

Violazione di CP in altri sistemi

Mesoni D neutri

$D^0 (c\bar{u}) \quad \bar{D}^0 (\bar{c}u)$

$$m = 1.8 \text{ GeV}/c^2$$

$$\tau = 0.4 \cdot 10^{-12} \text{ s} \quad (c\tau = 124 \text{ }\mu\text{m})$$

$$\Delta m < 7 \cdot 10^{10} \text{ h s}^{-1} (< 5 \cdot 10^{-5} \text{ eV})$$

- Oscillazioni molto lente: $\Delta m/\Gamma < 0.1$
- Asimmetrie CPV molto piccole: $O(10^{-5})$ nel Modello Standard
 \Rightarrow Ricerca di nuova fisica
- Decadimenti DCSD (doppiamente soppressi) competono con oscillazioni (es. $D^0 (\rightarrow \bar{D}^0) \rightarrow K^+\pi^-$): CPV nell'interferenza
- Decadimenti soppressi (es. $D^0 \rightarrow K^+K^-, \pi^+\pi^-, D^+ \rightarrow K_S K^+$): possibile CPV diretta
- Nessuna asimmetria misurata (errori $\sim 1 \div 10\%$)

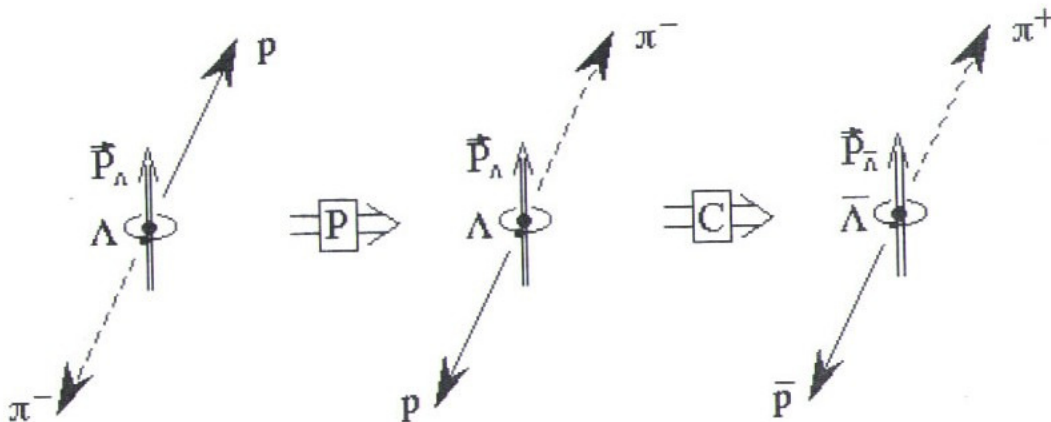
Decadimenti degli iperoni

Decadimenti non-leptonici: $\Lambda \rightarrow p\pi^-$

Violazione di P: distribuzione angolare (nel CM) del fermione (ignorando la sua polarizzazione):

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{1}{4\pi} (1 + \alpha_\Lambda \mathbf{P}_\Lambda \cdot \mathbf{p}_p)$$

Impulso p
Polarizzazione Λ



$$\alpha_\Lambda \xrightarrow{CP} \bar{\alpha}_\Lambda = -\alpha_\Lambda$$

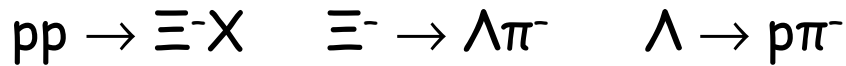
Asimmetria $A_\Lambda = \frac{\alpha_\Lambda + \bar{\alpha}_\Lambda}{\alpha_\Lambda - \bar{\alpha}_\Lambda}$

Predizioni:

$$\text{CKM} \sim 4 \div 5 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Altri modelli: } -2.5 \div 60 \cdot 10^{-5}$$

HyperCP @ FNAL

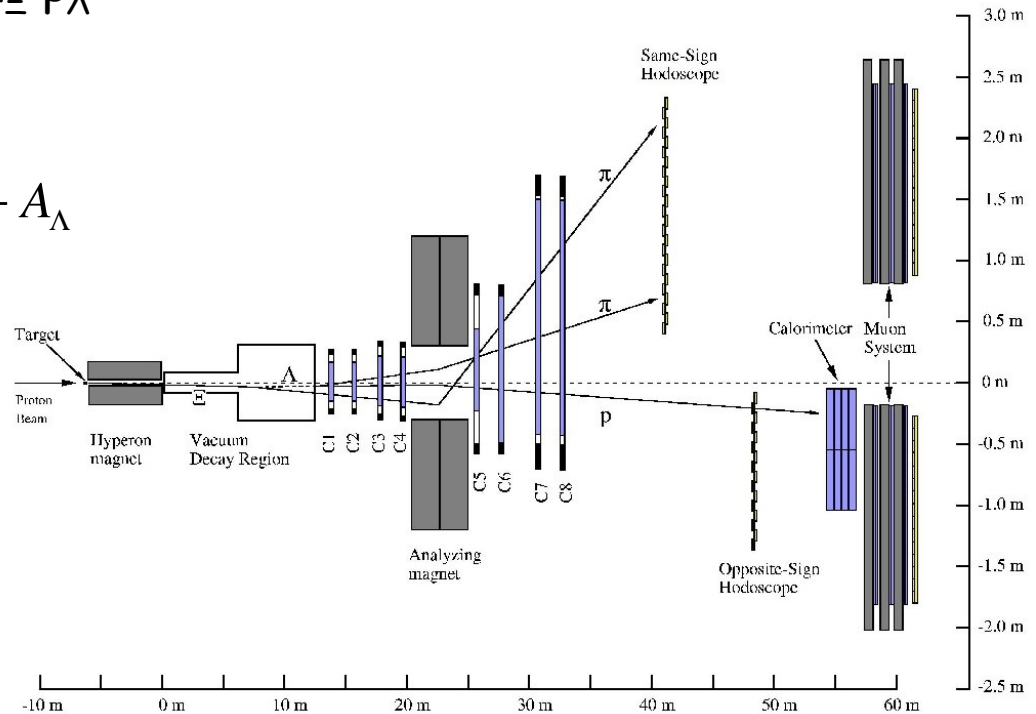


Ξ^-/Ξ^+ non polarizzate: $P_\Lambda = \alpha_\Xi p_\Lambda$

Misura asimmetria

$$A_{\Xi\Lambda} = \frac{\alpha_{\Xi^-} \alpha_{\Lambda^-} + \overline{\alpha_{\Xi^-}} \overline{\alpha_{\Lambda^-}}}{\alpha_{\Xi^-} \alpha_{\Lambda^-} - \overline{\alpha_{\Xi^-}} \overline{\alpha_{\Lambda^-}}} \cong A_{\Xi^-} + A_{\Lambda^-}$$

con precisione $\sim 2 \cdot 10^{-4}$



Neutrini ?

Matrice PMNS (Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata)

- Neutrini **particelle di Dirac**: situazione simile al caso dei quark

$$V_{PMNS} \sim V_{CKM}$$

- Unica fase che viola CP nella matrice di mescolamento leptonica
 - Necessario mescolamento tra tre generazioni ($\theta_{13} \neq 0$?)
-
- Neutrini **particelle di Majorana** (coincidenti con le proprie anti-particelle): non c'è libertà di ridefinire le fasi
 - 3 fasi CPV nella matrice di mescolamento leptonica (di cui 2 non osservabili nelle oscillazioni dei neutrini)
 - Una fase CPV anche per N=2

Test di T e CPT

Test di T

TIME REVERSAL (T) INVARIANCE

Limits on e , μ , τ , p , n , and Λ electric dipole moments under Parity Invariance above are also tests of Time Reversal Invariance.

μ decay parameters

transverse e^+ polarization normal to plane of μ spin, e^+ momentum	0.007 ± 0.023
α'/A	$(0 \pm 4) \times 10^{-3}$
β'/A	$(2 \pm 6) \times 10^{-3}$
$\text{Im}(\xi)$ in $K_{\mu 3}^{\pm}$ decay (from transverse μ pol.)	-0.014 ± 0.014
asymmetry A_T in K^0 - \bar{K}^0 mixing	$(6.6 \pm 1.6) \times 10^{-3}$
$\text{Im}(\xi)$ in $K_{\mu 3}^0$ decay (from transverse μ pol.)	-0.007 ± 0.026
$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ decay parameters	
ϕ_{AV} , phase of g_A relative to g_V	[b] $(180.08 \pm 0.10)^\circ$
triple correlation coefficient D	$(-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$
triple correlation coefficient D for $\Sigma^- \rightarrow n e^- \bar{\nu}_e$	0.11 ± 0.10

Momenti di dipolo elettrico

$$\mathbf{d} = \sum_i q_i \mathbf{r}_i$$

Per un sistema a simmetria sferica non degenere:

$\mathbf{d} \propto \mathbf{J}$ (teorema di Wigner-Eckart).

$$\begin{array}{cc} \mathbf{d} \xrightarrow{P} -\mathbf{d} & \mathbf{d} \xrightarrow{T} \mathbf{d} \\ \mathbf{J} \xrightarrow{P} \mathbf{J} & \mathbf{J} \xrightarrow{T} -\mathbf{J} \end{array}$$

$\langle \mathbf{d} \rangle \neq 0$ viola le simmetrie P e T (a parte fasi forti).

Interazioni con i campi $H = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{d} \cdot \mathbf{E}$

$$\mu_B \approx e/1 \text{ MeV} \quad d_e < e/10^{16} \text{ MeV}$$

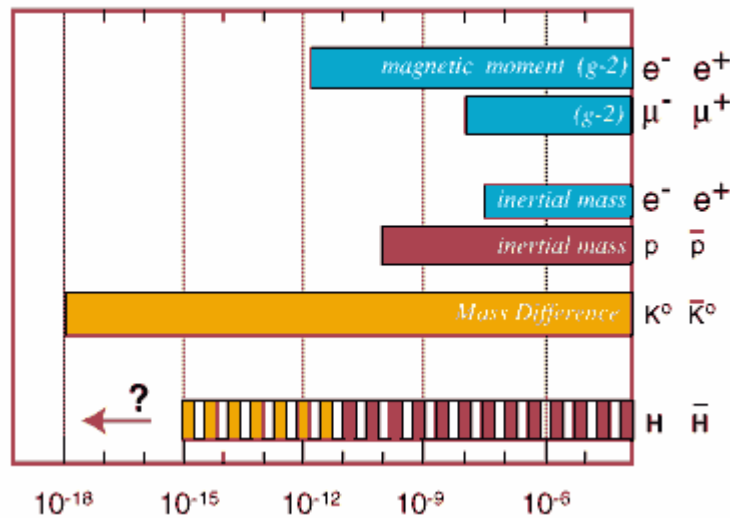
Confronto frequenze di precessione $\mathbf{B} \uparrow \mathbf{E} \uparrow$ e $\mathbf{B} \uparrow \mathbf{E} \downarrow$
 $|\mathbf{d}_n| < 6.3 \cdot 10^{-26} \text{ e cm} \quad |\mathbf{d}_e| < 10^{-27} \text{ e cm} \quad (SM < 10^{-30})$

Test di CPT

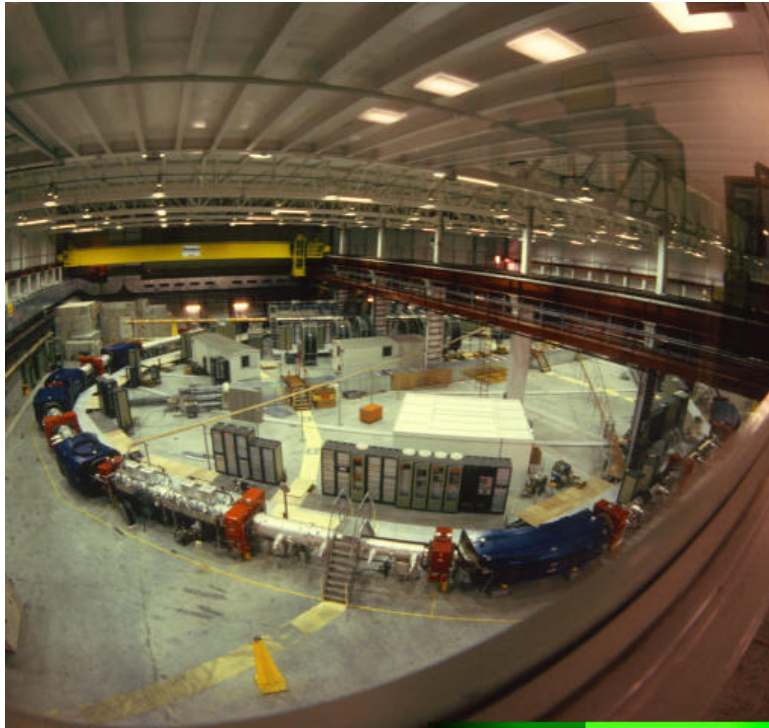
CPT INVARIANCE

$(m_{W^+} - m_{W^-}) / m_{average}$	-0.002 ± 0.007
$(m_{e^+} - m_{e^-}) / m_{average}$	$< 8 \times 10^{-9}$, CL = 90%
$ q_{e^+} + q_{e^-} / e$	$< 4 \times 10^{-8}$
$(g_{e^+} - g_{e^-}) / g_{average}$	$(-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$
$(\tau_{\mu^+} - \tau_{\mu^-}) / \tau_{average}$	$(2 \pm 8) \times 10^{-5}$
$(g_{\mu^+} - g_{\mu^-}) / g_{average}$	$(-0.11 \pm 0.12) \times 10^{-8}$
$(m_{\pi^+} - m_{\pi^-}) / m_{average}$	$(2 \pm 5) \times 10^{-4}$
$(\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}) / \tau_{average}$	$(6 \pm 7) \times 10^{-4}$
$(m_{K^+} - m_{K^-}) / m_{average}$	$(-0.6 \pm 1.8) \times 10^{-4}$
$(\tau_{K^+} - \tau_{K^-}) / \tau_{average}$	$(0.11 \pm 0.09)\%$ (S = 1.2)
$K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ rate difference/average	$(-0.5 \pm 0.4)\%$
$K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$ rate difference/average	[f] $(0.8 \pm 1.2)\%$
δ in $K^0 - \bar{K}^0$ mixing	
real part of δ	$(2.9 \pm 2.7) \times 10^{-4}$
imaginary part of δ	$(-0.2 \pm 2.0) \times 10^{-5}$
Re(η), K_{e3} parameter	$(0.4 \pm 2.5) \times 10^{-3}$
Re(x_-), K_{e3} parameter	$(-0.8 \pm 2.5) \times 10^{-3}$
$ m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} / m_{average}$	[g] $< 10^{-18}$, CL = 90%
$(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0}) / m_{average}$	$(8 \pm 8) \times 10^{-18}$
phase difference $\phi_{00} - \phi_{+-}$	$(0.2 \pm 0.4)^\circ$
$Re(\frac{2}{3}\eta_{+-} + \frac{1}{3}\eta_{00}) - \frac{\delta}{2}$	$(-3 \pm 35) \times 10^{-6}$
$A_{CPT}(K^\mp \pi^\pm)$ in $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	0.008 ± 0.008
$ m_p - m_{\bar{p}} / m_p$	[h] $< 1.0 \times 10^{-8}$, CL = 90%
$(\frac{q_p}{m_p} - \frac{q_{\bar{p}}}{m_{\bar{p}}}) / \frac{q_p}{m_p}$	$(-9 \pm 9) \times 10^{-11}$
$ q_p + q_{\bar{p}} / e$	[h] $< 1.0 \times 10^{-8}$, CL = 90%
$(\mu_p + \mu_{\bar{p}}) / \mu_p$	$(-2.6 \pm 2.9) \times 10^{-3}$
$(m_n - m_{\bar{n}}) / m_n$	$(9 \pm 5) \times 10^{-5}$
$(m_\Lambda - m_{\bar{\Lambda}}) / m_\Lambda$	$(-0.1 \pm 1.1) \times 10^{-5}$ (S = 1.6)
$(\tau_\Lambda - \tau_{\bar{\Lambda}}) / \tau_\Lambda$	-0.001 ± 0.009
$(\tau_{\Sigma^+} - \tau_{\Sigma^-}) / \tau_{\Sigma^+}$	$(-0.6 \pm 1.2) \times 10^{-3}$
$(\mu_{\Sigma^+} + \mu_{\Sigma^-}) / \mu_{\Sigma^+}$	0.014 ± 0.015
$(m_{\Xi^-} - m_{\Xi^+}) / m_{\Xi^-}$	$(1.1 \pm 2.7) \times 10^{-4}$
$(\tau_{\Xi^-} - \tau_{\Xi^+}) / \tau_{\Xi^-}$	0.02 ± 0.18
$(\mu_{\Xi^-} + \mu_{\Xi^+}) / \mu_{\Xi^-} $	$+0.01 \pm 0.05$
$(m_{\Omega^-} - m_{\bar{\Omega}^+}) / m_{\Omega^-}$	$(-1 \pm 8) \times 10^{-5}$
$(\tau_{\Omega^-} - \tau_{\bar{\Omega}^+}) / \tau_{\Omega^-}$	-0.002 ± 0.040

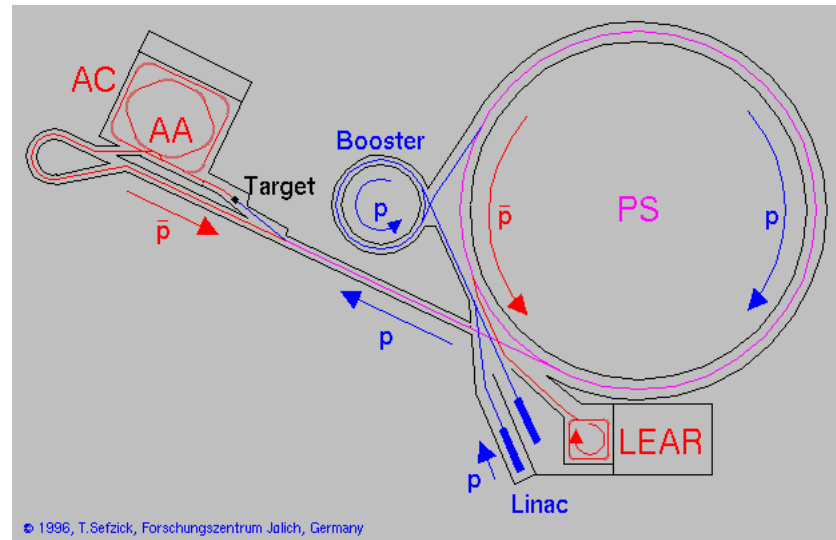
The most precise CPT Tests



Studio di antimateria



CERN Antiproton Decelerator
 $2 \cdot 10^{-7} \bar{p} / 200 \text{ ns}$ (100 MeV/c)



M.S. Sozzi

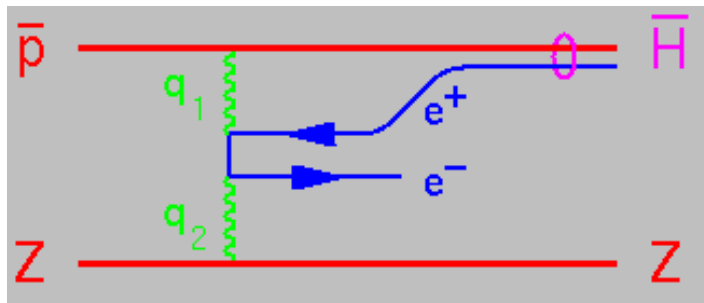
Violazione di CP

Studio diretto di anti-materia

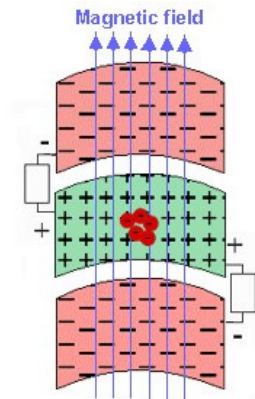
Studio dei livelli energetici dell'anti-idrogeno.

Misura delle proprietà elementari di anti-protoni freddi (massa inerziale e gravitazionale).

Produzione di anti-idrogeno

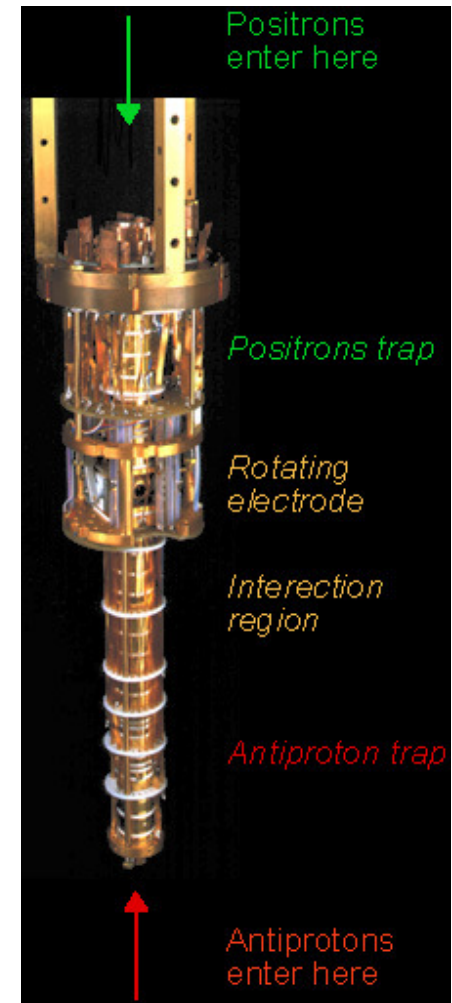


M.S. Sozzi



Penning trap

Violazione di CP



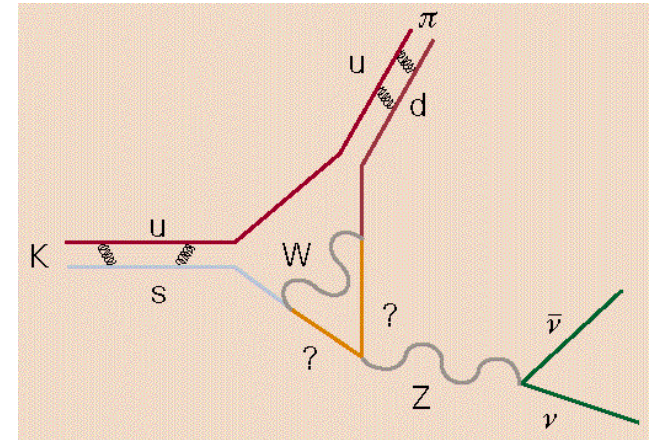
Decadimenti rari del K

K → πℓℓ̄ decays

Switch to *quantitative* test of the SM

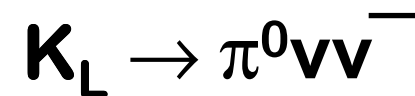
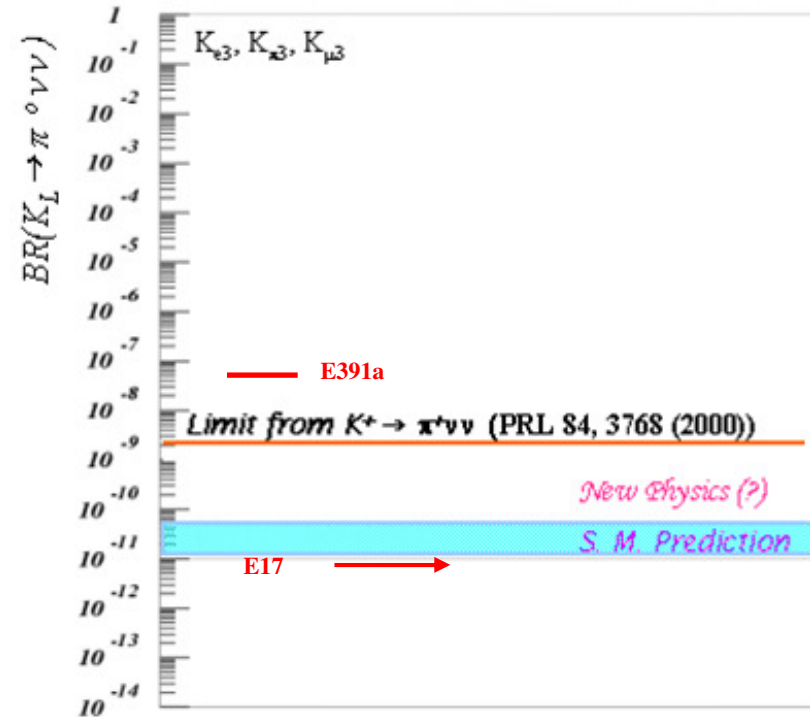
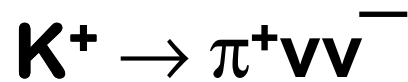
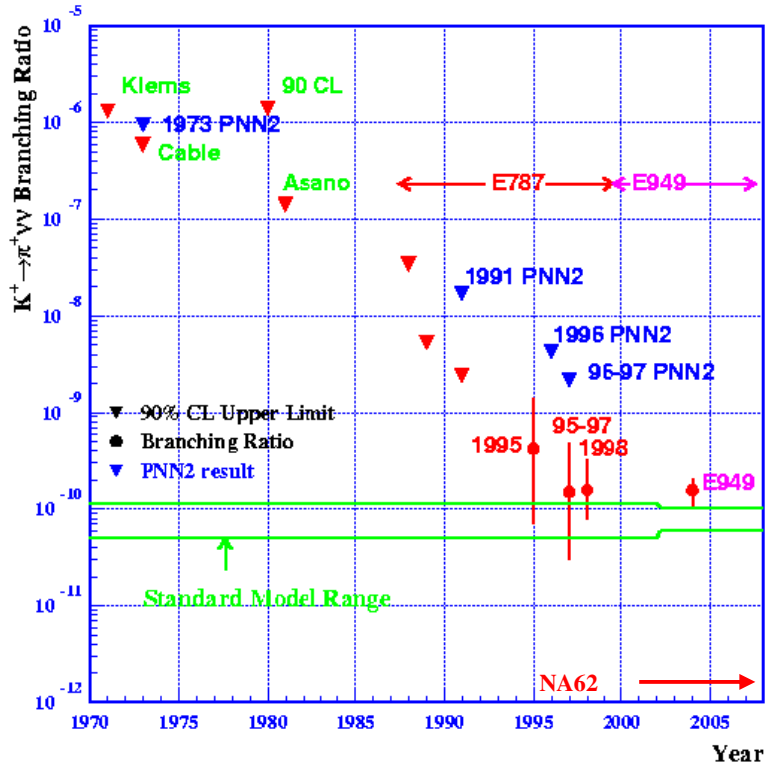
Flavour sector, probing extremely high energy scales: precision frontier
complementary to LHC energy frontier

Some (tiny!) BRs can be computed to *very high* (few percent) precision



$K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$	10^{-11} ($CPV_{dir} 3 \cdot 10^{-12}$)	$< 2.8 \cdot 10^{-10}$ (FNAL KTeV)	CPC+CPV 3 ev. (2.05 bkg)
$K_L \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$	10^{-11} ($CPV_{dir} 1 \cdot 10^{-12}$)	$< 3.8 \cdot 10^{-10}$ (FNAL KTeV)	CPC+CPV 2 ev. (0.87 bkg)
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	$8 \cdot 10^{-11}$ (at 7%)	$1.47^{+1.30}_{-0.89} \cdot 10^{-10}$ (BNL E787+E949)	Dedicated expt. 3 evt. (bkg. 0.45)
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$ (at 2%)	$< 6.7 \cdot 10^{-8}$ (KEK E391a)	CPV dir "Nothing to nothing"

The long march



Japan: J-PARC E14

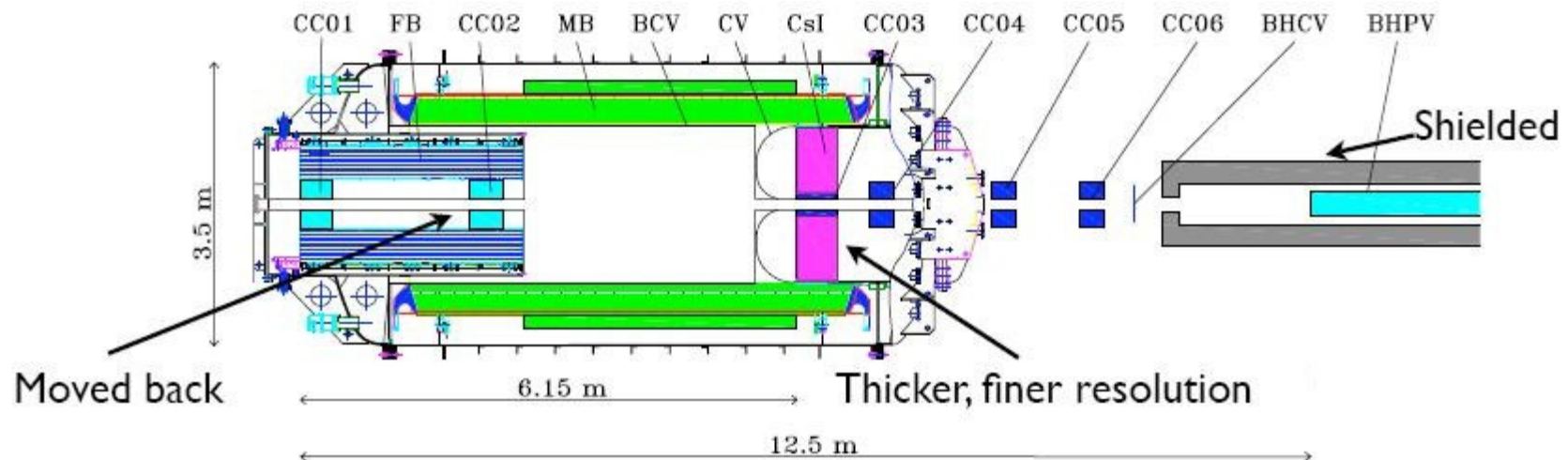
Improved beamline (reduced halo, $n/K \approx 7$, lower background, veto)

Re-use E391a barrel

Thicker and more fine-grained CsI calorimeter (KTeV)

Waveform digitization

Upgraded vetos (KOPIO-like beam hole γ veto)



Flux x10, Time x10, Performance x10

Goal: 2.7 ev. ($S/N \approx 1.6$) in 3 years

Construction 2009, first physics run 2011 ?

Step 2: 100 SM events ($S/N \approx 4.8$)

Europe: CERN NA62

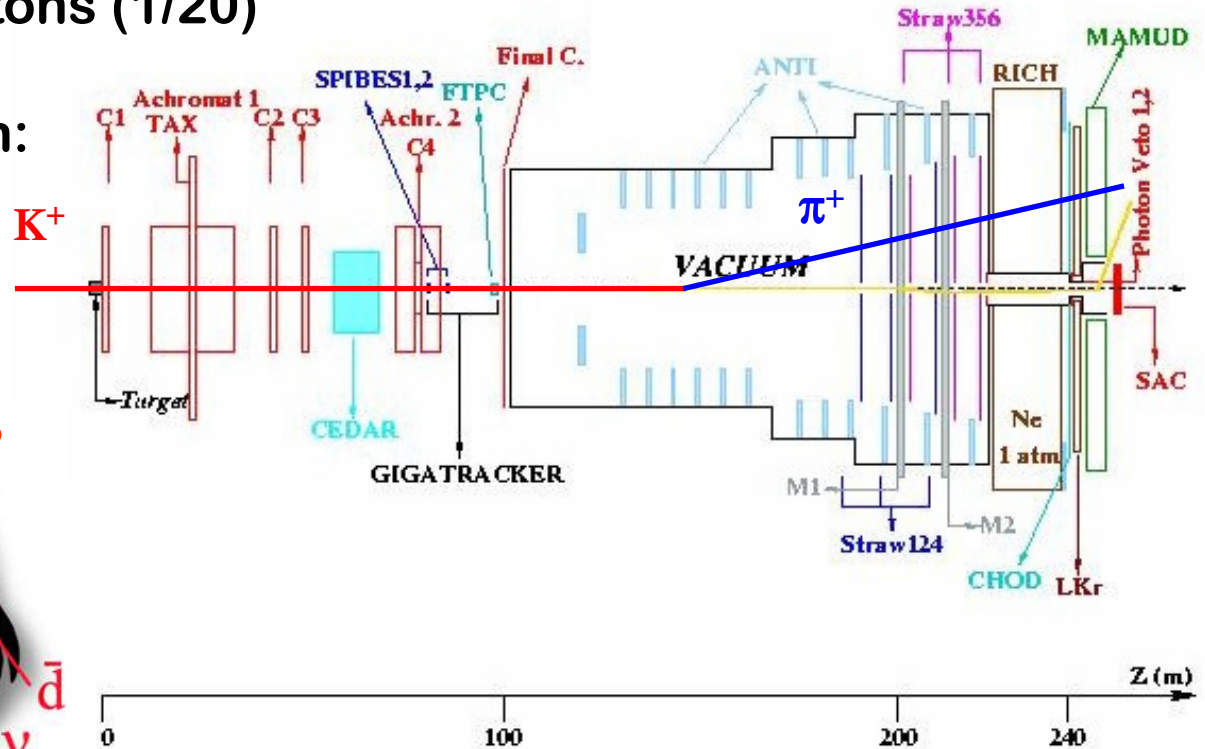
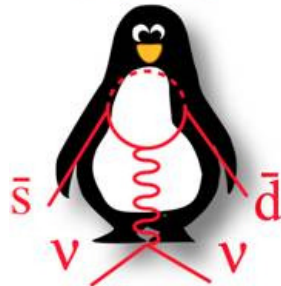
New approach: decay in flight
(75 GeV/c unseparated K⁺ beam)

Reuse some parts of NA48 apparatus
and existing SPS protons (1/20)

Background rejection:

- K⁺ tracking in 1 GHz
- PID(π/μ) by RICH
- γ vetoing (low-E π , low ineff.)
- Kinematics

NA62



Violazione di CP e cosmologia

Composizione dell'universo

L'universo osservabile contiene:

- Molta luce: $n_\gamma \sim 411/\text{cm}^3$ ($E \sim 1 \text{ MeV}$)
nella radiazione di fondo
spettro di corpo nero a $T = 2.726 \pm 0.005 \text{ K}$

Densità di energia

$$\sim 2 \cdot 10^{-5} \Omega$$

- Materia:

- Pochi barioni: $n_B \sim 1/100 \text{ m}^3$

$$\leq 5\% \Omega$$

- Neutrini

$$\leq 10\% \Omega$$

- "Materia oscura"

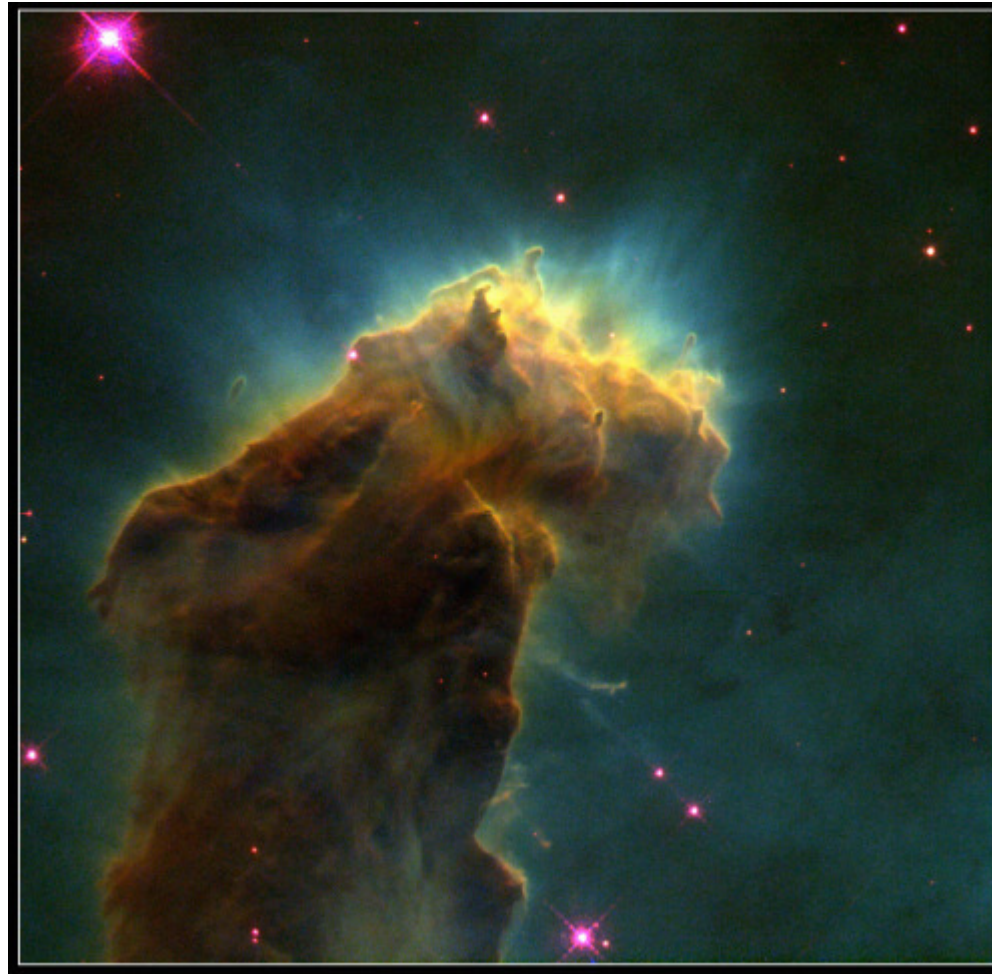
$$\leq 30\% \Omega$$

- "Energia oscura"

$$\sim 70\% \Omega$$

MA...

DOV'E' L'ANTIMATERIA ?



M.S. Sozzi

Violazione di CP

- Ogni particella ha un'antiparticella
- Particelle ed antiparticelle prodotte ed annichilate a coppie
- Numeri quantici conservati (numero barionico, numero leptonico...)

Le leggi della fisica sono *sostanzialmente* simmetriche
tra **materia** ed **antimateria**.

E' ragionevole (?!) attendersi un universo **SIMMETRICO**

Evidenza diretta di antimateria

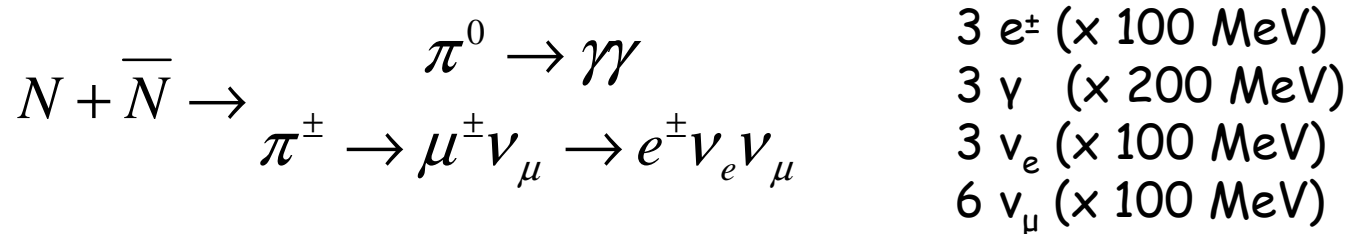
- Luna, Venere, Marte: sonde
- Pianeti del sistema solare: γ di annichilazione da vento solare
- Antimateria primordiale nella formazione del sistema solare: annichilata
- Raggi cosmici: non direzionali
- Rotazione di Faraday della luce polarizzata da pulsar

$$\Delta\theta = \lambda^2 R = \lambda^2 \int [n(e^-) - n(e^+)] B_{par} dl$$

Da misura di dispersione $D \propto \int [n(e^-) + n(e^+)] dl$

si ottiene $R/D \sim \langle B_{par} \rangle$ ovvero $n(e^+) \sim 0$

Evidenza indiretta di antimateria



e^\pm : facilmente prodotti come secondari, non si allontanano, potrebbero alimentare sorgenti extra-galattiche (ma vincolo da flusso γ)

ν_e : fondo solare

ν_μ : secondari, 1/3 rivelabili

γ : 0.5 MeV (annichilazione e^+e^-), 200 MeV (annichilazione $p\bar{p}$)

Fondo diffuso isotropo $\sim 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

Limiti su antimateria intergalattica o densita' del mezzo intergalattico.

Confronto emissione X e γ di ammassi, collisioni galattiche.



Se esiste antimateria, questa e' separata dalla materia almeno su scale degli ammassi di galassie. Nessun meccanismo noto per separarle.

Asimmetria barionica dell'universo

A $t = t_0$ grande asimmetria barionica (~ 0 antibarioni)

A $t \sim 10^{-6}$ s abbondanza di antiquark: $q\bar{q} \leftrightarrow \gamma\gamma$

Per $T \gg m$ densita' comparabili: $n_q \sim n_{\bar{q}} \sim n_\gamma$

Raffreddamento: $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ mantiene costante $n_q - n_{\bar{q}}$

$$\left. \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q} \right|_{\text{(allora)}} \approx \left. \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_\gamma} \right|_{\text{(allora)}} \approx \left. \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_\gamma} \right|_{\text{(oggi)}} \approx \frac{n_B}{n_\gamma} \approx \frac{10^{-7} / \text{cm}^3}{400 / \text{cm}^3} \approx 10^{-9}$$

Materia visibile e nucleosintesi

Radiazione di fondo

Piccolissima (ma non nulla) asimmetria barionica per $t < 10^{-6}$ s

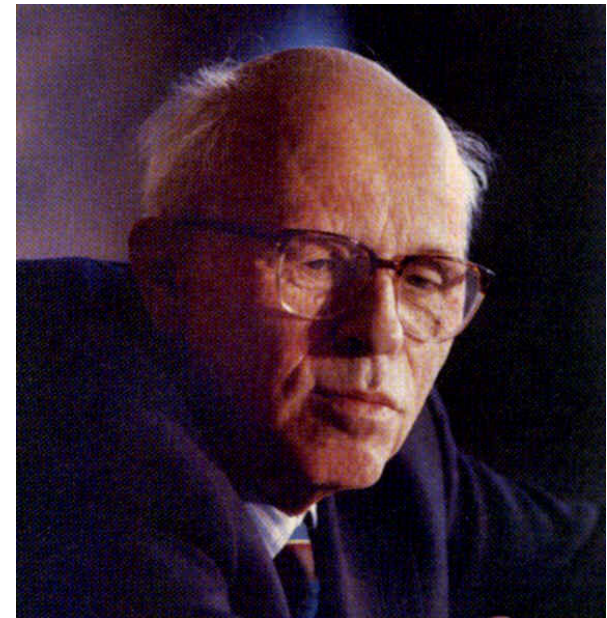
Bariogenesi: condizioni di Sakharov

A. Sakharov (1967):

per generare un'asimmetria barionica sono necessarie:

1. Non-conservazione del numero barionico
2. Violazione di C e di CP
3. Condizione di non-equilibrio termodinamico

(Assumendo CPT)



Non-conservazione numero barionico

- Ovviamente necessaria
- Implica il decadimento del protone (ad es. $p \rightarrow \pi^0 e^+$)
 $\tau_p > 10^{31} \div 10^{33}$ anni
- Naturale in Teorie di Grande Unificazione
multipletti (q, ℓ) , $M_X \approx 10^{16}$ GeV. SU(5) (esclusa), SO(10)...
- Nel modello standard B, L conservati ma:
 - Simmetrie di gauge globali
 - Anomalie quantistiche ('t Hooft 1976) violano B, L (non B-L):
 $\tau_p \approx 10^{100}$ anni, rapide a T elevate
- Buchi neri primordiali possono generare numero barionico/leptonico

Violazione di C e CP

- C e CP implicano ampiezze uguali per le reazioni coniugate di carica:

$$\Gamma(B \rightarrow X) = \Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{X})$$

B e' dispari per C/CP:

uno stato C/CP simmetrico ha $\langle B \rangle = 0$

- Oltre a violazione di CP esplicita (fase nella lagrangiana): violazione di CP spontanea (vuoto):
⇒ problema dei muri di dominio.
- Violazione di C (massimale) e di CP nel Modello Standard
- Molte fasi presenti in modelli al di la' del Modello Standard

Non-equilibrio termodinamico

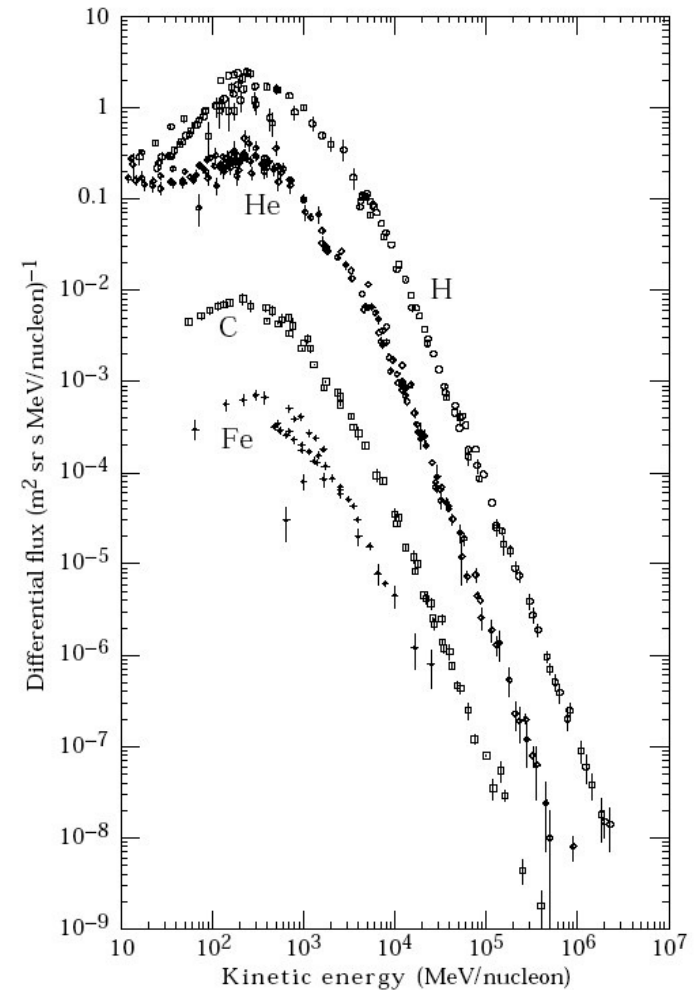
- In equilibrio termico CPT diventa CP
- All'equilibrio: $\rho = e^{-H/kT}$

$$\begin{aligned}\langle B \rangle_{eq} &= \text{Tr}[e^{-H/kT} B] = \text{Tr}[CPT(CPT)^{-1} e^{-H/kT} B] = \\ &= \text{Tr}[e^{-H/kT} (-B)] = -\langle B \rangle_{eq}\end{aligned}$$

- Le distribuzioni di particelle sono $\propto e^{-E/kT}$
e per CPT: $\bar{m} = m$ e $\bar{E} = E$
- Le transizioni dirette ed inverse hanno la stessa velocita'

Raggi cosmici

- Provenienza extra-sistema solare
 - Modulazione solare per $E < 10 \text{ GeV}$
 - Composizione: 79% p
- PRIMARI: e^- , p, He, C, O, Fe, ...
- SECONDARI: Li, Be, B, ..., p, e^+
- Effetti geomagnetici ed atmosferici
- $I_N(E) \approx 1.8 E^{-2.7} \text{ nucleoni}/(\text{cm}^2 \text{ s sr GeV})$



Antimateria nei raggi cosmici

Antiprotoni: $pp \rightarrow \bar{p}X$ (ad es. $pp \rightarrow \bar{p} 3p$) con picco a ≈ 2 GeV

Antiprotoni primari extragalattici: spettro crescente o costante con E nel rapporto \bar{p}/p

$$\bar{p}/p \sim 10^{-4}$$

Effetto dell'attività solare su \bar{p} primari

Positroni: $pp \rightarrow \pi X \rightarrow \mu\nu X \rightarrow e\nu\nu\nu X$

Incertezze su densità mezzo intergalattico, β^+ da stelle

$$e^+/e^- \sim 10^{-1}$$

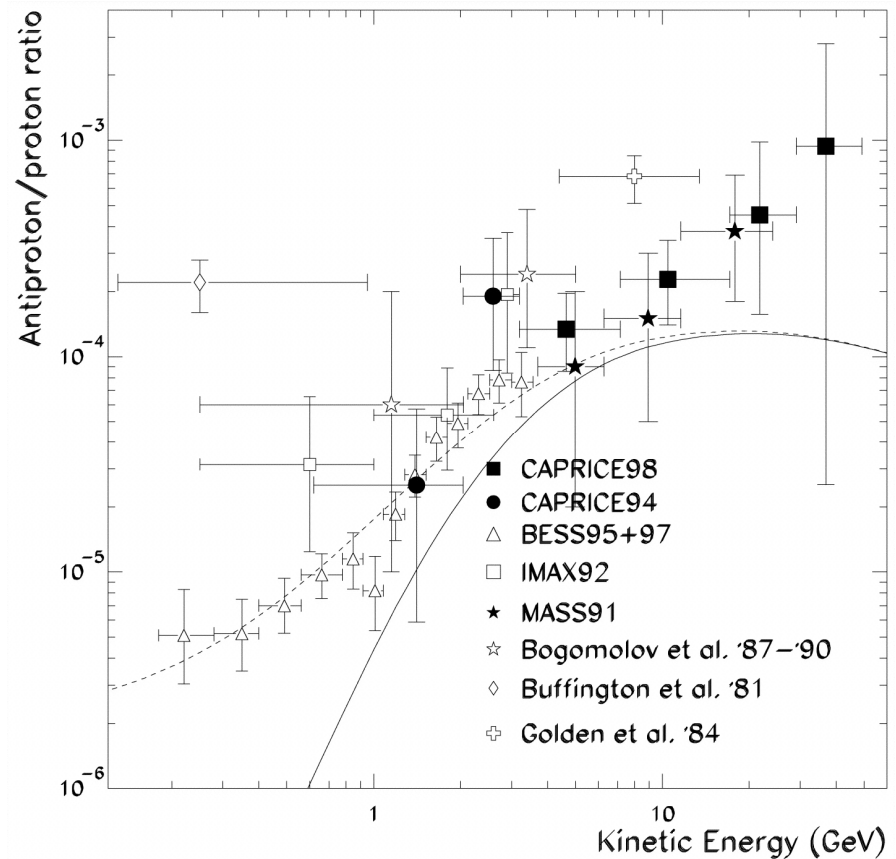
Anti-nuclei: $\bar{N}/\bar{p} \approx e^{-2(M-m_p)/160 \text{ MeV}}$ ${}^3\bar{\text{He}}/\bar{p} \approx 10^{-11}$ $\bar{\text{C}}/\bar{p} \approx 10^{-56}$

No fondo. Vento galattico e campi magnetici: alta energia?

$$\bar{\text{He}}/\text{He} \sim 10^{-6}$$

Rapporto \bar{p}/p

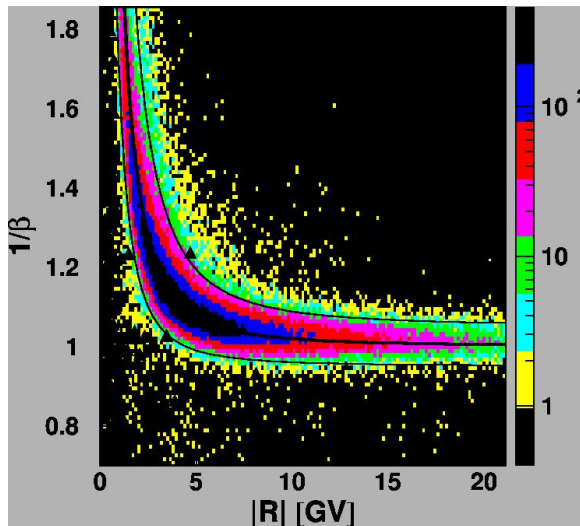
Antiprotoni secondari nella regione ~ 4 GeV, affetti da attivita' solare



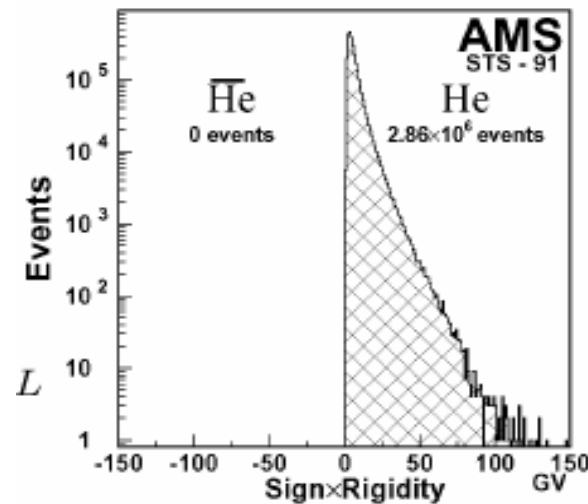
Alpha Magnetic Spectrometer

Test (AMS-01), 10 giorni su shuttle (1998): $2.9 \cdot 10^6$ eventi He, no $\bar{\text{He}}$
($\bar{\text{He}}/\text{He} < 3.9 \cdot 10^{-6}$ per 1.6-100 GV)

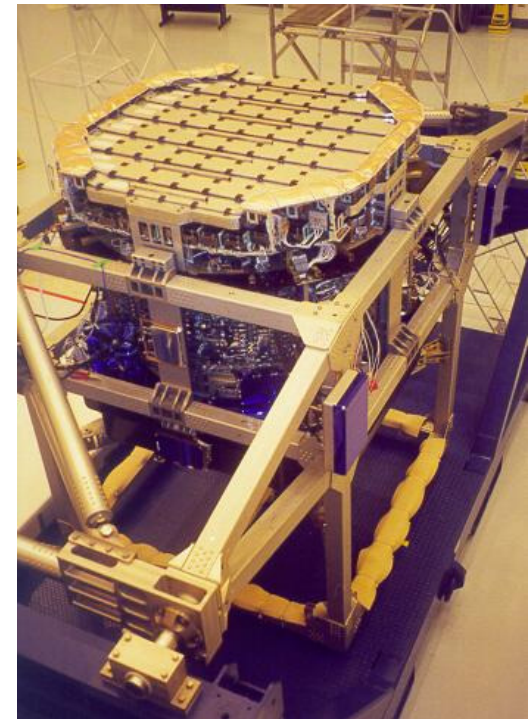
Magnete permanente 0.14T. Tracciatore (6 piani Si), TOF (4 strati scintillatore), Cerenkov a soglia (aerogel), veto.
Carica da dE/dx in TOF e Si.



M.S. Sozzi



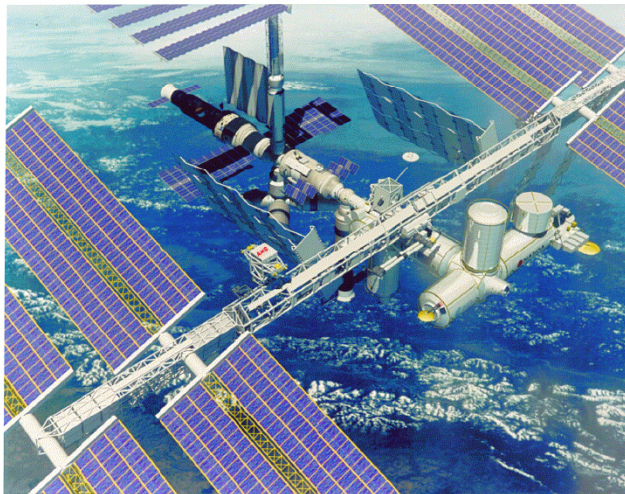
Violazione di CP



AMS

Lancio 2011

Magnete superconduttore (0.9 T) $p < 3$ TeV
TOF (4 piani scintillatore): velocità e carica,
TRD (20 strati): separazione, tracciatore (8
strati Si): impulso e carica, RICH (aerogel):
velocità e carica, calorimetro EM (9 strati
Pb-SciFi): E, direzione



M.S. Sozzi

Statistica
prevista

$\sim 10^9$ He

Violazione di CP

