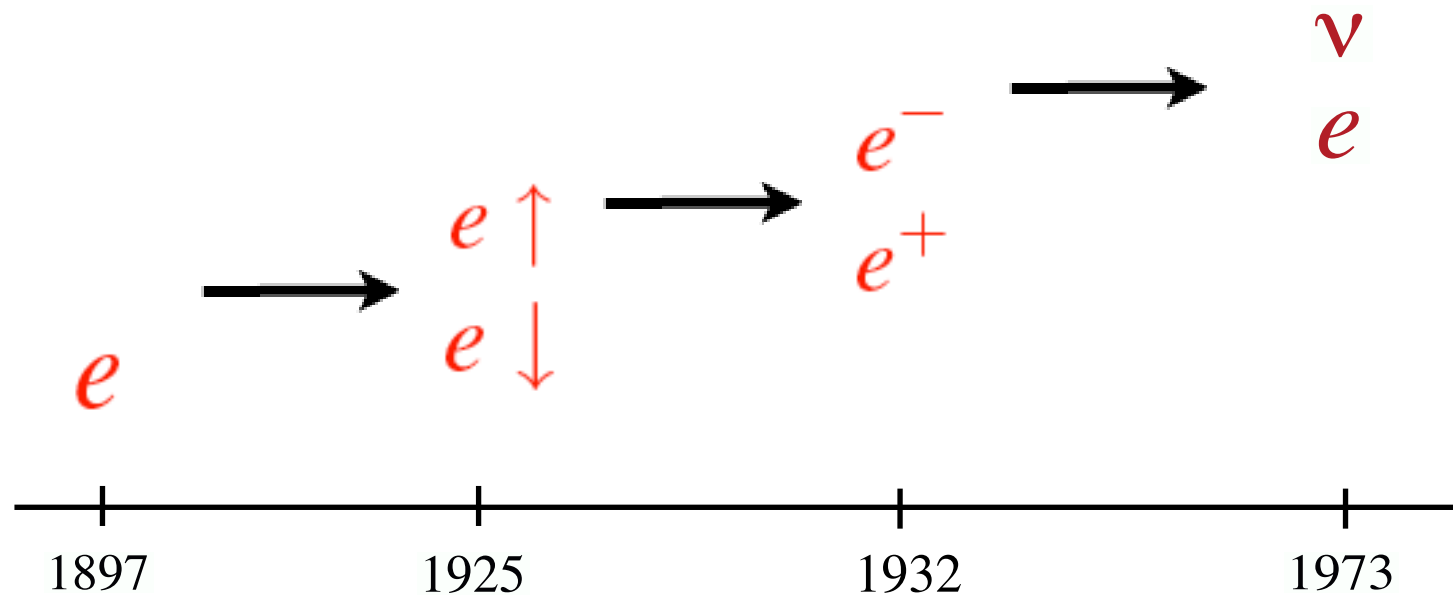
2 gradi di liberta'  $m \neq 0$   $\bar{\nu} = C(\nu) = \nu$   
incompatibile con una carica conservata

Majorana parte dalla simmetria fra elettroni e positroni, C,  
non evidente nella pittura del mare di Fermi

Nel superarla, Majorana incappa nell'idea dello spinore autoconiugato

Se il neutrino e' di Majorana, il numero leptonico (come B?) e' violato

# La chiave della sintesi nella fisica delle particelle



Le simmetrie “interne” e dello spazio-tempo,  
al centro della fisica del 900 e degli interessi di **Majorana**

L'uso *strumentale*:

Cosa implicano le simmetrie di una teoria data?

L'uso *di invenzione*:

Quali le possibili simmetrie e le teorie possibili?

# Il ruolo delle simmetrie e' esaurito?

3 direzioni possibili:

1. L'unificazione:

$e \quad \nu \quad u \quad d$

2. La supersimmetria:

$e \quad \tilde{e}$

3. Le corde:

$X(\sigma, \tau) \subset (e, \nu, u, d, \dots)$

non mutuamente escludentesi

# Le corde

Le particelle elementari come eccitazioni di una corda vibrante

Gli stati di spin piu' elevato sono una componente inevitabile di una teoria di corde, che ne costituisce l'unica descrizione relativistica nota, incluse le interazioni.

⇒ Majorana si pone per primo il problema e lo risolve per (una infinita' di) particelle libere di spin intero e semintero (Fierz, Fierz e Pauli, 1939; ...)

⇒ La prima rappresentazione unitaria (infinito-dimensionale) del gruppo di Lorentz (Wigner, 1939; Dirac, 1945; ...)

⇒ Uno dei primi esempi di formula di massa in fisica delle particelle elementari

$$m_s = \frac{M}{s + 1/2} \quad \begin{array}{l} s = 0, 1, 2, \dots \\ s = 1/2, 3/2, \dots \end{array}$$

# La supersimmetria

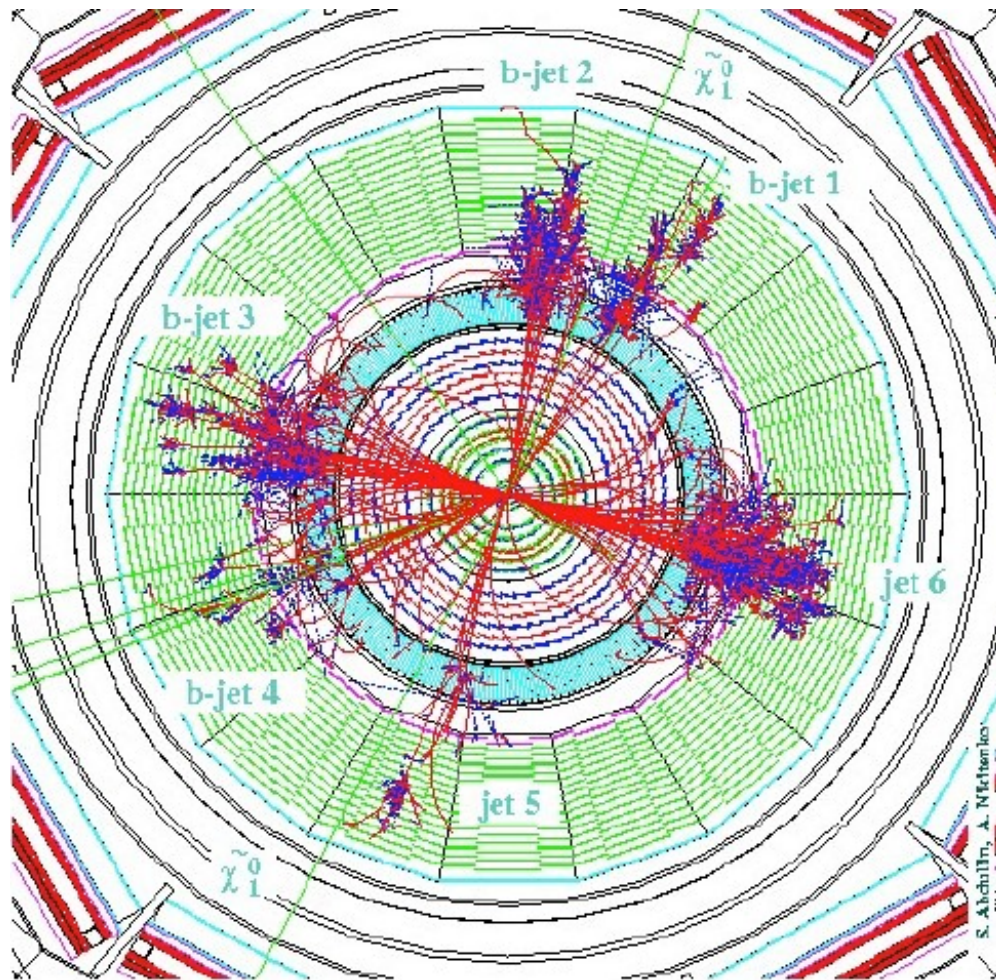
$$\mathcal{L} = i\bar{\psi} \not{D}\psi - (m\psi\psi + h.c.) + |D_\mu\phi|^2 - m^2|\phi|^2$$

La Lagrangiana libera di uno scalare complesso e di un fermione di **Majorana** e' simmetrica per un opportuno scambio del bosone col fermione

Tale Lagrangiana e' estendibile ad includere interazioni mantenendo la supersimmetria



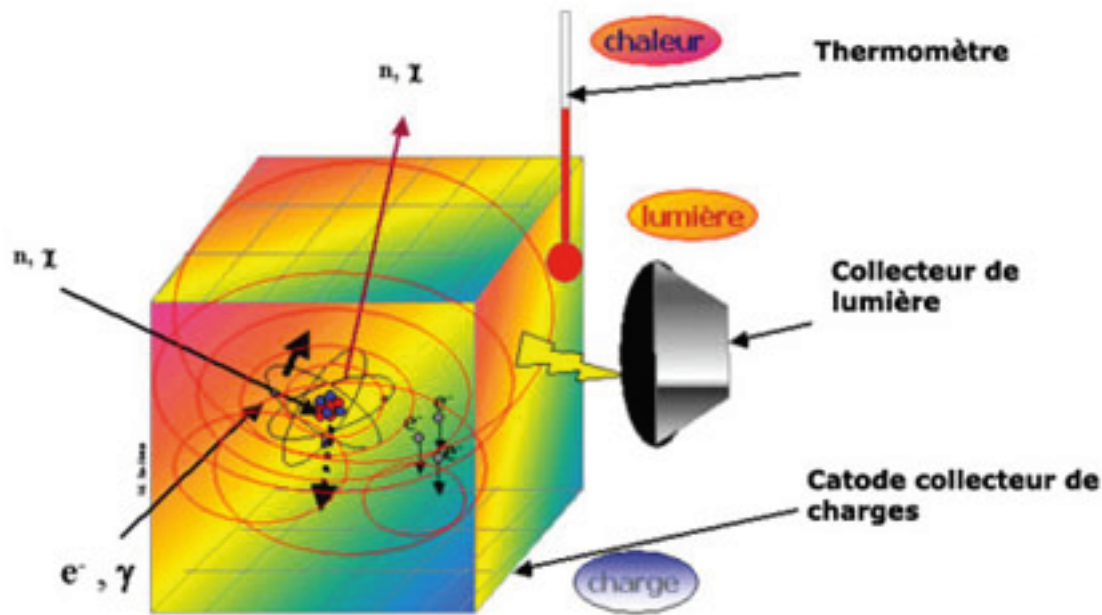
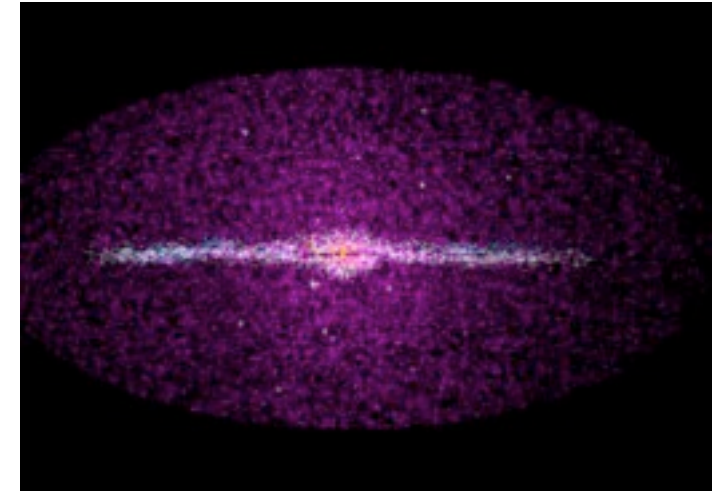
# Se le particelle supersimmetriche esistono, saranno scoperte al Large Hadron Collider



- $m_{\tilde{g}} = 1266 \text{ GeV}$
  - $m_{\tilde{u}_L} = 1450 \text{ GeV}$
  - $m_{\tilde{t}_1} = 1026 \text{ GeV}$
  - $m_{\tilde{\chi}_2^0} = 410 \text{ GeV}$
  - $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 214 \text{ GeV}$
  - $m_h = 119 \text{ GeV}$
- fermioni di Majorana

Materia di discussione al momento

La particella supersimmetrica piu' leggera e' probabilmente un fermione stabile di Majorana. Come tale puo' costituire la materia oscura osservata nell'universo



$$Z_{\mu} \bar{\Psi}_M \gamma_{\mu} \Psi_M = 0$$

$$Z_{\mu} \bar{\Psi}_M \gamma_{\mu} \gamma_5 \Psi_M \neq 0$$

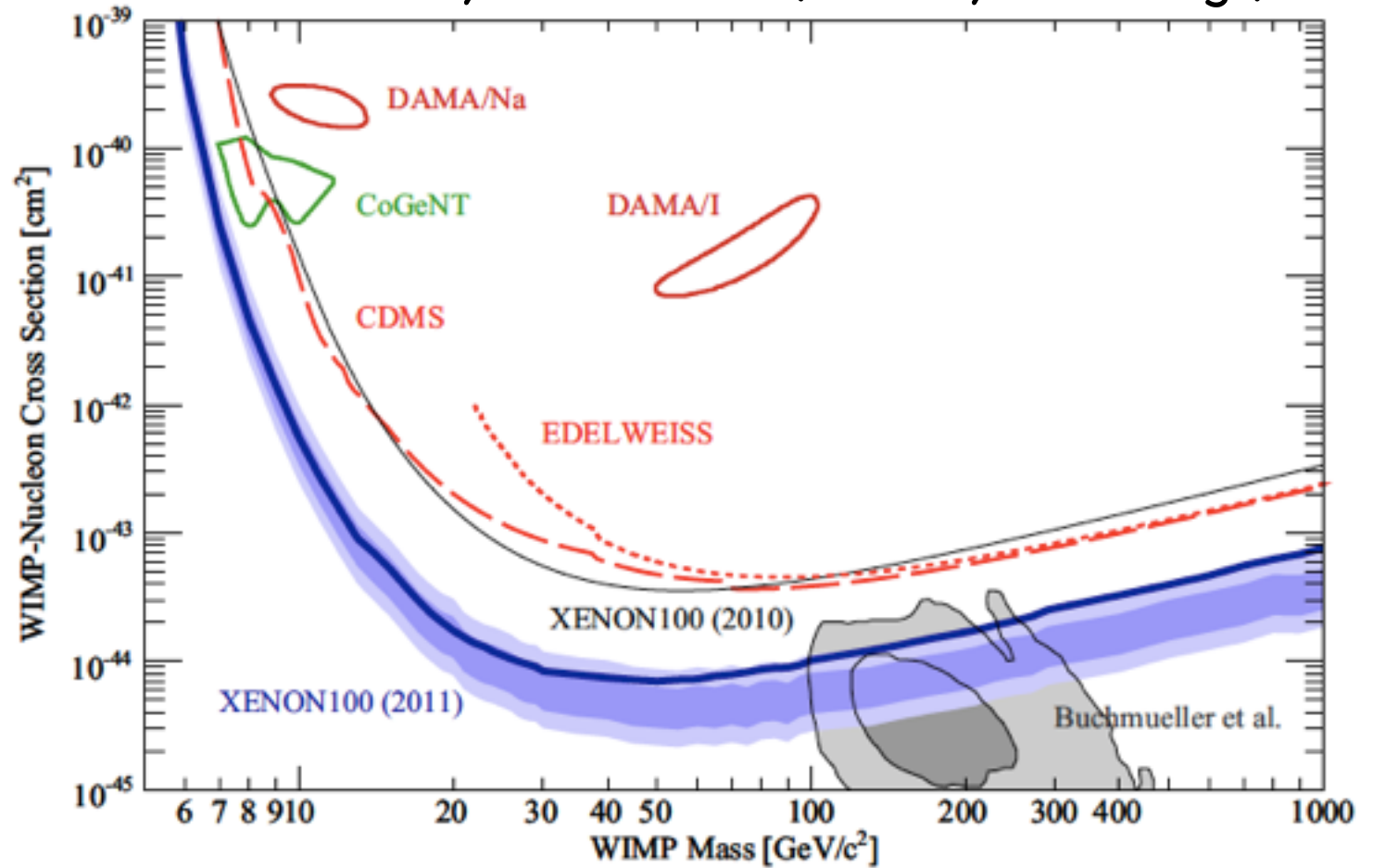
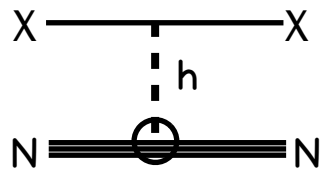
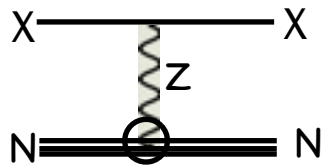


# The LHC/DM interplay

exclusion by XENON100 (100 days x 48 kgs)

$\chi N \rightarrow \chi N$   
3 events/1.8 backgd

$\sigma_Z(\chi N)$  spin indep.  
excluded since  
long time



Higgs boson exchange being probed now for  $m_h \approx 100 \text{ GeV}$

$$\sigma_h(\chi N) \approx 10^{-43} \text{ cm}^2 \left(\frac{\lambda}{0.1}\right)^2 \left(\frac{100 \text{ GeV}}{m_\chi}\right)^2 \left(\frac{100 \text{ GeV}}{m_h}\right)^4$$

# L'unificazione

Il problema principale di Pagina 1:  
la carica elettrica non quantizzata

Perche'  $q(\text{protone}) = q(\text{elettrone})$  a meno di  $10^{-21}$ ?

$e \quad \nu \quad u \quad d$  come un unico multipletto  
di una teoria unificata:  $SO(10)$ ?

⇒  $Q$  diventa uno dei generatori di una simmetria non  
abeliana con autovalori quantizzati

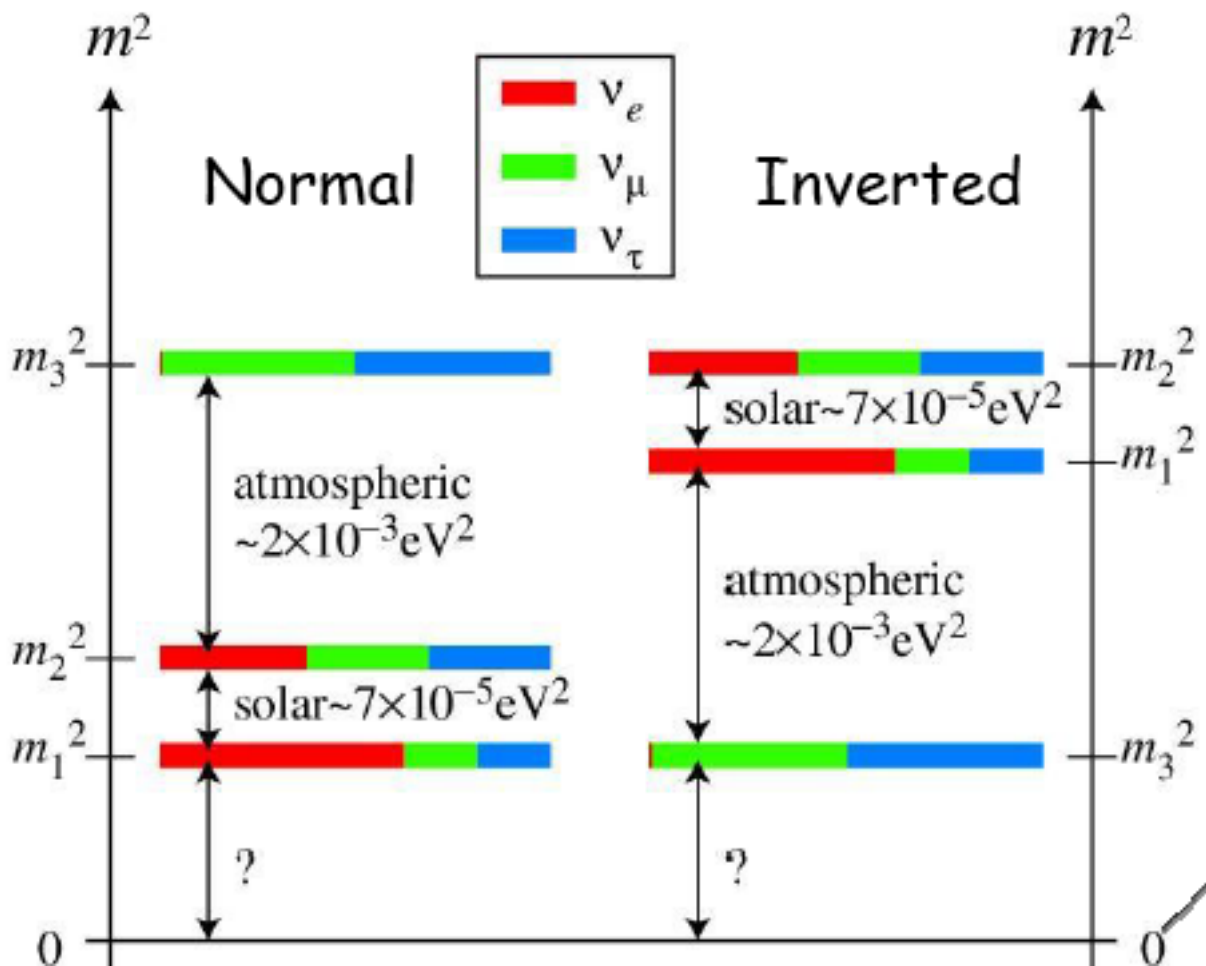
⇒  $B$  ed  $L$ , come  $Q$ , da simmetrie globali a simmetrie di  
gauge necessariamente rotte a piccolissime distanze

⇒ I neutrini sono di **Majorana**

Provare che i neutrini sono di Majorana e' uno  
dei pochi modi per corroborare l'unificazione

# Current knowledge and open problems in $\nu$ -physics

in the 3-neutrino picture



$$|\nu_i\rangle = V_{i\alpha} |\nu_\alpha\rangle$$

$$\alpha = e, \mu, \tau$$

$$\langle m^2 \rangle = ?$$

$$V_{3e} = ?$$

Normal or Inverted?

CP violated?

3 neutrinos only?

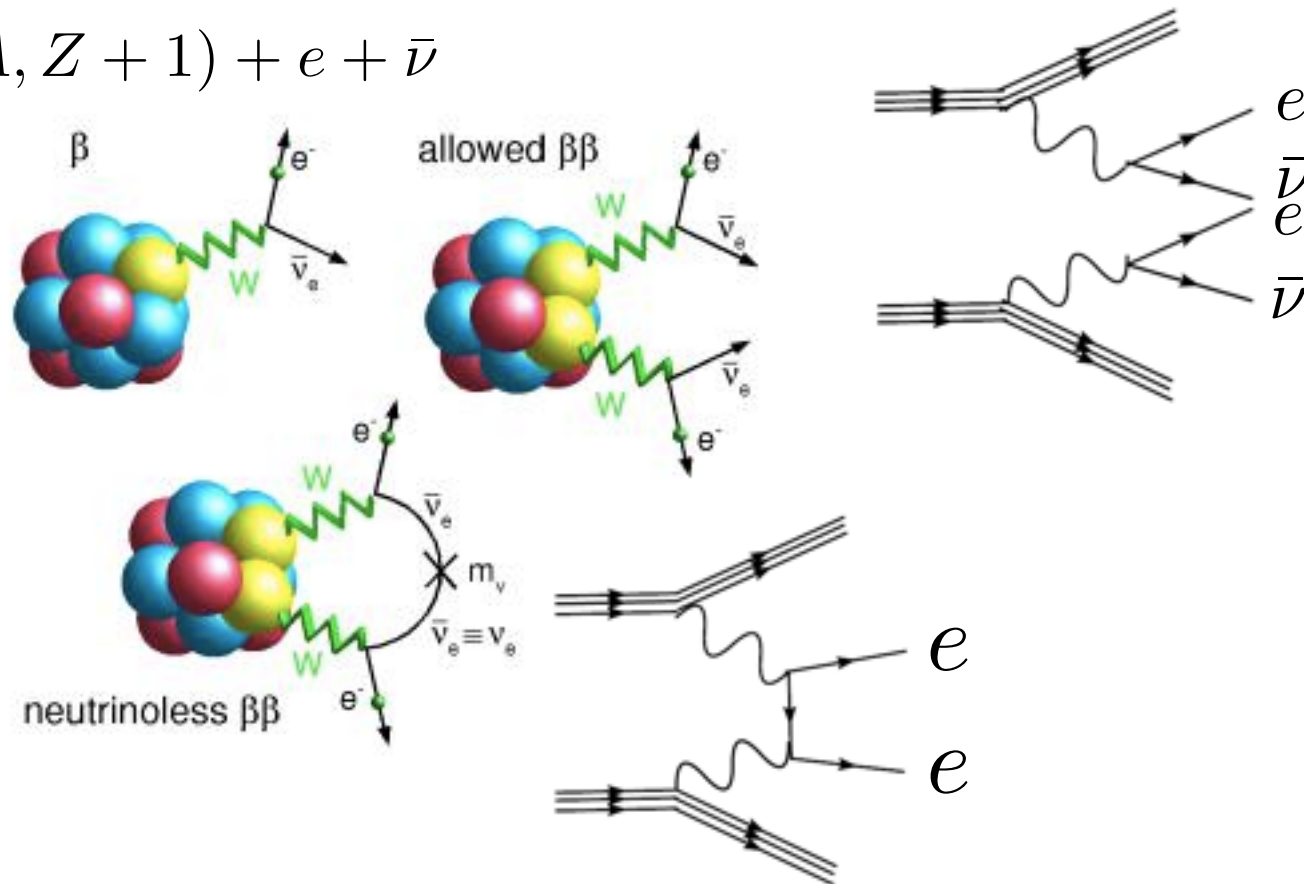
Majorana or Dirac?

The newest result:  $\sin^2 \theta_{13} = 0.0245 \pm 0.0032$

# Come si prova che un neutrino e' di Majorana?

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e + 2\bar{\nu}$$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e + \bar{\nu}$$



$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e$$

Currently  $\tau_{2\beta}^{0\nu} \gtrsim 10^{25} \text{ yrs} \Rightarrow m_{\nu M} \lesssim 0.1 \div 1 \text{ eV}$

Se il ruolo delle simmetrie nella fisica delle interazioni fondamentali non è esaurito, è molto probabile che ci ritroveremo a parlare ancora di Majorana

# Contents of the lectures

1. About the Higgs boson
2. A natural Fermi scale
3. Flavour physics at the Fermi scale