

Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben

2018.11.13

Matematikai felfedezés

Paul Dirac bukkant rá 1928-ban. Relativisztikus sebességeknél a teljes energia:

$$E = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$p = -i\hbar\nabla, E = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$$

Klein–Gordon-egyenlet:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \Phi = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \Phi$$

Dirac-egyenlet:

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi = mc\psi$$

$$\begin{bmatrix} mc^2 & c\sigma p \\ c\sigma p & -mc^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_+ \\ \Phi_- \end{bmatrix} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \Phi_+ \\ \Phi_- \end{bmatrix}$$

Dirac: "...a new kind of particle, unknown to experimental physics, having the same mass and opposite charge to an electron..."

Carl Anderson kimutatta kozmikus sugárzásban a pozitront 1932-ben.

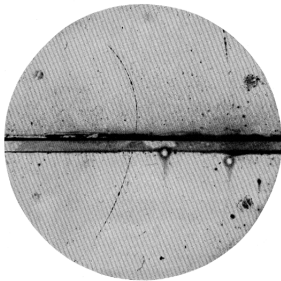
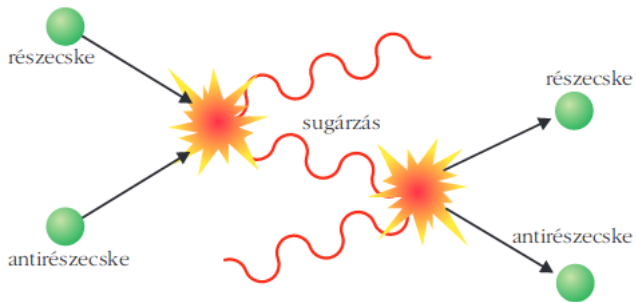


Figure 1: Pozitron felfedezése

Antirészecske és részecske egyesülése



Negatív tömeg = antigravitáció?

- ▶ az anyag és antianyag szimmetriája nem zár ki lehetséges különbséget a gravitációban
- ▶ anyagunk tömege túlnyomórészt energia
- ▶ gravitációs lencsehajlás → ha az elemi részecskékre és az antirészecskékre másképpen hatna a közös anyag gravitációs hatása, azt is nehéz volna kimutatni a közös energia gravitációs hatása mögött

- ▶ az általános relativitáselméletet eddig minden kísérleti adat szigorúan igazolja, márpedig azokban az egyenletekben nincs olyan tag, amely előjelet váltana részecske és antirészecske között. ajánlottak ilyen matematikai leírásokat, de azok megbuktak a kísérleti adatokon, az előjelváltó tagok észlelhetetlenül kicsik
- ▶ elektron pozitron gravitációs mozgásának összehasonlítása

- ▶ antianyag-hiány → mégsem teljesen egyformák?



Figure 2: A CERN "antianyaggyára"

- ▶ Antiproton Decelerator, ELENA (Extra Low ENergy Antiproton)

- ▶ proton beam fired into a block of metal → secondary particles
- ▶ these antiprotons have too much energy to be useful for making antiatoms. they also have different energies and move randomly in all directions
- ▶ produces antiproton beams and sends them to the different experiments.

The AD is a ring composed of bending and focussing magnets that keep the antiprotons on the same track, while strong electric fields slow them down to around a tenth of the speed of light.

AD provides bunches of $3 \cdot 10^7$ antiprotons, of which $6 \cdot 10^4$ are dynamically trapped. Cooling, elektronok eltávolítása $\rightarrow 1.5 \cdot 10^4$
Currently the AD serves several experiments that are studying antimatter and its properties: ALPHA, ASACUSA, ATRAP and BASE. Two other experiments, AEGIS and GBAR, are preparing to study the effects of gravity on antimatter.

Eddig minden eredmény megerősíti az egyenértékűséget.

Néhány éven belül egy újabb, a németországi Darmstadtban épülő FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) megindulása várható.

ELENA is a new deceleration ring that will soon be commissioned. Coupled with the AD, this synchrotron, with a circumference of 30 metres, will slow the antiprotons even more, reducing their energy by a factor of 50, from 5.3 MeV to just 0.1 MeV. The number of antiprotons that can be trapped will be increased by a factor of 10 to 100, improving the efficiency of the experiments and paving the way for new experiments.

Kísérletek a CERN-ben

- ▶ anyag-antianyag egyenértékűség legérzékenyebb ellenőrzésére az antihidrogén-atom két fotonnal bomló $2S-1S$ átmenete nyújt lehetőséget, a $2S$ metastabil állapot hosszú élettartama miatt ($1/8$ s)
- ▶ The CPT symmetry of QED requires that the gross structure, fine structure and Lamb shifts, and the hyperfine structures in hydrogen and antihydrogen are identical

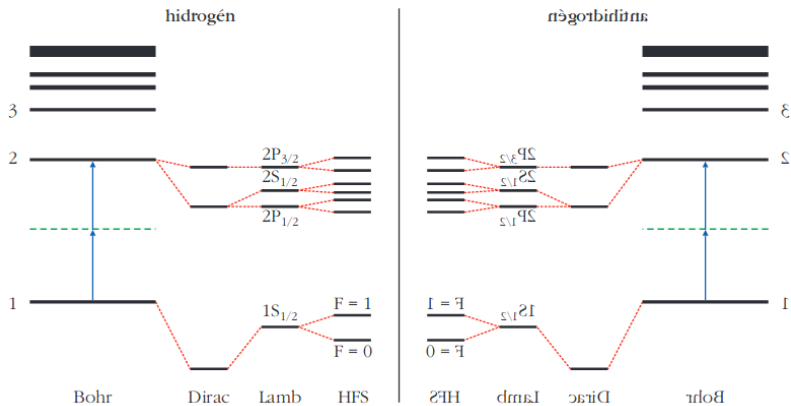


Figure 3: Hidrogén és antihidrogén energiaszintjei

- ▶ 2011, 300 trapped antihydrogen atoms for 1000s, long enough to be able to study their properties in detail

The ALPHA antihydrogen trap is comprised of the superposition of a Penning trap for antihydrogen production and a magnetic field configuration that has a three-dimensional minimum in magnitude.

- ▶ meghatározták a tárolt antihidrogén-atomok töltésének semlegességét, és azzal korlátozták a lehetséges eltérést a proton és antiproton töltése között
- ▶ az antihidrogén-atomok gravitációs süllyedéséből behatározták a lehetséges különbséget a proton és antiproton gravitációs tömege között

"Our results set statistical bounds on the value of $F \equiv \frac{M_g}{M}$, the ratio of the gravitational mass M_g to the inertial mass M of antihydrogen. (M is assumed numerically equal to the mass of hydrogen.) In the absence of systematic errors, we find that F must be <75 "

- ▶ spektroszkópai észlelés: we trapped antihydrogen atoms in our magnetic trap and illuminated them with laser light. We tuned the light so that it was positioned in a number of different places relative to the calculated resonance with the $1S$ - $2S$ transition in hydrogen. If the light excites the antiatoms to the $2S$ state it has a good probability for getting photoionised by subsequent photons and thus be lost from the trap. By repeating the experiment for a number of different frequencies we could map out the resonance position of the transition and it's shape.

ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons)

- ▶ hyperfine structure for testing CPT sym
- ▶ antiprotonic helium by replacing one of the electrons with an antiproton → antiproton electron mass ratio → CPT

AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy)

- ▶ általánosan $\rightarrow g = \bar{g}$
- ▶ extensions of the standard model which attempt to quantize gravity $\rightarrow g \neq \bar{g}$
- ▶ antihidrogén-nyalábot röptetnek részrendszereken át és a gravitáció hatására történő süllyedést mérik

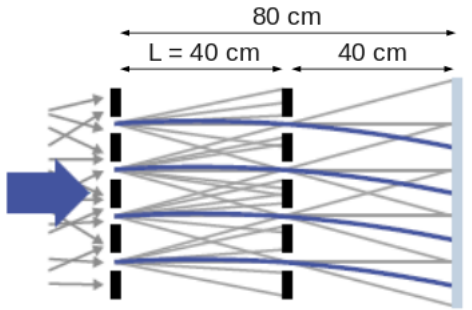


Figure 4: Antihydrogen atoms annihilating on the detector surface generate a periodic pattern. A shift of the pattern is caused by the vertical gravitational force

BASE (Baryon Antibaryon Symmetry Experiment)

▶ $\frac{\left(\frac{q}{m}\right)_{\bar{p}}}{\left(\frac{q}{m}\right)_p} - 1 = (1 \pm 69)10^{-12}$

▶ mágneses momentum

$$\mu_{\bar{p}} = -2.7928473441(42)\mu_N$$

$$\mu_p = -2.792847350(9)\mu_N$$

▶ grav állandó

GBAR (Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest)

Az antiprotonhoz két pozitront kötő \bar{H}^+ iont az abszolút zérus hőmérséklethez egészen közel hűtenének, majd az egyik pozitront eltávolítva – mérnék a gravitációs süllyedését. From a 20 cm height the time of fall is 200 milliseconds (assuming $g = \bar{g}$).

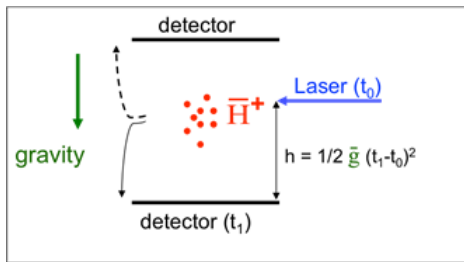


Figure 5

Horváth Dezső: Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben - Fizikai szemle
A CERN kísérletek hivatalos honlapjai