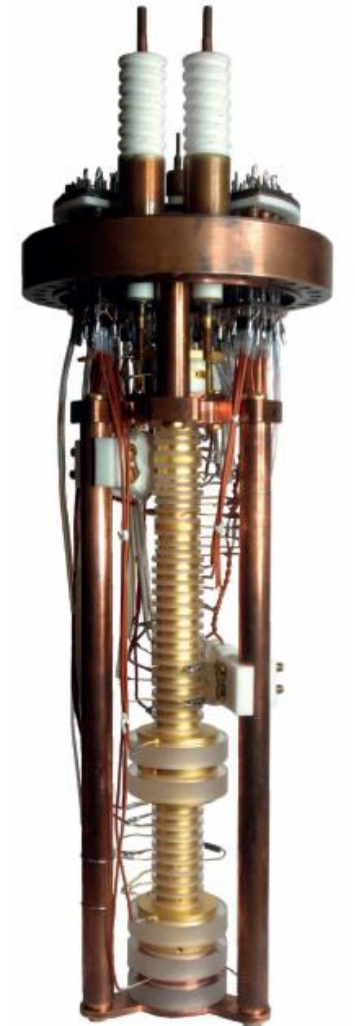


# Antimatter factory / Fabryka antymaterii

**Barbara Latacz**

CERN

RIKEN, Fundamental Symmetries Lab



I think that the discovery of antimatter was perhaps the biggest jump of all the big jumps in physics in the 20th century.

W. Heisenberg in “The physicist’s conception of Nature”, 1972





... jeden z niewielu przypadków gdy teoretyk zaproponował coś co nie było widziane wcześniej.

Relatywistyczna wersja równania Schrodingera dla elektronu:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = \left( \frac{\hbar c}{i}\alpha^k\partial_k + \beta mc^2 \right) \psi \equiv H\psi$$

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

**DIRAC znalazł rozwiązania do swojego równania z negywną enegią**

1928

Since half the solutions must be rejected as referring to the charge  $+e$  on the electron, the correct number will be left to account for duplexity phenomena.

1930

would fill it, and will thus correspond to its possessing a charge  $+e$ . We are therefore led to the assumption that *the holes in the distribution of negative-energy electrons are the protons.* When an electron of positive energy drops into

1931

nearly all, of the negative-energy states for electrons are occupied. A hole, if there were one, would be a new kind of particle, unknown to experimental physics, having the same mass and opposite charge to an electron. We may call such a particle an anti-electron. We should not expect to find any of

Presumably the protons will have their own negative-energy states, all of which normally are occupied, an unoccupied one appearing as an anti-proton.

# 1932 - Odkrycie antymaterii w komorze mgłowej

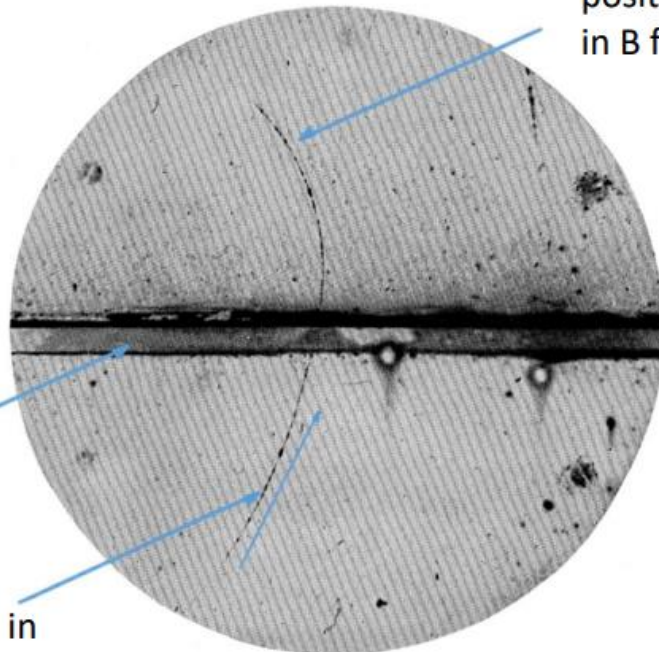
**Komora Wilsona = inaczej komora kondensacyjna, komora mgłowa)**

W jaki sposób wiadomo czy cząstka ma ładunek ujemny czy dodatni?

492

CARL D. ANDERSON

23 MeV positron in B field

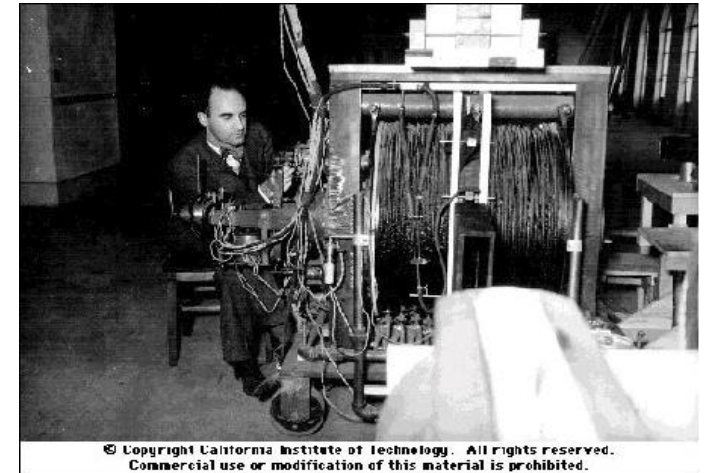
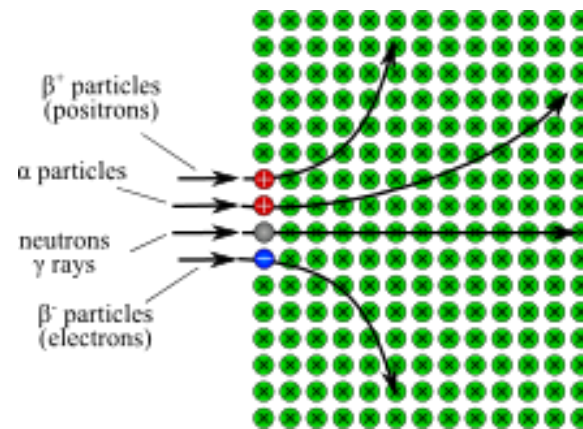


Lead plate

64 MeV positron in B field

FIG. 1. A 63 million volt positron ( $H\beta = 2.1 \times 10^8$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H\beta = 7.5 \times 10^8$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

C. D. Anderson, Phys.Rev.43(1933)491



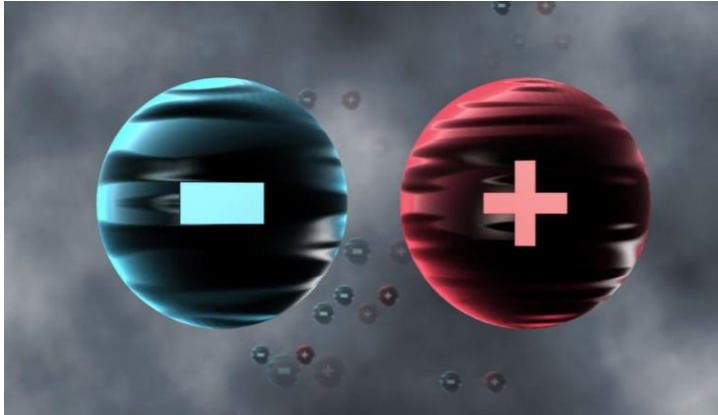
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

Out of a group of 1300 photographs of cosmic-ray tracks in a vertical Wilson chamber 15 tracks were of positive particles which could not have a mass as great as that of the proton. From an examination of the energy-loss and ionization produced it is concluded that the charge is less than twice, and is probably exactly equal to, that of the proton. If these particles carry unit positive charge the seemed to be interpretable only on the basis of the existence in this case of a particle carrying a positive charge but having a mass of the same order of magnitude as that normally possessed by a free negative electron. Later study of the

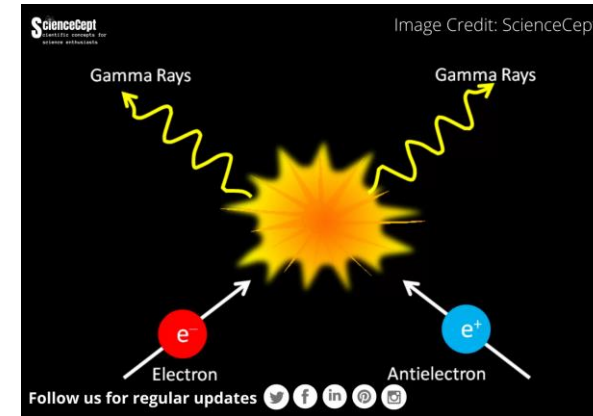


# Czym jest antymateria?

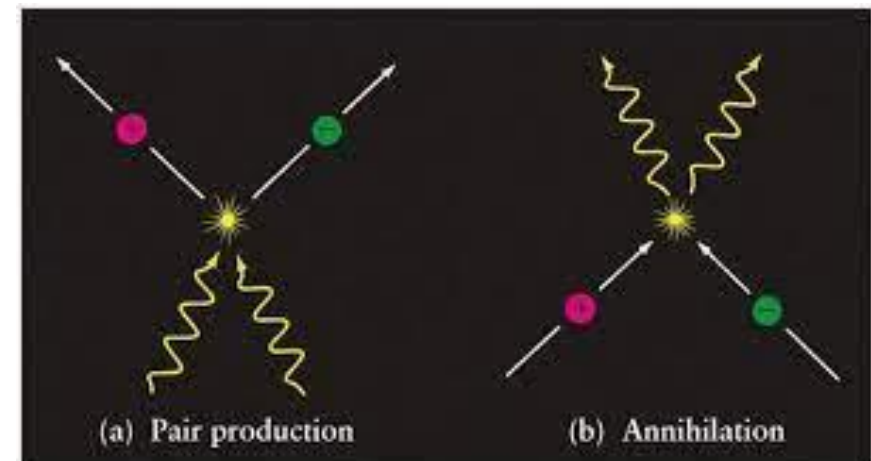
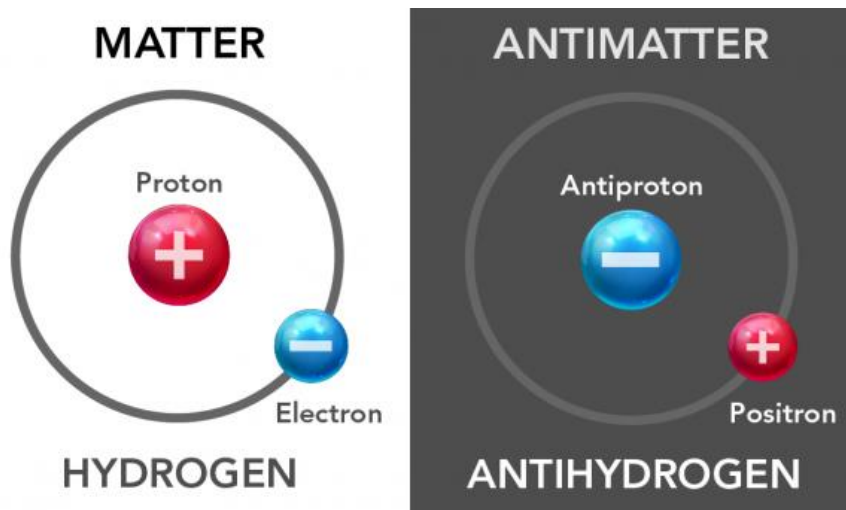
- Podstawowe własności:



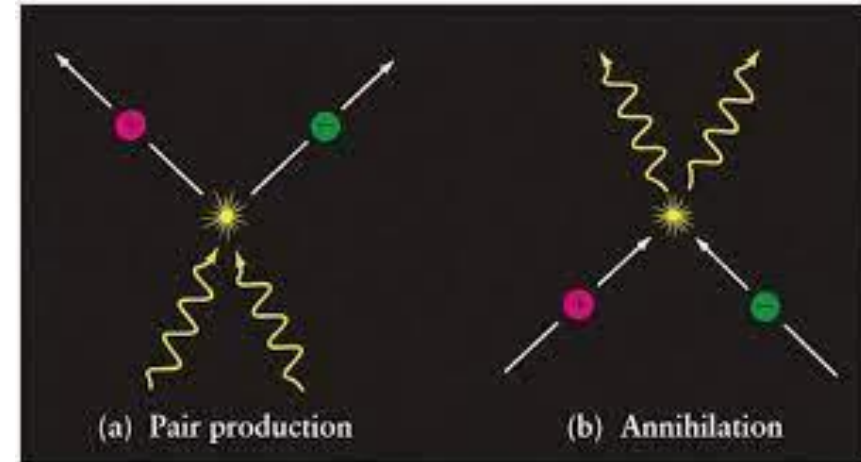
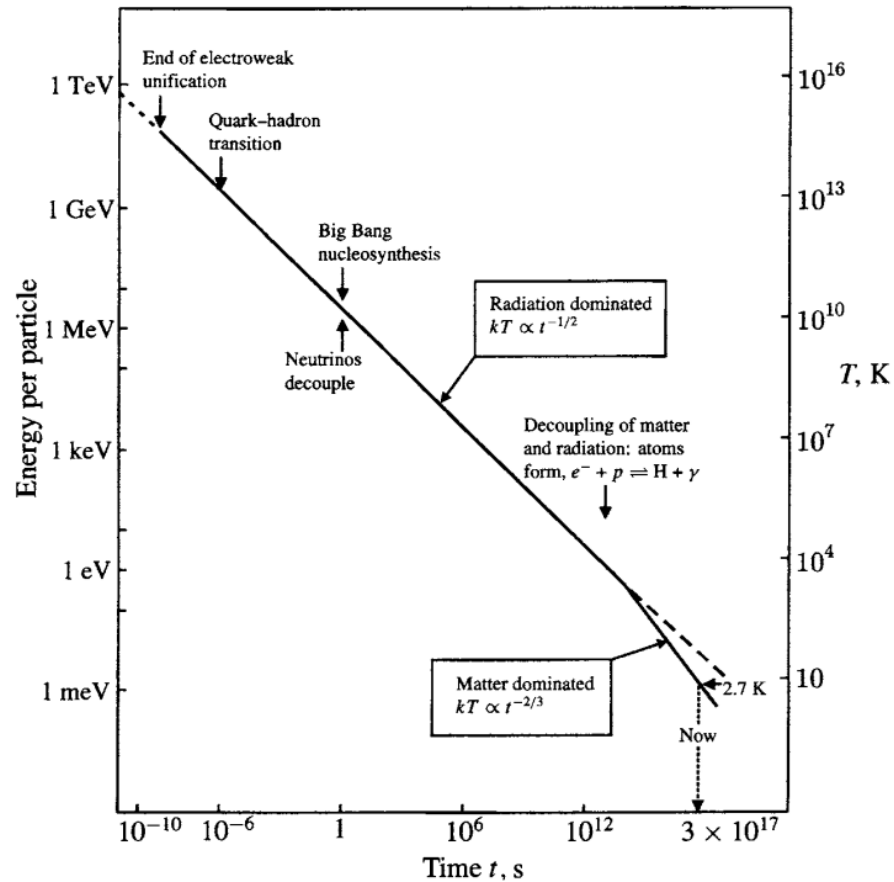
- Anihilacja:



- Kreacja:



- Powstanie antimaterii:
  - Bariony: 0 do  $10^{-6}$  s
  - Leptony: 0 do 1 s



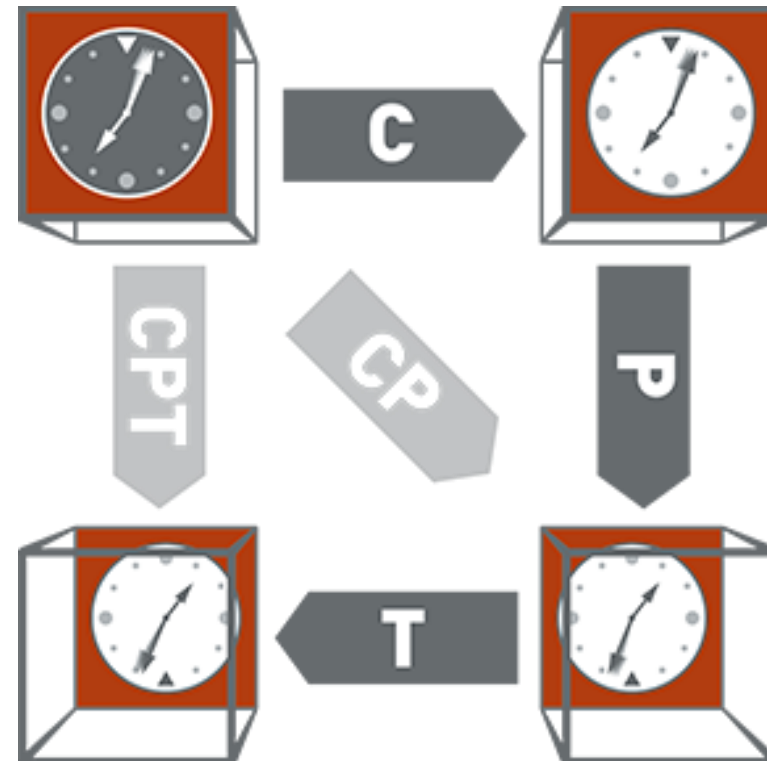
## Standard Model of Particle Physics

Naiwne przewidywania		Obserwacje	
Stosunek Bariony/Fotony	$10^{-18}$	Stosunek Bariony/Fotony	$0.6 \times 10^{-9}$
Stosunek Bariony/Antybariony	1	Stosunek Bariony/Antybariony	10 000

- Co się stało z antymaterią?
  - Naruszenie liczby barionowej
  - Jakież nowe oddziaływania o których nie wiemy?
  - Antymateria inaczej oddziałuje z materią niż myślimy?



# Zamanie symetrii CPT



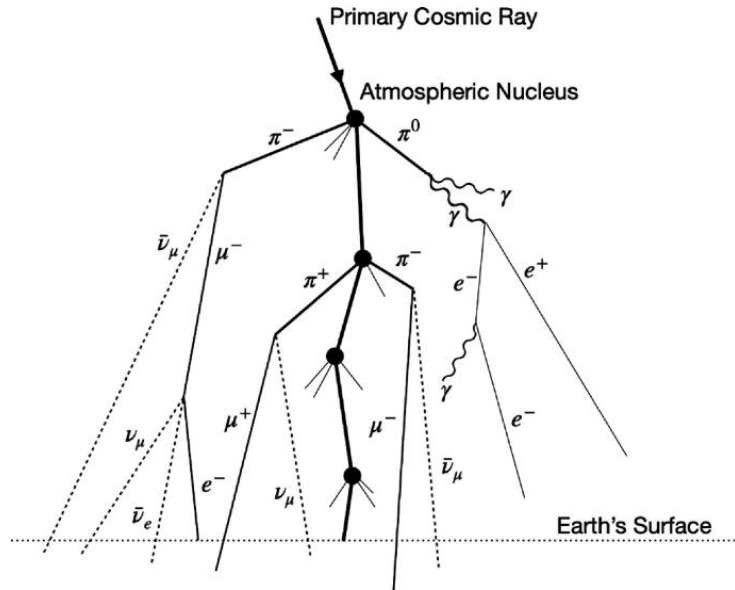
**Złamanie symetrii CPT?**



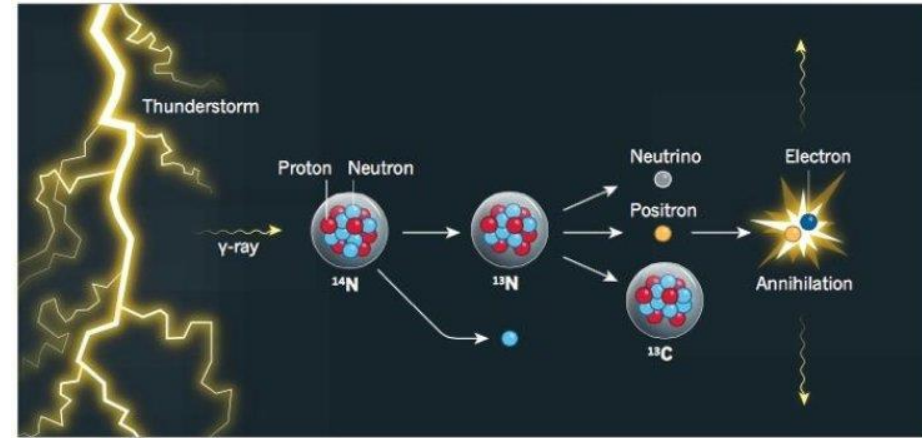
**Ultraprecyzyjne porównania  
fundamentalnych właściwości układu  
materia/antymateria**

# Naturalne występowanie antymaterii

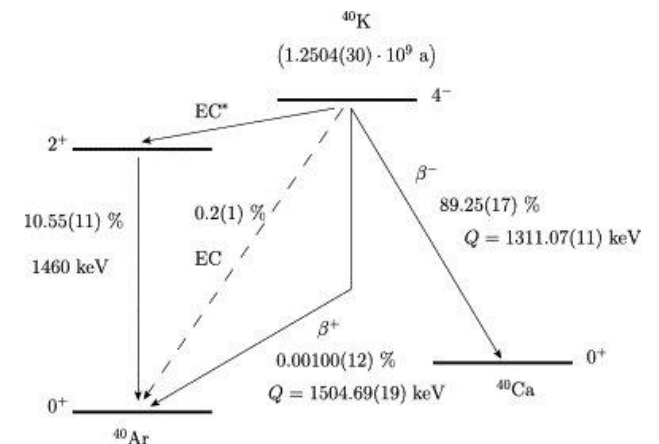
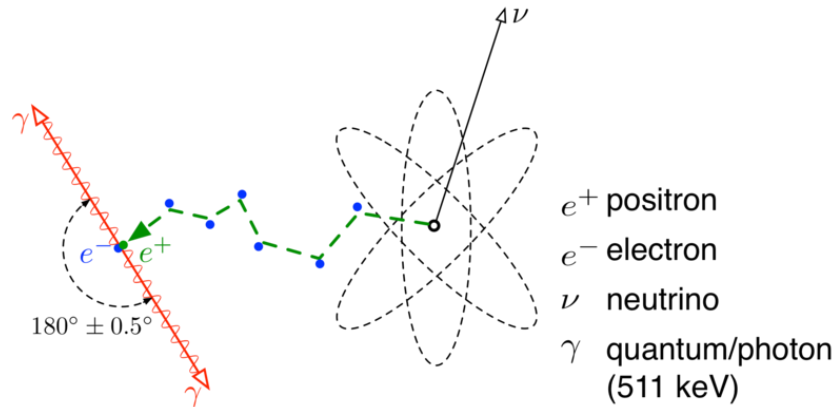
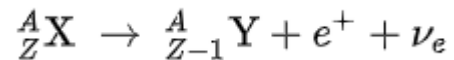
- Promieniowanie kosmiczne:



- Błyskawice:

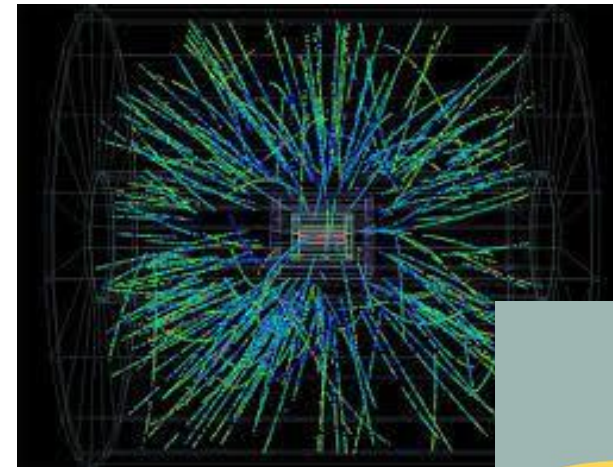


- Pierwiastki które rozpadają się poprzez rozpad  $\beta^+$



- Sód 22 -> najsilniejsze źródło pozytonów.
- Potas 40 -> jeden banan emituje około w pozyton na 75 min.

- **Obserwacje kosmiczne:**
- Spektrometr Alpha Magnetic (AMS-02) to moduł do eksperymentów fizyki cząstek elementarnych, który jest zamontowany na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS). Moduł jest detektorem mierzącym antymaterię w promieniowaniu kosmicznym; informacje te są potrzebne do zrozumienia powstawania Wszechświata i poszukiwania dowodów na istnienie ciemnej materii.
- **Podejście od strony fizyki wysokich energii:**
- Wszelkie reakcje jądrowe produkują materię i antymaterię.
- Skomplikowane układy składające się z antymaterii:
  - LHC – w zderzeniach proton–proton (pp) i żelazo–żelazo (Pb–Pb):
    - ALICE – anty-  $^3\text{He}$ .
- Model standardowy wie: każda cząstka ma swoje lustrzane odbicie antymaterii o przeciwnym ładunku, tej samej masie, tym samym momencie magnetycznym...
- Na poziomie modelu standardowego i fizyki cząstek elementarnych materia i antymateria anihilują dokładnie / powstają w reakcjach HEP w dokładnie takiej samej ilości. Nie stwierdzono jeszcze naruszenia.



- Fizyka atomowa / antymaterii – wykorzystanie technik pomiaru częstotliwości daje największą osiągalną technologicznie precyzję pomiarów.







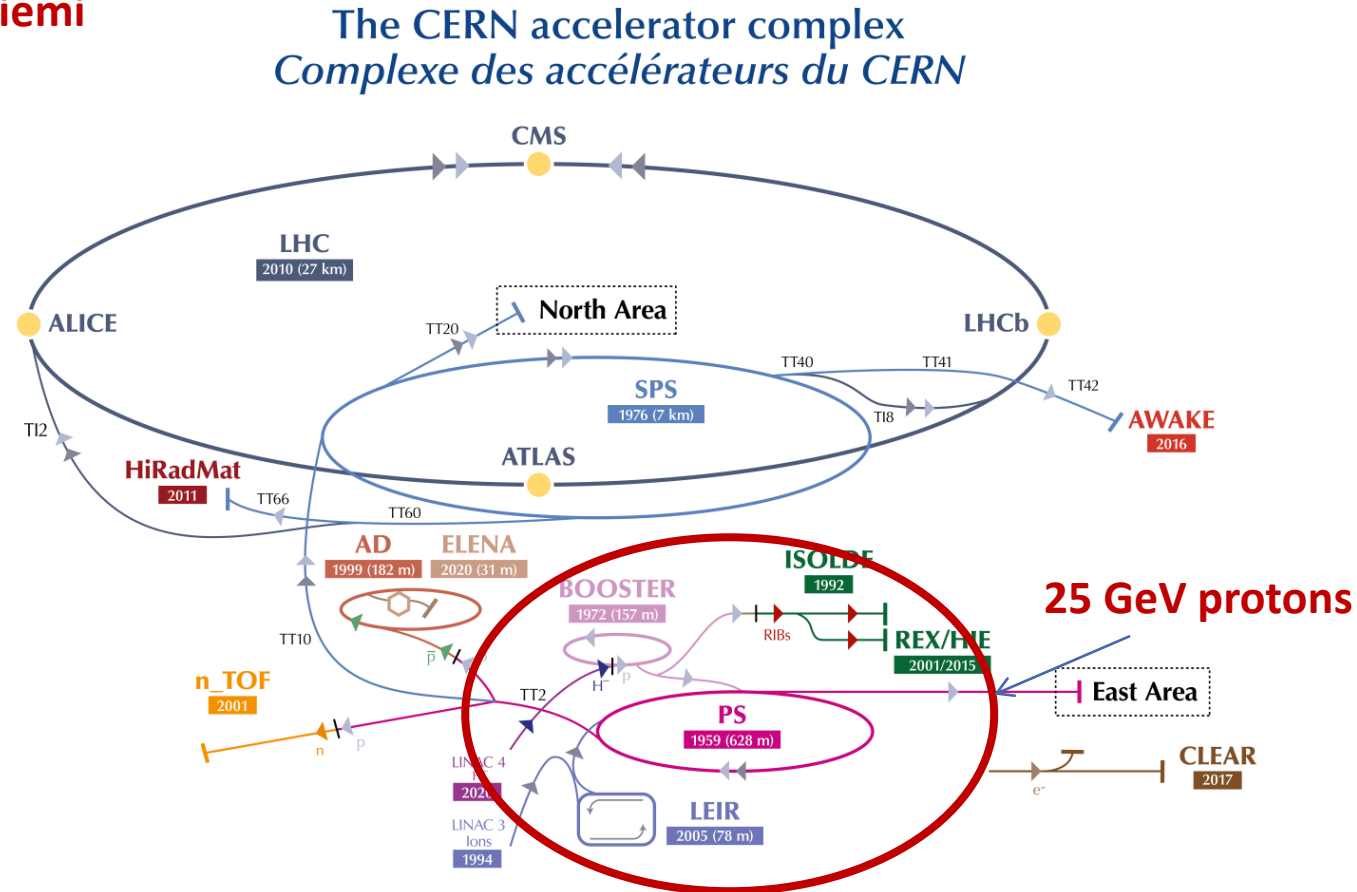
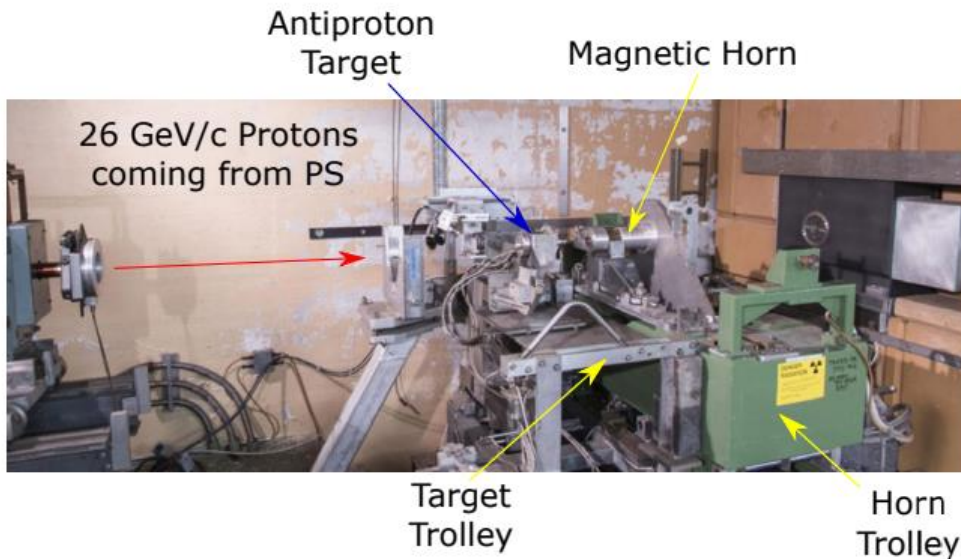


# Jak produkuje się antyprotony?

- Fabryka antymaterii w CERNie – jedyne miejsce na ziemi gdzie produkuje się niskoenergetyczne antyprotony.



- $1.5 \times 10^{13}$  protonów o energii 26 GeV aby wyprodukować  $5 \times 10^7$  antyprotonów w ciągu 2 minut.
- Pręt z indu o długości 55 cm.
- Zbieramy 3.5 GeV antyprotony.

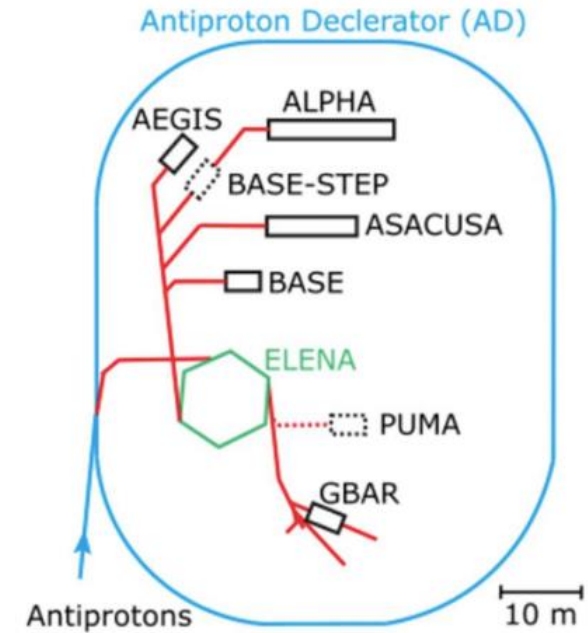
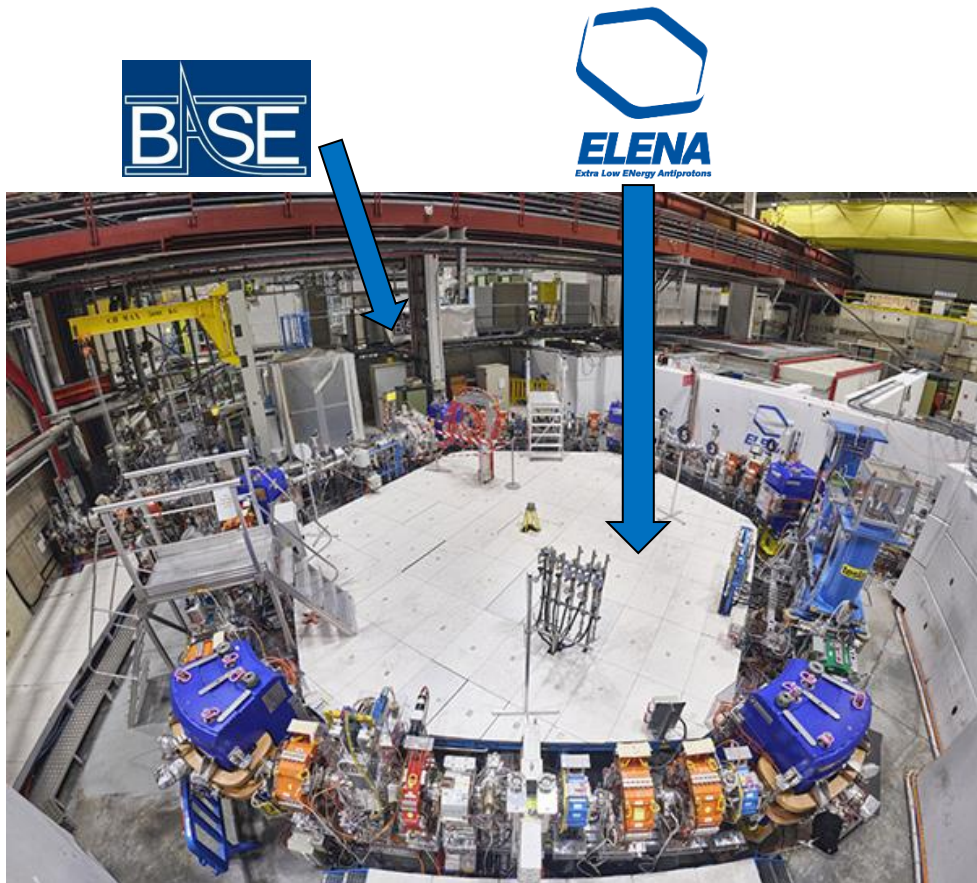


▶ H<sup>-</sup> (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶ e<sup>-</sup> (electrons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials

# Produkcja powolnych antyprotonów

- Decelerator antyprotonów – 5.3 MeV.
- Od 2021: ELENA – 100 keV antyprotony  $5 \times 10^7 \bar{p}$  in one pulse.

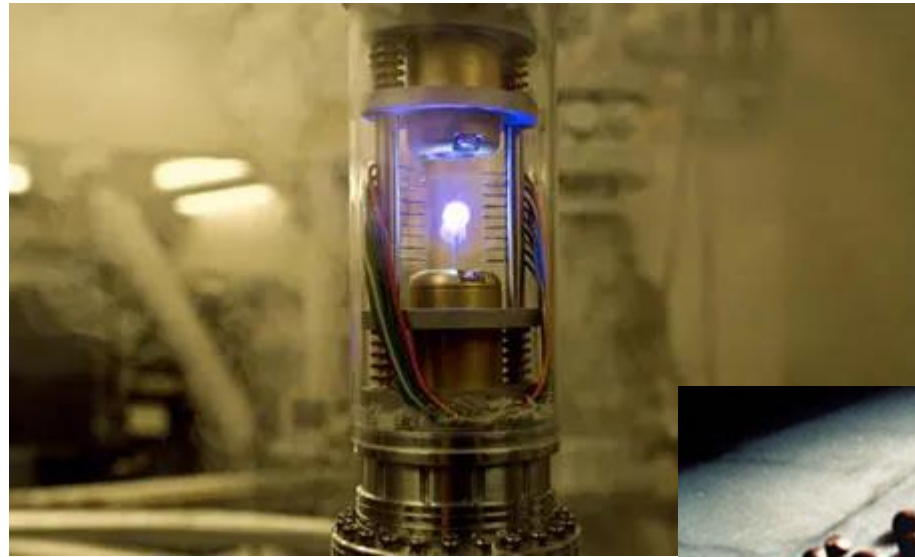
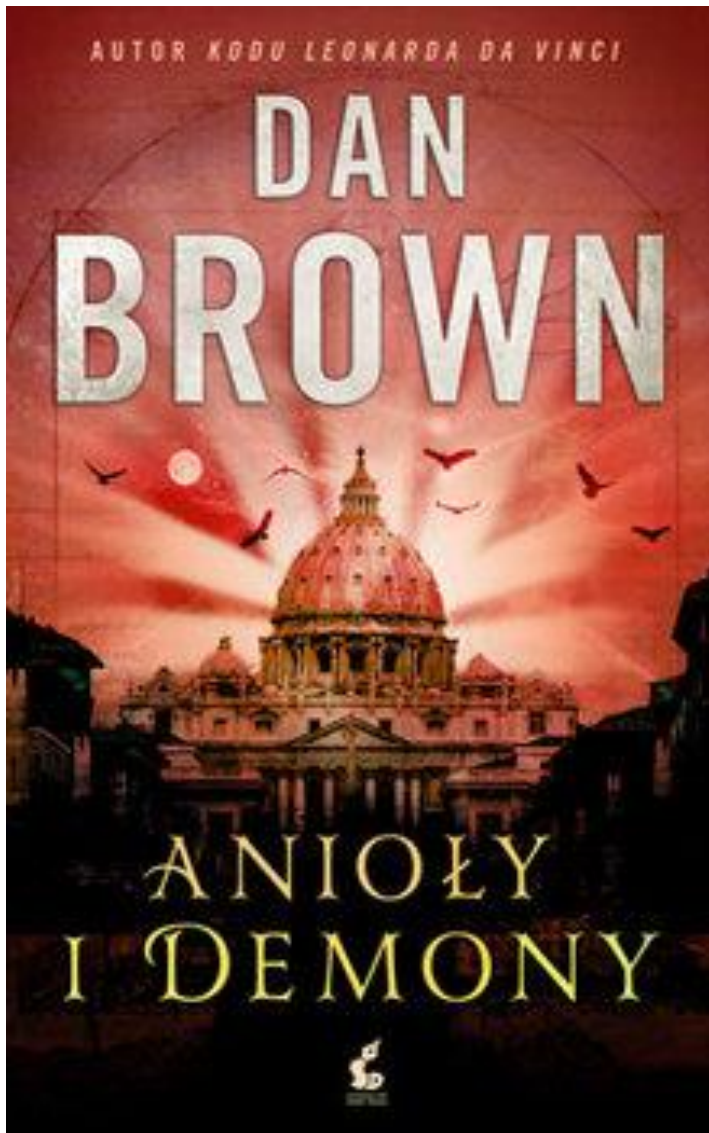


**Wycieczka jutro o 13:30!!!**

- Barbara Latacz
- Karol Szymczyk
- Małgorzata Grosbart



# „Anioły i demony” Dan Brown



... ale niestety cała antymateria do tej pory wyprodukowana podgrzałaby jedną filiżankę kawy o 1 stopień Celcjusza.

Bardzo nam przykro – ale nie możemy pomóc... 😊



... jednakże gdybyśmy mieli to jakoś oszacować...



CERN produces  $3 \times 10^7 \bar{p}/\text{cycle} \sim 10^{15} \bar{p}/\text{yr}$

1.67 pg per year

**Fat Man:**

20 kt TNT =  $8.4 \cdot 10^{13} \text{ J}$   
 0.5 g antimatter  
 + 0.5 g matter

0.5g antymaterii:  $4.5 \cdot 10^{13} \text{ J}$

Wydajność:  $10^{-9}$

CERN koszt prądu po promocji:  $1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} = 0.1 \text{ Euro}$

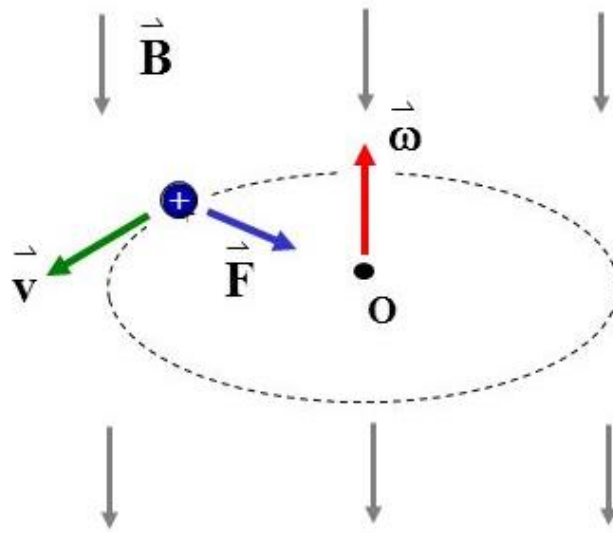
**Koszt: 1 250 000 000 000 000 Euro**

**Czas produkcji: 300 000 000 years**



# Częstość cyklotronowa

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_B}{m} = \frac{q}{m} (\vec{v} \times \vec{B}) = \left( -\frac{q\vec{B}}{m} \right) \times \vec{v}$$



*Dla ruchu jednostajnego po okręgu:*

$$\vec{a}_d = \vec{\omega} \times \vec{v}$$

*W jednorodnym polu magnetycznym, cząstka porusza się ze stałą prędkością kątową:*

$$\frac{mv^2}{r} = qBv \rightarrow$$

$$\vec{\omega} = -\frac{q\vec{B}}{m}$$

# Pałapka Penninga

- Pałapkuje:**

-> ograniczenie radialne:  $\vec{B} = B_0 \hat{z}$

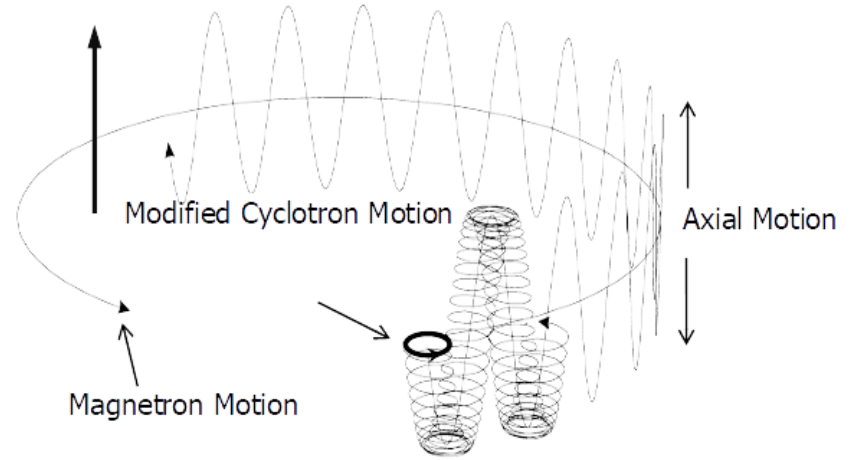
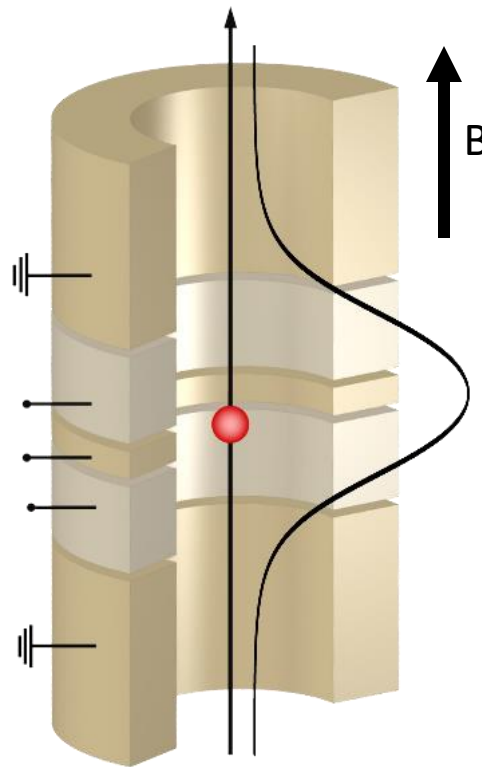
-> ograniczenie aksjalne:  $\Phi(\rho, z) = V_0 c_2 \left( z^2 - \frac{\rho^2}{2} \right)$

- Twierdzenie o niezmienniczości:**

Częstotliwość cyklotronowa cząstki (częstotliwość naładowanej cząstki umieszczonej w polu magnetycznym)

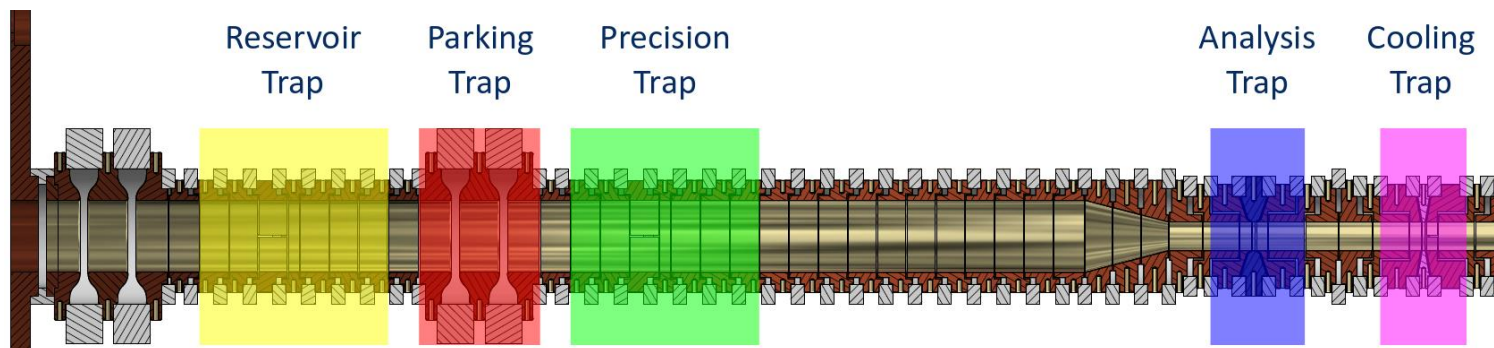
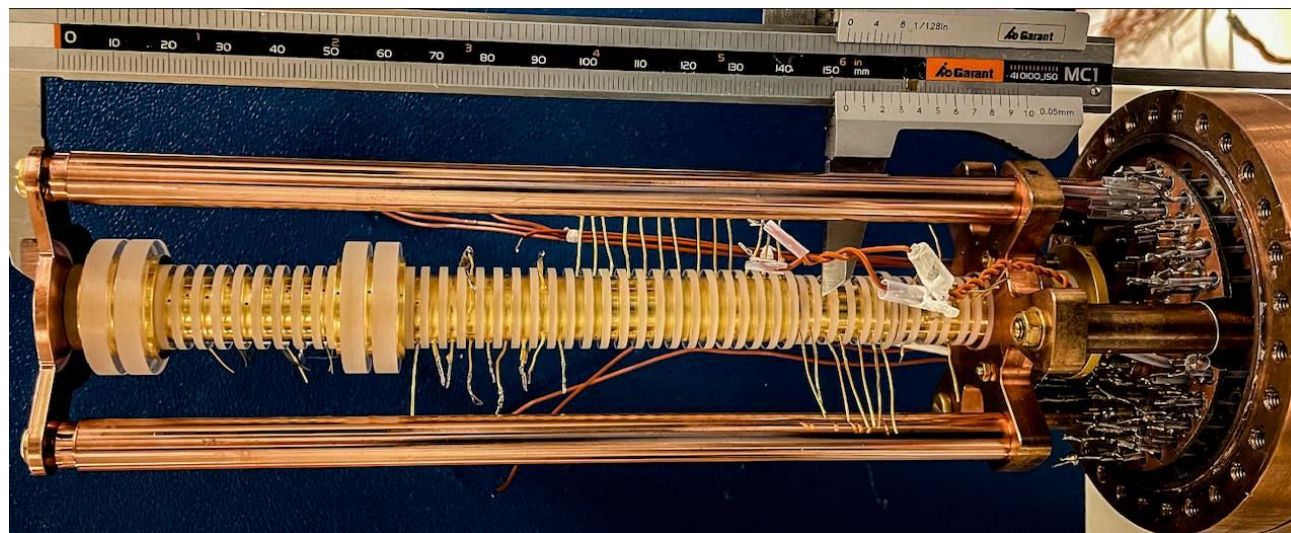
$$v_c = \sqrt{v_+^2 + v_z^2 + v_-^2}$$

$$v_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q_{ion}}{m_{ion}} B$$



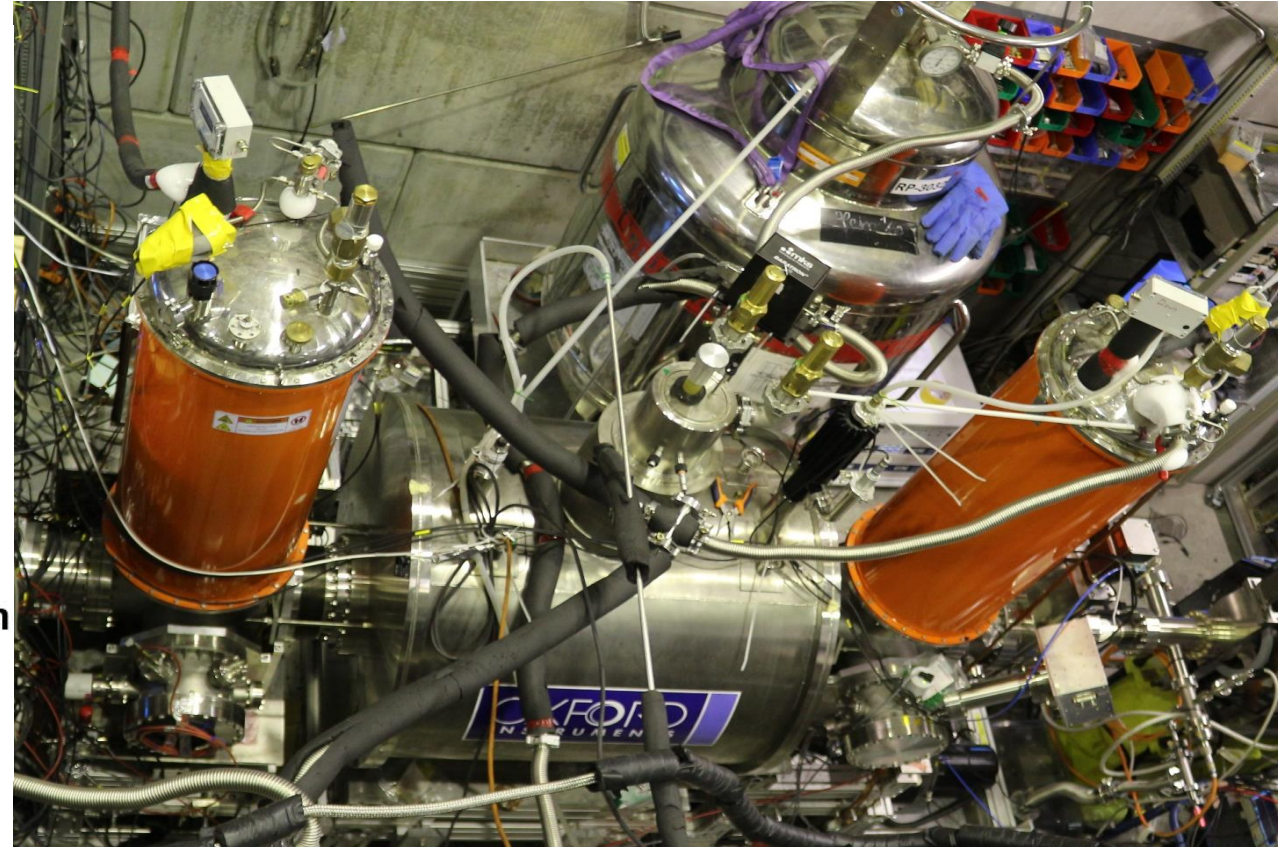
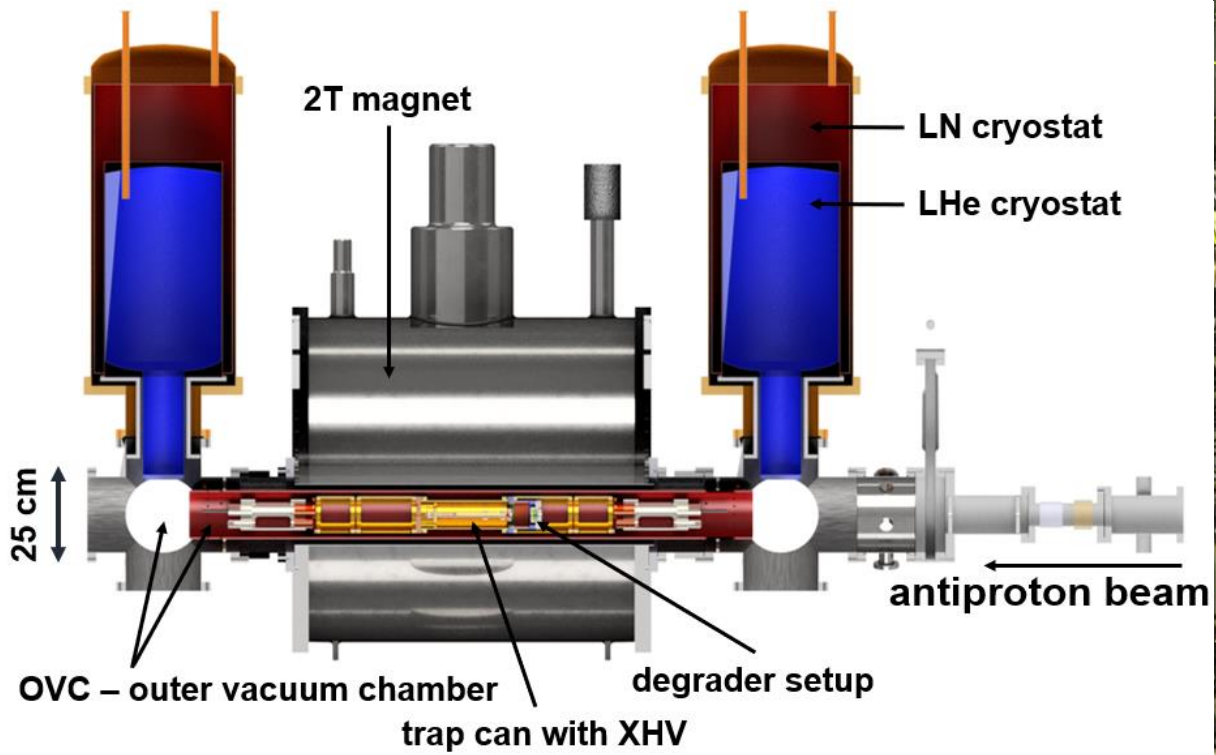
Axial	680 kHz	$v_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2C_2 q V_0}{m}}$
Magnetron	8 kHz	$v_- = \frac{1}{2} \left( v_c - \sqrt{v_c^2 - 2v_z^2} \right)$
Modified Cyclotron	28.9 MHz	$v_+ = \frac{1}{2} \left( v_c + \sqrt{v_c^2 - 2v_z^2} \right)$

# Układ pułapek w eksperymencie BASE

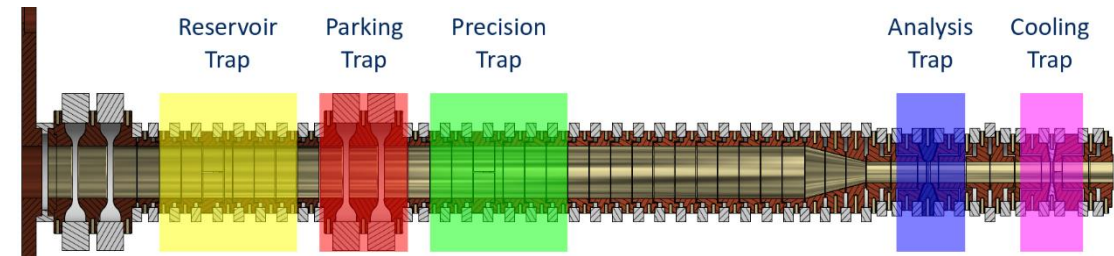




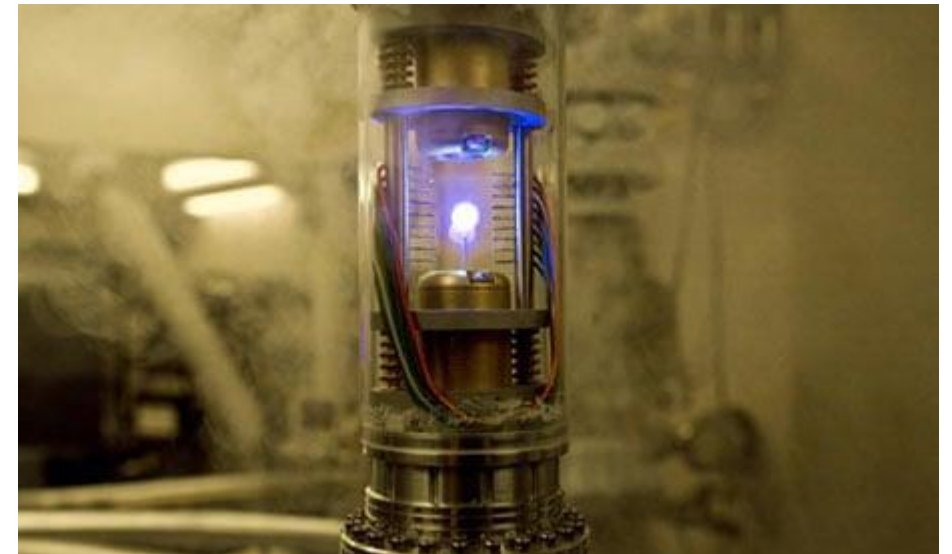
# Putapka Peninga - mages



- BASE Reservoir trap:
  - **Ciśnienie:**  $p_H < 0.46 \times 10^{-18}$  mbar and  $p_{He} < 1.04 \times 10^{-18}$  mbar.
  - najlepiej scharakteryzowana próżnia na Ziemi, porównywalna z ciśnieniami w ośrodku międzygwiazdowym
  - Czas przechowywania antyprotonu to 10s lat -> 405 dni.
  - Nie więcej niż 3000 atomów w próżni o objętości 0,5 l
  - Od 100 do 1000 uwięzionych antyprotonów
  - Lokalna inwersja asymetrii barionowej

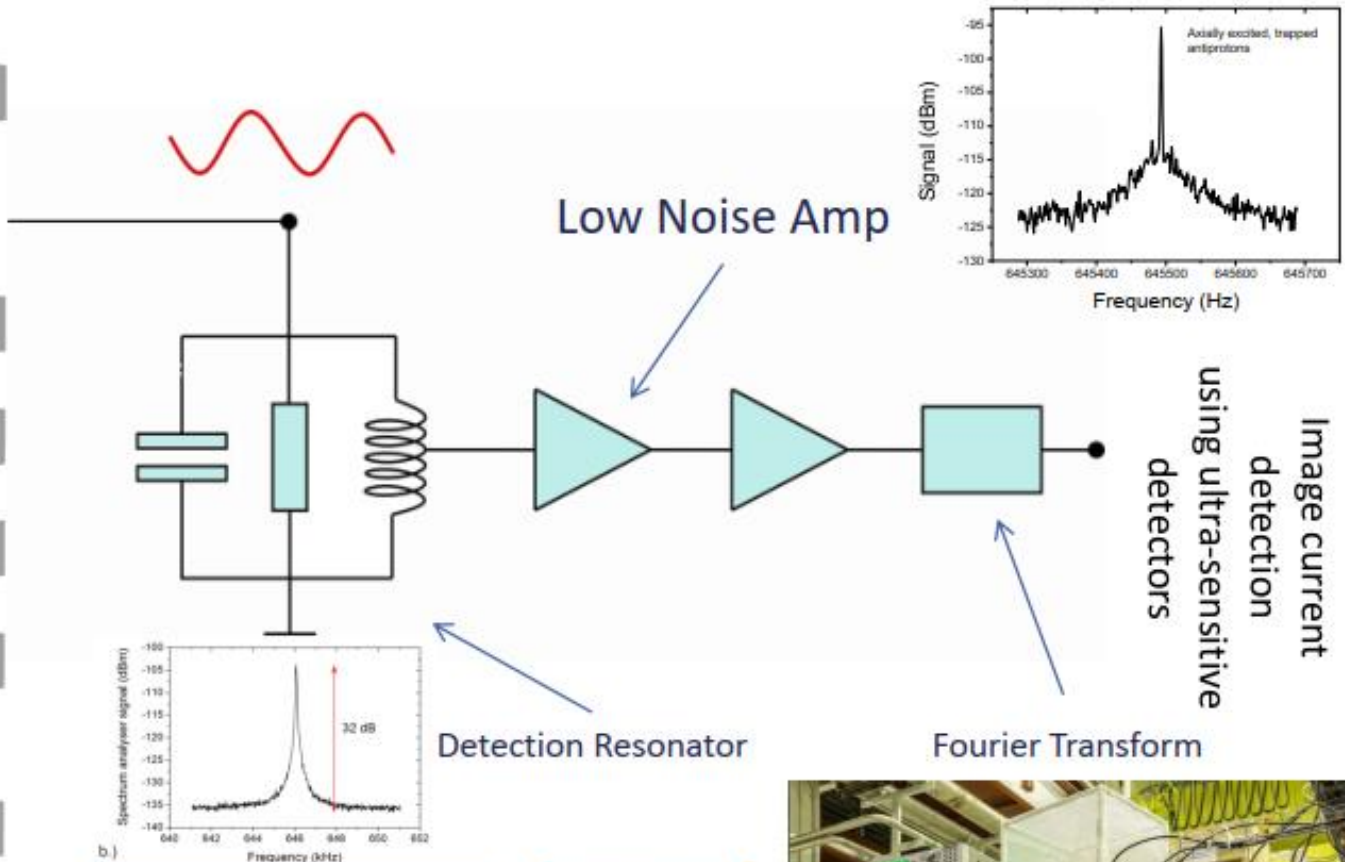
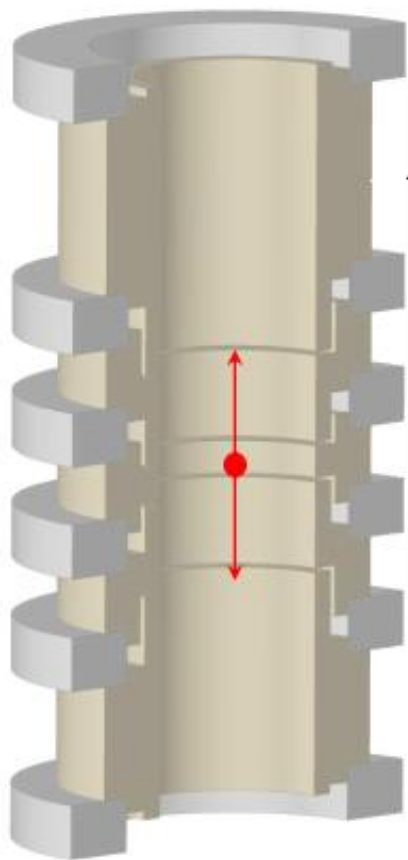


BASE ANTIMATTER INVERSION	
local volume	$0.0001^3 \text{ m}^3$
Baryons in local trap volume	$1.65 \cdot 10^{-7}$
Antibaryon in local trap volume	100
<b>Stosunek Antybarionów do Barionów</b>	<b><math>5.9 \cdot 10^8</math></b>

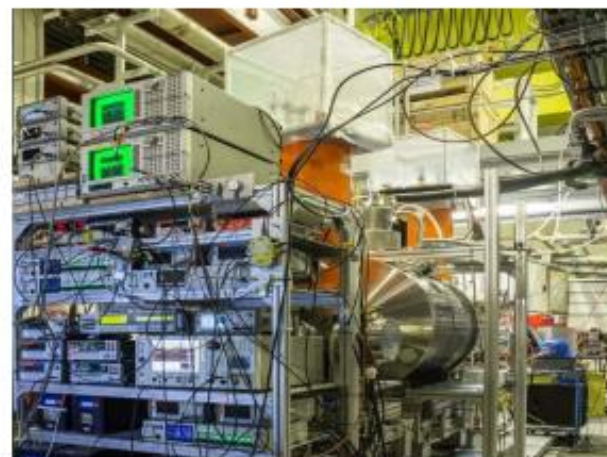




# Niedestrukcyjne słuchanie antymaterii



Resonator	Toroidal coil
$N = 950 - 1200$ $Q = 200k - 500k$ $L = 2-3 \text{ mH}$ $R_p > 1 \text{ G}\Omega$	



**Induced Current:**

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{q}{D_{eff}} \omega \rho \rightarrow fA$$

**Detection Resonator:**

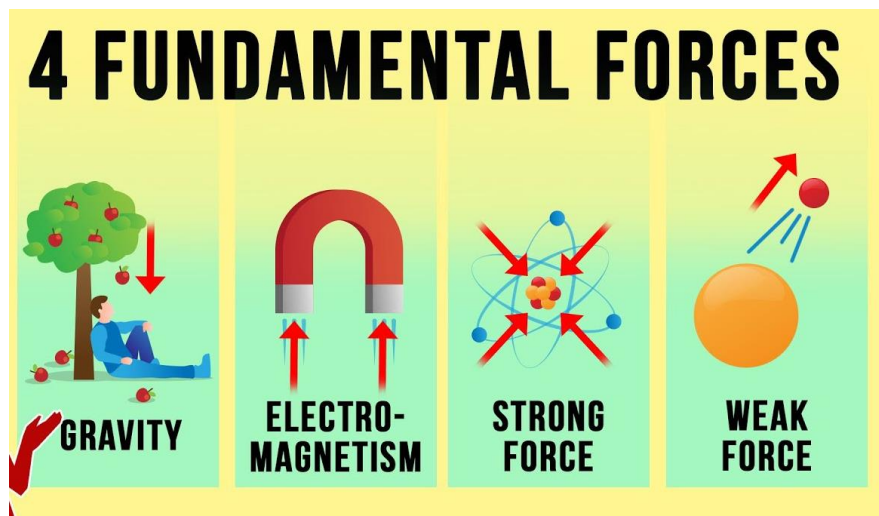
$$R_p = Q\omega L \rightarrow 100M\Omega$$

**Voltage Drop**

$$u_p = \frac{Q\omega L}{\sqrt{2}} * \frac{q}{D_{eff}} \omega \rho$$

**100 nV**

- Badania antymaterii:
  - Podstawowe własności jak masa, ładunek, moment magnetyczny
- Badnie oddziaływań antymaterii z antymateriaią/ materią:



# Badane systemy

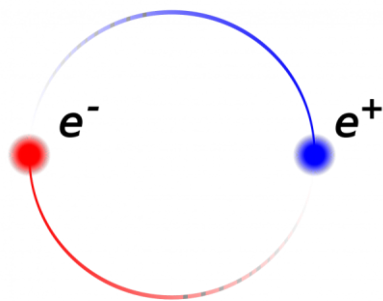
Cząstki „podstawowe”:

- Pozytony
- Antyprotony (BASE)

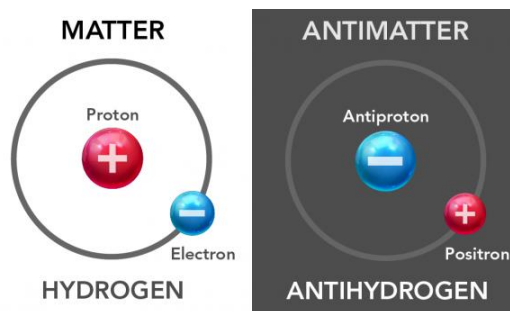
Układy „złożone”:

- a) Spektroskopia
- b) Pomiary grawitacji

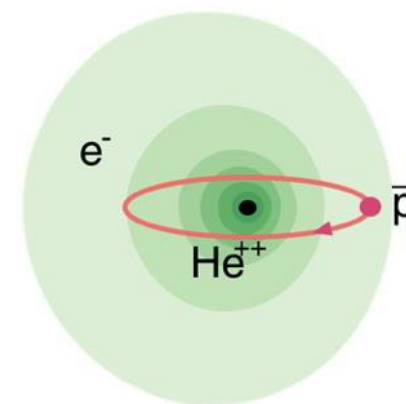
- Pozytonium



- Antywodór (ATRAP, AEGIS, ALPHA, ASACUSA, GBAR)



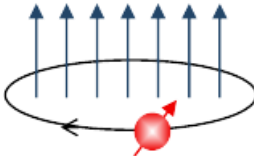
- Antiprotonic Helium (ASACUSA II)

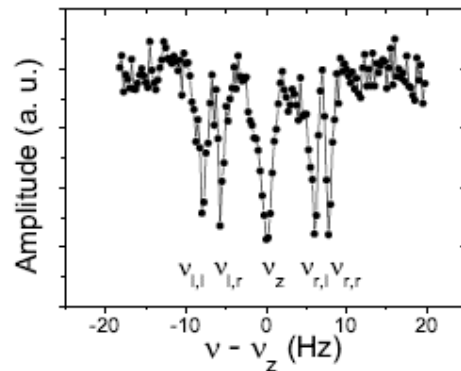


## Wysoko precyzyjna spektroskopia masy

$$\frac{\nu_{c,\bar{p}}}{\nu_{c,p}} = \frac{e_{\bar{p}}/m_{\bar{p}}}{e_p/m_p}$$

### Cyclotron Motion

$$\omega_c = \frac{e}{m_p} B$$


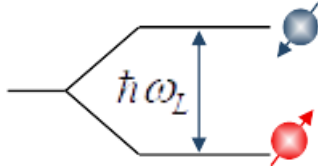


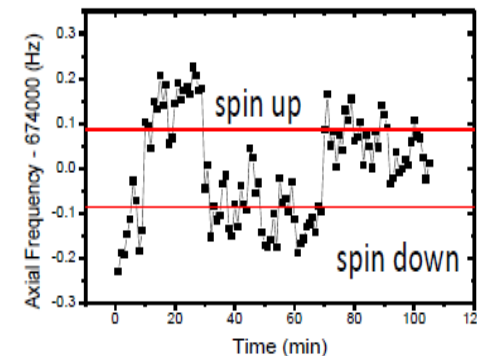
- A 16-parts-per-trillion measurement of the antiproton-to-proton charge–mass ratio, Nature 601.7891 (2022): 53-57.

## Wysoko recyzyjne pomiary momentu magnetycznego

$$\frac{\nu_L}{\nu_C} = \frac{\mu_p}{\mu_N} = \frac{g_p}{2}$$

### Larmor Precession

$$\omega_L = g \frac{e}{2m_p} B$$




- 1.5 p.p.b. Measurement of antiproton magnetic moment, Nature 550, 371-374 (2017)

# Moment magnetyczny antyprotonu

- Moment magnetyczny i spin cząstki są powiązane przez bezwymiarowy parametr zwany Czynnikiem Landégo  $g$ :

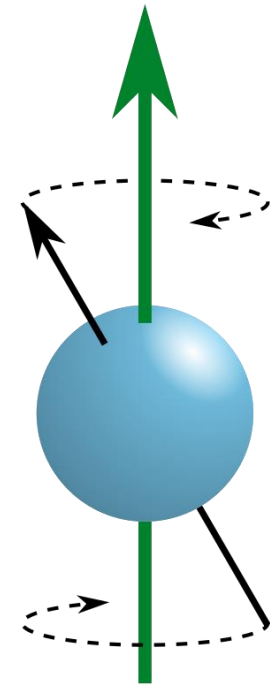
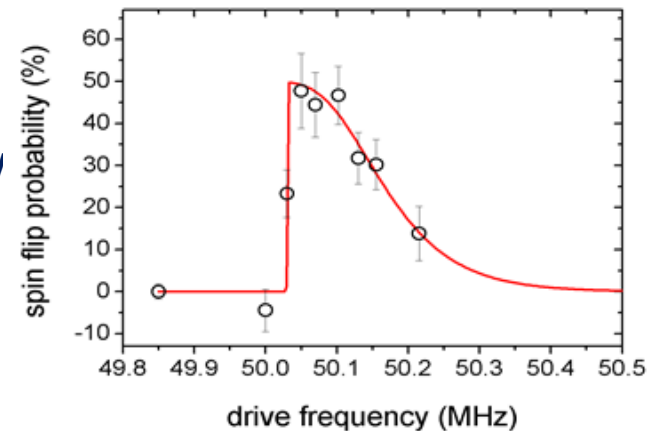
$$\mu = g \frac{q}{2m} S \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{g}{2} \mu_N$$

- (Anty)Proton / elektron spin  $S = \frac{1}{2}$
- Częstotliwość Larmora – precesja spinu w danym polu magnetyczny

$$\omega_L = g \frac{e}{2m_p} B$$

- **Pomiary:**

-> najbardziej precyzyjnie mierzona wielkość w fizyce!

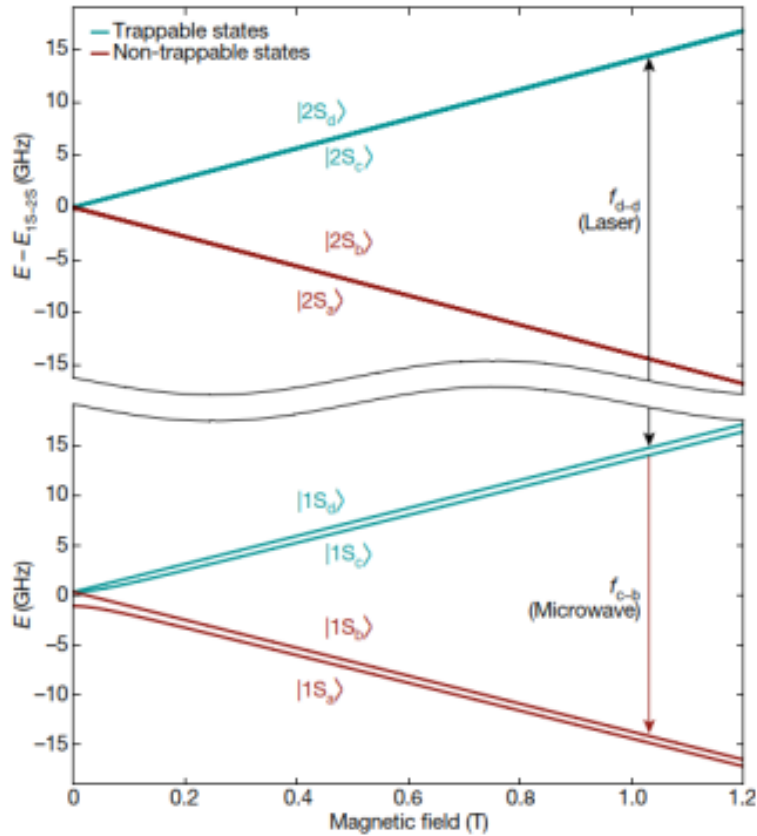


Particle	g-factor	Relative standard uncertainty
Elektron	-2.00231930436256(35)	$1.7 \times 10^{-13}$
Mion – (średnia z różnych pomiarów-2021)	-2.002 331 84121(82)	$4.1 \times 10^{-10}$
Proton	5.5856946893(16)	$2.9 \times 10^{-10}$
Antyproton	5.5856946906(60)	$1.5 \times 10^{-9}$



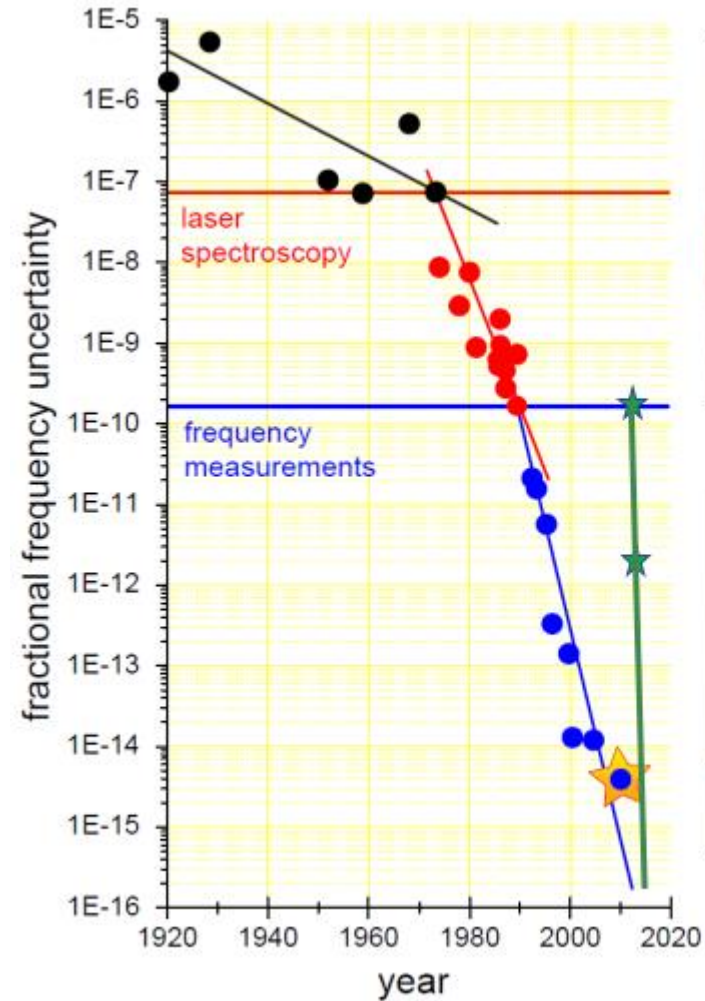
# Spektroskopia antywodoru 1S-2S

- Użyteczne jest przejście 1S–2S, ze względu na długi czas życia (około 1/8 s) stanu 2S i związaną z tym wąską szerokość częstotliwości przejścia (kilka herców przy  $2,5 \times 10^{15}$  Hz)



$$f_{d-d} = 2,466,061,103,064(2) \text{ kHz}$$

$$f_{c-c} = 2,466,061,707,104(2) \text{ kHz}$$

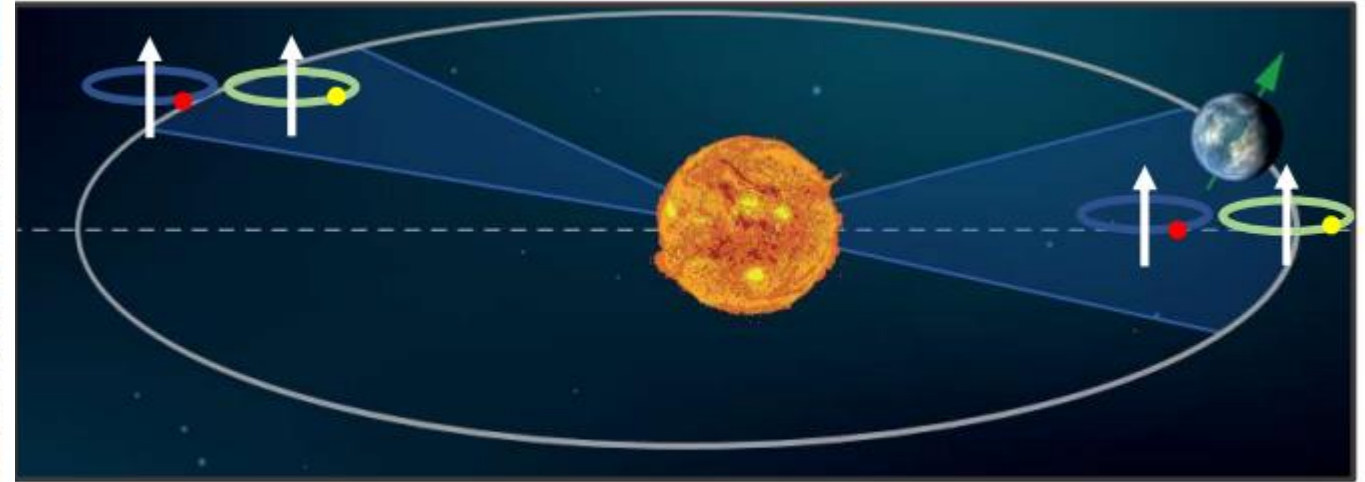
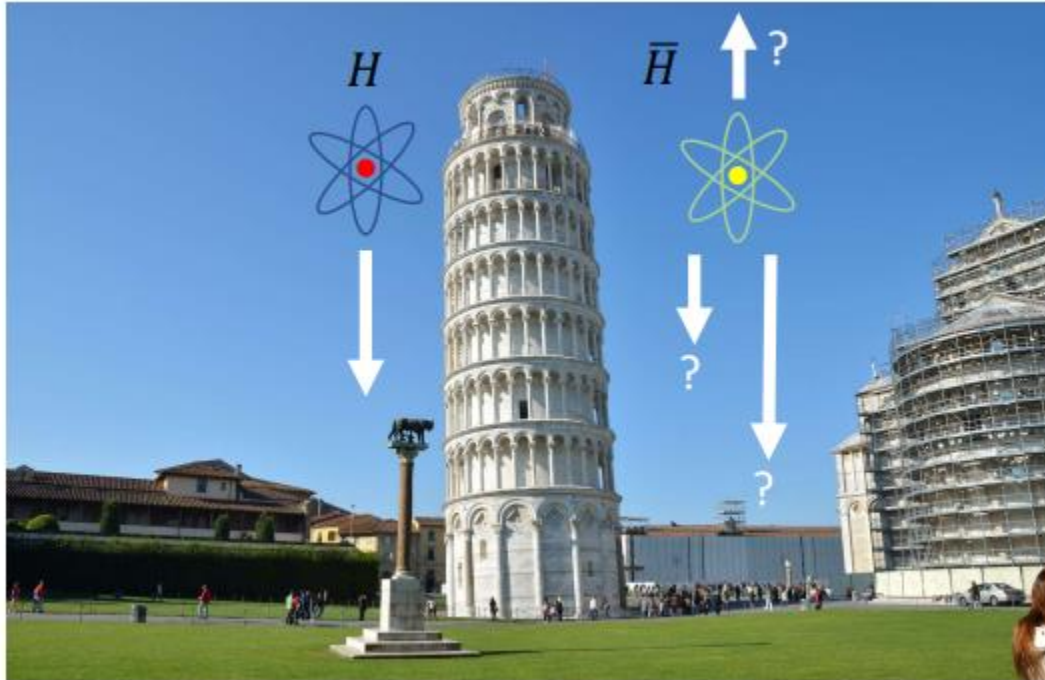


Hydrogen  
Hänsch Plot



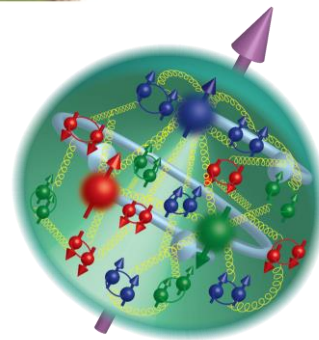
Antihydrogen  
Hangst Plot

# Pomiary oddziaływania grawitacyjnego



Swobodny spadek:

- ALPHAg
- ASACUSA
- GBAR



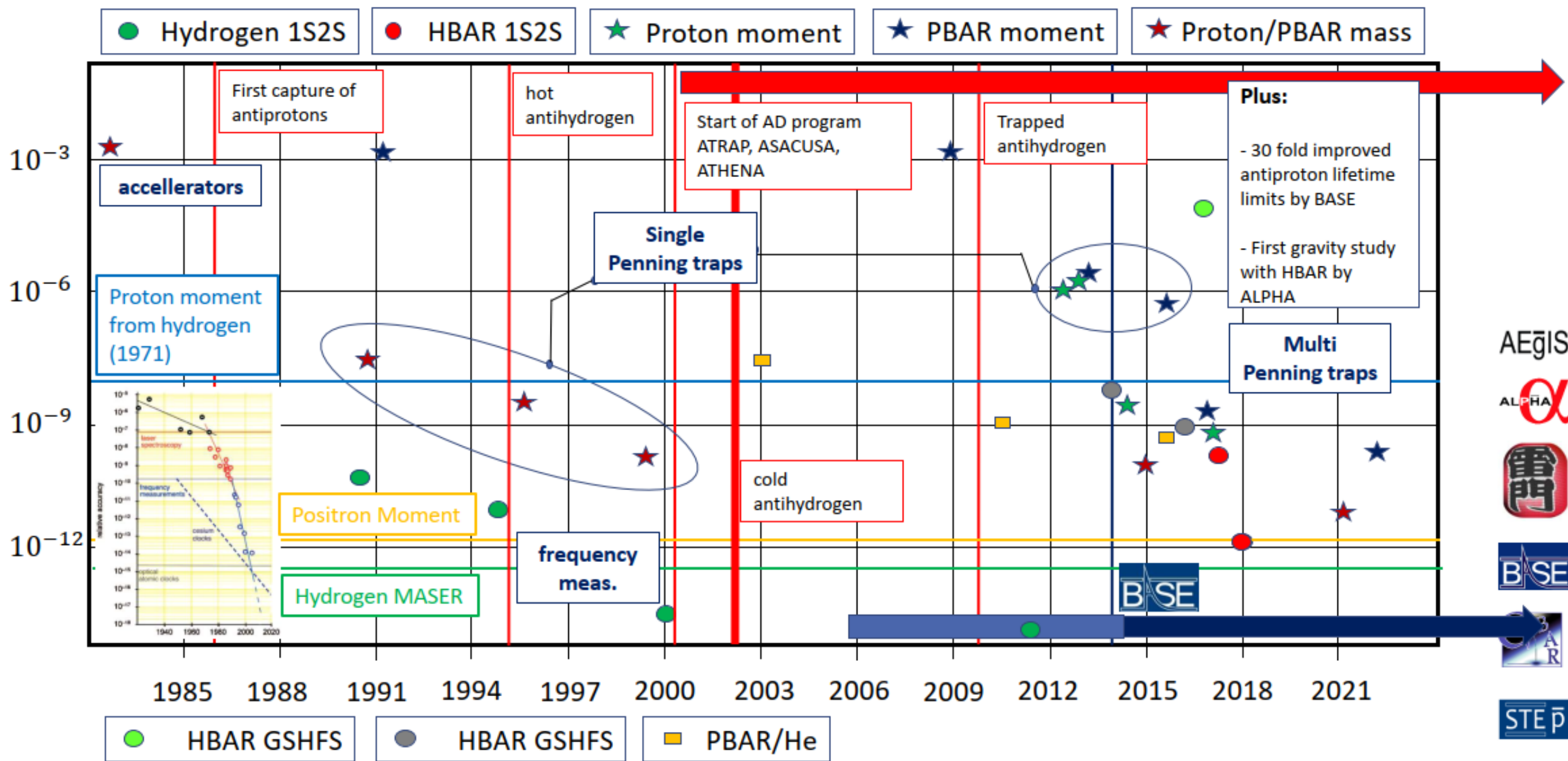
Porównywanie zegarów:

- BASE – wynik:  $|\alpha_{g,D} - 1| < 0.030$

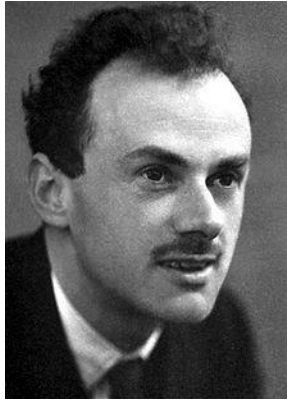
- W antyprotonie tylko 1 % masy stanowią antykwarki – potrzebna wysoka precyzja.



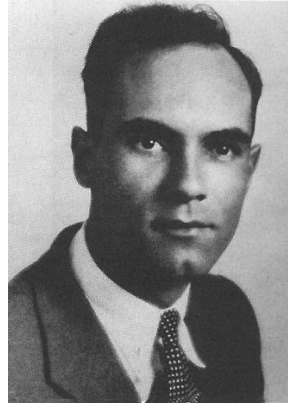
# Historical Milestones



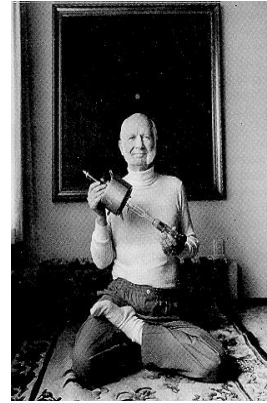




Idea teoretyczna - Paul Dirac



Odkrycie – Carl Anderson, Emilio Segrè



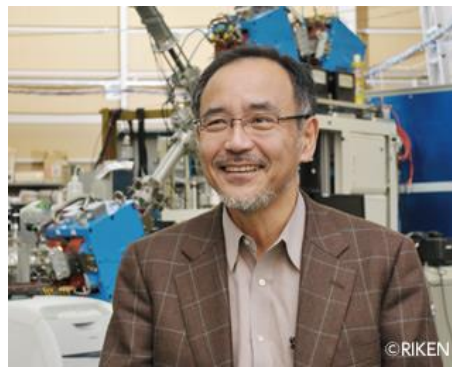
Pułapkowanie antymaterii - Hans Dehmelt, Gerald Gabrielse



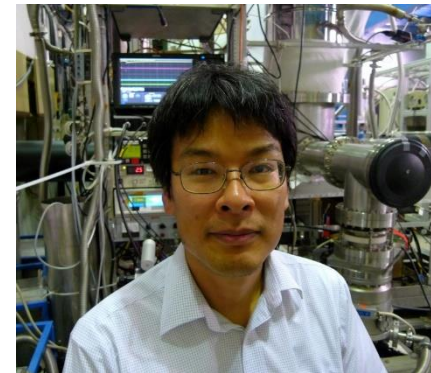
Pierwszy wyprodukowany antywodór -Walter Oelert



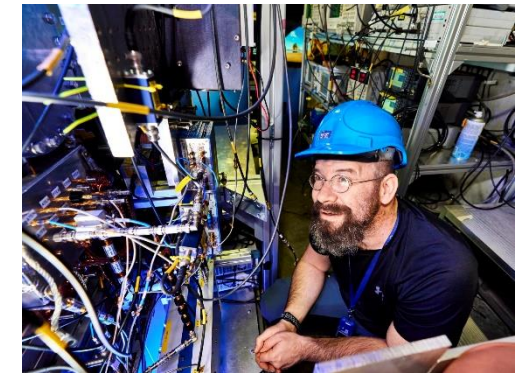
Spułapkowany antywodór - Jeffrey Hangst (eksperyment ALPHA)



Wiązka antywodoru - Yasunori Yamazaki (eksperyment ASACUSA)

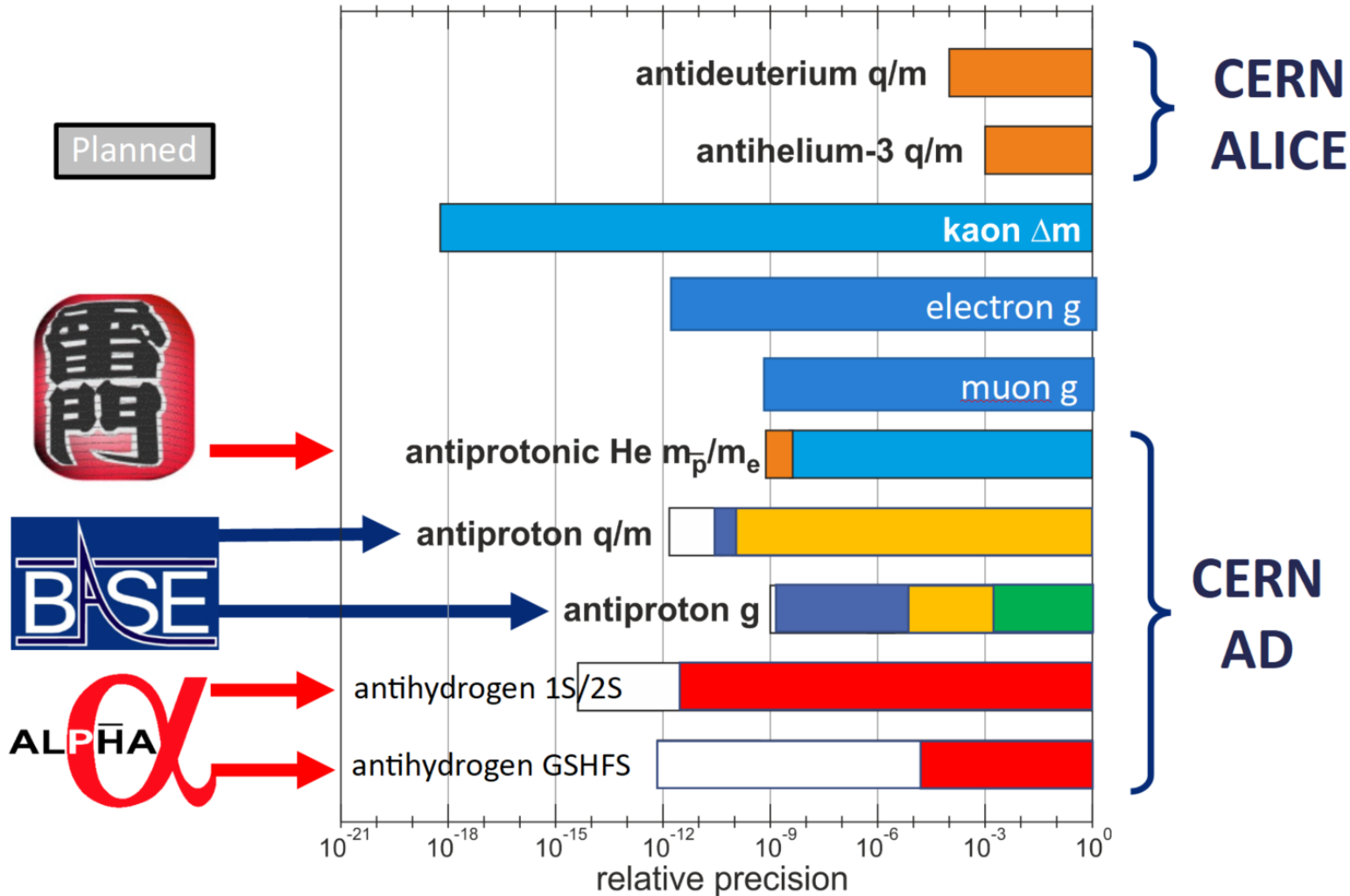


Spektroskopia antiprotonic helium – Masaki Hori (eksperyment ASACUSA II)



Najbardziej precyzyjne testy CPT dla antimaterii – Stefan Ulmer (eksperyment BASE)

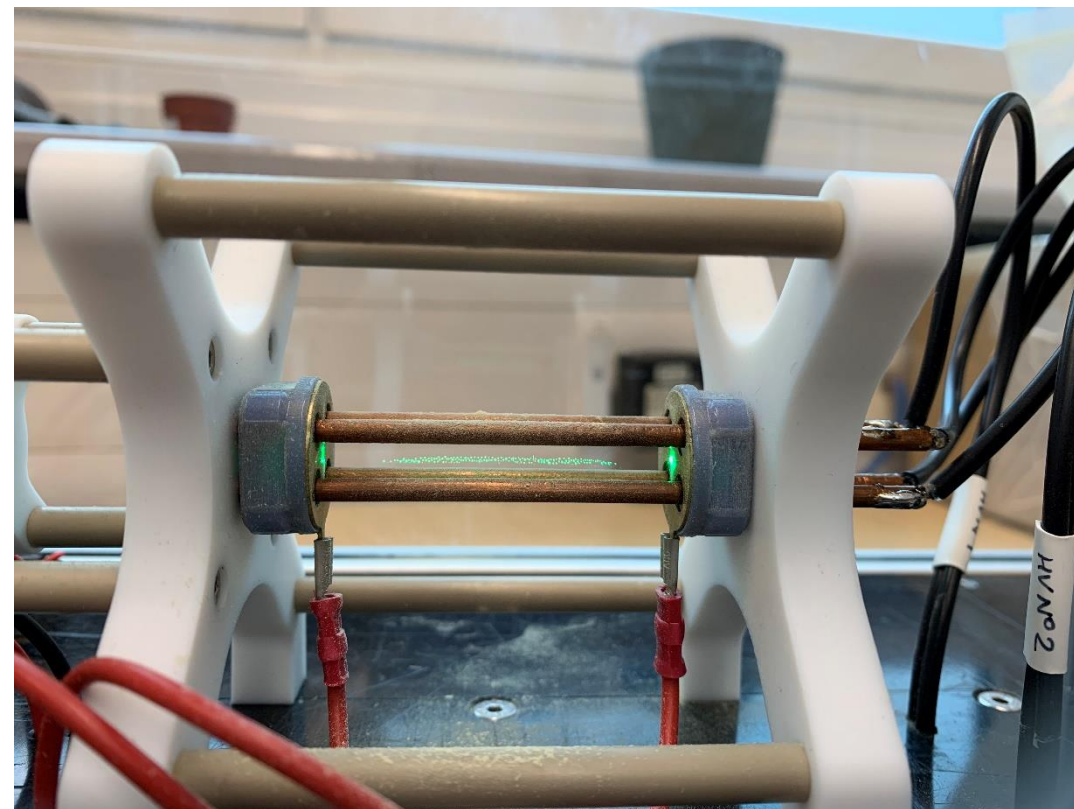
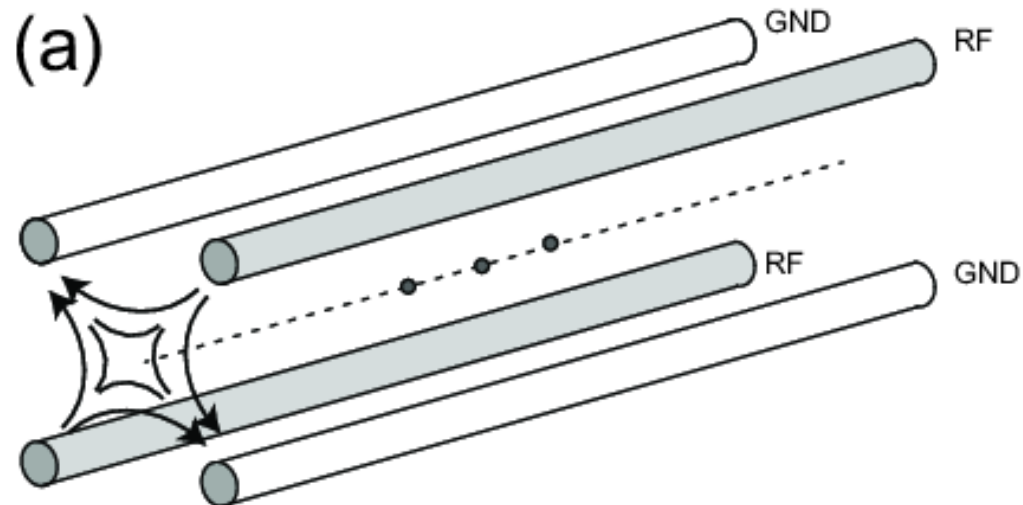
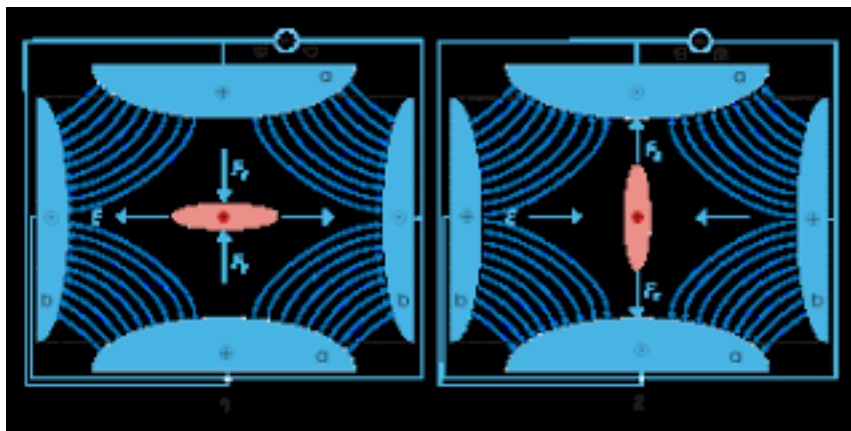
# Testy CPT w układach materia-antymateria



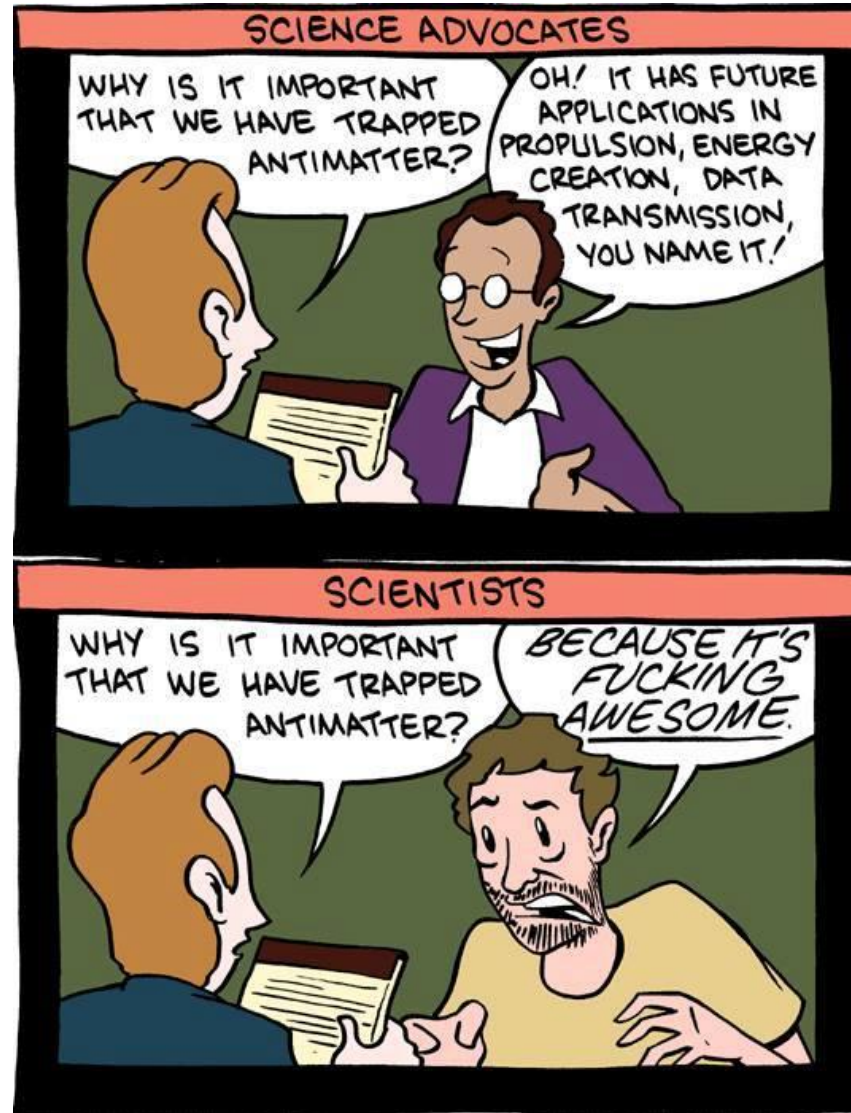
R.S. Van Dyck et al., Phys. Rev. Lett. **59**, 26 (1987).  
 B. Schwingerheuer, et al., Phys. Rev. Lett. **74**, 4376 (1995).  
 H. Dehmelt et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 4694 (1999).  
 G. W. Bennett et al., Phys. Rev. D **73**, 072003 (2006).  
**M. Hori** et al., Nature **475**, 485 (2011).  
 G. Gabriesle et al., PRL **82**, 3199(1999).  
 J. DiSciaccia et al., PRL **110**, 130801 (2013).  
 S. Ulmer et al., Nature **524**, 196-200 (2015).  
 ALICE Collaboration, Nature Physics **11**, 811-814 (2015).  
 M. Hori et al., Science **354**, 610 (2016).  
 H. Nagahama et al., Nat. Comm. **8**, 14084 (2017).  
 M. Ahmadi et al., Nature **541**, 506 (2017).  
 ALPHA Collaboration, Nature **561**, 211-215 (2018).  
 ALPHA Collaboration, Nature **578**, 375-380 (2020).  
 BASE Collaboration, Nature 601.7891: 53-57 (2022).



# Pułapka Paula



# Dziękuję za uwagę!



Thanks to Stefan Ulmer and Jack Devlin for sharing material for this lecture.