

Lezione Fermi 25

Luciano Maiani, AA 14-15

Il Numero Barionico

Sommario

1. Un Universo simmetrico e disomogeneo...non funziona
2. Conservazione del numero barionico, B
3. Misura della instabilita' del protone
4. La materia in un Universo simmetrico, B conservato
5. le condizioni di Sakharov

1. Un Universo simmetrico ma disomogeneo...non funziona

- Idea in voga negli anni '60
- Universo parte simmetrico tra materia e antimateria, ad es. con un Big Bang
- fluttuazioni di densita' permettono vaste zone in cui la materia prevale sull'antimateria, o viceversa
- raffreddandosi, le diverse zone diventano delle "isole" di materia (come la Terra, o forse la Galassia, o....) e isole di antimateria
- da allora molte prove sperimentali indicano che l'idea non funziona
- non si vede antimateria a livello di
 - sistema solare: non ci sono "antiasteroidi" (neanche l'evento siberiano!)
 - galassia: gas interstellari e polveri mettono in contatto tutte le parti della galassia, se alcune parti fossero di antimateria ci dovrebbe essere annichilazione al confine → emissione diffusa di raggi γ che non si vede
 - raggi cosmici: hanno cariche positive! non ci sono frazioni apprezzabili di antinuclei
- L'immagine di oggi (ma sorprese ancora possibili): Universo omogeneo con prevalenza di materia (protoni+elettroni) sull'antimateria

Tunguska 2008

On June 30, 1908, an explosion over Siberia killed reindeer and flattened trees. But no crater was ever found. Scientists now believe it was a small comet or asteroid.

LE RICERCHE CONTINUANO, ANCHE DA PARTE DEGLI ITALIANI

F. Foresta Martin, *Le Scienze* 2008

Cento anni fa sui cieli della Siberia un'esplosione da mille bombe atomiche

Tra le ipotesi la disintegrazione di un asteroide, ma anche lo «scontro» con un blocco di antimateria cosmica



Un'immagine della foresta carbonizzata (da www.americandigest.org)

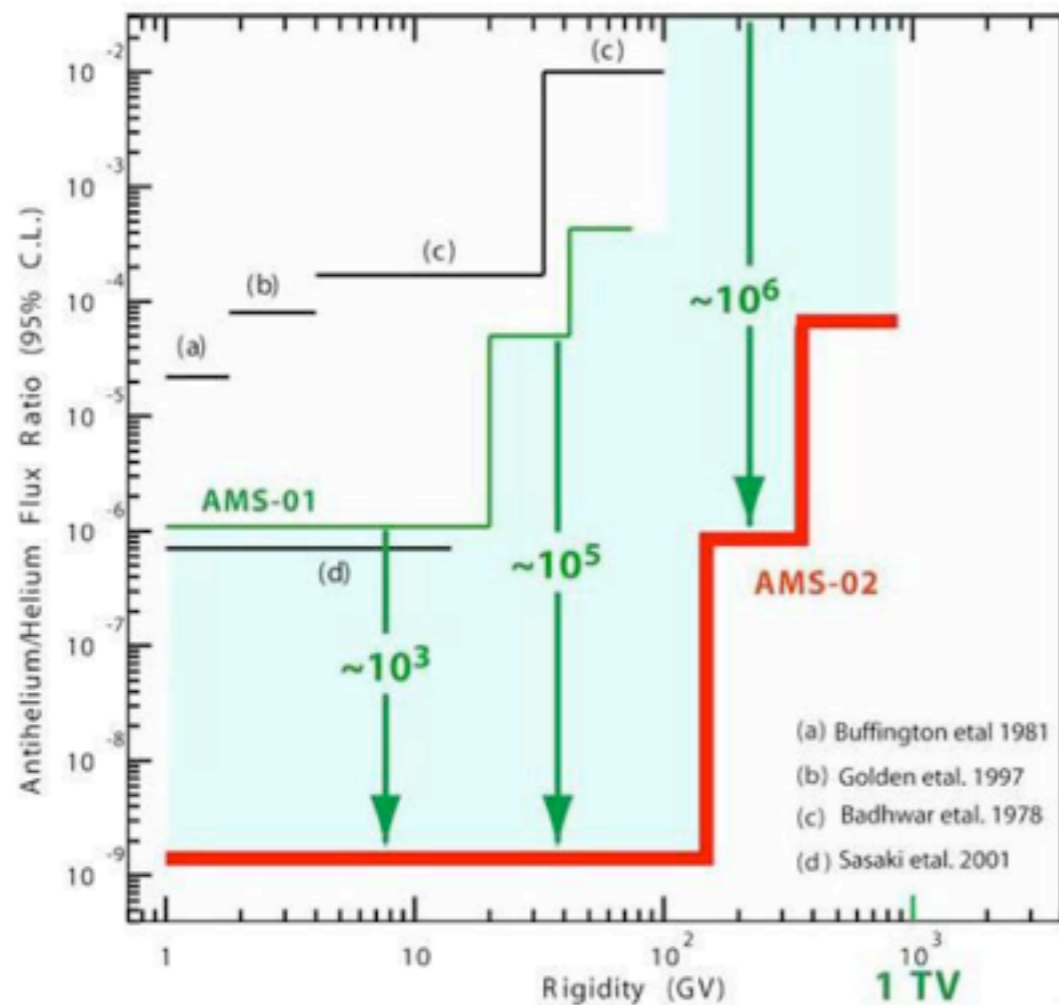
Che un secolo fa, in piena Siberia, si sia verificata un'esplosione equivalente a mille bombe nucleari di tipo Hiroshima, e che quel remoto fenomeno rimanga ancora un problema insoluto, malgrado decine di esplorazioni e ricerche, è uno smacco per la moderna ricerca scientifica. Ma proprio questa è la storia della misteriosa esplosione di Tunguska, che il 30 giugno 2008 compie esattamente 100 anni: tante supposizioni, tanti tenui indizi, e ancora nessuna ipotesi definitivamente provata. Caduta di una cometa o di un asteroide? Esplosione di una bolla naturale di gas metano? Oppure, per scivolare sul fantascientifico, collisione fra il

nostro pianeta e un grumo di antimateria? O lo schianto di un'astronave aliena? Sul caso Tunguska, negli ultimi anni, se ne sono lette di tutti i colori, da credibili ipotesi pubblicate su qualificate riviste scientifiche, ad articoli e libri di fiction privi di qualunque fondamento. Il centennale del mistero della Tunguska, ancora oggi irrisolto, merita un'attenta ricostruzione dei fatti.

Asteroide,
cometa...o
antimateria???

AMS-01/02

- I migliori limiti su antinuclei nei raggi cosmici sono stati ottenuti da Spettrometri magnetici su satellite: Pamela e AMS-01 su International Space Platform
- $x_{He} = \text{Flusso}(\text{Anti Elio}) / \text{Flusso}(\text{Elio})$ e' il segnale preferito: antigalassie lontane emetterebbero raggi cosmici di antiElio come la nostra emette raggi cosmici di Elio
- possiamo ottenere una stima della distanza minima di una antigalassia a partire dai limiti su x_{He}



- assumiamo: $x_{He} = \left(\frac{D_{noi}}{D_{a.m.}} \right)^2$
 $D_{noi} \sim 30 \text{ kpc}$ (galassia)

- troviamo:
 $x_{He} = 1 \cdot 10^{-6}$ (AMS - 01, Pamela)
 $D_{a.m.} \sim 30 \text{ Mpc}$ (Virgo Cluster)
 $x_{He} = 1 \cdot 10^{-9}$ (AMS - 02, futuro)
 $D_{a.m.} \sim 1000 \text{ Mpc}$ (confini dell'Universo visibile)

AMS-02 sensitivity to the anti-Helium flux

2. Conservazione del numero barionico

- Abbiamo incontrato molte reazioni nucleari, causate da interazioni deboli, forti elettromagnetiche, in varie combinazioni

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad e^- + p \rightarrow p + \nu_e, \quad (\text{weak int.})$$

$$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e, \quad {}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma, \quad (\text{weak and e.m. int.})$$

$${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n, \quad {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p, \quad (\text{strong int.})$$

$$\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + p, \quad p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \quad (\text{strong int.})$$

...

- se assegno al protone e al neutrone un numero (barionico) convenzionale =+1 e numero barionico =0 a elettroni, neutrini e fotoni, osservo che, in tutte le reazioni, questo numero si conserva, nel senso che:

$$\sum B_{iniz} = \sum B_{fin}$$

- da notare che questo non avviene separatamente per il numero dei protoni e dei neutroni. Ad es. nella reazione di formazione del deuterio (seconda riga), all' inizio ho $B_p=2$, $B_n=0$, mentre alla fine ho $B_p=1$, $B_n=1$: si conserva solo la somma $B=B_p+B_n$
- ad energie piu' alte incontriamo reazioni che coinvolgono mesoni e antibarioni. Se assegno $B=0$ ai mesoni e $B=-1$ agli antibarioni, la conservazione del numero barionico totale vale ancora. Es. nella seconda riga ho: $B_{iniz}=2$, $B_{fin} = 3-1=2$

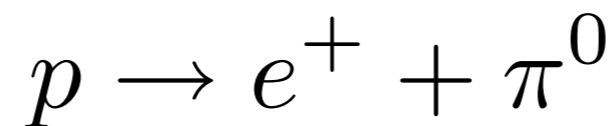
$$\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0, \quad \pi^- + p \rightarrow p + \pi^- + \pi^0 \quad (\text{reaz. con pioni})$$

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}, \quad p + p \rightarrow p + p + n + \bar{n} \quad (\text{prod. di antibarioni})$$

...

numero barionico e altre grandezze conservate (continua)

- la conservazione di B si aggiunge alle leggi di conservazione della *carica elettrica* (che potete verificare nelle reazioni della pag. precedente) e la conservazione di *energia, quantita' di moto e momento angolare*, E, p, *J*.
- Inoltre, se assegnamo L=+1 a (e^- , ν_e), L=-1 a (e^+ , anti- ν_e) anche il *numero leptonic* si conserva
- in totale, Q, B, L, E, p, *J* sono le grandezze conservate, e definiscono le reazioni permesse e quelle vietate (regole di selezione)
- L'elettrone e' la particella carica piu' leggera, quindi la sola conservazione di Q spiega la stabilita' assoluta dell'elettrone.
- La conservazione di B "spiega" la stabilita' del protone, nonostante la sua massa sia molto superiore alla massa dell'elettrone
- Se fosse solo per le altre leggi di conservazione si potrebbe avere, ad es. il decadimento (B diminuisce di 1, L diminuisce di 1, ***B-L=costante***)



- La conservazione di Q trova la sua base teorica nell' invarianza di gauge delle equazioni di Maxwell e implica che il fotone abbia massa zero.
- L'attuale limite e': $m_\gamma < 1 \cdot 10^{-18} \text{ eV} !!!!$
- La conservazione di B non e' associata ad alcuna invarianza di gauge ed e' sempre apparsa come una regola artificiosa, tuttavia...vale con grande precisione
- teorie di Grande Unificazione (GUT) prevedono che la conservazione di B sia violata ($B-L$ conservato) e che il protone sia instabile (prossima lez.) ma non abbiamo ancora evidenza sperimentale per il decadimento del protone, entro limiti che iniziano a mettere in dubbio la validita' delle GUT
- Limiti sulla instabilita' del protone si possono stabilire fino a vite medie estremamente lunghe, come indicato dai seguenti calcoli di ordini di grandezza

3. Misura della instabilita' del protone

1 m³ di acqua = 1 ton $\sim 10^{30}$ protoni

Super Kamiokande ~ 50 kton $\sim 5 \cdot 10^{34}$ protoni

1evento/anno corrisponde ad una vita media $\tau_p \sim 10^{34}$ anni

- Il decadimento $p \rightarrow e^+ + \pi^0 \rightarrow e^+ + 2\gamma$ produce un elettrone energetico che si distingue bene dal fondo e gamma energetici che a loro volta, nell'acqua producono elettroni energetici.
- se osservo SK per un anno e non vedo alcun decadimento, posso mettere un limite sulla vita media del protone dell'ordine di $\tau > 10^{34}$ anni
- infatti, SuperKamiokande, tenuto conto di tagli, efficienze etc. da' il limite

Mean life $\tau_p \geq 10^{31}$ to 10^{33} years

- che e' il meglio che possiamo fare oggi...e per un bel po' di tempo a venire.

Decadimento del protone: nel futuro?

- limite delle caverne che si possono scavare molto prossimo, ma si pensa ad un Hyper Kamio Kande
- strutture immerse per rivelatori alla Megatonnellata ? 10^{35} year limit
- e' il limite estremo per le GUT

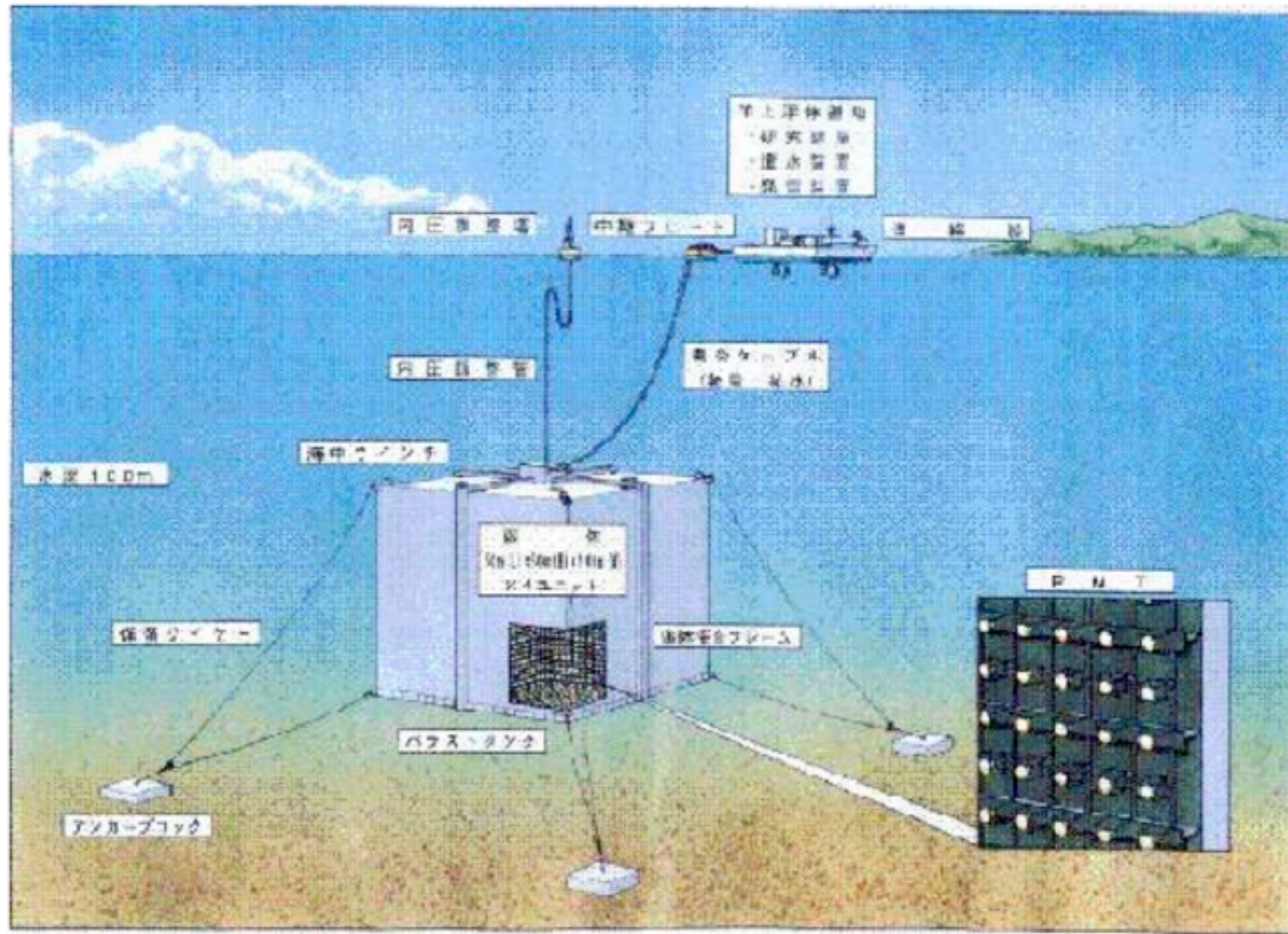


Figure 4: The artist's view of the detector. The unit detector (2 Mton) consists of 4 identical modules assembled at the experimental site. About 60K PMTs are used for 2Mt detector which provides a 20% photo-coverage of the inner surface.

4. La materia in un Universo simmetrico, B conservato

- Se B si conserva e se l'Universo parte da un Big Bang simmetrico in equilibrio termico, il numero di barioni (protoni e neutroni) e il numero di antibarioni presenti alla temperatura T si mantengono sempre uguali e sono dati dalla distribuzione di Fermi

$$N_B = N_{\bar{B}} = \sum_i \frac{1}{e^{\frac{E_i}{kT}} + 1}$$

- La somma sugli stati quantici sviluppa un fattore di volume, cosi' che la *densita'* dei barioni, n_B , quando la temperatura e' scesa al disotto di m_p , e' data da:

$$n_B = A \frac{1}{e^{\frac{m_p}{kT}} + 1} \sim A e^{-\frac{m_p}{kT}}$$

- A e' un fattore che dipende dalla temperatura e che non e' necessario specificare. Infatti, alla temperatura attuale dell' Universo di 3 °K, l'esponente al secondo membro e' tanto grande che aggiungere o meno il logaritmo di A e del tutto trascurabile:

$$n_B \sim e^{-\frac{m_p}{kT}} \sim e^{-3.6 \cdot 10^{+18}} \sim 10^{-1.6 \cdot 10^{+18}}$$

- (sarebbe anche trascurabile dare la densita' in particelle/universo invece che particelle/cc, perche' questo fa "solo" un fattore 10^{110} !!!)
- Questa stima, in realta', e' molto pessimista. Ben prima che la temperatura sia scesa a 3 °K, le reazioni di annichilazione finiscono: ci sono ormai troppi pochi barioni !
- la temperatura di disaccoppiamento stimata e' ~ 40 MeV, $n_B/n_\gamma \sim 10^{-20}$, comunque molto minore dalla densita' osservata

in questo Universo non ci sarebbe posto per noi

E. Schroedinger, Termodinamica Statistica, Boringhieri, (1944):

Questo risultato si presenta ogni volta che si considera una qualunque possibilita' di annichilazione della materia, ad esempio la transizione in radiazione di calore....A meno che non si voglia ammettere che questi tipi di transizioni siano impossibili, ci si meraviglia che nell'universo sia rimasta tanta materia ponderabile quanta ve n'e' effettivamente...

Sembra che l'unico mezzo per uscire da questa situazione sia di supporre che la transizione sia un processo molto lento e che in un passato non molto remoto le condizioni dell'universo fossero molto diverse da quelle che sono ora

La soluzione (provvisoria) e' ammettere:

(i) la conservazione del numero barionico, B

(ii) che l'universo sia partito con uno sbilanciamento originario tra materia e antimateria, ovvero con $B \neq 0$. Dopo l'annichilazione delle coppie barione-antibarione, restiamo con un universo che ha B protoni: *tanta materia ponderabile quanta ve n'e' effettivamente.*

Si deve pensare che il Padreterno, per permetterci di esistere, si sia dovuto preoccupare di mettere nella sua ricetta del Big Bang la costante che abbiamo determinato dalla nucleosintesi primordiale:

$$\eta_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = (0.65 \pm 0.15) 10^{-9}$$

Bariogenesi

- Possiamo pensare, invece, che l'Universo parta in condizioni simmetriche, ed evolva, sulla base delle leggi fisiche, verso un Universo asimmetrico, e che la densità di barioni, η_B , sia *calcolabile* sulla base delle stesse leggi fisiche ?
- e come dobbiamo modificare, nel caso, le leggi che conosciamo per rendere questo possibile?
- I principi che sono alla base di una Bariogenesi calcolabile sono indicati come le *condizioni di Sakharov*, dal nome del fisico russo Andrei Sakharov che le ha individuate nel 1967.
- le condizioni sono
 1. Violazione del numero barionico
 2. Violazione di CP
 3. L'eccesso di materia deve essere generato da processi fuori dell'equilibrio termico

A.D. Sakharov, *Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe*, JETP Lett. **5** (1967) 24.

5. Le condizioni di Sakharov

- Violazione del numero Barionico
 - e' evidente che ci deve essere
 - ed e' assai ragionevole che ci sia, visto che la conservazione di B non e' collegata ad una simmetria di gauge
 - successivamente a Sakharov, si e' visto che addirittura nel modello Standard ci sono fenomeni non perturbativi che producono violazioni di B, anomalie U(1), proprio perche' la conservazione di B non e' protetta da un principio di simmetria di gauge
 - un' altra sorgente potrebbero essere le interazioni nelle teorie GUT, le stesse che dovrebbero produrre il decadimento del protone
 - il troppo stropia: l'eccesso di B prodotto da un'interazione, es. GUT, potrebbe, el corso del Big-Bang essere cancellato da un' altra interazione, es. anomalia U(1)
 - gli argomenti per la violazione di B valgono anche per la violazione di L
 - La violazione di L potrebbe trasformarsi in una e ci potrebbero essere collegamenti di B, se B-L e' invece conservato: ***Majorana ritorna!!!!***

Violazione di CP

- E' necessaria, altrimenti la produzione o distruzione di barioni con elicità negativa sarebbe sempre accompagnata dalla produzione o distruzione di antibarioni con elicità positiva e lo stesso per le altre due combinazioni di elicità
- Come abbiamo visto le simmetrie P e CP sono violate nelle interazioni deboli, quindi la seconda condizione di S. si verifica certamente in fisica
- il problema è se la violazione che abbiamo visto è proprio quella responsabile del fenomeno o no. Su questo le opinioni sono divise
- la maggior parte propende per il no e pensa ci vogliano altre interazioni oltre la teoria Standard, però..la fisica non si fa con i referendum...

Disequilibrio termico

- E' la vera novita' delle condizioni di S.
- All'equilibrio termico, la distribuzione delle particelle nel livello "i" dipende solo dal fattore di Boltzmann: $e^{(-E_i/kT)}$.
- Il teorema CPT, e le sue verifiche sperimentali, dicono che i livelli di barioni e antibarioni sono uguali
- quindi al'equilibrio termico non si uo' generare alcuna simmetria
- Visto in positivo:
 - Un processo fuori equilibrio procede piu' lentamente della espansione dell'Universo e della decerscita della temperatura
 - la asimmetria prodotta in un processo di questo tipo puo' non essere riassorbita in quanto nel frattempo la temperatura e' diminuita
 - un esempio e' il decadimento asimmetrico tra barioni e antibarioni di particelle superpesanti: i prodotti finali non si possono ricombinare nelle particelle iniziali perche' nel frattempo sono stati red-shifted dall'espansione e non hanno piu' l'energia necessaria

Scenari concreti nella prossima puntata !