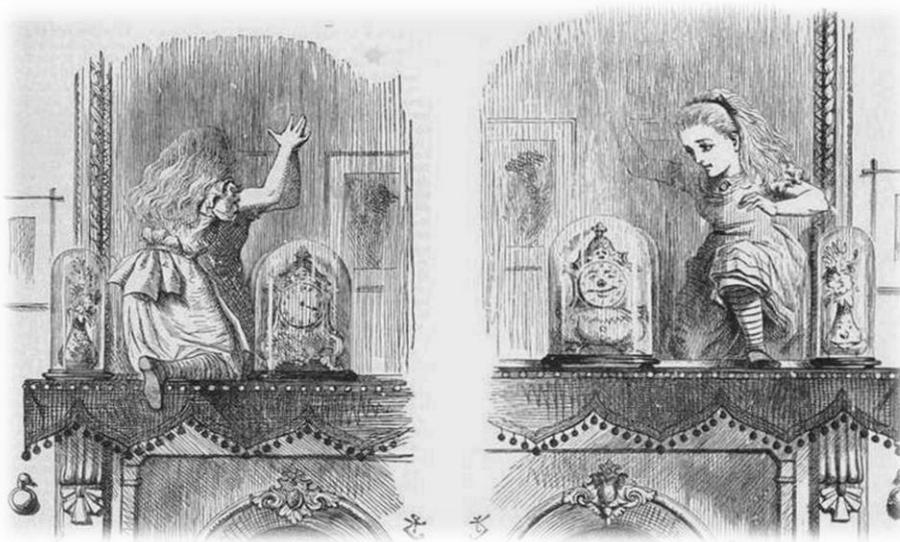


# Attraverso lo specchio: uno sguardo al mondo dell'antimateria

"Prima di tutto, v'è la stanza che si vede attraverso lo Specchio: è precisa come il salotto dove stiamo; però tutte le cose son messe alla rovescia. [...] I libri, poi, somigliano ai nostri libri; ma le parole sono stampate a rovescio. Questo lo so; perchè ho tenuto un libro contro lo specchio, e nell'altra stanza ne hanno pigliato un altro. [...]"

L. Carroll (Charles Lutwidge Dodgson), *Attraverso lo specchio e quel che Alice vi trovò*



Susanna Costanza  
Incontri del martedì - 08/11/2016

# Antimateria: che mistero!



# Antimateria: che mistero!



# Antimateria: che mistero!



# Cos'è la materia?

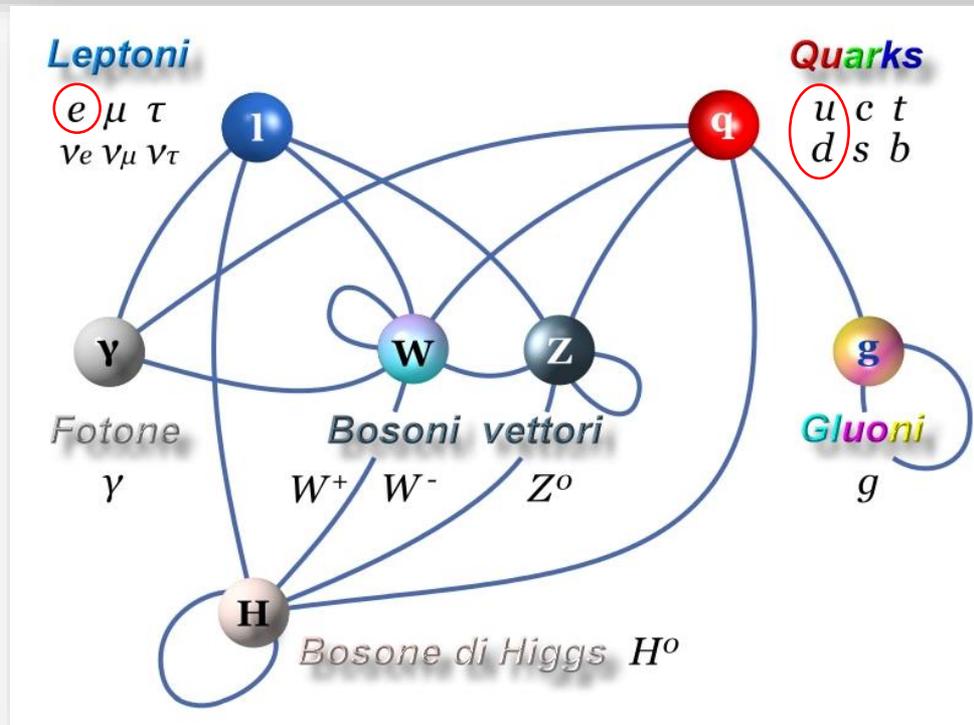
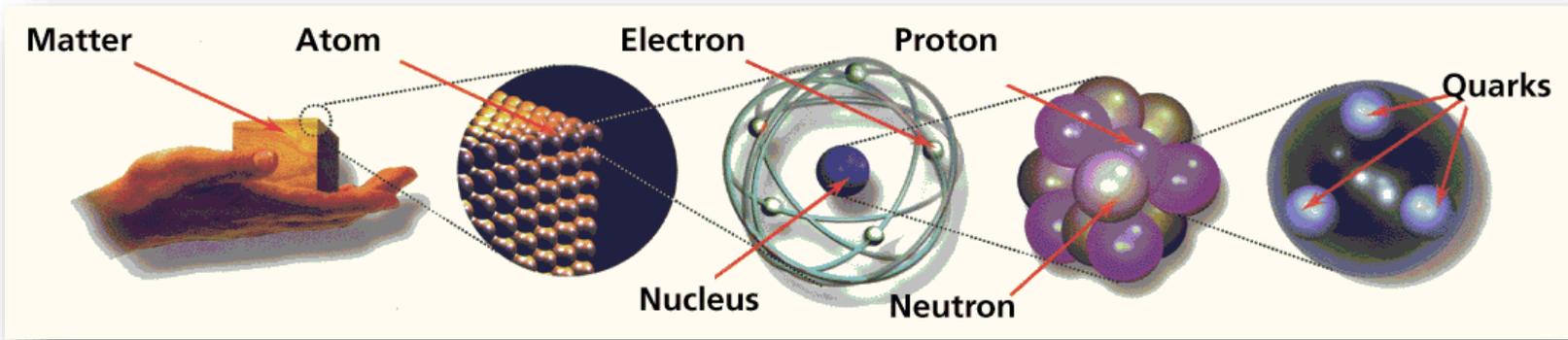
- Quali sono i costituenti fondamentali della materia?
  - Con quali forze interagiscono?
  - Qual è l'origine di queste forze?



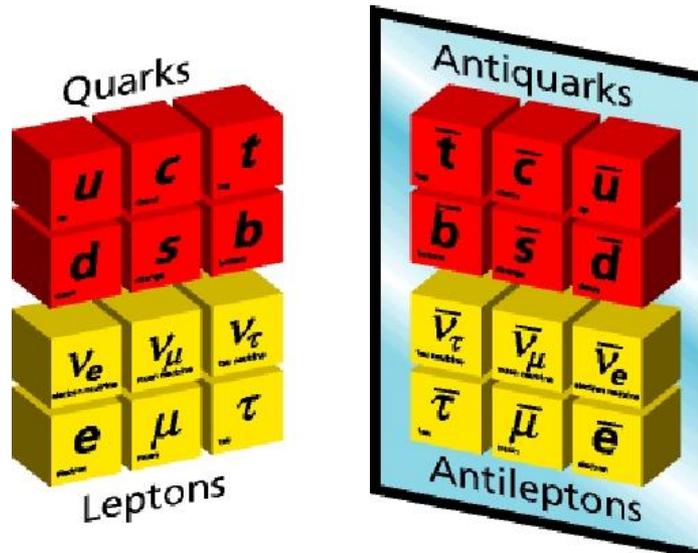
Democrito  
(460 a.C. – 370 a.C)

Interpretare **fenomeni complessi**  
**in termini delle proprietà delle**  
**parti più semplici** che li  
compongono e delle forze che  
intervengono a comporli

# I costituenti della materia

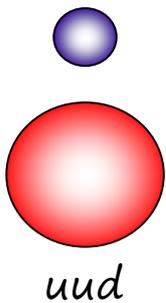


# Cos'è l'antimateria?



Particelle e antiparticelle hanno:

- Stessa massa
- Carica (non solo elettrica) di segno opposto



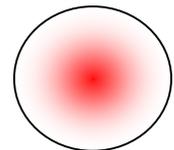
*elettrone: carica -e*  
*Massa m*

*protone: carica +e*  
*Massa = 1836 m*

*uud*



*positrone: carica +e*  
*Massa m*



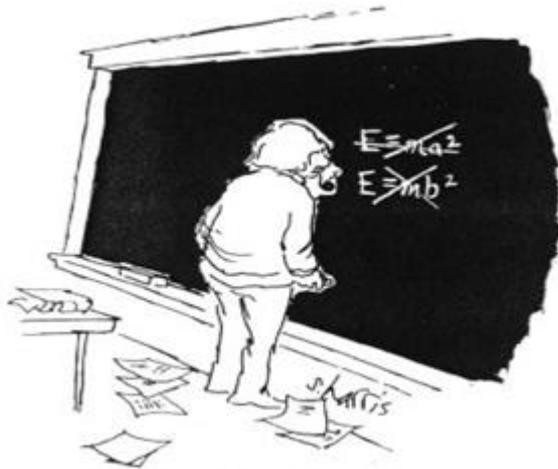
*antiprotone: carica -e*  
*Massa = 1836 m*

*$\bar{uud}$*

# Verso l'equazione di Dirac

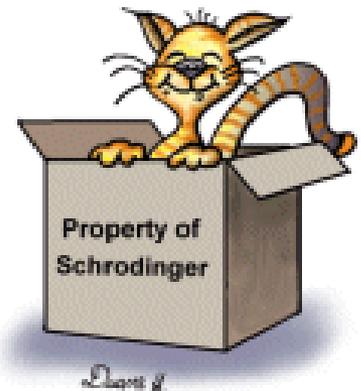
Primi anni del 1900:

le leggi della fisica che governano la materia vengono estese per descrivere gli atomi e le particelle elementari



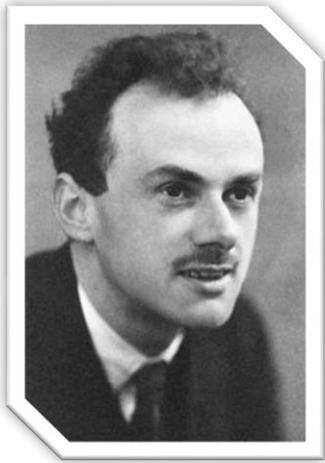
1905 – A. Einstein:  
Teoria della Relatività Speciale  
 $E = mc^2$

1926 – 1930:  
Teoria Quantistica –  
E. Schrödinger e W. Heisenberg



**Problema:**  
le teorie quantistiche proposte non sono relativistiche

# L'equazione di Dirac

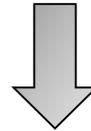


1928, P. Dirac:

equazione che combina la meccanica quantistica e la relatività speciale, per descrivere il moto di un elettrone relativistico

$$(\not{\partial} + m) \psi = 0$$

L'equazione di Dirac prevede due soluzioni:  
Una a energia positiva e una a energia negativa



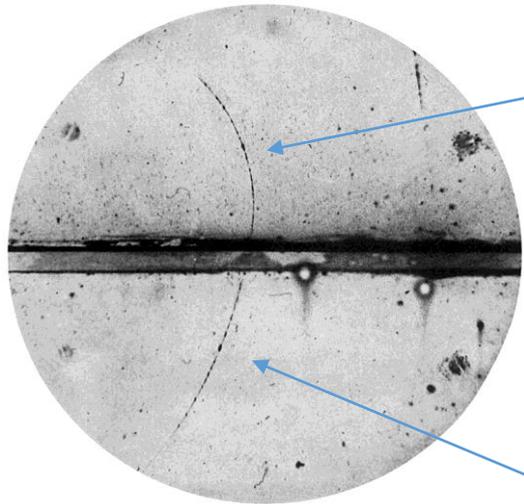
Ogni particella elementare ha un complementare, un'antiparticella.

*«Dobbiamo considerare un caso il fatto che la Terra (e probabilmente il Sistema Solare) contenga una preponderante parte di elettroni negativi e protoni positivi. È possibile che per qualcuna delle stelle sia nel modo opposto, ossia che queste siano composte di anti-elettroni e di anti-protoni. È possibile che la metà delle stelle siano fatte così...e non ci sarebbe modo di accorgersene»*

P. Dirac, Discorso per il ricevimento del premio Nobel (1933)

# La scoperta del positrone

1932, C. Anderson:  
prima evidenza sperimentale dell'esistenza di una particella di  
antimateria, l'antielettrone di Dirac



**positrone uscente:**  
minore energia →  
maggiore curvatura

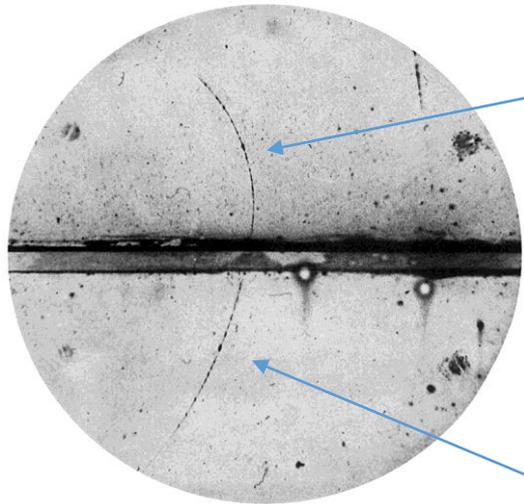
**spessore di piombo**  
→ perdita di energia

**positrone entrante**

*«Spesso si trova in letteratura che la scoperta del positrone fu una conseguenza della previsione teorica di P. Dirac, ma ciò non è vero. La scoperta del positrone fu assolutamente accidentale...»  
C. Anderson (1932)*

# La scoperta del positrone

1932, C. Anderson:  
prima evidenza sperimentale dell'esistenza di una particella di antimateria, l'antielettrone di Dirac



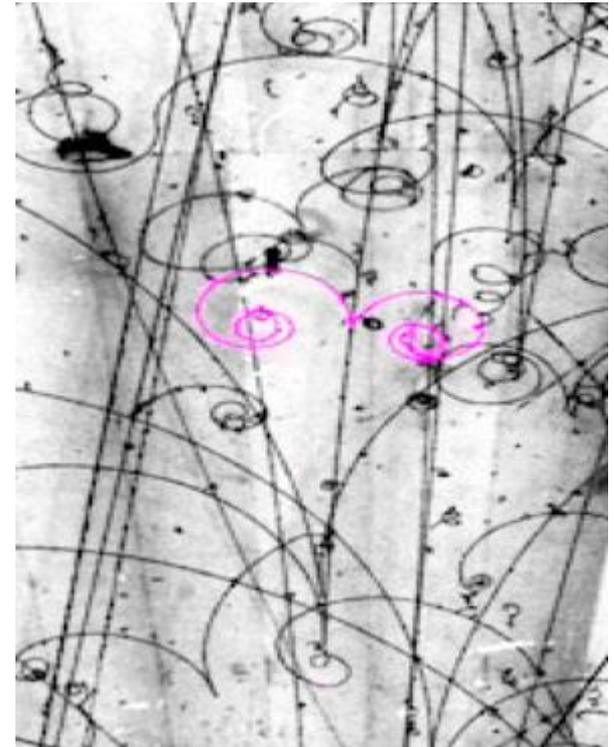
positrone uscente:  
minore energia →  
maggiore curvatura

spessore di piombo  
→ perdita di energia

positrone entrante

«Spesso si trova in letteratura che la scoperta del positrone fu una conseguenza della previsione teorica di P. Dirac, ma ciò non è vero. La scoperta del positrone fu assolutamente accidentale...»

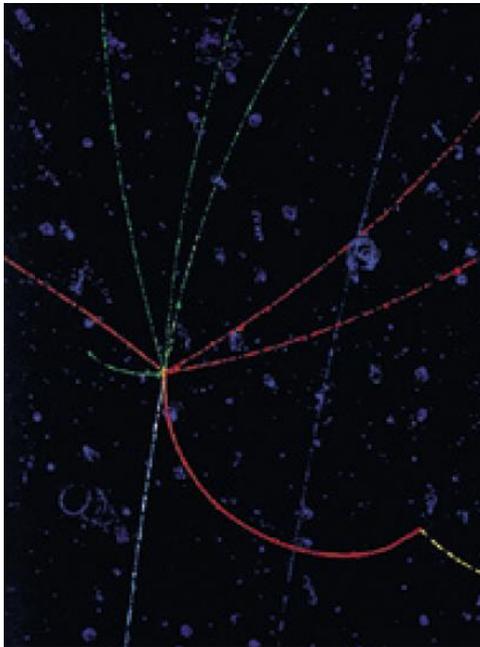
C. Anderson (1932)



1934, G. Occhialini e P. Blackett:  
osservazione sperimentale di generazione di coppie e annichilazione

# L'era degli acceleratori

1929, E. Lawrence (Nobel 1939):  
invenzione del ciclotrone → accelera protoni fino a qualche decina di MeV  
1954, E. Lawrence:  
costruzione del Bevatrone, progettato per raggiungere 6.2 BeV (GeV)



elettroni di  
bassa energia

4  $\pi^-$

4  $\pi^+$

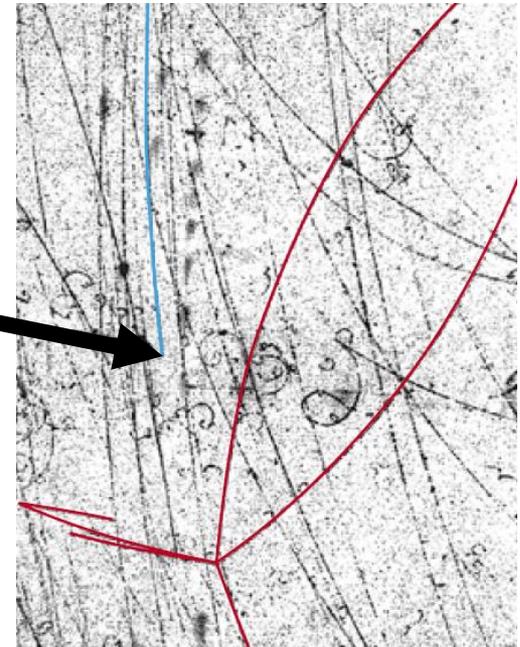
$\mu$

antiprotone

antiprotone

Reazione di  
scambio  
carica

Prodotti  
annichilazione  
antineutrone



1955, O. Chamberlain, E. Segrè C.  
Wiegand, T. Ypsilantis:  
scoperta dell'antiprotone (Nobel 1959)

1956, B. Cork, G. Lambertson, O.  
Piccioni, W. Wenzel:  
scoperta dell'antineutrone

# L'era degli acceleratori

1965, Zichichi e Lederman:  
scoperta degli **antideutoni**, primi nuclei fatti di antimateria

Dal 1980:  
particelle di antimateria instabili prodotte con acceleratori  
L'antimateria e le sue proprietà sono tuttora studiate in numerosi esperimenti agli acceleratori o con esperimenti nello spazio

1995, CERN e FERMILAB:  
**primi atomi di antidrogeno** (circa 60, relativistici)

1999, CERN:  
entra in funzione AD (Antiproton Decelerator) dedicato alla produzione di antiidrogeno freddo (temperature - pochi Kelvin o subkelvin, velocità di decine - centinaia m/s)

2002, ATHENA (e ATRAP) @ CERN:  
**milioni di atomi di antidrogeno**

Dal 2006, ALPHA, ATRAP, ASACUSA, AEGIS, GBAR:  
esperimenti in presa dati o in preparazione al CERN per studiare le proprietà dell'antidrogeno

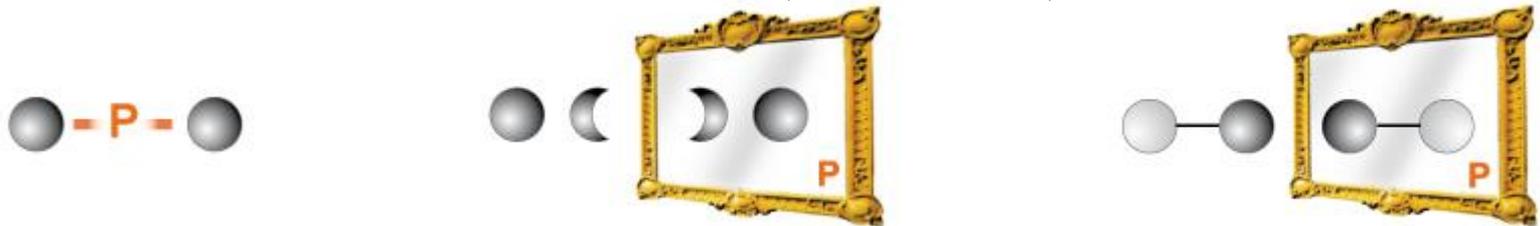
*materia*  
DIVERSITÀ



# Simmetrie C, P, T

## Simmetria P = PARITÀ

Inversione dei tre assi del sistema di riferimento cartesiano che misura le coordinate di ogni punto dello spazio



## Simmetria C = coniugazione di CARICA

Inversione della carica delle particelle, cioè si sostituisce ad ogni particella la propria antiparticella

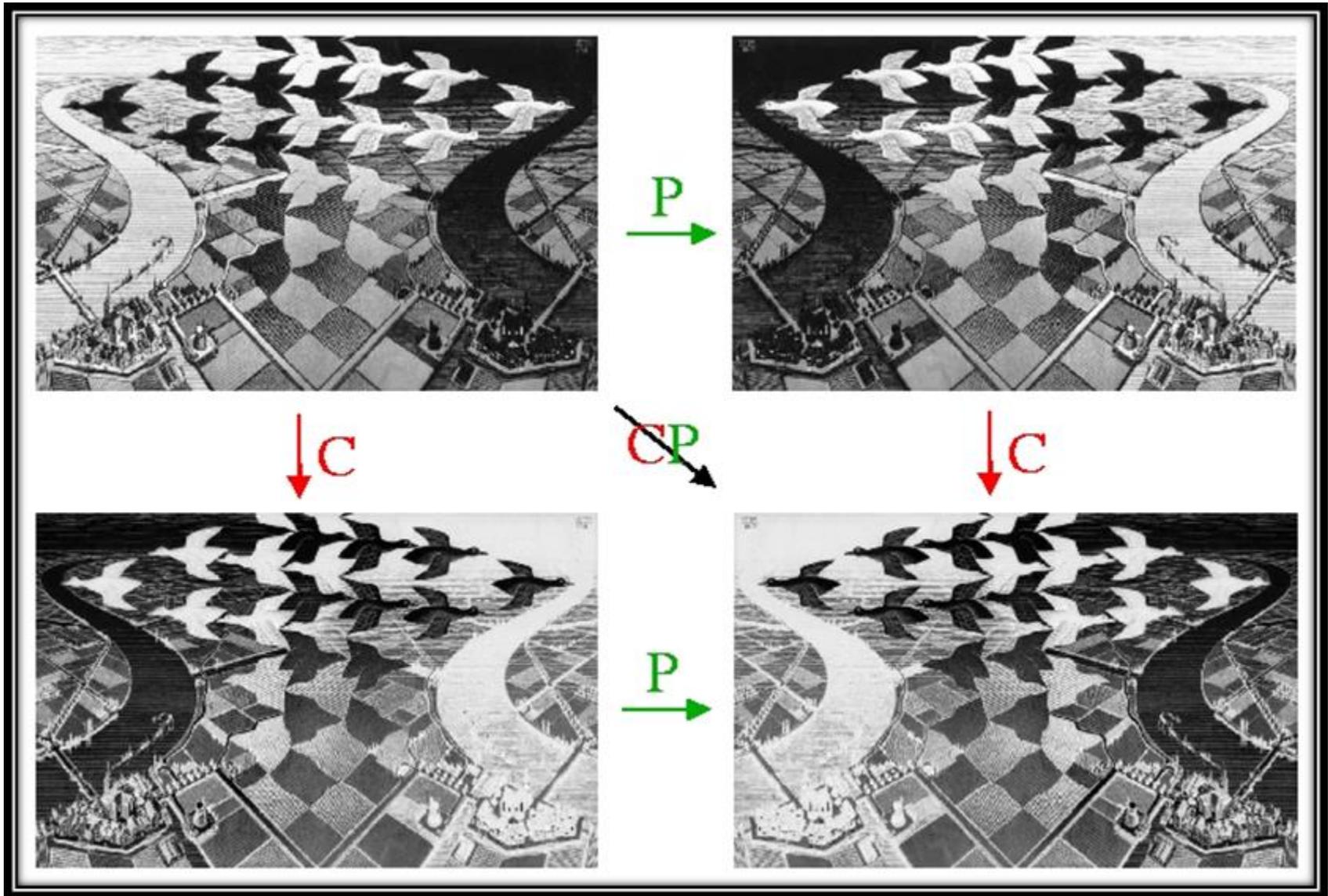


## Simmetria T = inversione del TEMPO

il tempo scorre all'indietro ( $t \rightarrow -t$ )

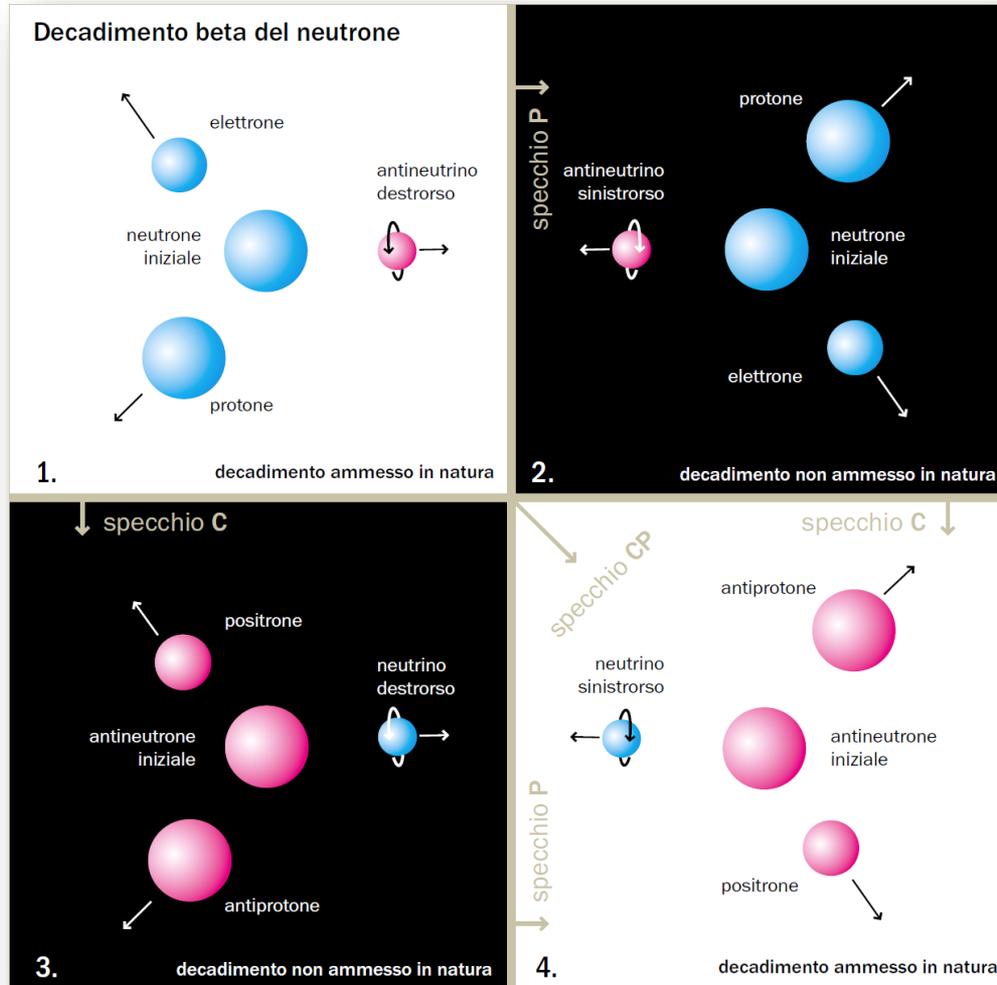
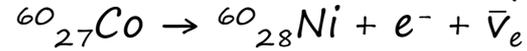


# Simmetrie *C* e *P*



# ...e per il mondo allo specchio?

1956, Wu et al.: Osservazione della violazione della parità nelle interazioni deboli



# CP è conservata?



...no...

# La natura sa distinguere...

1964, Cronin e Fitch

osservazione della **violazione di CP** nel decadimento dei mesoni  $K_L$  e  $K_S$

$$K_L (\tau \approx 5.2 \times 10^{-8} \text{ s}) \rightarrow 3\pi$$

$$K_S (\tau \approx 0.89 \times 10^{-10} \text{ s}) \rightarrow 2\pi$$

Dopo 17m, 45 decadimenti a  $2\pi$  su 22700 decadimenti ( $\sim 1/500$ )!!!

Osservazione della **violazione di CP** nel decadimento leptonic di  $K_L$

$$K_L \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

$$K_L \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

Osservata emissione di più positroni che elettroni  $\epsilon \approx 10^{-3}$

2004, esperimento BABAR:

osservazione della **violazione di CP** nel decadimento dei mesoni  $B^0$  e  $\bar{B}^0$

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$$

$$\bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+$$

$$A(B^0 \bar{B}^0) = \frac{K^- \pi^+ - K^+ \pi^-}{K^- \pi^+ + K^+ \pi^-} = -0.133 \pm 0.031$$

# Teorema CPT

1954, Gerhard Luders:

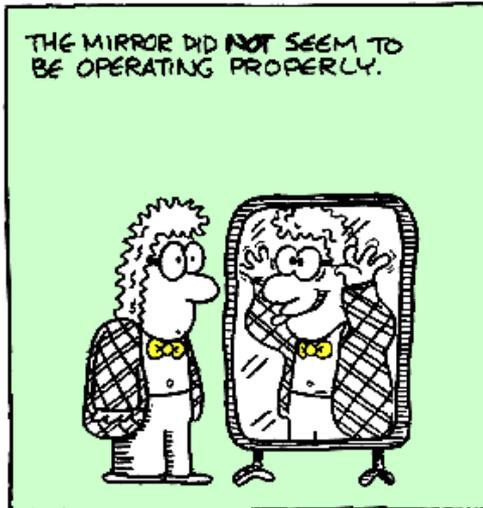
L'azione simultanea di:

**Coniugazione di carica**

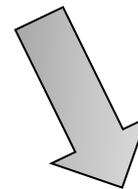
**Parità**

**Inversione temporale**

lascia invariate le leggi fisiche



...e la violazione di CP?



Se T viene violata,  
CPT è comunque conservata!

Violazione di T osservata sperimentalmente

CPT  
simmetria  
universale?



*Sì...finora!*

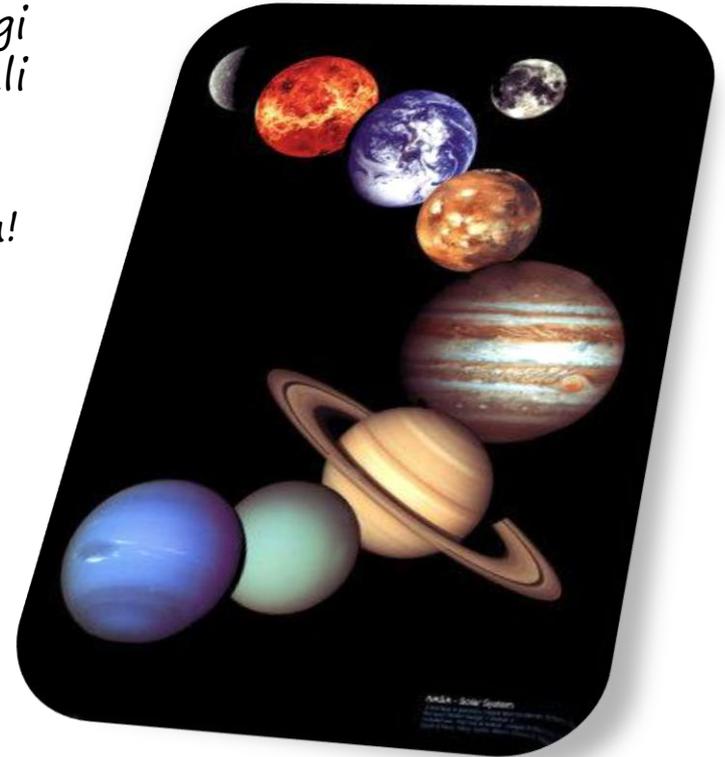
*Sì...finora!*

# Dov'è finita l'antimateria?

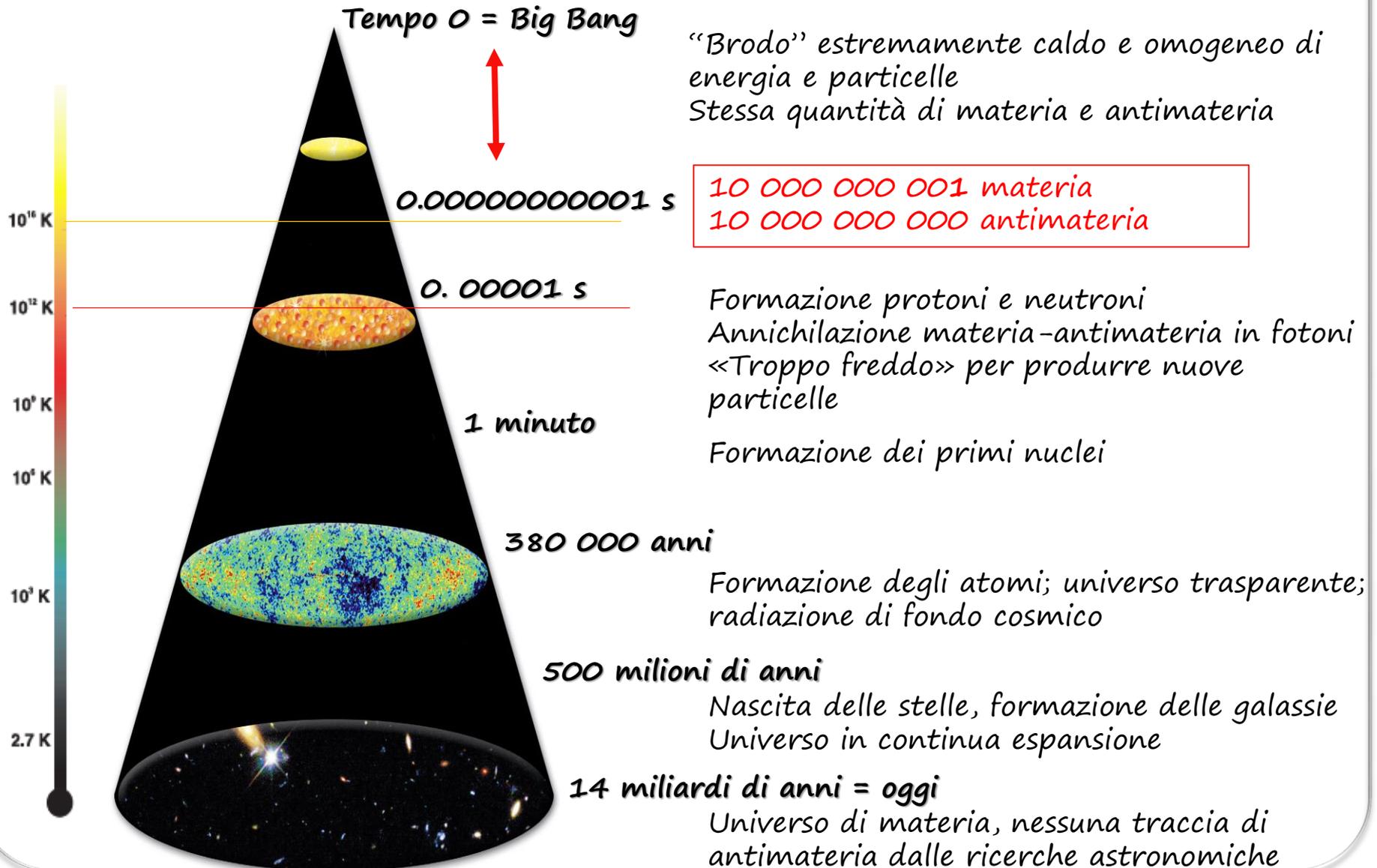
Particelle di materia e antimateria sono sempre create in coppia, in accordo con  $E = mc^2$

Applicate su scala cosmica, queste leggi prevederebbero un Universo costituito da uguali quantità di materia e antimateria.

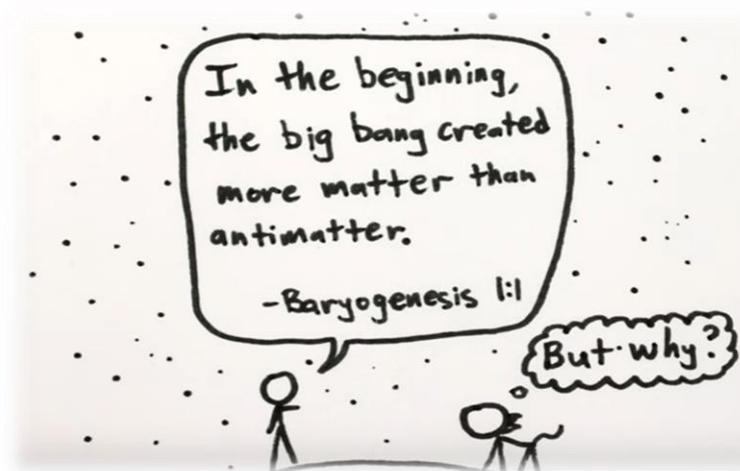
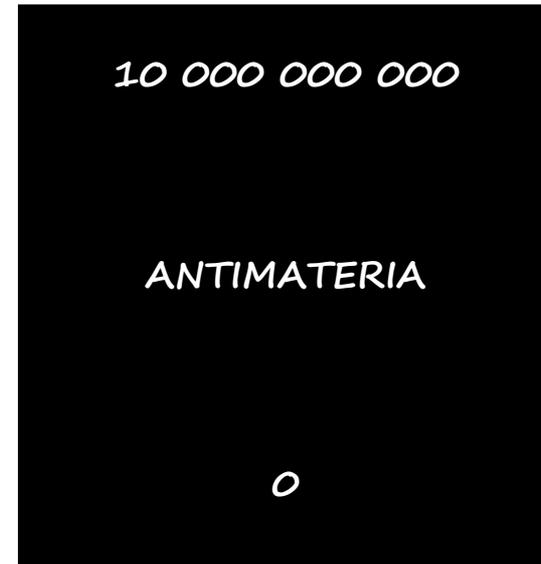
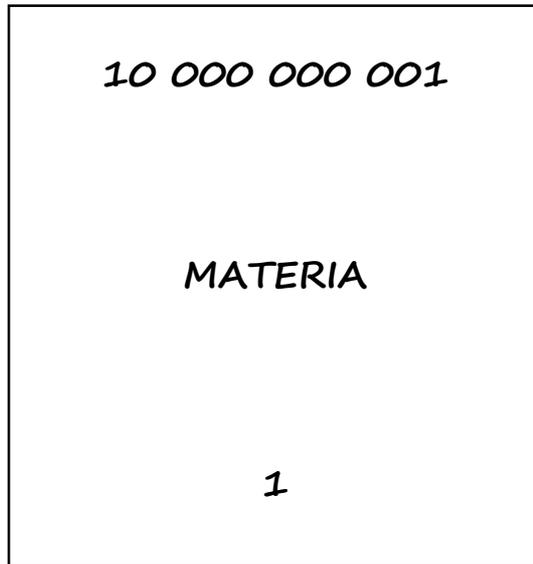
Ma...l'Universo appare solo costituito da materia!  
Esistono antistelle, antigalassie e antiuniversi??



# Dal Big Bang a oggi



# La Grande Annichilazione



# Asimmetria materia-antimateria

## Bariogenesi:

produzione di eccesso di materia rispetto ad antimateria



## Condizioni di Sacharov (1967)

1. **Violazione del numero barionico**  
se così non fosse, l'asimmetria materia-antimateria rifletterebe una asimmetria iniziale (ai tempi del Big Bang) → disaccordo con l'universo inflazionario
2. **Violazione di C e CP**  
Violazione di B non è sufficiente se non si favorisce la preferenza dei barioni sugli antibarioni
3. **Evoluzione primordiale non in equilibrio termodinamico**  
Ad ogni reazione, non è corrisposta una reazione opposta a controbilanciare e a mantenere in equilibrio il sistema



Perché  
studiare  
l'antimateria?



*«It isn't what we don't know that gives us trouble, it's what we know that ain't so.»*  
Mark Twain (1835 – 1910)

*Una qualsiasi misura sull'antimateria che porti a risultati inaspettati sarebbe una scoperta che cambierebbe radicalmente la nostra comprensione della Fisica*

*Come  
studiare  
l'antimateria?*



*Attraverso esperimenti che ci permettano un confronto ad alta risoluzione dei sistemi materia-antimateria (massa, proprietà spettroscopiche, decadimenti, effetti della gravità, ...) per verificare la simmetria CPT*

# *Antimateria agli acceleratori*



# ATHENA (2001-2004)

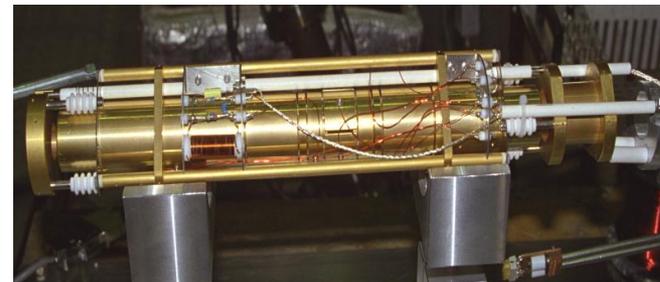
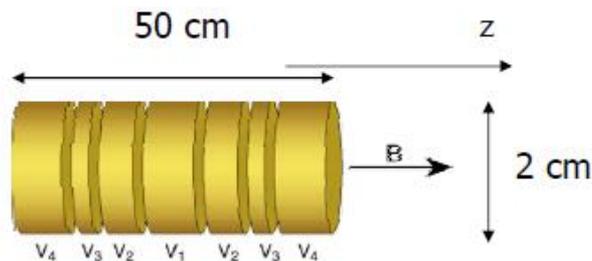
Apparatus for High-precision Experiments on Neutral Antimatter  
Numerosa (5 su 40) componente pavese

Produzione e rivelazione di atomi di antiidrogeno freddi

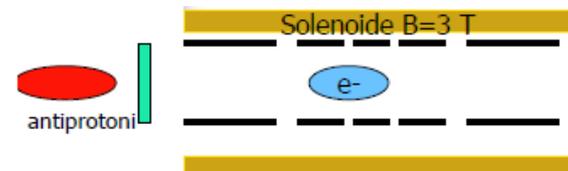
1996:	9 (PS210, CERN)	2 GeV
1998:	60 (Fermilab)	3 GeV
2002:	1000000 (ATHENA, ATRAP)	0.001 eV

## Come si produce l'antiidrogeno?

1. Produzione e decelerazione degli antiprotoni → AD al CERN, bunch di 30 milioni di antiprotoni ogni 100 s
2. Cattura degli antiprotoni → trappola con campi elettrici e magnetici



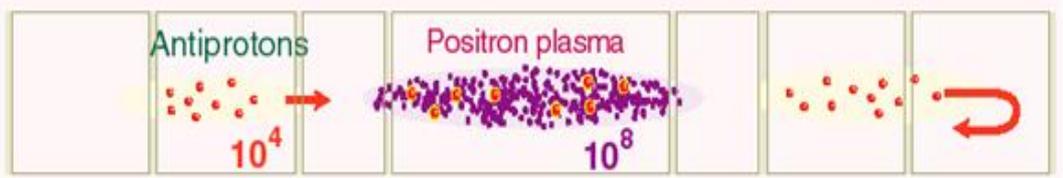
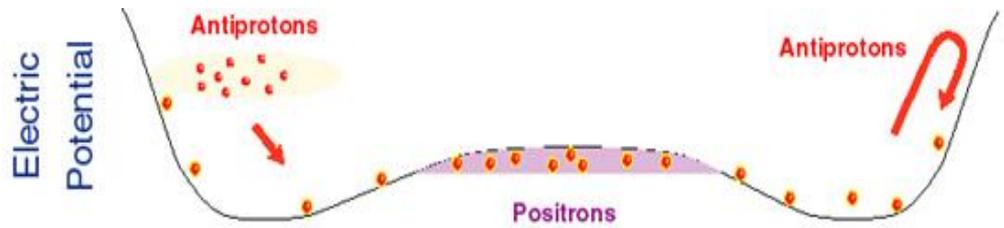
3. Raffreddamento degli elettroni  
→ electron cooling



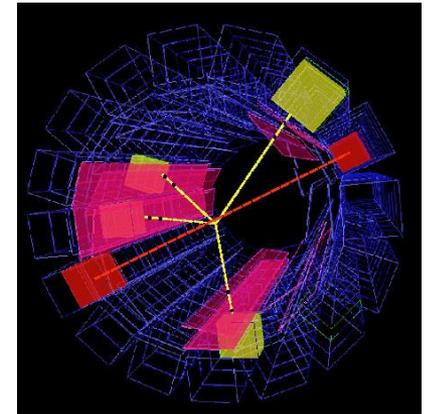
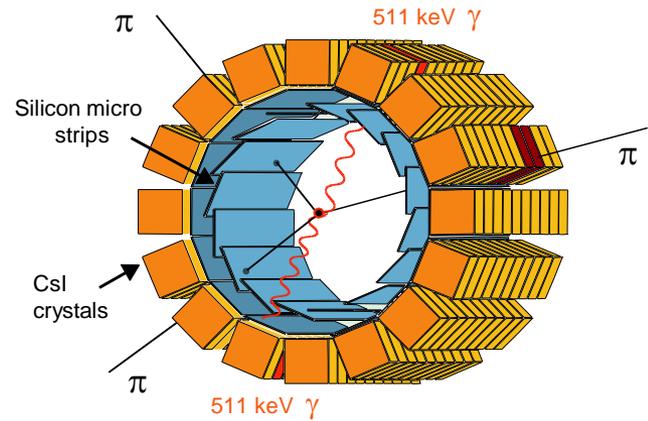
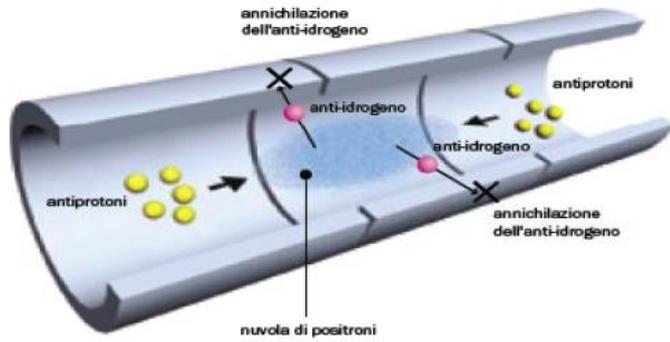
# ATHENA

4. Produzione di un plasma freddo di positroni da sorgente radioattiva di  $^{22}\text{Na}$  (circa 400 milioni  $e^+/s$ )

5. Mixing positroni-antiprotoni e ricombinazione:  
 $\bar{p} + e^+ + e^+ \rightarrow \bar{H} + e^+$



6. Gli atomi neutri di antiidrogeno sfuggono e annichilano contro le pareti della trappola



# Misure di precisione: ALPHA

Misura della carica elettrica  $Q_e$  di  $\bar{H}$ :  $Q = (-1.3 \pm 1.1 \pm 0.4) \times 10^{-8}$

*Nature Commun, 5, 3955 (2014)*

- ✓ Miglioramento di 6 ordini di grandezza rispetto al precedente limite sperimentale
  - ✓ Conferma (entro gli errori sperimentali) che l'antiidrogeno è neutro
- ✓ Ulteriore evidenza dell'uguaglianza delle proprietà tra materia e antimateria (CPT)

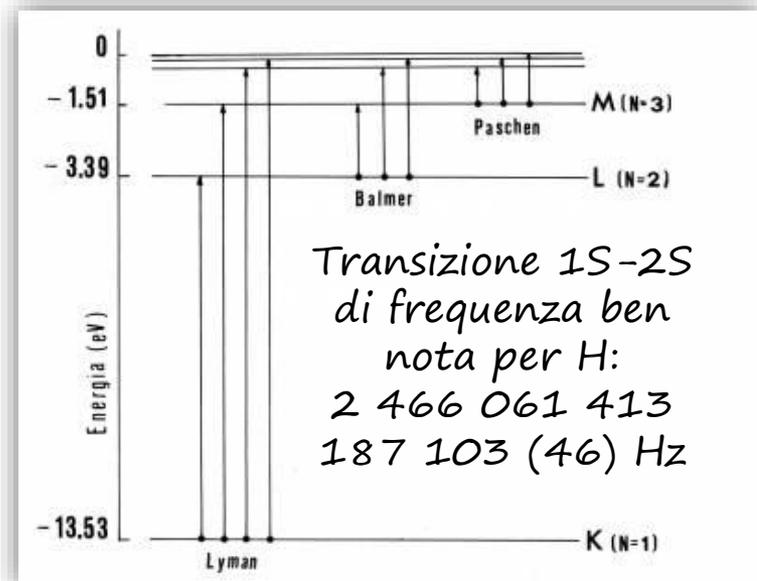
Confinamento di atomi di antiidrogeno per 1000 s!

*Nature Physics 7, 558-564 (2011)*



"Okay, who's the practical joker -- my antihydrogen atoms disappeared for 1,000 seconds."

- ✓ Importante per studi di spettroscopia



È la stessa frequenza anche per  $\bar{H}$ !

# Misure di precisione



@ CERN

## ASACUSA: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons

- Test simmetria CPT attraverso misura precisa del rapporto  $M_{\bar{p}}/m_e$
- Test simmetria CPT attraverso studio struttura iperfine dell'atomo di  $\bar{H}$
- Sezioni d'urto di collisione atomica e nucleare per  $\bar{p}$  di basse energie (<100 keV)

Science 354, 610 (2016)

Nuova misura di precisione  $M_{\bar{p}}/m_e$ , ( $= 1836.1526734(15)$ ),  
in accordo con  $M_p/m_e$  entro un fattore  $8 \times 10^{-10}$



ALICE

@ CERN

## ALICE: A Large Ion Collider Experiment

- Fisica del confinamento
- Meccanismo di generazione della massa nell'interazione forte
- Comportamento materia dopo il Big Bang - Quark Gluon Plasma

Nature Physics 11, 811-814  
(2015)

Misure di precisione della differenza di massa ( $\mu \equiv m/z$ ) per  
(anti)deuterio  $\mu_{d\bar{d}}$  e (anti) $^3\text{He}$   $\mu_{^3\text{He}^3\bar{\text{He}}}$

$$\Delta \mu_{d\bar{d}} = (1.7 \pm 0.9 \pm 2.6) \times 10^{-4} \text{ GeV}/c^2$$

$$\Delta \mu_{^3\text{He}^3\bar{\text{He}}} = (1.7 \pm 0.9 \pm 2.6) \times 10^{-4} \text{ GeV}/c^2$$

Compatibili con 0, in accordo con CPT

# Misure di (anti)gravità



$$F = m_l a$$

$$F = -G m_G M_G / r^2$$

Il principio di universalità di caduta libera (o *Weak Equivalence Principle, WEP*) stabilisce che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione.

Vale anche per l'antimateria?

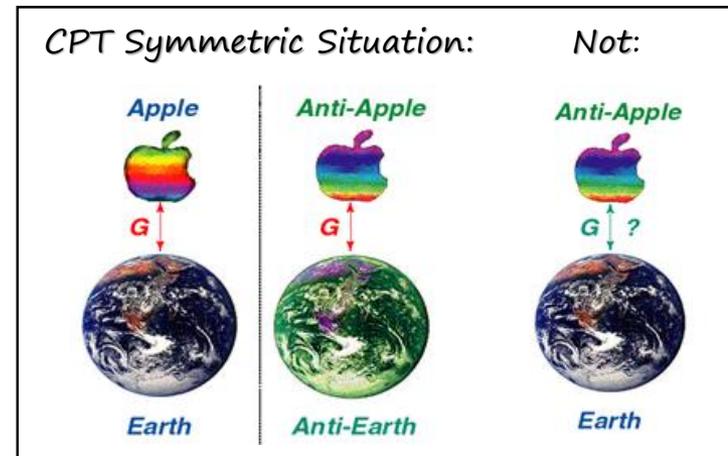
Secondo WEP:  $m_l = m_G$

Secondo CPT:  $m_l = \bar{m}_l$

$m_G = m_l = \bar{m}_l ? \bar{m}_G$

WEP materia-materia: accuratezza  $10^{-13}$

WEP materia-antimateria: ???



**AEgIS: Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectrometry**  
**verificare il WEP con gli antiprotoni** forniti dal CERN, utilizzando il deceleratore di antiprotoni (AD), ed effettuare la **prima misura diretta dell'accelerazione gravitazionale terrestre con l'atomo di antiidrogeno**

# *Antimateria nello spazio*

# Antimateria nello spazio: AMS



**AMS: Alpha Magnetic Spectrometer**  
studia l'universo e le sue origini, cercando antimateria di origine primordiale e materia oscura attraverso misure di precisione della composizione e del flusso dei raggi cosmici



**AMS-01, 1998**  
320-390 km di altitudine

~3 000 000 nuclei di He  
**0 nuclei  $\bar{\text{He}}$**

Phys. Lett. B 461 (1999) 387-396

**AMS-02, lancio 2011**

- in orbita intorno alla Terra sulla ISS ad un'altezza di circa 300 km
- studia la composizione dei raggi cosmici primari



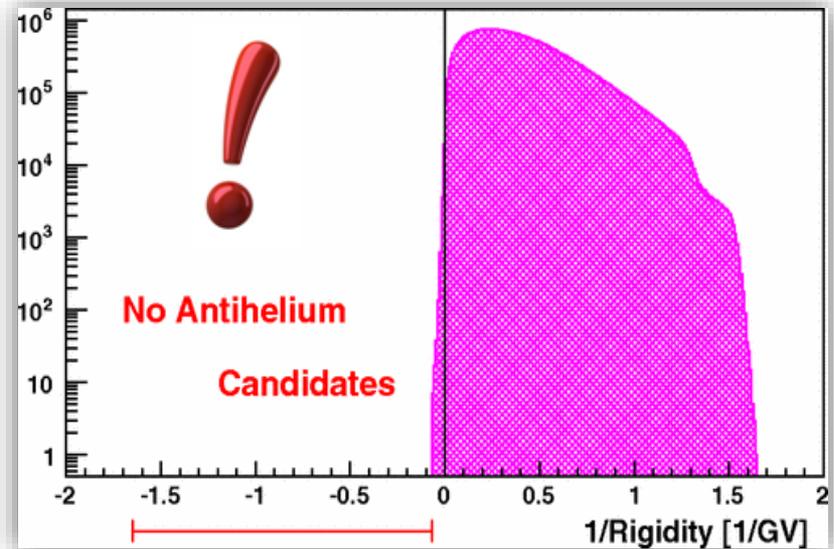
# Antimateria nello spazio: BESS-Polar



BESS-Polar: Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer  
 progetto per la ricerca dell'antimateria nella radiazione cosmica → ricerca nuclei di  $\overline{\text{He}}$

Phys. Rev. Lett. 108, 131301 (2012)

2 voli sopra l'Antartico:  
 BESS-Polar I: 8.5 giorni, 2004;  
 BESS-Polar II: 24.5 giorni, 2007-2008



$$F_{\text{cent}} = F_{\text{Lorentz}}: m \frac{v^2}{r} = Ze v B \rightarrow Br (\equiv \text{rigidity}) = p / Ze$$

BESS-Polar I: **0 candidati  $\overline{\text{He}}$**  su  $8.4 \cdot 10^6$  nuclei con  $|Z|=2$  in  $[1, 20]$  GV  
 BESS-Polar II: **0 candidati  $\overline{\text{He}}$**  su  $4.0 \cdot 10^7$  nuclei con  $|Z|=2$  in  $[1, 14]$  GV

# *Applicazioni*

# Antimateria per la ricerca di base

Fasci di antiprotoni negli acceleratori:



**antiProton ANnihilation at Darmstadt**

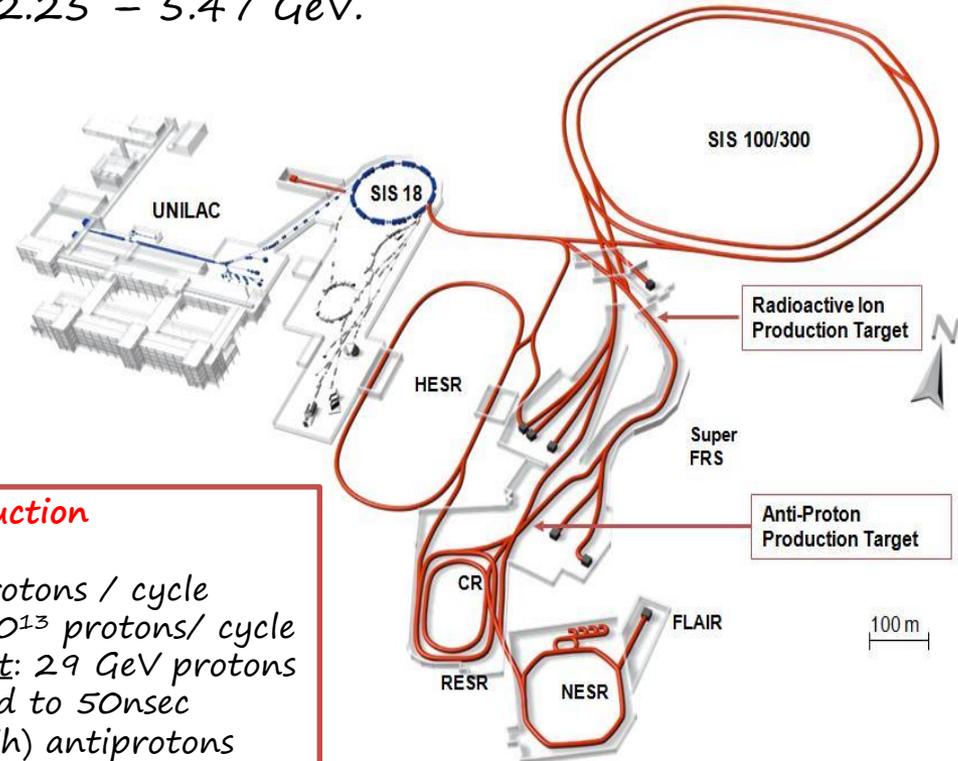


## Goal di PANDA:

- **Spettroscopia adronica**
  - Misura delle proprietà degli adroni
  - Ricerca di particelle «esotiche»
- **Adroni nella materia**
- **Struttura dei nucleoni**
  - Generalised Parton Distributions
  - Fattori di forma del protone
  - Processi Drell-Yan
- **Ipernuclei**

Gruppo pavese per anni impegnato nella progettazione e simulazione del tracciatore Straw Tube Tracker (STT)

Il fascio di antiprotoni avrà un momento compreso tra 1.5 e 15 GeV/c, corrispondente ad una energia nel centro di massa nel range 2.25 - 5.47 GeV.



### Antiproton production

Linac: 50 MeV p

SIS18:  $5 \cdot 10^{12}$  protons / cycle

SIS100:  $2 - 2.5 \cdot 10^{13}$  protons / cycle

Production target: 29 GeV protons bunch compressed to 50 nsec

$2 \cdot 10^7$  / s ( $7 \cdot 10^{10}$  / h) antiprotons

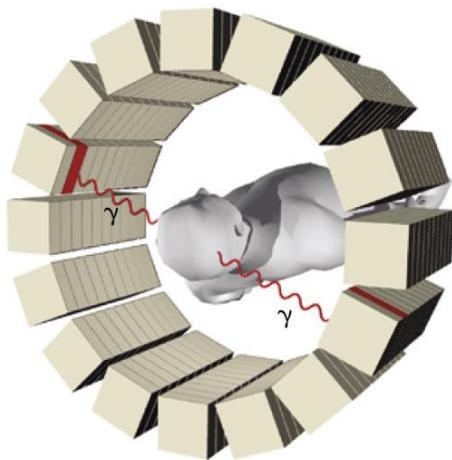
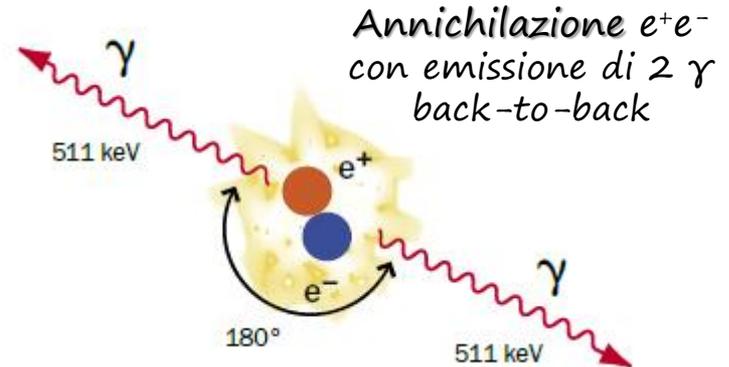
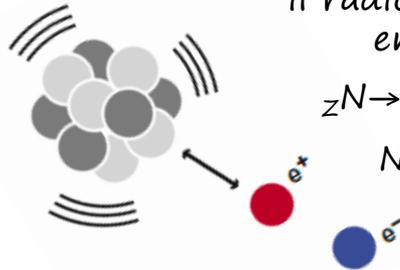
# Antimateria per la salute: la PET

Tomografia a Emissione di Positroni (Positron Emission Tomography): strumento diagnostico non invasivo ampiamente utilizzato in Medicina Nucleare, che sfrutta l'antimateria

Radio-tracciante:  
il radio-isotopo decade  
emettendo  $e^+$

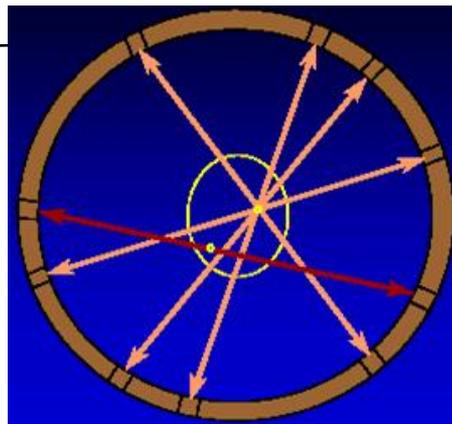


$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$



Tomografo PET

Rivelatori di  
raggi  $\gamma$



Ricostruzione linee di volo

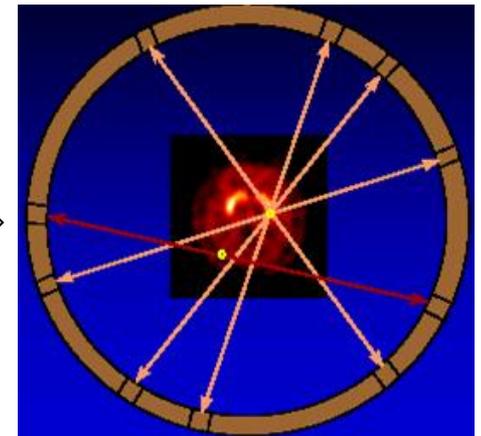


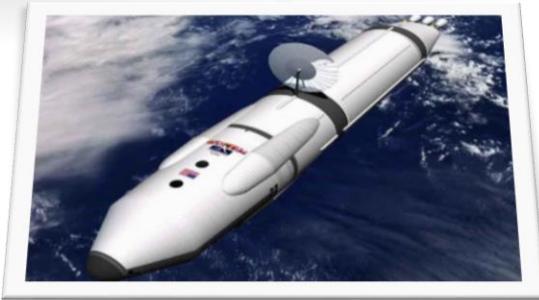
Immagine PET

# Antimateria e fantascienza



*«Senza antimateria, non sarebbero possibili le crociere della nave stellare Enterprise: la sua missione è quella di esplorare nuovi mondi, alla ricerca di nuove forme di vita e di nuove civiltà, e di giungere arditamente dove nessun uomo è mai giunto prima d'ora»*

*Star Trek, serie I*

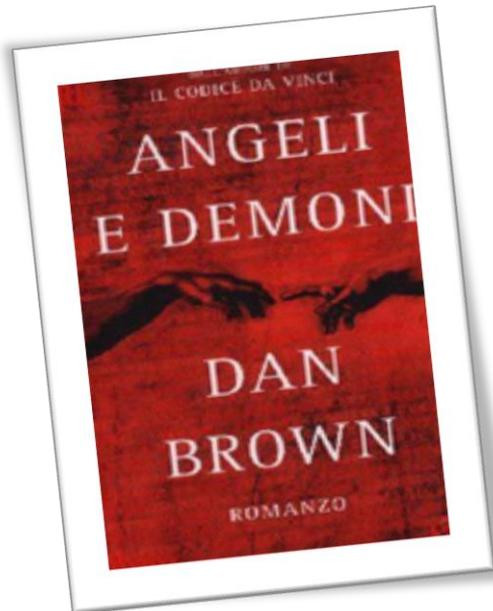


*2006: progetto NASA di navicella spaziale ad antimateria*



*Shuttle NASA Enterprise, realizzato per sperimentare le fasi di rientro e atterraggio*

# Antimateria e fantascienza



Thriller scientifico-religioso  
in cui la fantomatica antica  
setta degli Illuminati trafuga dal  
CERN **1 g** di antimateria in un  
**contenitore cilindrico**, per creare  
una bomba di antimateria per  
distruggere il Vaticano



Se gli acceleratori del CERN fossero usati SOLO per  
creare antimateria, servirebbero milioni di anni per  
crearne un grammo!!

Tutta l'antimateria prodotta da ATLAS  
basterebbe solo ad aumentare di 1°C in  
un'ora la temperatura di una tazza di caffè



**SE** fosse possibile accumulare 1 g di antimateria, metterla in un  
contenitore, trasportarla in sicurezza... sarebbe una bomba potente!

# Curiosità sull'antimateria

Energia prodotta da 1 g di antimateria:

$$E = mc^2 = (10^{-3} \text{ kg}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J} = 90\,000 \text{ GJ}$$

In termini di potenza elettrica:

$$1 \text{ kWh} = (1000 \text{ W}) \cdot (3600 \text{ s}) = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

→ 1 g di antimateria produce

$$9 \cdot 10^{13} \text{ J} / (3.6 \cdot 10^6 \text{ J/kWh}) = 25 \cdot 10^6 \text{ kWh}$$

Che equivale al consumo massimo giornaliero

$$(3 \text{ kWh} \cdot 24 \text{ h/gg} = 72 \text{ kWh/gg})$$

dell'impianto domestico per

$$2.5 \cdot 10^7 \text{ kWh} / (72 \text{ kWh/gg}) = 347222 \text{ giorni} = 951 \text{ anni!}$$

Costo 0.20 €/kWh → produrre 1 g di antimateria costerebbe 5 milioni €

1 tonnellata di tritolo genera un'energia di  $4 \cdot 10^9 \text{ J}$

1 bomba di 1 g di antimateria avrebbe la stessa energia di  $9 \cdot 10^{13} \text{ J} / (4 \cdot 10^9 \text{ J/ton}) = 22.50 \text{ tonnellate di tritolo!}$

L'antimateria prodotta finora da tutti gli acceleratori del mondo arriva a circa 10 ng l'anno ( $10^{-8} \text{ g/y}$ )!



**Grazie per l'attenzione!**

GRASIE PER L'ATTENZIONE!



"You clumsy oaf! — I can't believe you actually *dropped* the antimatter!"

# Fisica con antimateria a Pavia

*Più di 20 anni di fisica con gli antiprotoni*

*G. Bendiscioli, G. Boca, S. Costanza, A. Fontana,  
P. Genova, L. Lavezzi P. Montagna, A.  
Panzarasa, A. Rotondi, P. Salvini*

<i>1982-1986</i>	<i>antiprotone-nucleo (TOFRADUPP)</i>
<i>1986-1996</i>	<i>antiprotone-protone (OBELIX)</i>
<i>1997-2004</i>	<i>atomi di anti-idrogeno (ATHENA)</i>
<i>2004-2015</i>	<i>antiprotone-protone (PANDA)</i>
<i>2012-2020</i>	<i>atomi di anti-idrogeno (AEgIS)</i>