# Accademia Galileiana di Scienze Lettere e Arti

Giornata Majorana 28 Marzo 2006

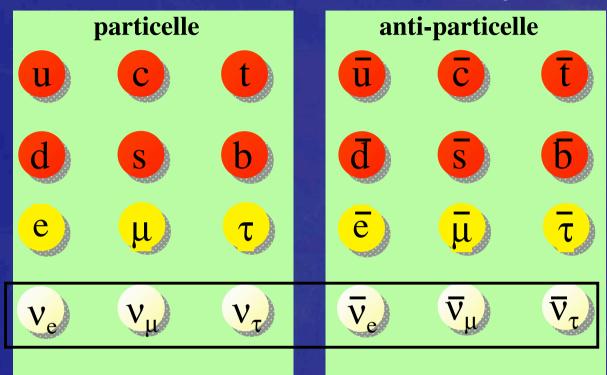
#### Ettore Majorana, la materia, l'antimateria

A. Bettini

Università di Padova, Dipartimento di Fisica G. Galilei INFN - Sezione di Padova



## I costituenti e le forze



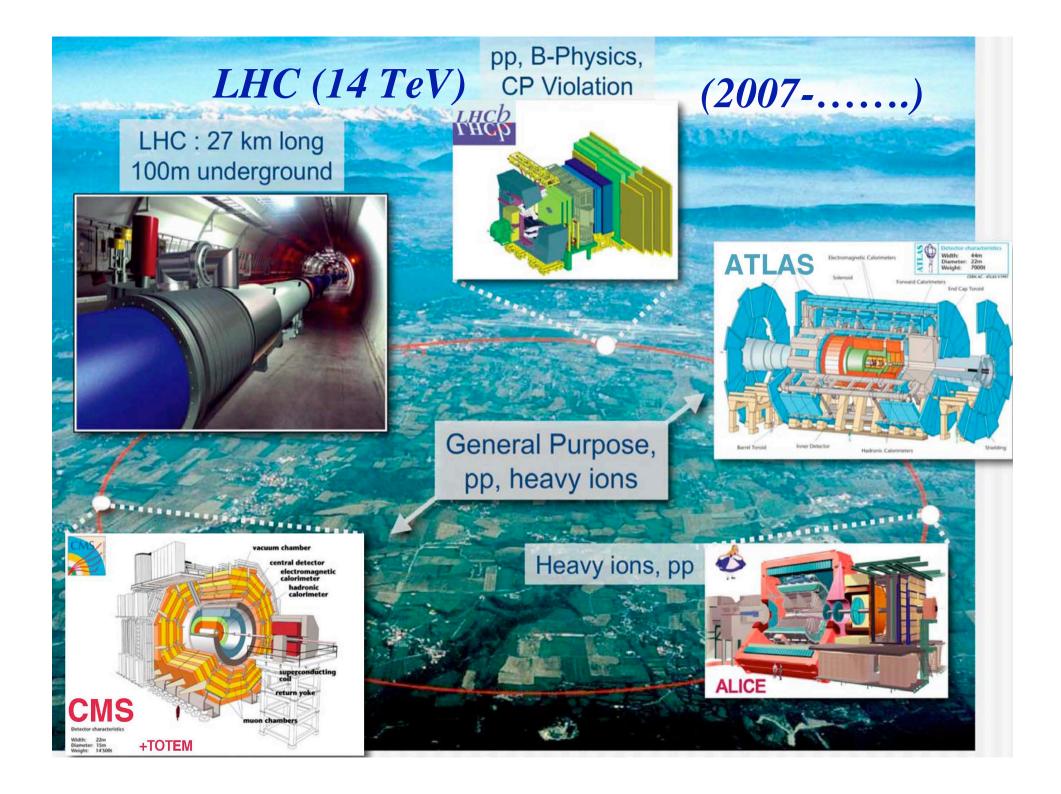
#### Ma

- $\nu_e, \nu_\mu e \, \nu_\tau$  non sono stati stazionari, passando il tempo cambiano famiglia
- •I neutrini hanno massa non nulla
- •Neutrini e antineutrini potrebbero essere la stessa particella



C'è realmente? Quanti ce ne sono?





#### Il modello standard non basta

Il modello standard è il grande edifico teorico che unifica tutte le interazioni fondamentali, tranne la gravità

È testato con precisione senza precedenti, ma non basta perché

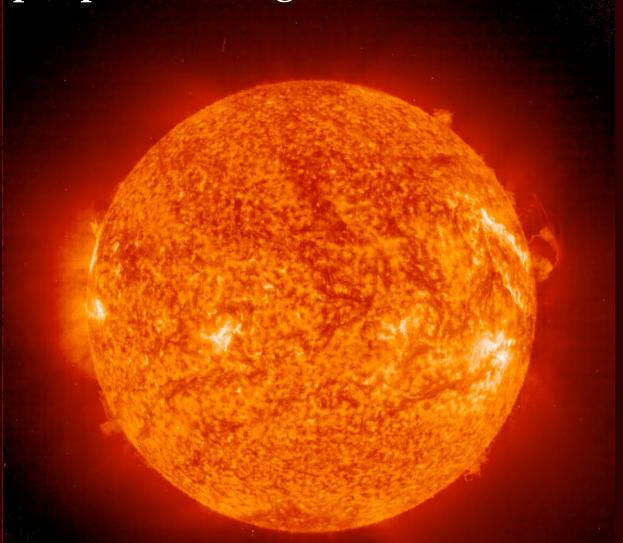
- •è incompleto perché non include la gravitazione
- •è in contraddizione con fatti sperimentali (fisica del neutrino) e con osservazioni astrofisiche
- •I valori di molti dei suoi parametri (le masse etc.) non sono previsti
- •L'interazione dell'higgs con le particelle virtuali che ribollono nel vuoto quantistico gli darebbe "naturalmente" una massa enorme.
  - •Per risolvere il problema ⇒ ipotesi della supersimmetria
- •SUSY è il più standard dei modelli non standard: ad ogni particella nota se ne associa un'altra

# Oltre il modello standard La fisica dei neutrini

Esperimenti sui neutrini hanno mostrato fatti in contraddizione con il modello standard:

- $v_e$ ,  $v_\mu$ e  $v_\tau$  non sono gli stati stazionari ma si possono trasformare l'uno nell'altro. Ciò è stato osservato in due tipi di fenomeni
  - •le oscillazioni (neutrini atmosferici)
  - •le trasformazioni nella materia (neutrini solari)
- •questi fenomeni possono avvenire solo se i neutrini hanno masse diverse, quindi non possono essere nulle

La più potente sorgente di neutrini vicino



B. Pontecorvo 1968: "Dal punto di vista osservativo l'oggetto ideale è il sole....... (Se ci fosse il fenomeno della conversione) l'effetto netto sulla superficie della terra sarebbe che il flusso osservabile di neutrini dal sole dovrebbe essere la metà del flusso totale"

La scoperta fu graduale

1964. Homestake + Modello Solare di J. Bahcall

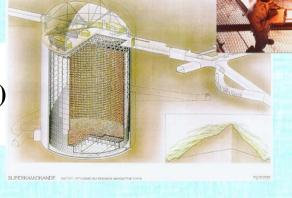
flusso di  $v_e$  dal sole  $\approx 1/3$  dell'aspettato ha colpa il sole, la fisica nucleare, il neutrino?

1997. GALLEX + LUNA al Gran Sasso

il colpevole è il neutrino

#### 1998. SuperKAMIOKANDE

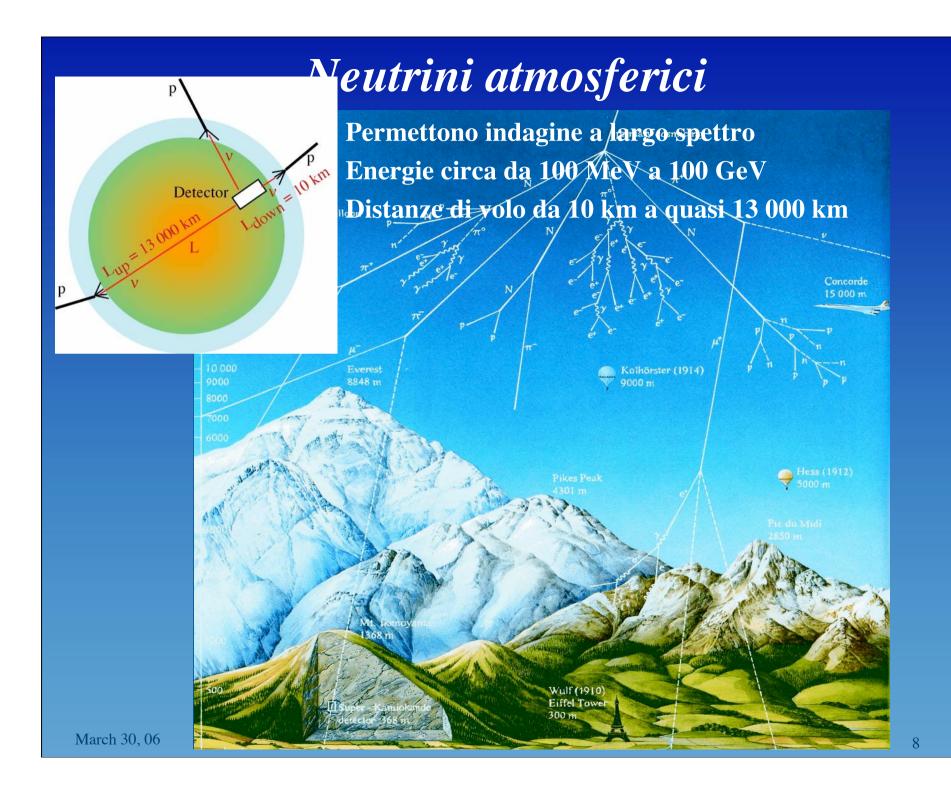
scoperta oscillazioni (scomparsa) nei  $v_{\mu}$  da atmosfera



#### **2002. SNO**

osservazione di comparsa di  $v_{\mu}$  e  $v_{\tau}$  dal sole, tanti quanti sono i  $v_{e}$  scomparsi





# Ottant'anni fa A. Bettini. INFN

## L'equazione di Dirac

1927. P.A. M. Dirac formula l'equazione relativistica per l'elettrone

Relatività + meccanica quantistica



L'elettrone è una trottola, momento angolare intrinseco (**spin**), = 1/2

Meccanica quantistica ⇒ due possibilità

elettrone destro



Si avvita girando cacciavite in senso orario

elettrone levo



Si avvita girando cacciavite in senso antiorario

Rappresentiamoli così ⇒

elettrone destro



elettrone levo



D

A. Bettini. INFN

L

## Ce ne sono quattro!

Soluzione dell'equazione: due stati con energia positiva, due stati con energia negativa. Palese assurdità?

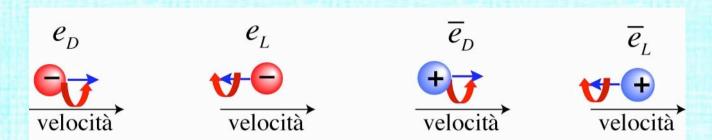
- 1929. Dirac ipotizza che gli stati di energia negativa siano particelle positive, protoni, con energia positiva (asimmetria)
- 1930. Weyl introduce la simmetria tra carica positiva e negativa
- **1931**. Dirac immagina che esistano gli anti-elettroni, uguali agli elettroni, ma con carica + (positroni)

Seguiamo Wilczek. Problema generale in retrospettiva: c'è una "tensione creativa" tra relatività e meccanica quantistica: per la relatività spazio e tempo sono sullo stesso piano, per la meccanica quantistica sono ben diversi.

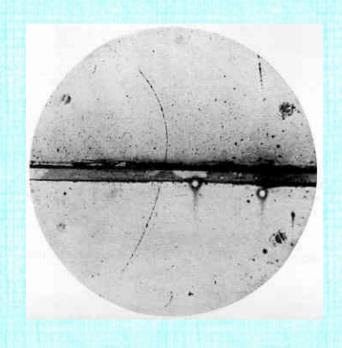
Un elettrone si muove a velocità prossima a c; per la MQ la velocità è un po' indeterminata, c'è una probabilità non nulla che sia >c. Per evitarlo  $\Rightarrow$  antielettrone

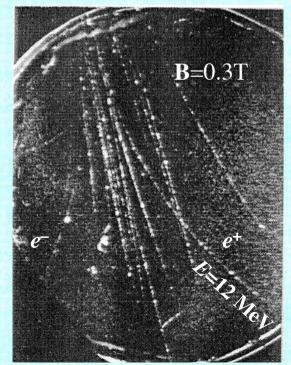
Grosso modo. Incertezza nella posizione ⇔ l'atto della misura può implicare la creazione di elettroni, tutti indistinguibili dall'originale, in punti diversi. Per il bilancio della carica ⇒ creazione di altrettanti anti-elettroni

#### I quattro stati



1932-33. Anderson e indipendentemente Blackett e Occhialini scoprono nei raggi cosmici particelle positive con la massa uguale agli elettroni





March 30, 06

A. Bettini. INFN

12

## Una spiacevole asimmetria

Oggi sappiamo dimostrare l'equazione di Dirac in modo completamente simmetrico tra elettroni e positroni, ma Dirac arrivò ad un risultato intermedio asimmetrico, per renderlo simmetrico nelle fasi successive della dimostrazione.

1937. E. Majorana non è soddisfatto dell'asimmetria in itinere. Pubblica su Il Nuovo Cimento l'articolo "Teoria Simmetrica dell'Elettrone e del Positrone", in cui "si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione".

Motivazione di Majorana: criterio "estetico" di ricerca di simmetria Risultato non rilevante per fisica degli elettroni (e particelle cariche) ma aprì una possibilità radicalmente nuova per le particelle neutre

#### Il neutrino (elettronico)

Il nuovo approccio permette "non solo di dare una forma simmetrica alla teoria elettroni-positroni, ma anche di costruire una teoria sostanzialmente nuova per le particelle senza carica elettrica (neutroni ed ipotetici neutrini)."

..... forse non è "ancora possibile chiedere all'esperienza una decisione fra questa nuova teoria e quella consistente nella semplice estensione delle equazioni di Dirac alle particelle neutre"

Il neutrino era stato ipotizzato da W. Pauli nel 1930, ma non si sapeva se esistesse

Majorana osserva che la sua teoria consente di introdurre "in questo campo poco esplorato, un minor numero di entità possibili".

Infatti se il neutrino è come l'elettrone, se ubbidisce all'equazione di **Dirac**, ci sono in totale **quattro oggetti**, se ubbidisce all'equazione di **Majorana**, solo **due** 

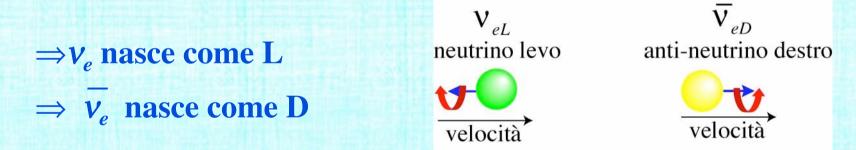
# Prime sorprese dal neutrino

1956. Reines e Cowan scoprono il neutrino elettronico  $v_e$  associato con l'elettrone

Da allora molte le esplorazioni del campo

E molte sorprese

1957. Le interazioni deboli violano la parità, cioè non sono simmetriche per l'inversione speculare



Quindi se il neutrino elettronico è come l'elettrone, se ubbidisce all'equazione di **Dirac**, ci sono in totale **due oggetti**, se ubbidisce all'equazione di **Majorana**, solo **uno** 

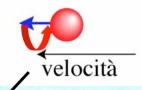
#### Relazione elettrone-antielettrone

Un nucleo fermo, rispetto ad un dato sistema di riferimento, decade beta producendo un elettrone L, che si muove con velocità v (ad esempio) verso destra

elettrone levo

Un altro sistema di riferimento si muove nella direzione dell'elettrone con velocità  $V>\upsilon$ . In esso l'elettrone viaggia verso sinistra. L'elettrone è D

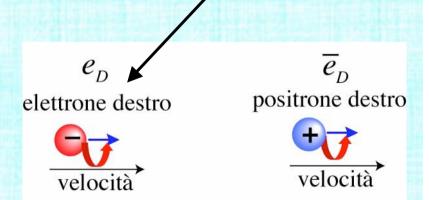
elettrone destro



Abbiamo due oggetti D; si potrebbe fare con uno solo?

Come si distingue tra i due?

Ovviamente dalla carica elettrica

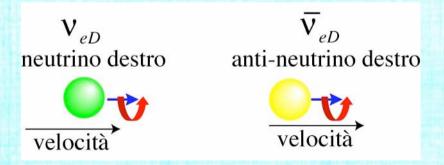


#### Relazione neutrino-antineutrino

Se i neutrini avessero m=0, come nel modello standard, viaggerebbero con la velocità c; non potremmo scambiare  $L \Leftrightarrow D$  cambiando sistema di riferimento

Invece hanno massa e quindi si può fare come per l'elettrone Cambiando sistema di riferimento  $v_L$  diventa  $v_D$ 

Come distinguerlo da  $\overline{v}_D$ ?



17

# Neutrino di Majorana

I neutrini non hanno carica, sono distinti solo dall'essere l'uno un leptone, l'altro un antileptone, cioè dal "numero leptonico"

Numero leptonico = numero di leptoni diminuito di quello di antileptoni

Dovrebbe essere sempre costante, ma le oscillazioni dei neutrini indicano che ciò potrebbe non essere (indicazione non prova sperimentale)

Dal punto di vista teorico se ci fosse violazione non sarebbe un dramma; la conservazione del numero leptonico è infatti conseguenza della forma specifica della teoria attuale

È possibile che la natura abbia scelto una delle due possibilità

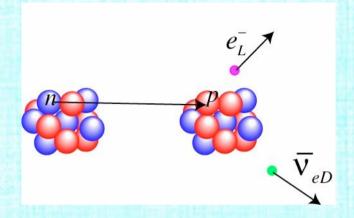
Majorana: neutrino che è anche antineutrino

Dirac: neutrino e antineutrino sono particelle diverse

# Decadimenti beta e doppio-beta

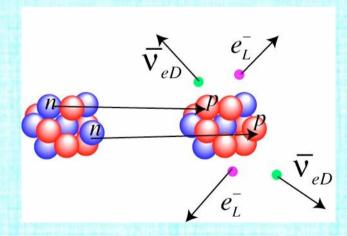
Decadimento beta di un nucleo; un protone decade beta

$$n \rightarrow p + e_L^- + \overline{\nu}_{eD}$$



Decadimento beta doppio di un nucleo; due protoni decadono beta contemporaneamente

$$2n \rightarrow 2p + 2e_L^- + 2\overline{\nu}_{eD}$$



Processo osservato sperimentalmente

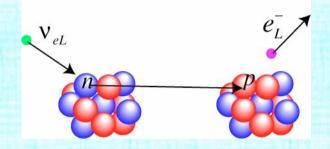
## Doppio-beta senza neutrini

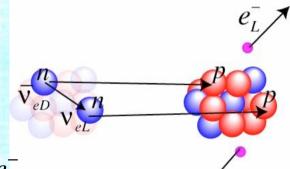
Processo inverso al decadimento beta; serve un neutrino L

$$V_{eL} + n \rightarrow p + e_L^-$$

Se neutrino è Majorana: antineutrino D emesso da un neutrone può apparire come neutrino L ad un altro neutrone

$$n \rightarrow p + e_L^- + (\overline{\nu}_{eD} = \nu_{eL}); \quad (\nu_{eL} = \overline{\nu}_{eD}) + n \rightarrow p + e_L^-$$





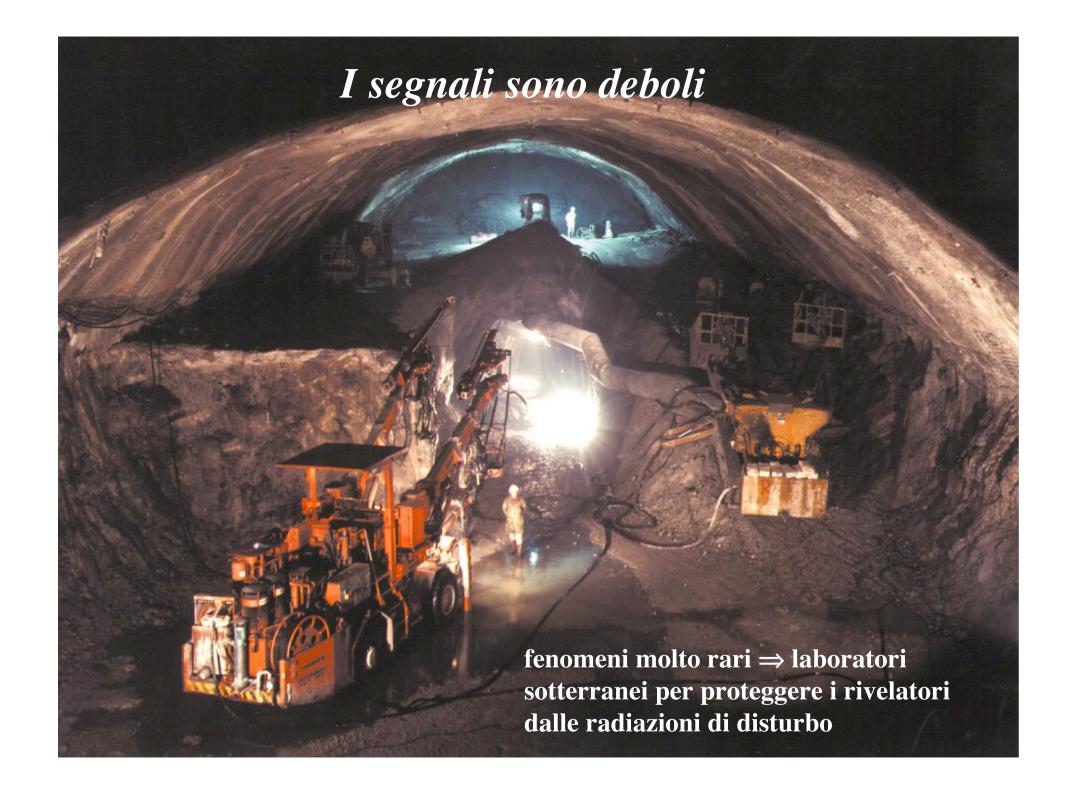
Processo rarissimo, tanto più quanto è più piccola la massa del neutrino

Non più di un milionesimo di miliardesimo dell'età dell'universo = un decadimento in una tonnellata di materiale in un anno

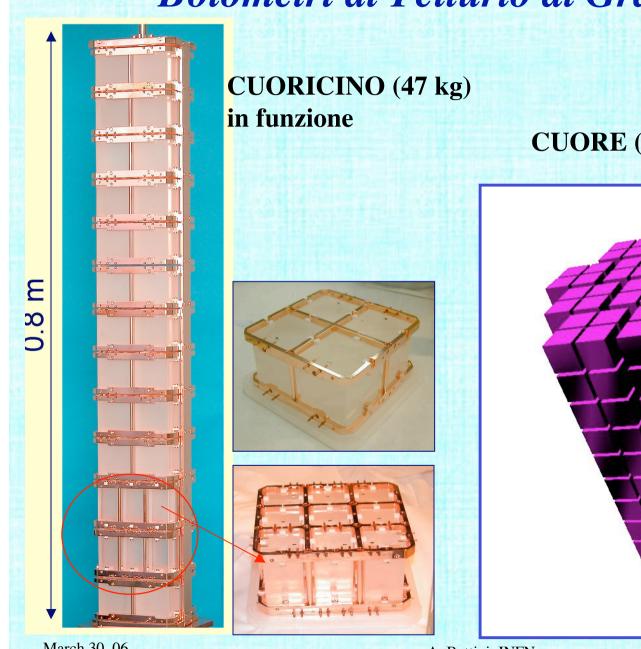
# Dirac o Majorana?



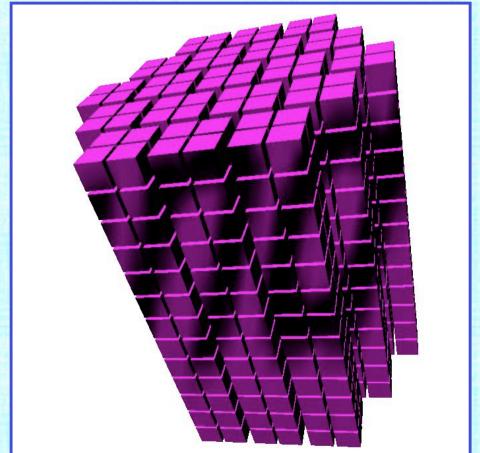




#### Bolometri di Tellurio al Gran Sasso



CUORE (741 kg) in costruzione



March 30, 06

A. Bettini. INFN

23

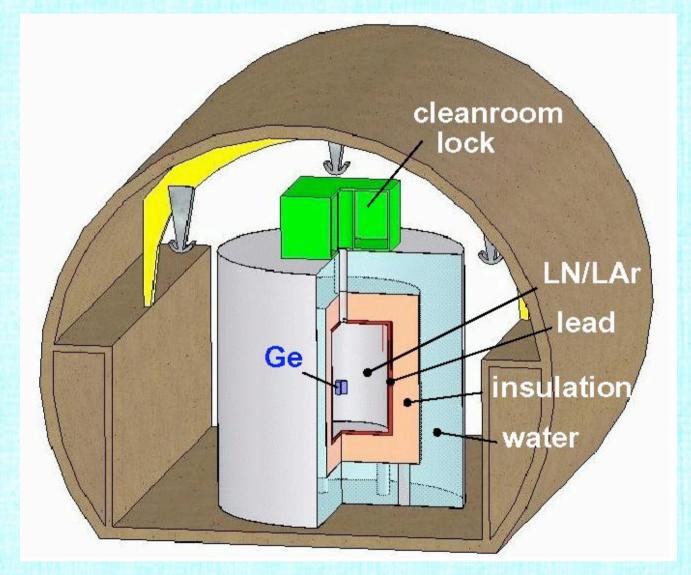
#### Diodi di Germanio arricchito al Gran Sasso

#### Cristalli di Ge arricchito in N2 o Ar liquido

Fase 1: 17 kg

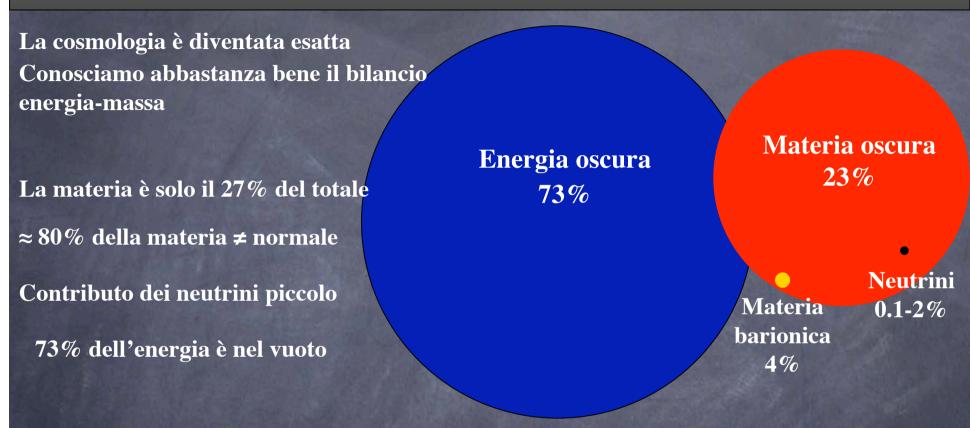
Fase  $2 \approx 30 \text{ kg}$ 

Fase  $3 \approx 500 \text{ kg}$ 





## Il bilancio cosmologico



Il modello cosmologico standard è basato su:

- **Una materia oscura che non vediamo**
- >Un'energia oscura che non capiamo

# Abbiamo appena cominciato

1975. Lezione inaugurale di S. Hawking alla Cattedra Lucasiana a Cambridge "La fine della fisica teorica è prossima?" Risposta: Sì Galileo, poi Newton (prima i physiologoi, un po')

- •la materia degli oggetti celesti è la medesima degli oggetti terreni
- •Le leggi che governano gli oggetti terrestri e del cosmo sono le medesime

Le osservazioni astronomiche recenti

- •Praticamente tutta la materia che riempie l'universo a grandi scale non è la stessa che costituisce gli oggetti terreni (e quelli visibili)
- •Le "forze" che governano l'universo a grandi scale non sono quelle del modello standard

Ma abbiamo indicazioni di cercare

- •Nuove particelle elementari
- •Nuove proprietà, quantistiche, del vuoto

March 30, 06 A. Bettini. INFN

#### La supersimmetria. SUSY

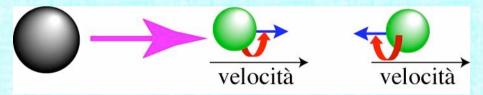
SUSY allarga il concetto di simmetria delle equazioni e la simmetria spazio-temporale della relatività speciale

Ogni particella nota di spin intero ha un partner con spin semiintero; ogni particella nota di spin semi-intero ha un partner con spin intero

*Elettrone, quark* ⇔ selettrone, squark



Higgs (e un po' d'altro) ⇔ neutralino

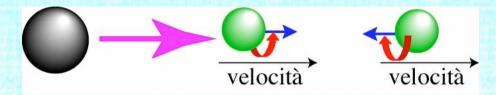


Nessuna particella supersimmetrica è stata mai osservata Se ci sono, hanno masse molto grandi

March 30, 06 A. Bettini. INFN

#### SUSY

#### **Higgs** ⇔ neutralino



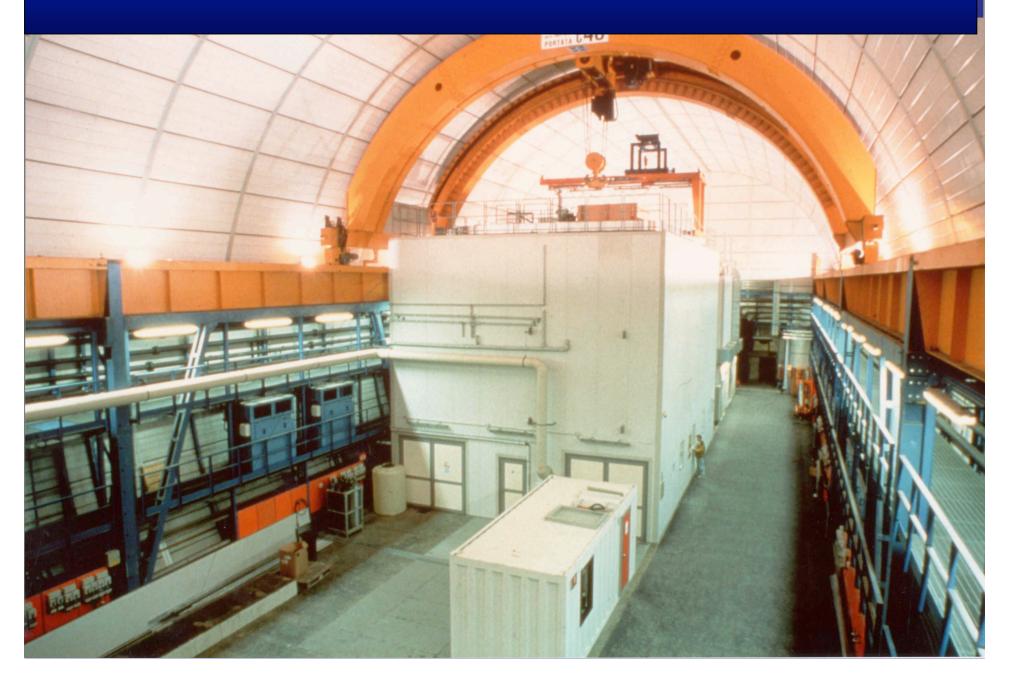
La teoria prevede che il neutralino  $\chi=\chi$ 

- •coincida con l'antineutralino, è una particella di Majorana
- •abbia massa grande
- •sia stabile; quelli prodotti quando l'universo era molto caldo sono attorno a noi

Potrebbero essere (alcune del)le particelle della materia oscura

Serve ricerca complementare a LHC

# Torniamo in laboratorio

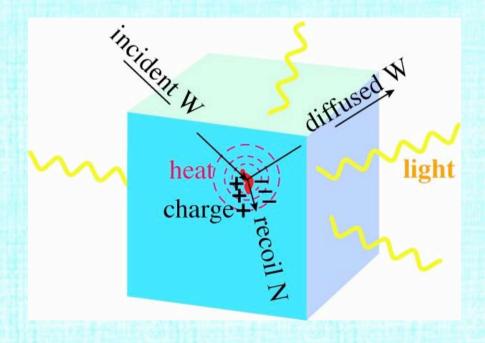


#### Rivelazione della materia oscura?

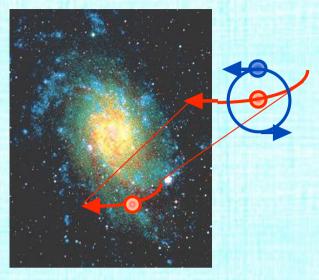
#### **Rivelatore=Bersaglio**:

Se una particella della materia oscura urta un nucleo, questi acquista energia di rinculo, che poi deposita nel rivelatore. Si cerca di misurarla come carica, luce o calore

I segnali sono rarissimi. Molti meno dei segnali spuri



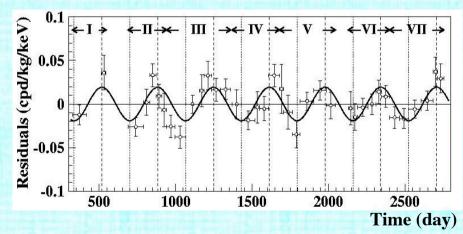
#### Modulazione Annuale. DAMA al Gran Sasso



Il sistema solare si muove nel nuvolone di materia oscura che riempie la Galasia. La terra ruota attorno al sole

Si aspetta che: in giugno si va contro-vento, maggiore frequenza di conteggio. In dicembre minima frequenza di conteggio





Indicazione positiva, ma serve conferma; molti fenomeni hanno periodo di un anno

March 30, 06

# Conclusioni

- •I mesoni neutri mediatori delle forze sono antiparticelle di se stessi
- •Le particelle che costituiscono la materia, leptoni carichi e quark hanno ciascuno un'antiparticella. La materia conosciuta è diversa dall'antimateria
  - •Perché nell'Universo la materia predomina?
- •Majorana anticipò incredibilmente i tempi dimostrando che ci sono forme di materia che sono anche antimateria. Non ne abbiamo ancora scoperte, ma
- •Tali potrebbero essere i neutrini
- •Tale potrebbe essere la gran parte della materia dell'Universo

# Infine

Possiamo capire il mondo, se ci proviamo (Talete)

La parte che capiamo è affascinate

Più è quello che capiamo, più è quanto sappiamo di non capire