

**HORVÁTH DEZSŐ**

HUN-REN Wigner Research Centre, Budapest  
és  
Babes-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

# Hová lett az antianyag?

2024

A CERN 70. SZÜLETÉSNAPJA

Humán Tudományok Kutatóháza, Budapest



MTA.HU



70 éves a CERN



70 éves a CERN



INSTITUTUL DE STUDII AVANSAE  
ÎN ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE

# Az antianyag születése

Paul Dirac, 1928:

Új egyenlet a hidrogénatom precíz matematikai leírására: **szépészet??**

Két megoldás elektronra ( $x^2 = 4 \Rightarrow x = \pm 2$ ):

- Pozitív energiájú és negatív töltésű:  $e^-$
- Negatív energiájú és pozitív töltésű:  $e^+$

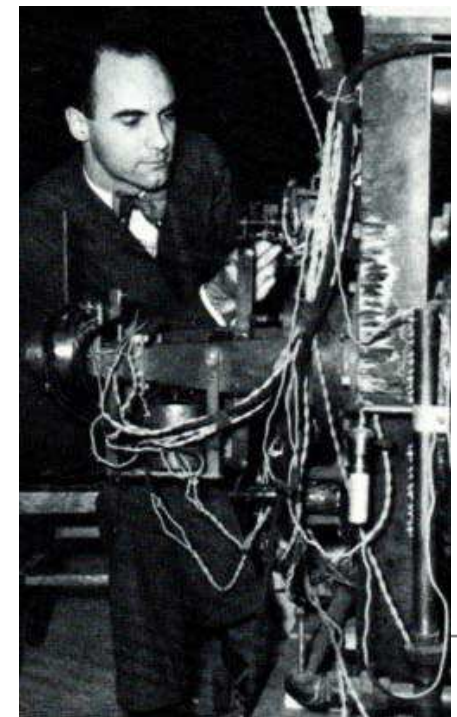
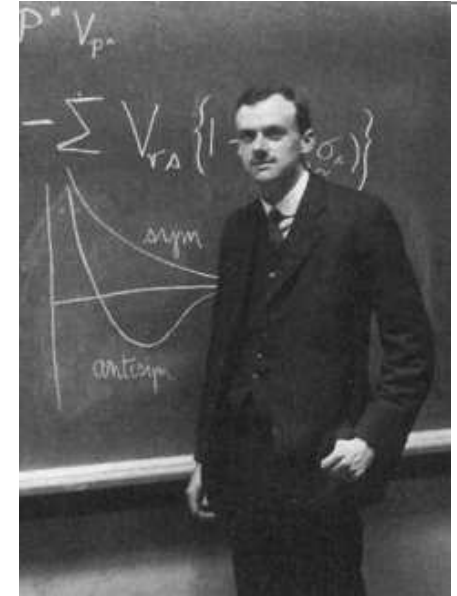
Negatív energia (tömeg!) nem fizikai, Dirac elektron-hiánynak értelmezte.

Carl Anderson, 1932:

$e^+$  kozmikus sugarakban  
 $\Rightarrow$  valódi részecske, pozitron

**Nobel-díjak:**

Dirac: 1933; Anderson: 1936



# Antirészecskék

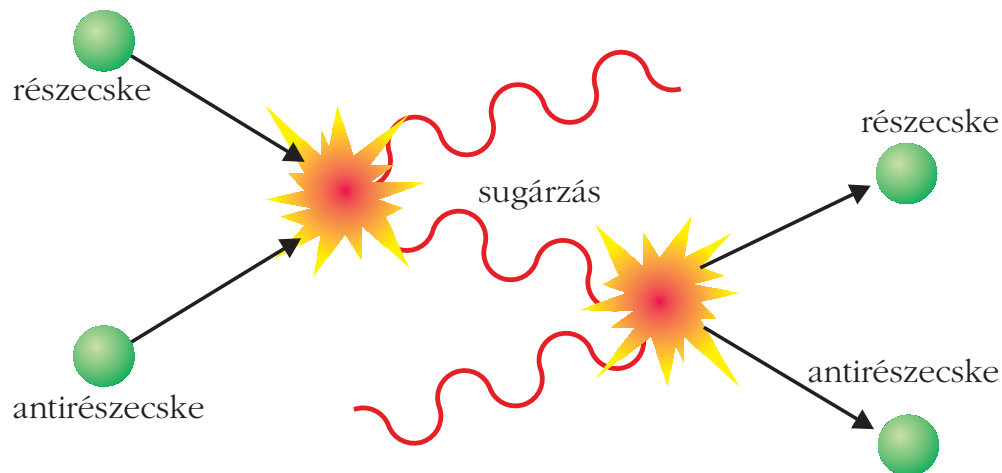
Minden anyagi részecskének van antirészecskéje.  
Tulajdonságaik (a töltés előjelén kívül) egyeznek.

Pl. proton (a hidrogénatom magja)  $\Leftrightarrow$  antiproton.

Ha részecske antirészecskéjével ütközik, megsemmisülnek, energiájuk  
szétsugároz.

Sugárzás atommag terében részecske + antirészecske párokat tud kelteni.

Kisebb energián elektron–pozitron párt,  
nagy energián, pl.  $E > 2M_{\text{proton}}c^2$  proton+antiproton párt.



# Csillagászat (űrteleszkópok!)

- A galaxisok kialakulása már az Ősrobbanás után 500-800 millió évvel megkezdődött
- Korai galaxisok kisebbek és kevésbé szimmetrikusak  $\Rightarrow$  gyorsabb formálódás
- A legtávolabbi felvételeken nyomon követhető csillagok képződése



Fiatal galaxisok

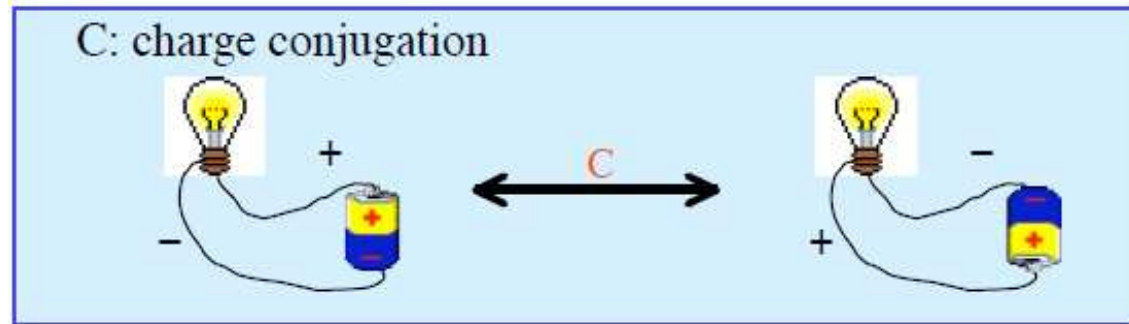
Nem látunk antianyag-galaxisokat:  
sugárzási övezet lenne körülöttük

Billiomod résszel több részecske keletkezett, mint  
antirészecske

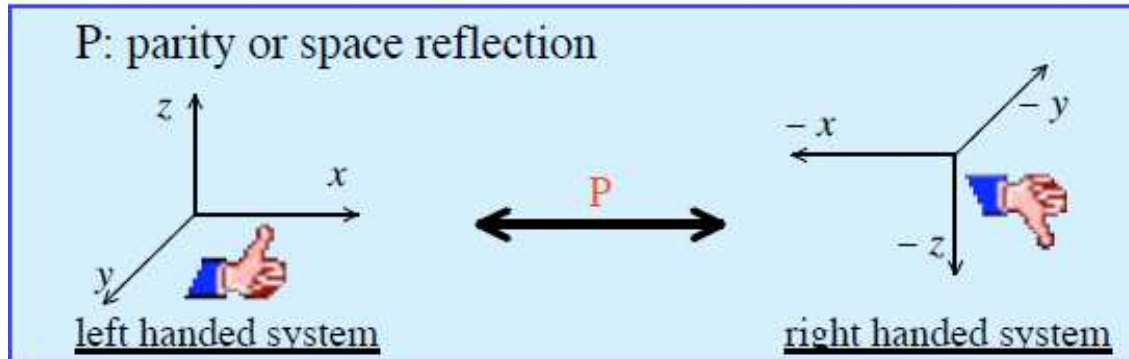
Különbség anyag és antianyag között?

# Tükrözési szimmetriák

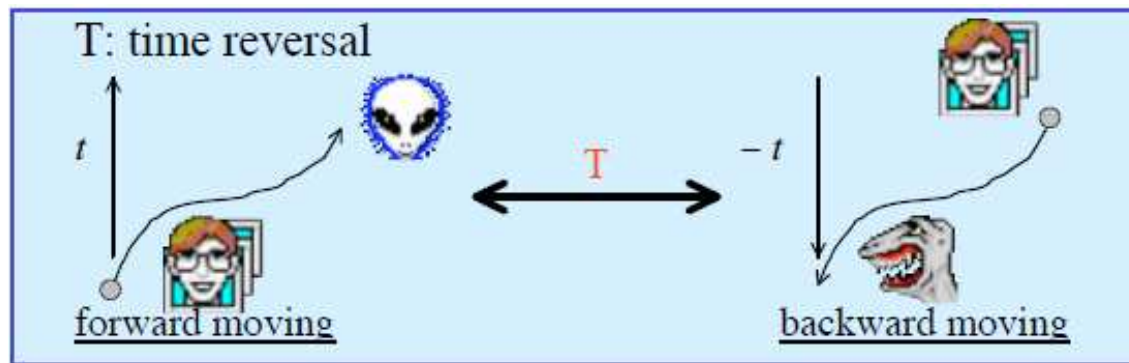
Töltéstükrözés:  $C$   
részecske  
⇓  
antirészecske



Tértükrözés:  $P$   
Jobbkéz  $\Rightarrow$  balkéz



Időtükrözés:  $T$   
Idő visszafelé



CPT-szimmetria:  
elektromágnesség,  
mikrovilág

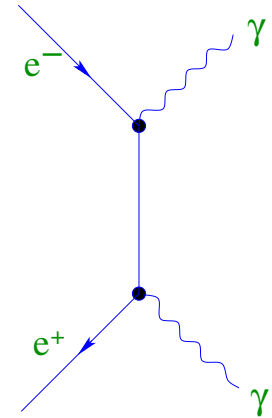
T. Nakada, CERN

# *CPT*-invariancia

Elméleti alaptétel (R. Feynman):

$$CPT|p(r, t)\rangle = |\bar{p}(-r, -t)\rangle \sim |p(r, t)\rangle$$

azaz szabad **antirészecske**  $\sim$  **részecske**,  
amely téridőben visszafelé mozog.



*CPT* sérülése sértené:

- a kölcsönhatások **lokálisát** azaz a **kauzalitást**, vagy
- **unitaritást**, az **anyag, információ, ...** megmaradását,
- vagy a Lorentz-invarianciát.

Elmélet általában: *CPT* nem sérül

De miért nincsenek antianyag-galaxisok? Az  
Ősrobbanáskor egyformán kellett keletkezniük

Vannak *CPT*-sértő modellek  $\Rightarrow$  ellenőrizni

# Az antianyag kérdései

- Miért nincs antianyag a világegyetemben? Az ősrobbanás után pontosan ugyanannyinak kellett keletkezniük: hova lett az antianyag?
- Lehet, hogy a Világegyetemnek általunk nem belátható részében rejtőzik? Az ősrobbanást követő felfúvódás sokkal gyorsabb lehetett, mint a fénysebesség, a horizonton kívül került világról nem lehet tudomásunk.
- Lehet ici-pici különbség anyag és antianyag között, amely okozhatta a különbséget?
- Létezhet-e olyan anyagi részecske, amely a saját antirészecskéje (Majorana-részecske)? A neutrínó lehet olyan.
- Van-e gyakorlati jelentősége az antianyagnak, vagy az csak a fizikusok drága játékszere?

# Részecske = – antirészecske ?

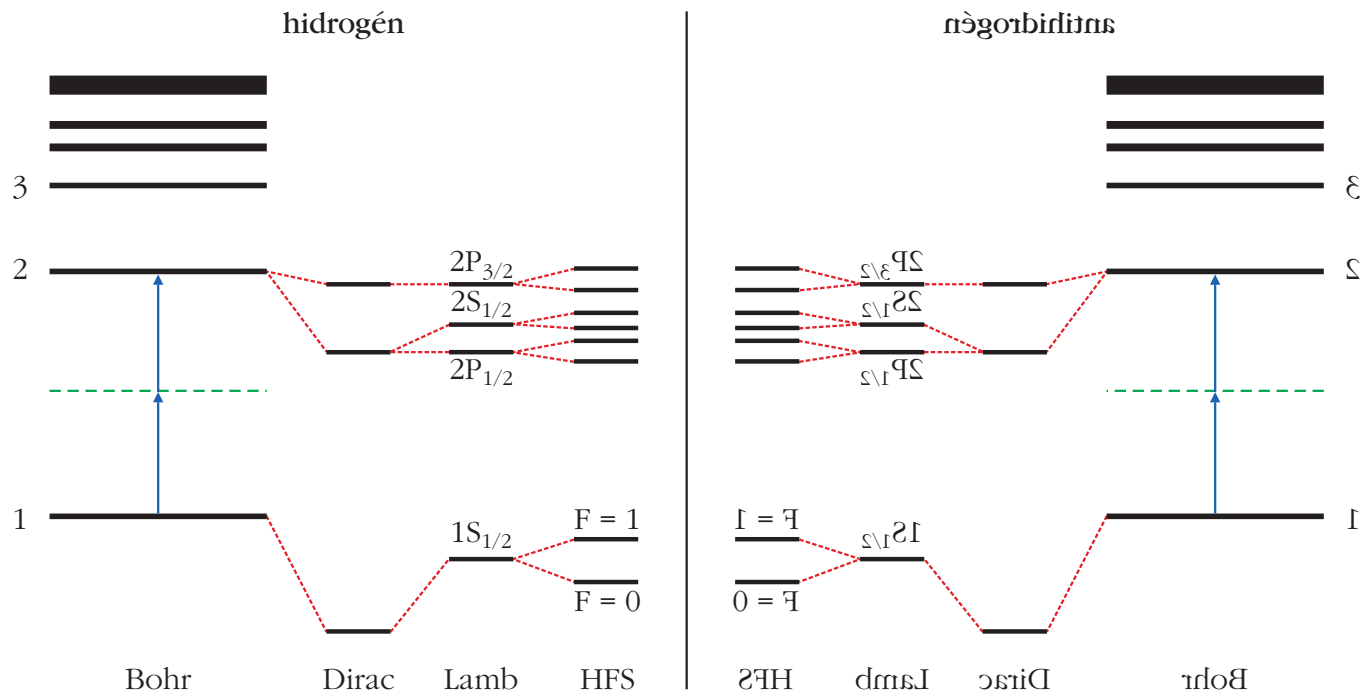
$$[m(K^0) - m(\bar{K}^0)]/m(\text{átlag}) < 10^{-18}$$

proton  $\sim$  antiproton? ( $m, q, \mu$  összehasonlítása)

$\bar{H} \sim H$ ? ( $2S - 1S$ ) átmenet, megfigyelve: ALPHA, 2016-17.

Kétfotonos bomlás  $\Rightarrow$  hosszú élettartam  $\Rightarrow$  keskeny vonal

Kétfotonos  
spektroszkópia  
hideg atomon  
 $\Downarrow$   
ellentétes  
irányú lézerek  
 $\Downarrow$   
hőmozgási  
hatás  
kiküszöbölve



M. Charlton, J. Eades, D. Horváth, R. J. Hughes, C. Zimmermann:

*Antihydrogen physics*, *Physics Reports* 241 (1994) 65–117.



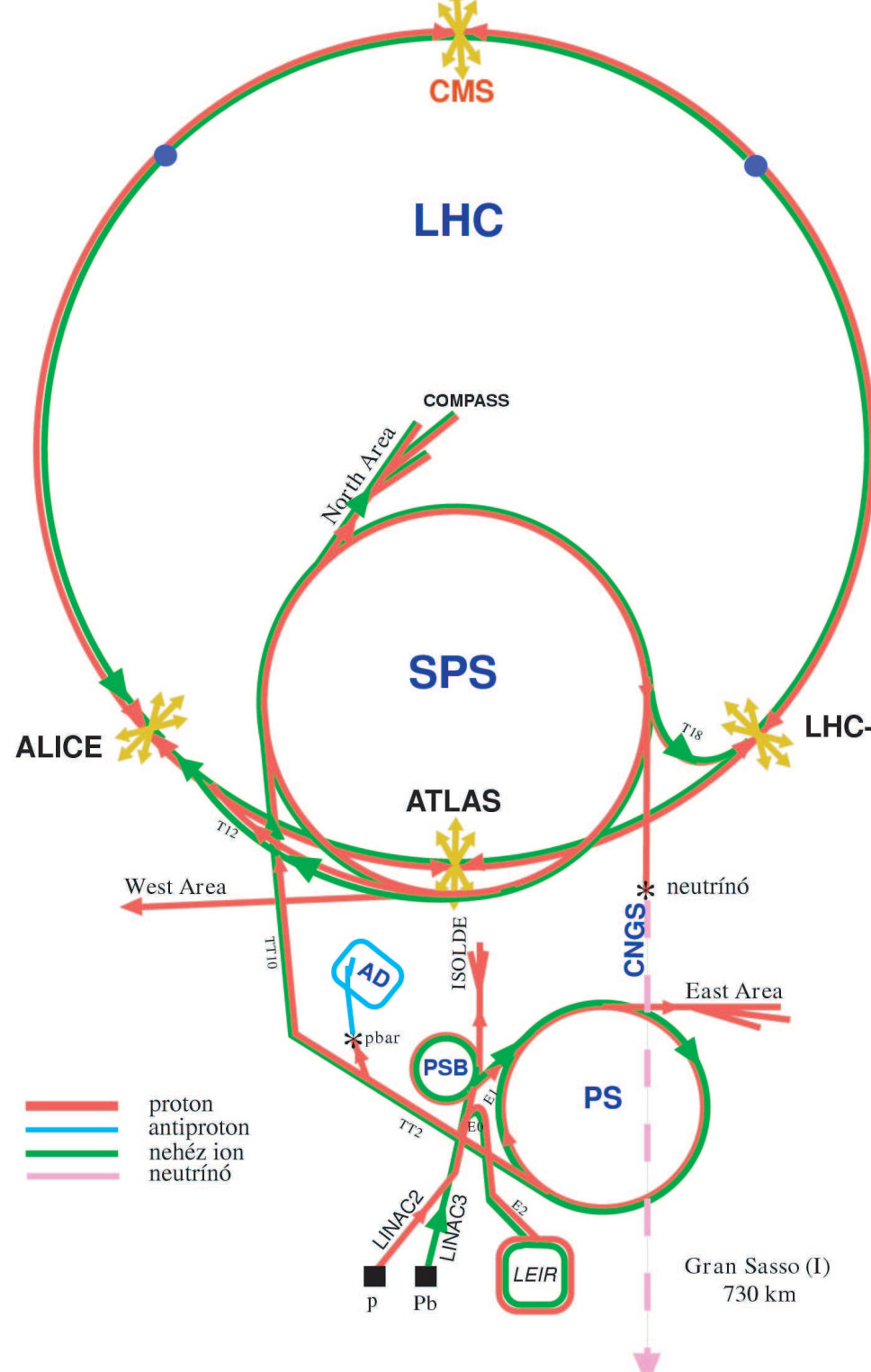
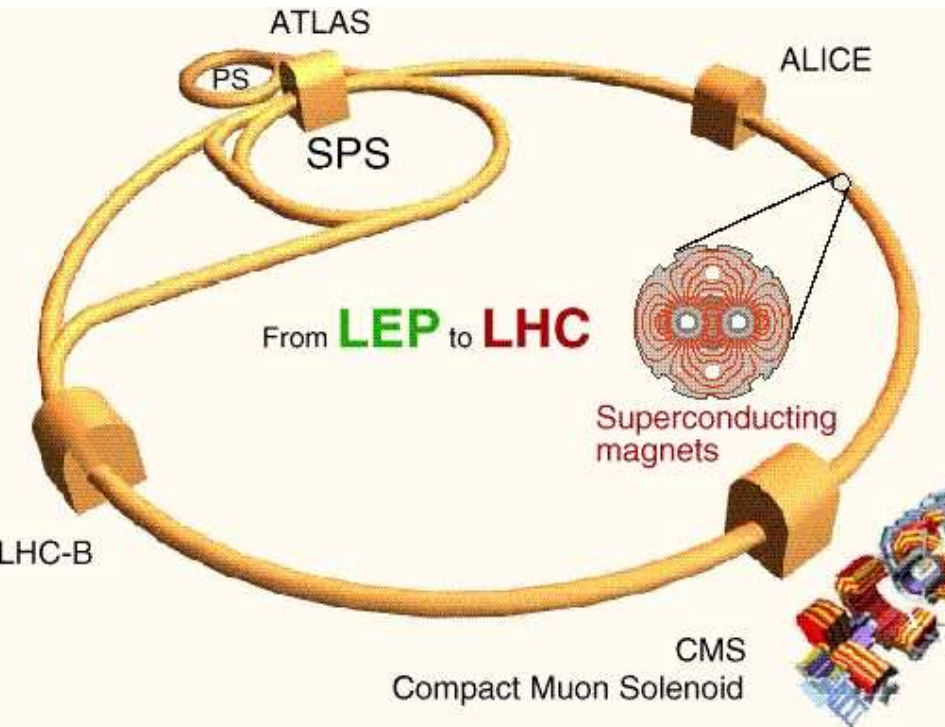
# A CERN antianyaggyára



Épült 1997-99-ben, a CERN döntéséhez a megvalósíthatósági tanulmányunk is hozzájárult

# A CERN gyorsítói

## LHC: Large Hadron Collider



# A CERN antiproton-lassítója (AD)



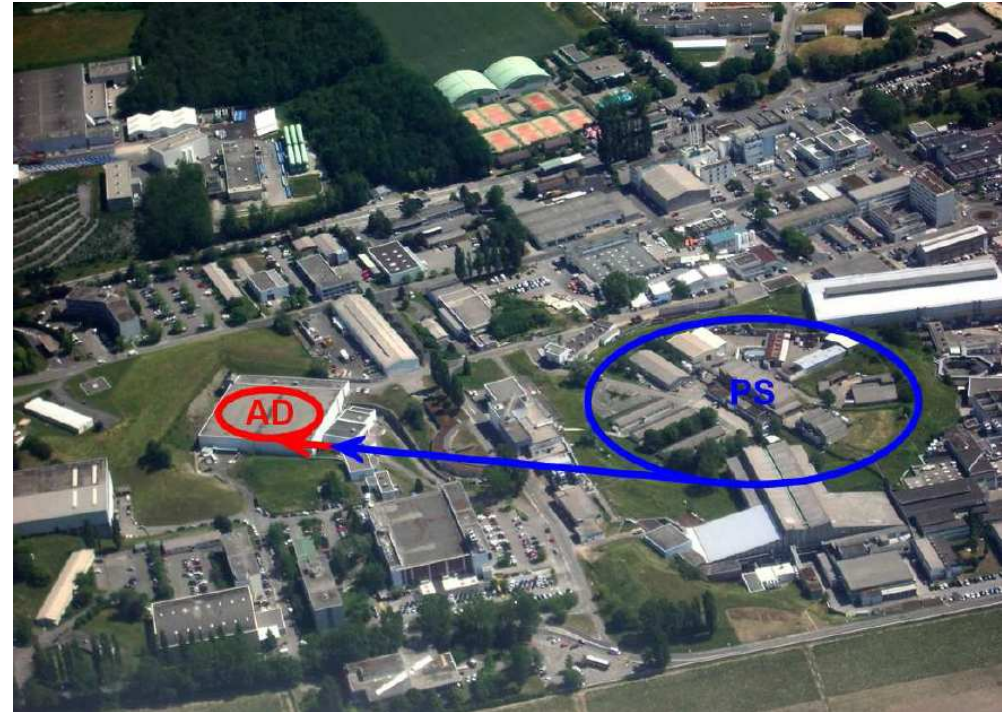
a *CPT*-invariancia ellenőrzésére épült



Hat alapvető kísérlet az AD-nál:  
Antihidrogén-spektroszkópia  
és antigravitáció

ASACUSA:

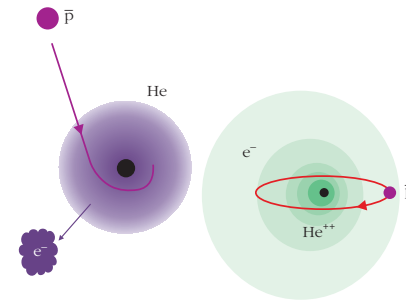
Antiproton tömege és töltése  
Antiproton mágneses momentuma  
Antihidrogén finomszerkezete



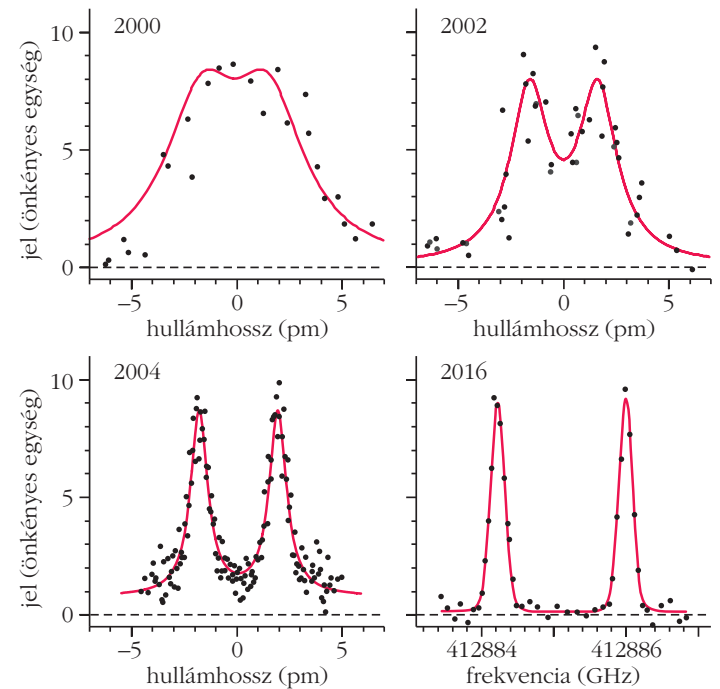
ASACUSA: Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons  
Tokió, Aarhus, Bécs, Brescia, Budapest, Debrecen, München  
Barna Dániel, Radics Bálint, Juhász Bertalan, Sótér Anna, Horváth Dezső



# ASACUSA: lézerspektroszkópia



Antiprotonos héliumatom



A lézerspektroszkópia fejlődése



Aszakusza: Tokió templomi negyede



# Anti-fizika, 2016. nov.

SCIENCE-cikk

MTA Hírek ⇒ Index

REPORT

PHYSICS

## Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio

Masaki Hori,<sup>1\*</sup> Hossein Aghai-Khozani,<sup>1</sup> Anna Sótér,<sup>1</sup> Daniel Barna,<sup>2</sup> Andreas Dax,<sup>3†</sup> Ryugo Hayano,<sup>3</sup> Takumi Kobayashi,<sup>3‡</sup> Yohei Murakami,<sup>3</sup> Koichi Todoroki,<sup>3§</sup> Hiroyuki Yamada,<sup>3</sup> Dezső Horváth,<sup>2,4</sup> Luca Venturelli<sup>5</sup>

Építette: Sótér Anna (München)

és Barna Dániel (Budapest)

Szerzők: 6 japán (München és Tokió), 3 magyar (Budapest, Debrecen és München), 1 olasz (Brescia), 1 német (Tokió) és 1 iráni (München)

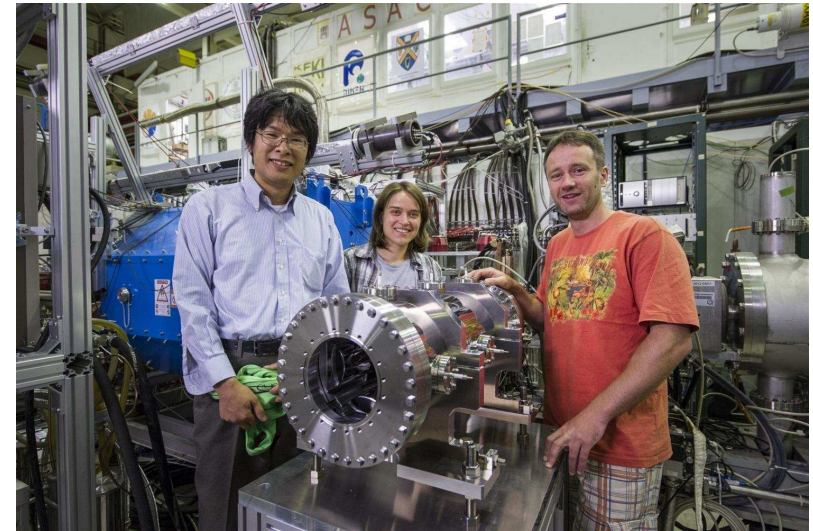
Az előző nagy lépés: M. Hori, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R.S. Hayano, S. Friedreich, B. Juhász, T. Pask, E. Widmann, D. Horváth, L. Venturelli, N. Zurlo: *Two-photon laser spectroscopy of  $p\bar{b}$ -He<sup>+</sup> and the antiproton-to-electron mass ratio*, *Nature* **475** (2011) 484-488.

Szerzők: 4 magyar (Bécs, Budapest+Debrecen, München, Tokió), 2 japán (München és Tokió), 2 olasz (Brescia), 2 német (Tokió és Bécs), 1–1 osztrák és angol (Bécs)



The screenshot shows the top navigation bar of the MTA Hírek website. It includes the MTA logo, the text 'MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA', and navigation links for 'KAPCSOLAT', 'ENGLISH', 'MTA', 'Köztestület', 'Kutatóhálózat', and a search icon. Below the navigation bar, the article title 'Antianyaggyár a CERN-ben: áttörés magyar részvétellel' is displayed. The article text describes the achievement of increasing the precision of antiproton mass measurements at CERN through the ASACUSA collaboration. The date '2016. NOVEMBER 9.' and the author 'HORVÁTH DEZSŐ' are also visible.

# ASACUSA: a mérőberendezés



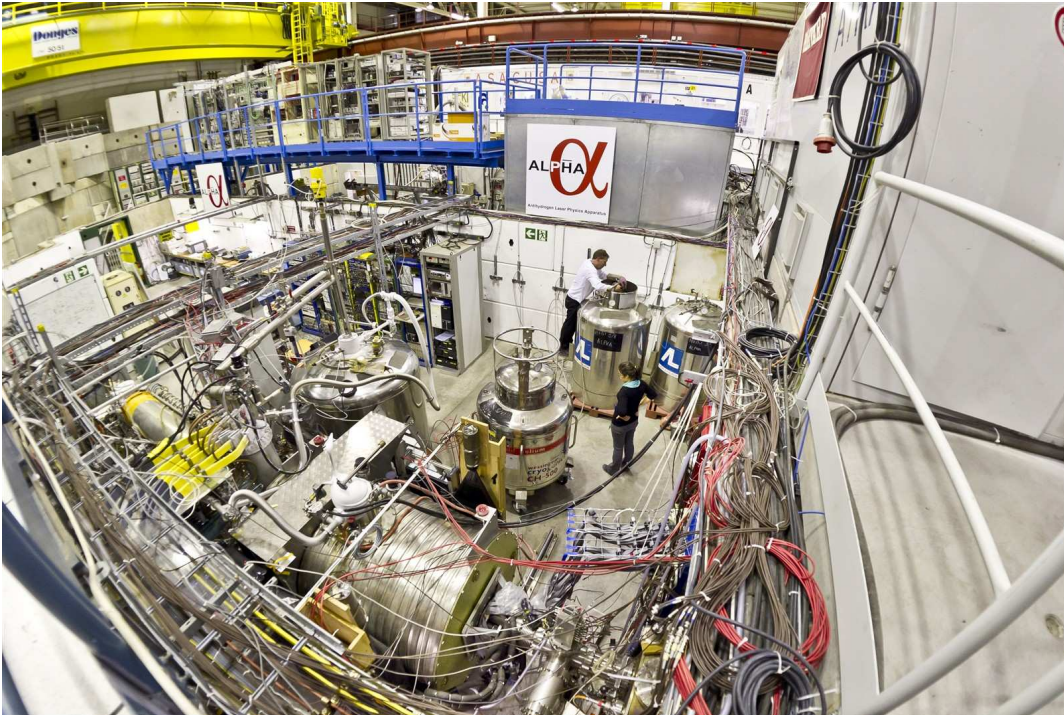
Hori Maszaki, Sótér Anna és  
Barna Dániel  
a berendezés építői

A hűtőrendszer és a lézerek a fal mögött



# ALPHA: antihidrogén vizsgálata

ALPHA: Antimatter Laser PHysics Apparatus (9 ország 19 intézete)



- Csapdázz 90,000 antiprotont.
- Keverj hozzá 3 millió pozitront.
- Kelts 50,000  $\bar{H}$  atomot.
- Zavard el a töltött részecskéket.
- Csapdázz 20  $\bar{H}$  atomot  $T = 0.54$  K-nél.

A  $\bar{H}$ -t csapdában tartják 10 s-ig  $\Rightarrow$  magától  $1S$  alapállapotba kerül.  
Észlelés mágnes tér ( $B = 1$  T) lekapcsolásával  $\Rightarrow$  annihiláció.

Mérések:  $\bar{H}$  mágneses momentuma, töltése ( $0!$ ),  $2S - 1S$  átmeneti energia, és a gravitációs gyorsulása (összehasonlítva H-atommal)



# Antihidrogén-nyaláb

## ASACUSA: MUSASHI



Monoenergetic  
Ultra  
Slow  
Antiproton  
Source for  
High-precision  
Investigations

Mijamoto Muszasi ~ 1640

5.8 MeV  $\bar{p}$  AD  $\Rightarrow$  RFQ

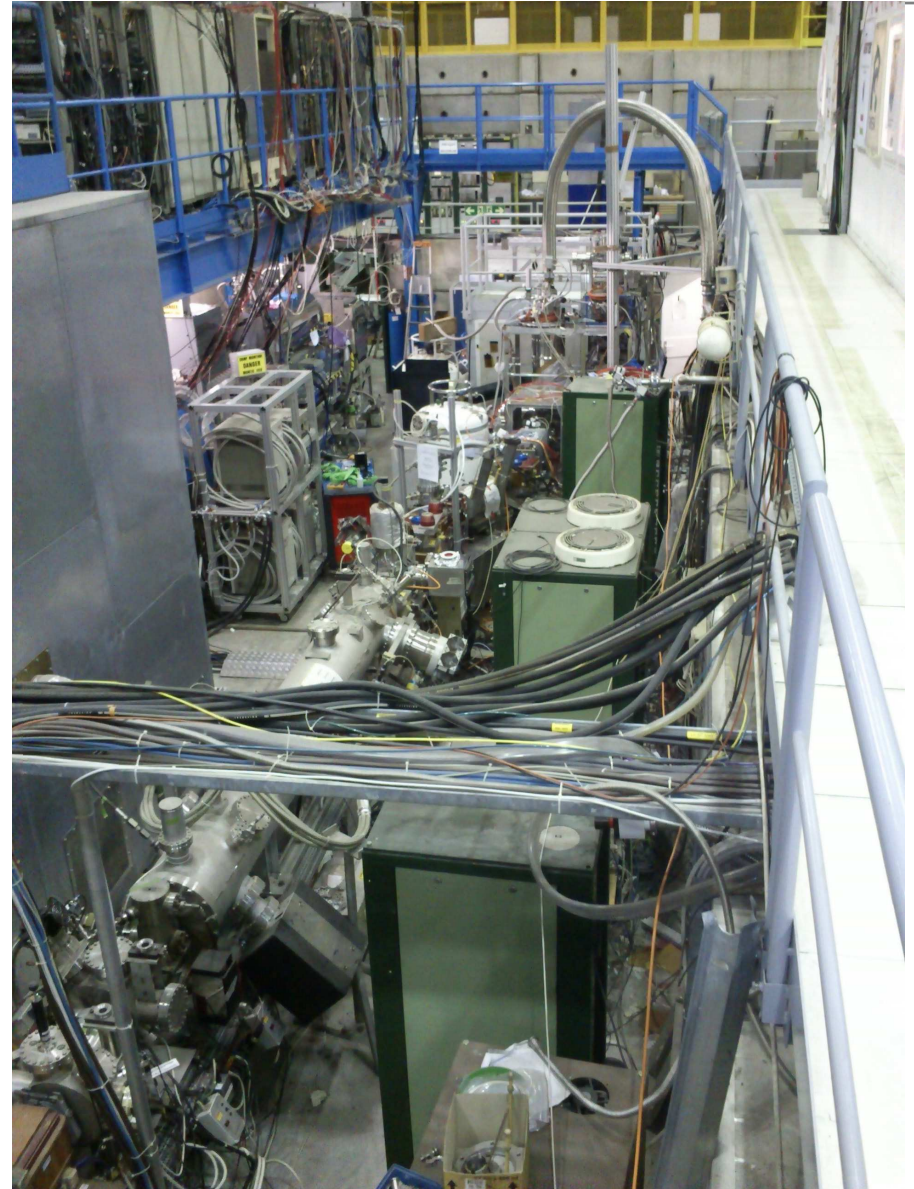
100 keV  $\bar{p}$  RFQ  $\Rightarrow$  csapda (2001)

$> 10^6$   $\bar{p}$  csapdában hűtve (2002)

$\sim 350000$  lassú  $\bar{p}$  kivezetve (2004)

Csapdázott  $\bar{p}$  összenyomva (2008)

( $5 \times 10^5$   $\bar{p}$ ,  $E = 0.3$  eV,  $R = 0.25$  mm)



Antihidrogén atomnyaláb: ASACUSA, 2010–2017





# Antigravitáció??

Antirészecske Dirac-egyenletben: negatív tömeg!  
Taszító gravitáció? Nem, mert az energia gravitál!  
USA, Nemzeti UFO-figyelő központ:  
1974 óta 90000 jelentés megfigyelésről  
(mind hamisnak bizonyult).

Repülő csészealjok!!

I read a book on anti-gravity



I couldn't put it down!

iUFO



iUFO

UFO Sightings



UFO tehenet lop

UFO-fénykép



# ALPHA-g kísérlet: CERN, 2023



Az antihidrogén is lefelé esik!



# Mennyi az antianyag a világűrben?

AMS-2: Alpha Magnetic Spectrometer  
antianyag (anti-hélium!) és sötét anyag  
felfedezésére

Nagyon kevés nehéz antirészecskét lát,  
inkább csak pozitronokat

Össztömeg: 8500 kg,  
1200 kg állandó mágnes

Vezetője: S. Ting (Nobel-díj, 1976),  
költsége: 2 G\$

Építés: CERN, 1998-2010

Fellőve: 2011 május, USA

Vezérlés: CERN



# AMS-2: Alpha Magnetic Spectrometer



Első eredmények (2013):

Antihéliumot nemigen látni.

Nagyenergiás pozitronok mindenhol.

Jöhetnek a sötét anyag szétsugárzásából vagy pulzárokból.

Még 10-15 évig gyűjt adatot.



# Eddig tartott a fizika

Szép a tudomány, de lehet mindezt valamire használni?

# Az antianyag alkalmazásai?

- Pozitron-emissziós tomográfia (PET): igen!
- AD: Antiproton Cell Experiment (ACE):  
rákterápia antiprotonokkal?
- Rakéta-hajtóanyag???
- Antianyag-bomba ...

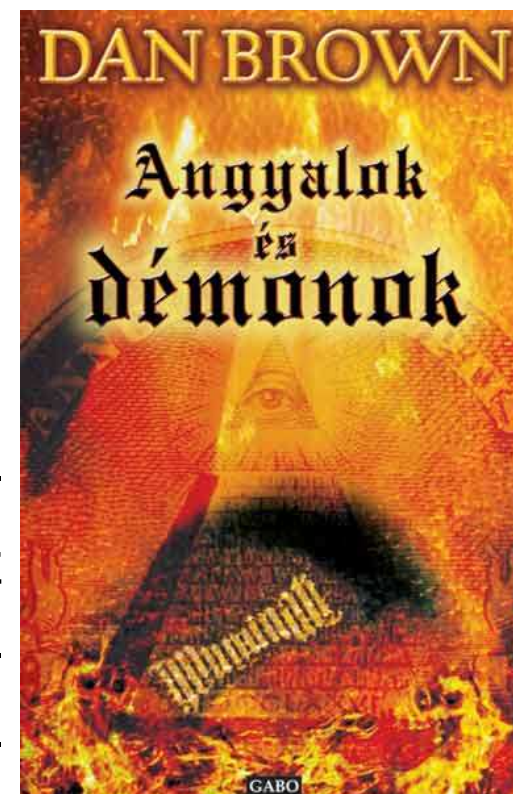
Valóság — álom — fantazmagória — marhaság

# Dan Brown: *Angyalok és démonok* (2000)

**Cselekmény:** A CERN titkos, föld alatti laboratóriumából ellopnak egy termosznai antianyagot és fel akarják robbantani vele a Vatikánt, de a főhős, szerencsére, megakadályozza.

A CERN a könyvnek honlapot nyitott, amely közölte:

- A CERN valóban létezik, megépítette a világ legnagyobb részecskegyorsítóját (LHC, 27 km-es gyűrű, 100 m-rel föld alatt).
- Teljesen nyitott intézmény, nincsenek titkos laboratóriumai és semmi baja a Vatikánnal.
- Előállít antihidrogén-atomokat (nehezebb atomokat nem tud) az Antiproton-lassítónál (és nem az LHC-ban), tisztán tudományos célra, mikroszkópikus mennyiségben: nem alkalmas bombakészítésre.



# Angyalok és démonok: a film, 2009

A CERN vezetői meghívták a film készítőit és felajánlották a CERN-t helyszínnek a film elejére. Azok mindent lefényképeztek, azután felépítették Los Angelesben az LHC hasonmását, és ott forgattak.



Tom Hanks az LHC ATLAS kísérleténél



# Angyalok és démonok: a kiállítás



## A CERN kiállítása a Globe-ban

# A CERN kiállítása: antianyag-tároló



A film antianyag-csapdája  
a kiállításon



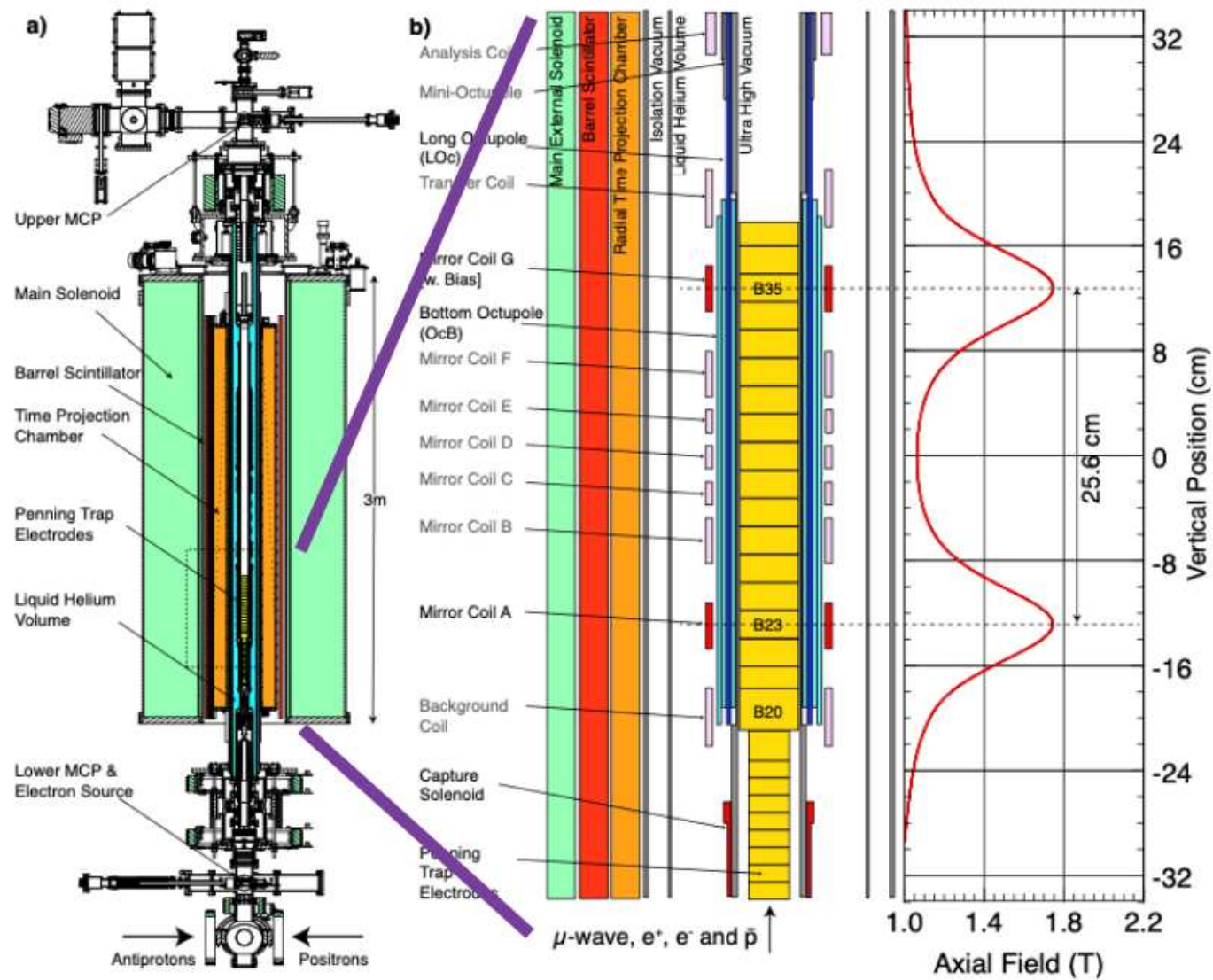
Az ASACUSA-kísérlet  
3-tonnás  
antiproton-csapdája a  
CERN-ben

# Köszönöm a figyelmet!

*Az Angyalok & Démonok* 4-perces filmrészlete az LHC-ről



# ALPHA gravitációs csapdája (2023)



Lefelé esik az  $\bar{H}$ , nem felfelé!