



Fabryka Antymaterii

Barbara Maria Latacz

CERN

CERN, 06-03-2025



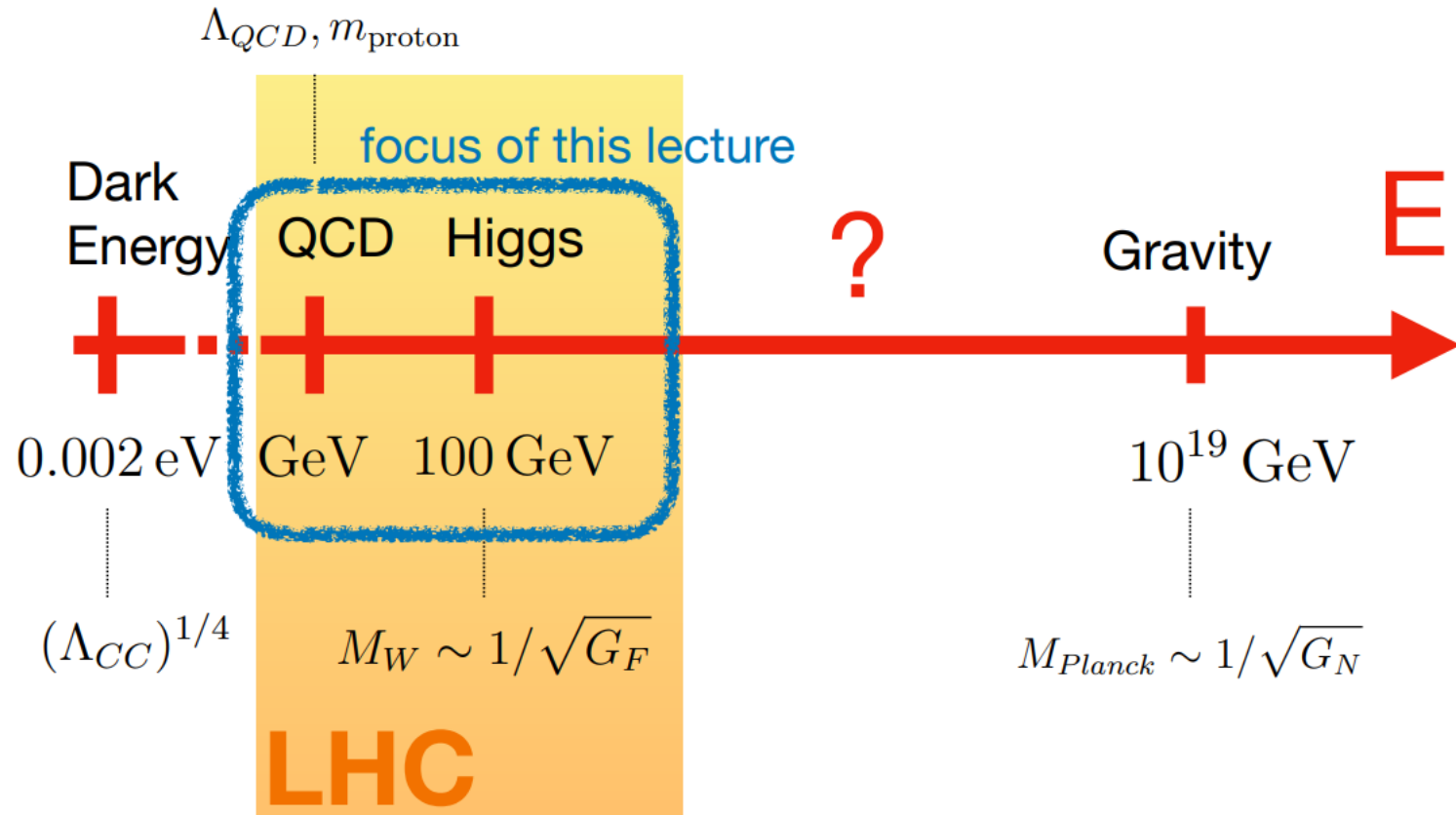


Wstęp





Fundamental scales





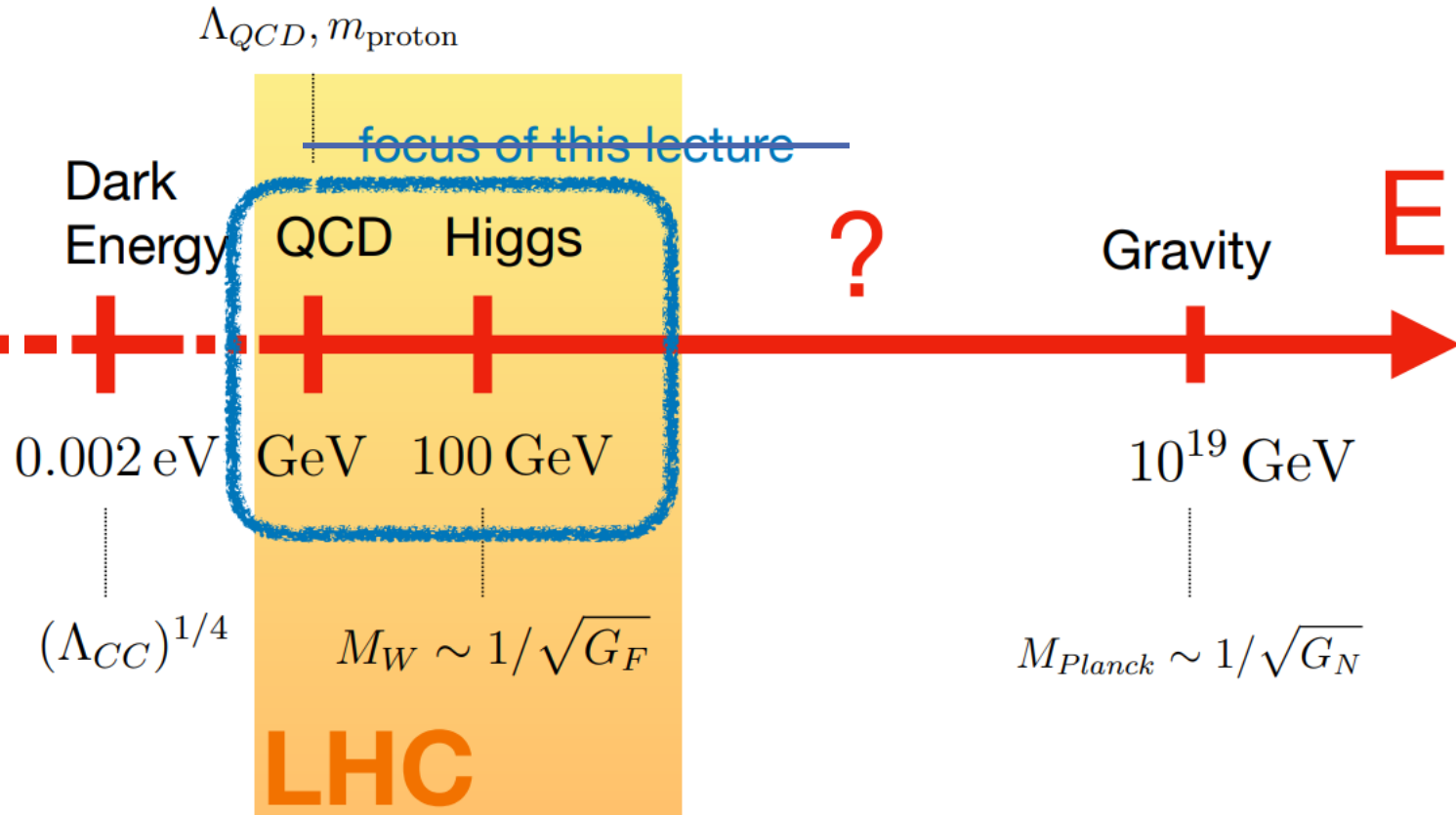
Płaszczyzny rozwoju Fizyki Fundamentalnej -> Precyzyjne Pomiar

Fundamental scales

Ultraprecyzyjne testy Modelu Standardowego poprzez pomiary podstawowych właściwości materii // antymaterii.

$10^{-27} - 10^{-20}$ GeV

Eksperymenty w Fabryce Antymaterii (AD/ELENA).



Screen from the lecture „Standard Model ¼”, Andreas Weiler (TU Munich)





Wstęp

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

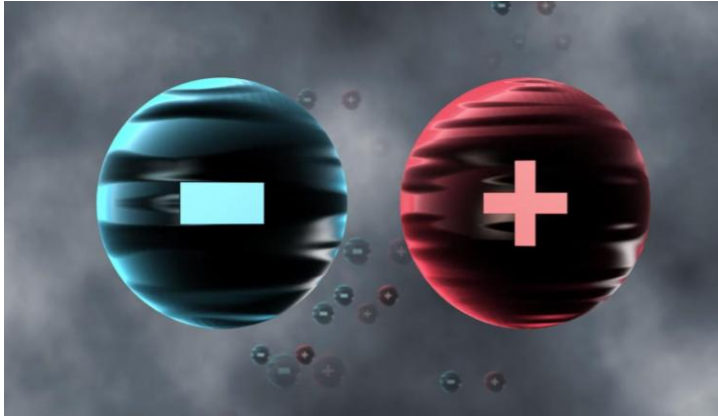
W. Heisenberg in “The physicist’s conception of Nature”, 1972



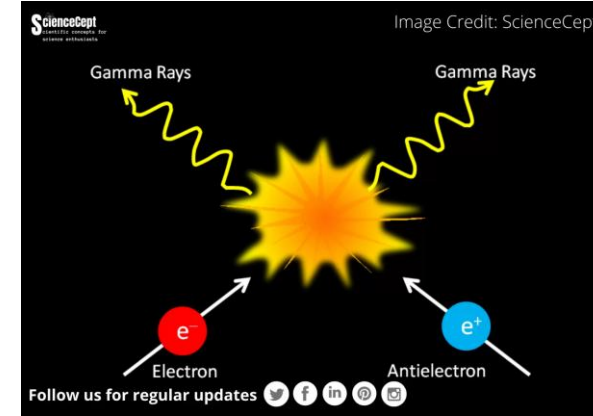


Czym jest antymateria?

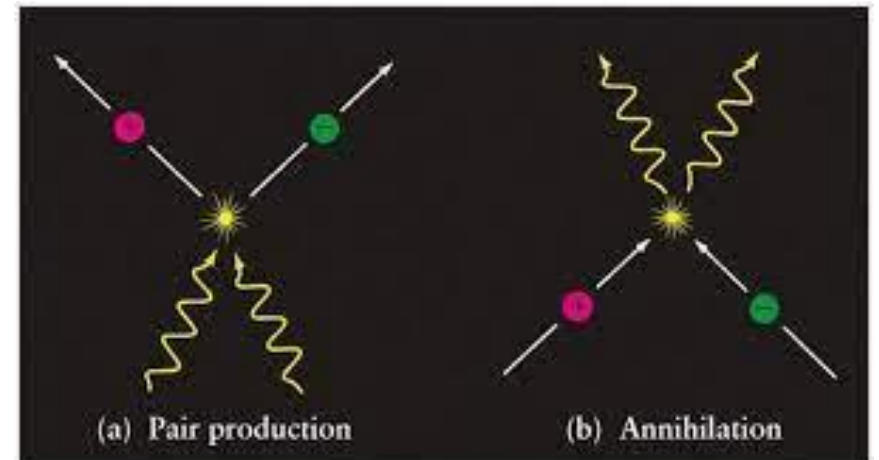
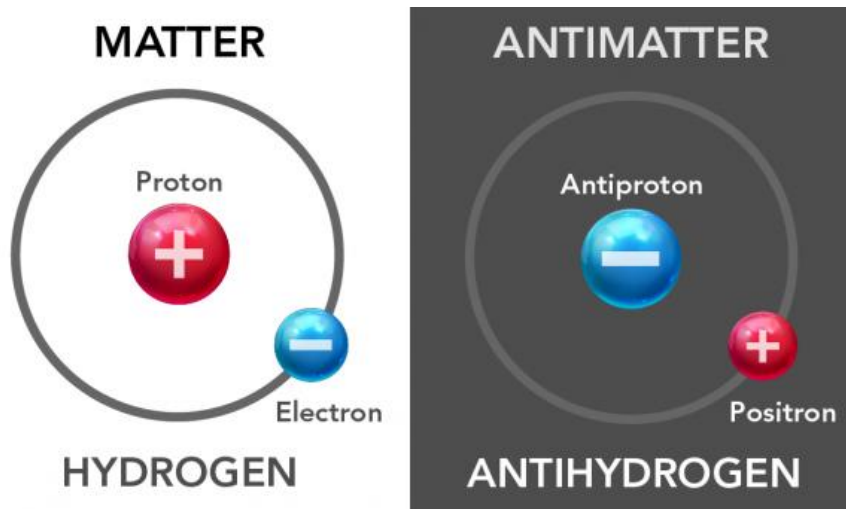
- Podstawowe własności:



- Anihilacja:



- Kreacja:





Stosowane techniki: klasyczna fizyka AMO

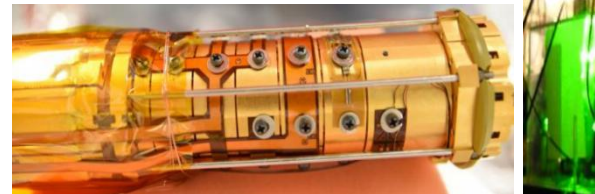
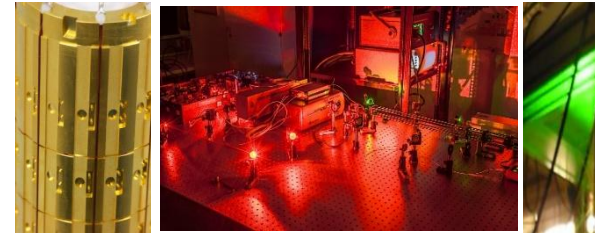
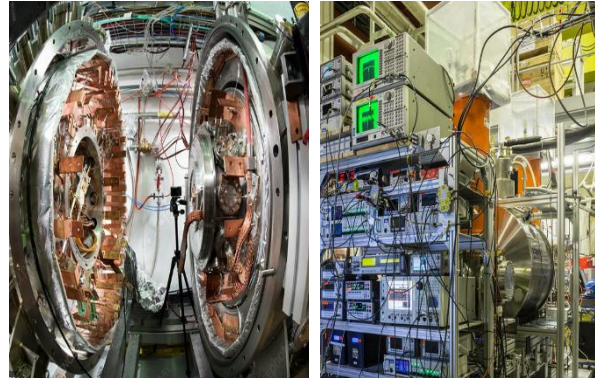
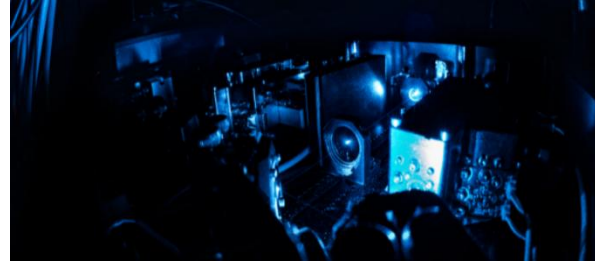
Zegary



Pułapki



Lasery



Innowacje i technologie

- Pułapkowanie cząstek
- Pułapki Penninga
- Chłodzenie
- Lasery
- Spektroskopia

matter sector 2016

proton lifetime (direct)	>1.67 e34 y
proton m	90 p.p.t.
proton magn. moment	3.3 p.p.b.
hydrogen 1S/2S	0.004 p.p.t.
hydrogen GSHFS	0.7 p.p.t.

antimatter sector 2016

antiproton lifetime	>1.2 y
antiproton m	120 p.p.t.
antiproton m. moment	4.4 p.p.m.
antihydrogen 1S/2S	?
antihydrogen GSHFS	?

matter sector 2021

proton lifetime (direct)	>1.67 e34 y
proton m	30 p.p.t.
proton magn. moment	0.3 p.p.b.
hydrogen 1S/2S	0.004 p.p.t.
hydrogen GSHFS	0.7 p.p.t.

antimatter sector 2021

antiproton lifetime	>30 y
antiproton m	30 p.p.t.
antiproton m. moment	1.5 p.p.b.
antihydrogen 1S/2S	2 p.p.t.
antihydrogen GSHFS	400 p.p.m.





Motywacja fizyczna



Czy to jest w ogóle ciekawe?

Głos sceptyka:

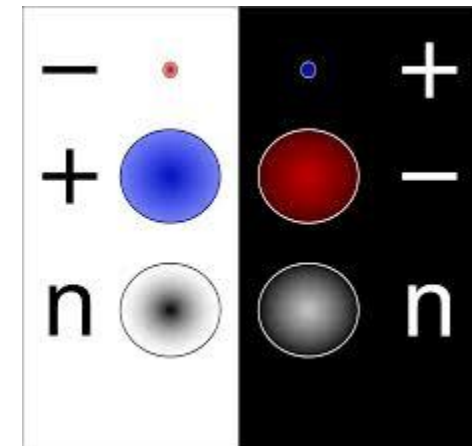
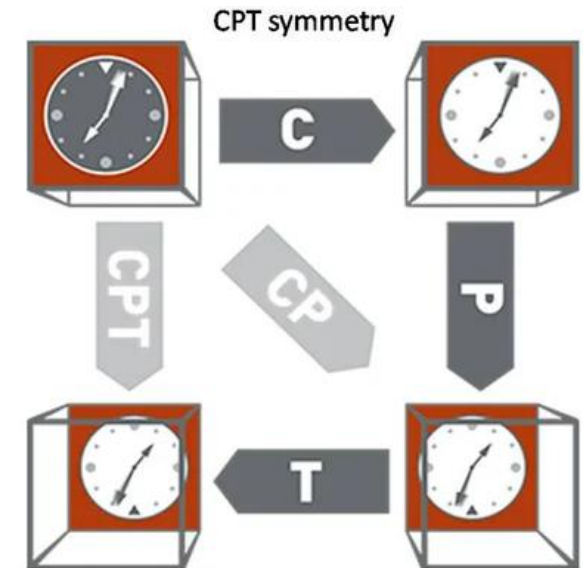
Czy możliwe jest, aby właściwości materii i antymaterii różniły się?

Głos sceptyka z przeszkoleniem fizycznym:

Każda „rozsądna” (Lorentz covariant) teoria pola kwantowego będzie symetryczna CPT.

Symetria CPT oznacza, że właściwości materii i antymaterii są takie same.

... z drugiej strony...





Dlaczego badamy antymaterię?

- Łącząc model Λ -CDM i SM, nasze przewidywania dotyczące stosunku barionów do fotonów są niespójne o około 9 rzędów wielkości

Naive Expectations	
Baryon/Photon Ratio	10^{-18}
Baryon/Antibaryon Ratio	1

Observations	
Baryon/Photon Ratio	0.6×10^{-9}
Baryon/Antibaryon Ratio	10 000

Warunki Sakharova (1967):

- 1.) złamanie symetrii B (możliwe ale nieodkryte)
- 2.) złamanie symetrii CP (zaobserwowane, ale za słabe)
- 3.) Złamanie strzałki czasu (ale w sumie to czemu?)

Być może brak równowagi termodynamicznej?



... więc może „ostateczna” teoria pola jest „nierozsądna”?
A może jest tego o wiele więcej?

AEGIS

ALPHA



BSE
STEP





Jak podejść do problemu...

- Potrzebujemy sond do nowej fizyki i nowych odkryć, aby uzyskać głębszą, dodatkową, uzupełniającą wiedzę.
- **Powinniśmy szukać tam gdzie nikt wcześniej nie szukał!**
 1. Przeprowadzać doświadczenia z egzotycznymi systemami.
 2. Opracowywać nowe techniki o wyższej czułości.
 3. Skalować eksperymenty w górę.



Fizyka Wysokich Energii
=
Skalowanie w górę / Wyższe energie

Fizyka Niskich Energii
=
Nowe metody / Wyższa czułość pomiarów

W tym wykładzie zobaczymy, że fizyka antymaterii AMO odgrywa tutaj kluczową rolę!!!

AEGIS

ALPHA α



BSE
STEP





Jak podejść do problemu...

- Potrzebujemy sond do nowej fizyki i nowych odkryć, aby uzyskać głębszą, dodatkową, uzupełniającą wiedzę.

Powinniśmy szukać tam, gdzie nikt wcześniej nie zaglądał!

1. Przeprowadzać doświadczenia z egzotycznymi systemami. => **systemy z barionami i antybarionami, uwięzione cząstki.**
2. Opracowywać nowe techniki o wyższej czułości. => **Najczulszy detektor antyprotonów (eksperyment BASE) ma czułość 120 neV! To najczulszy spektrometr, jaki kiedykolwiek zbudowano.**
3. Skalować eksperymenty w górę. => **Twórz więcej atomów antywodoru, twórz bardziej złożone systemy, bądź kreatywny...**

Fizyka Wysokich Energii
=
Skalowanie w górę / Wyższe energie

Fizyka Niskich Energii
=
Nowe metody / Wyższa czułość pomiarów

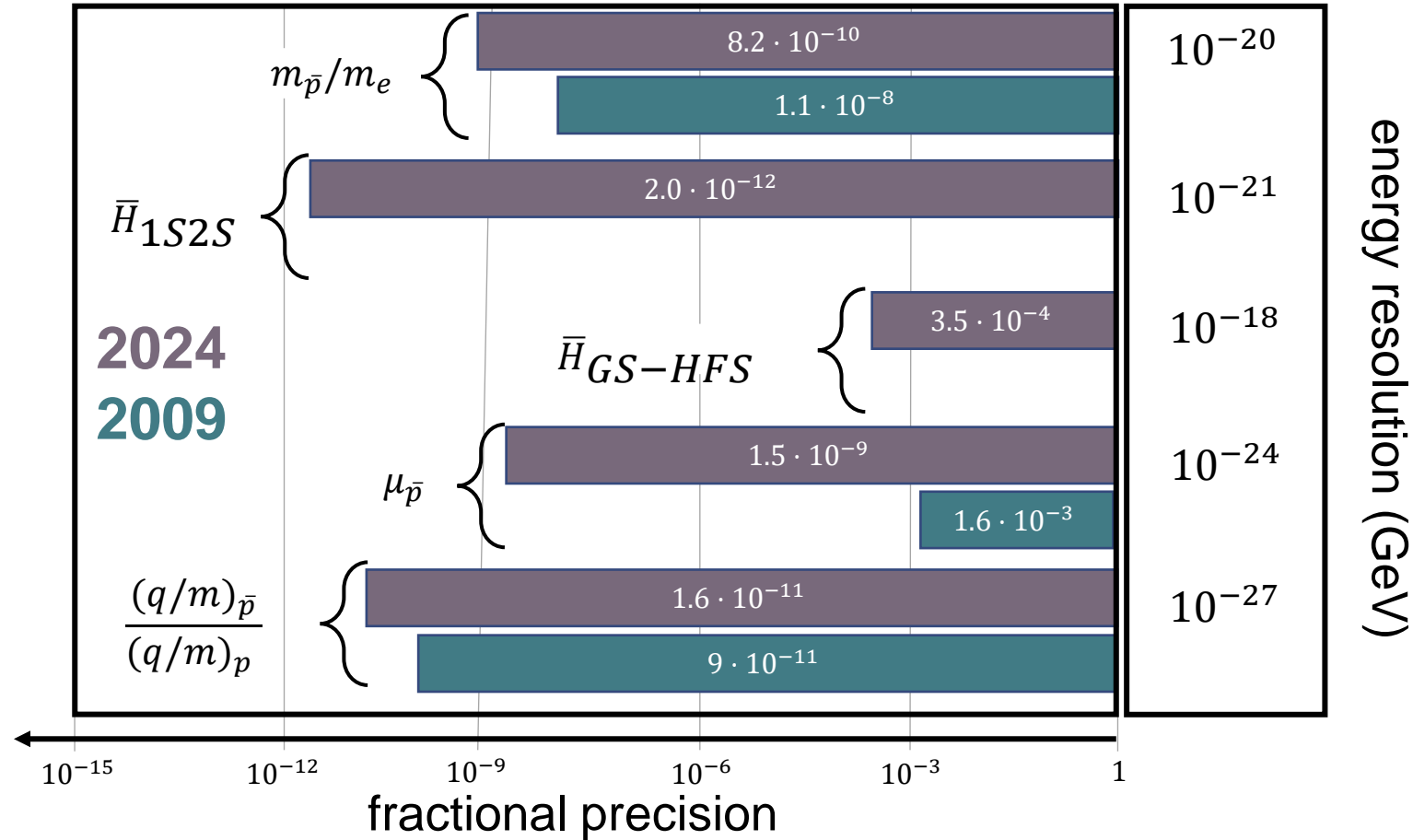
W tym wykładzie zobaczymy, że fizyka antymaterii AMO odgrywa tutaj kluczową rolę!!!



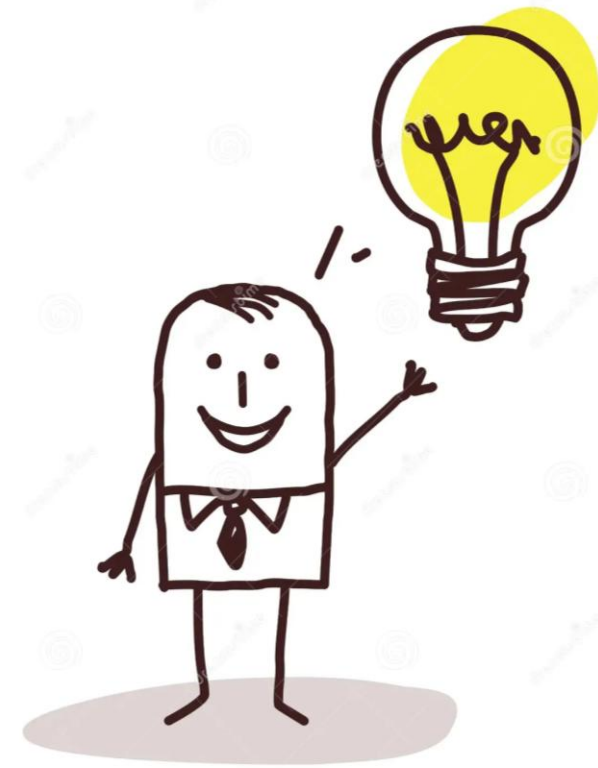


Temat tego wykładu i jutrzejszej wycieczki -> Jak zmierzyć te liczby?

- AD -> mierzy podstawowe właściwości układów antymaterii i porównuje je z teorią // materii.

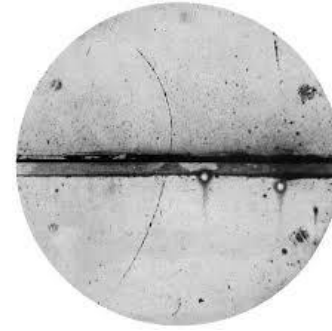


Pytanie do was wszystkich:
Jaki rodzaj układu z antymaterii
proponowałibyście zbadać i dlaczego?

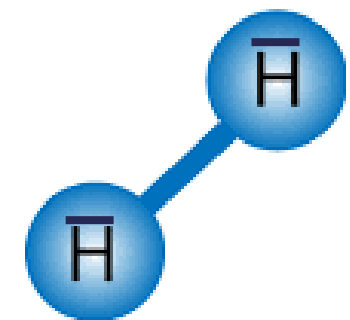
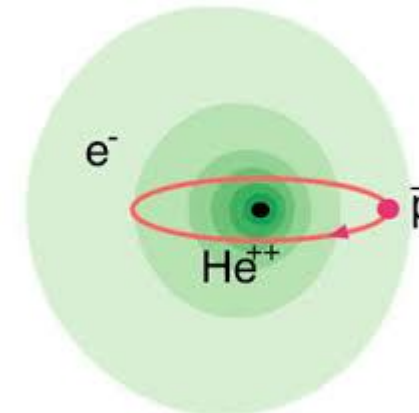
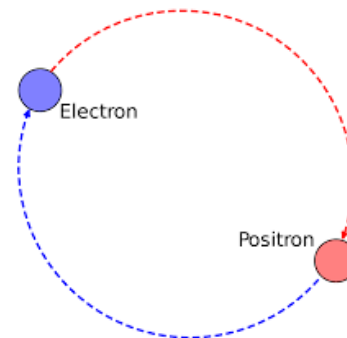
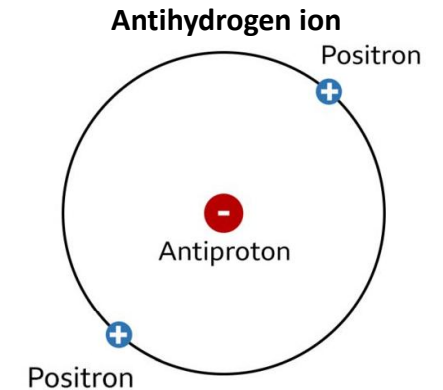
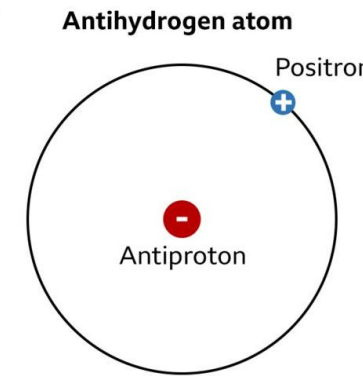
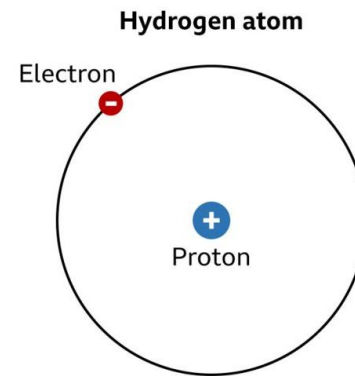
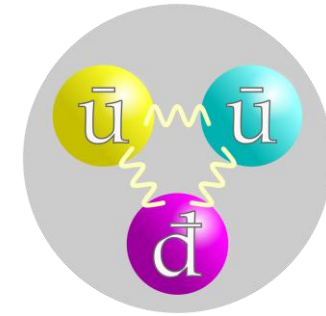


Co badamy w kontekście antymaterii:

- Pojedyncze cząstki:
 - Antyelektron -> pozyton -> antylepton
 - Antyproton -> antybaryon
 - Antyneutron (Maybe in 10 years in AD)
- Układy złożone:
 - Układy wodoro-podobne:
 - Antywodór
 - Jon antywodoru
 - Positrium
 - Antiprotonic helium
 - Molekularny antywodór



Antiproton





Jak możemy produkować antymaterię?

AEGLIS

ALPHA α

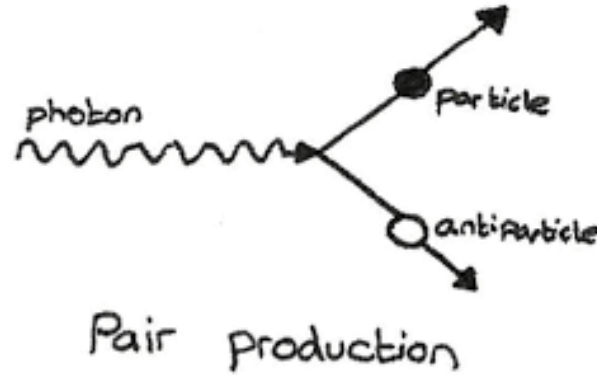
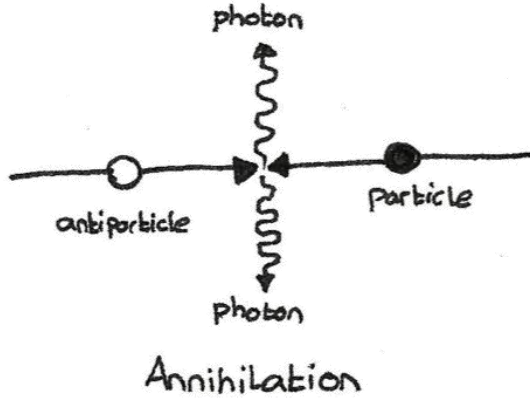


BISE
STEP

GBAR



Produkcja antymaterii



$$\sigma_{\text{pair production}} \sim Z^2$$

Z - atomic number

- Antycząstki (natural units $c=1$):

- Neutrino: $< 1 \text{ eV}$
- Elektron: $511\,000 \text{ eV}$
- Muon: $105\,000\,000 \text{ eV}$
- Proton: $938\,000\,000 \text{ eV}$
- Higgs Boson: $125\,000\,000\,000 \text{ eV}$

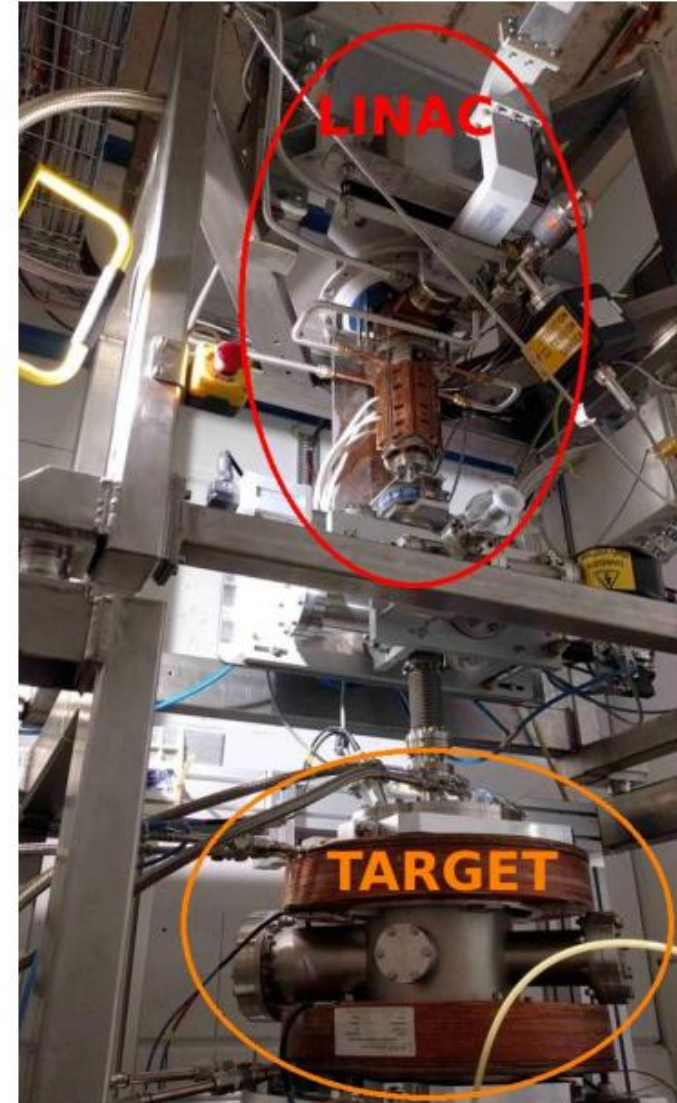


...cała energia potrzebna cząstce, aby wydostać się z materiału
 // zostać moderowaną // i przygotować ją do bycia użyteczną.

- Produkcja pozytonów:
 - Produkcja przy użyciu źródeł elektronów o dużej intensywności:
 $10^7 - 10^{10} \text{ e}^+/\text{s}$

Linac	beam energy	current	Number of positrons
Giessen (shut down)	35 MeV	160 mA	$10^8 \text{ e}^+/\text{s}$
Livermore (shut down)	100 MeV	400 mA	$10^{10} \text{ e}^+/\text{s}$
Oak Ridge	180 MeV	300 mA	$10^8 \text{ e}^+/\text{s}$
AIST, Japan	70 MeV	3 mA	$2.5 \times 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$
GBAR, CEA	4.3 MeV	140 mA	$3 \times 10^6 \text{ e}^+/\text{s}$
GBAR, CERN	9 MeV	330 mA	$5 \times 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$

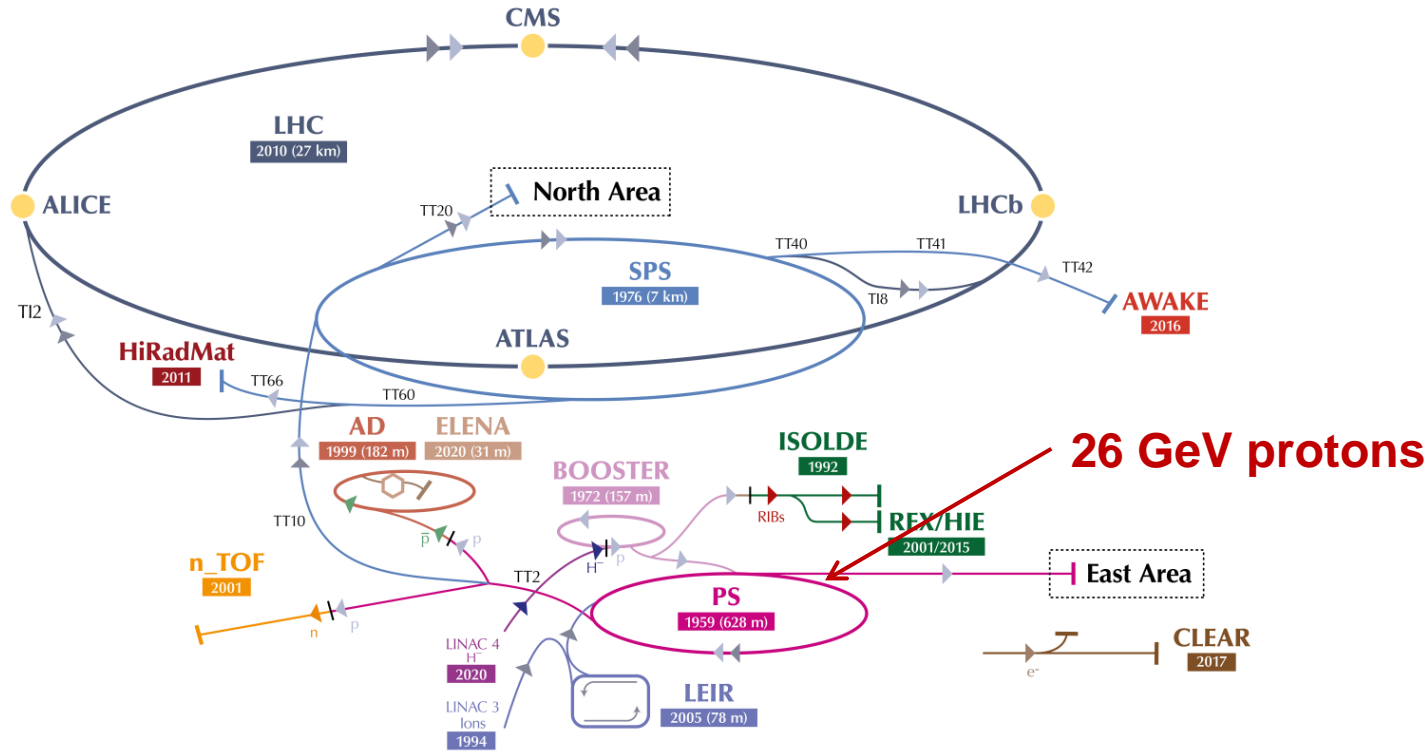
- Wychwytywanie cząstek ze źródeł naturalnych
 - $^{22}\text{Na} < 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$
- Wychwytywanie cząstek z reaktorów jądrowych:
 - $^{113}\text{Cd} + n \rightarrow ^{114}\text{Cd} + \gamma, 10^9 \text{ e}^+/\text{s}$





Produkcja antyprotonów

- Fabryka antymaterii CERN – jedyne miejsce na Ziemi, gdzie możliwe są badania nad niskoenergetycznymi antyprotonami.



▶ H^- (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶ \bar{p} (antiprotons) ▶ e^- (electron)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Line: 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



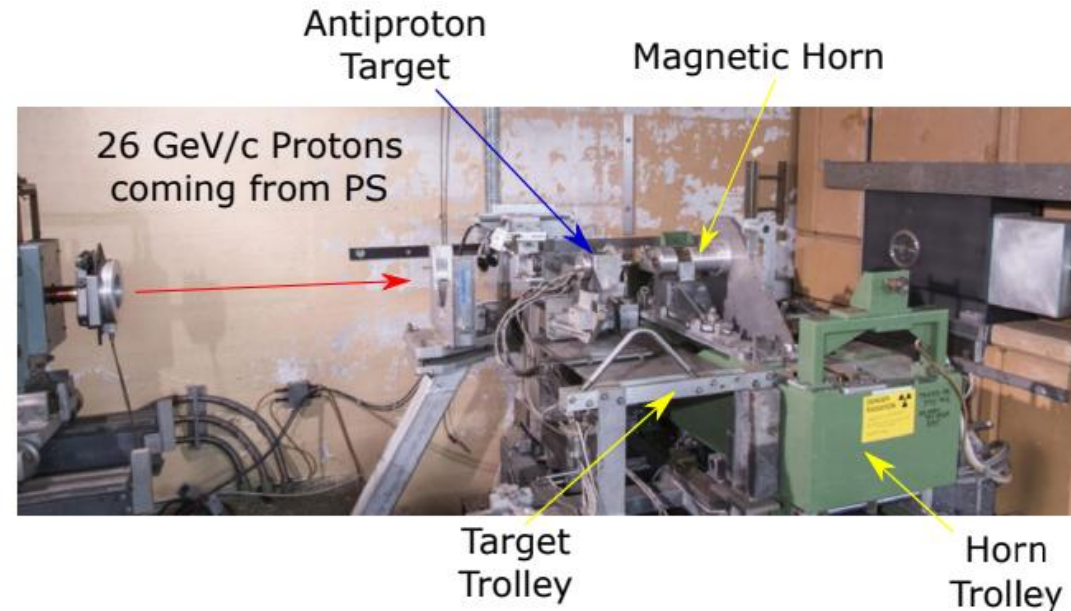
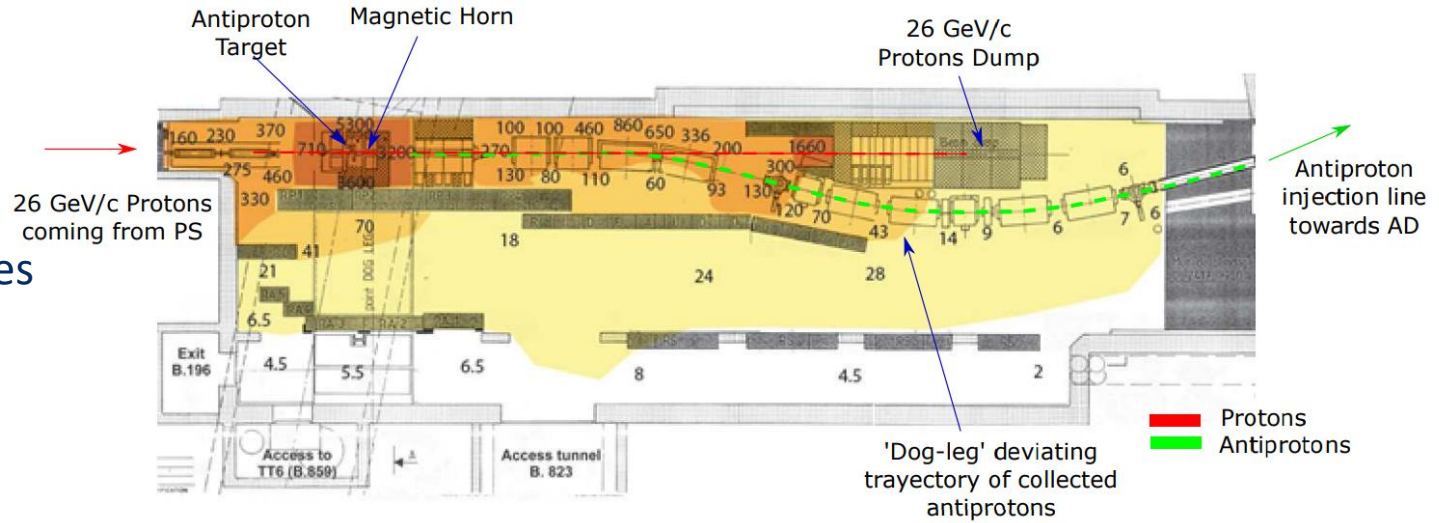
- Mechanizm produkcji:



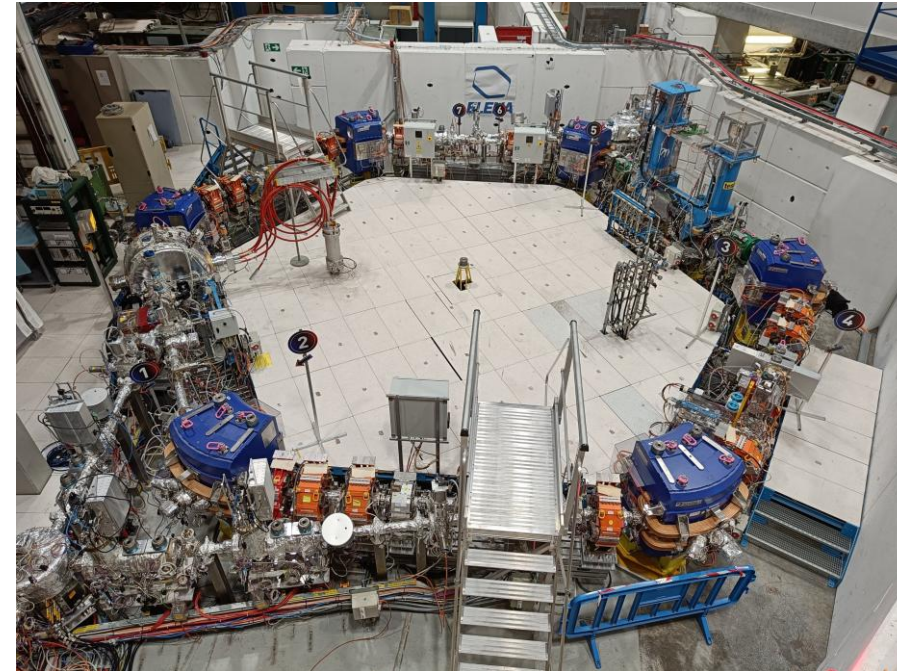
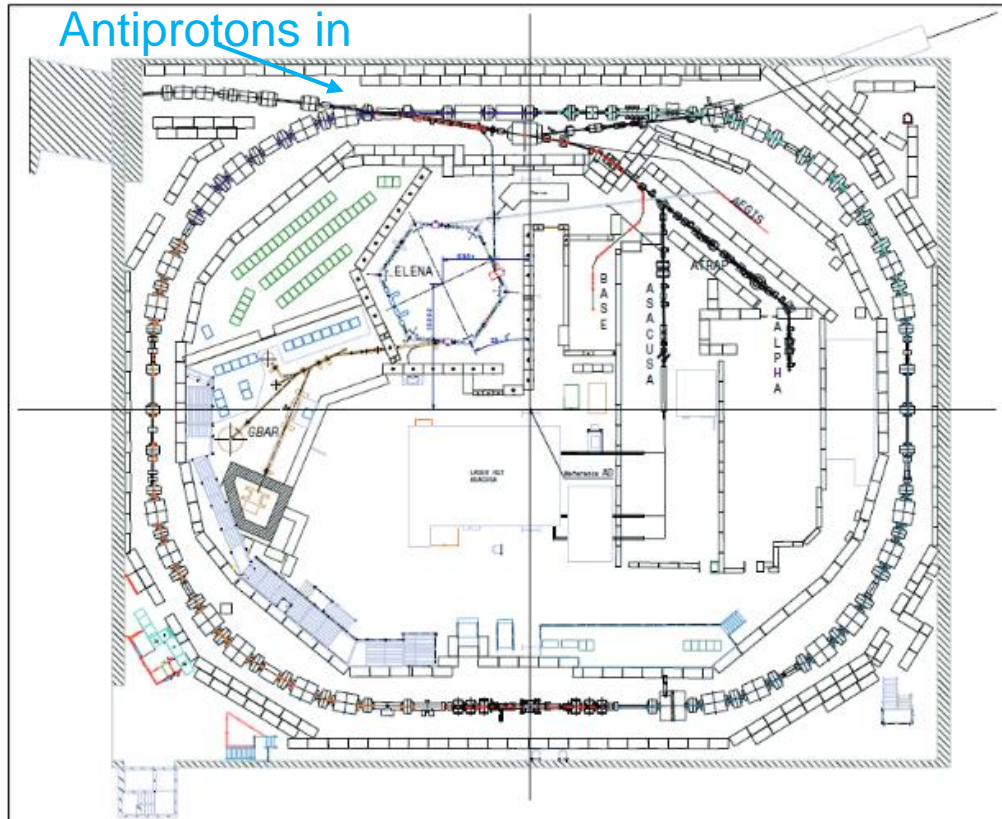
→ Excited nucleus + p + \bar{p} + other particles

Próg dla tej reakcji wynosi 5,6 GeV, reakcję przeprowadza się przy 26 GeV.

- 1.5×10^{13} protony o energii 26 są użyte do wyprodukowania 5×10^7 antyprotonów.
- Pręt indowy o długości 5,5 cm.
- Ekstremalne temperatury: wzrost o 2000 stopni w ciągu 0,5 mikrosekundy
- Zbieramy antyprotony o energii 3,6 GeV z rozrzutem pędu $\frac{\Delta p}{p} = 6\%$.
- Jedna wiązka co 2 minuty.

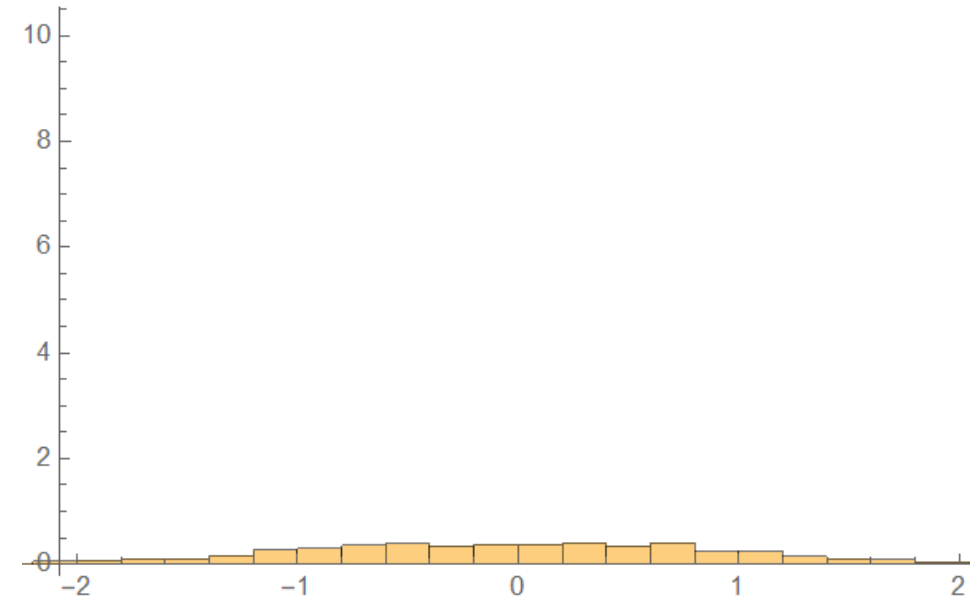
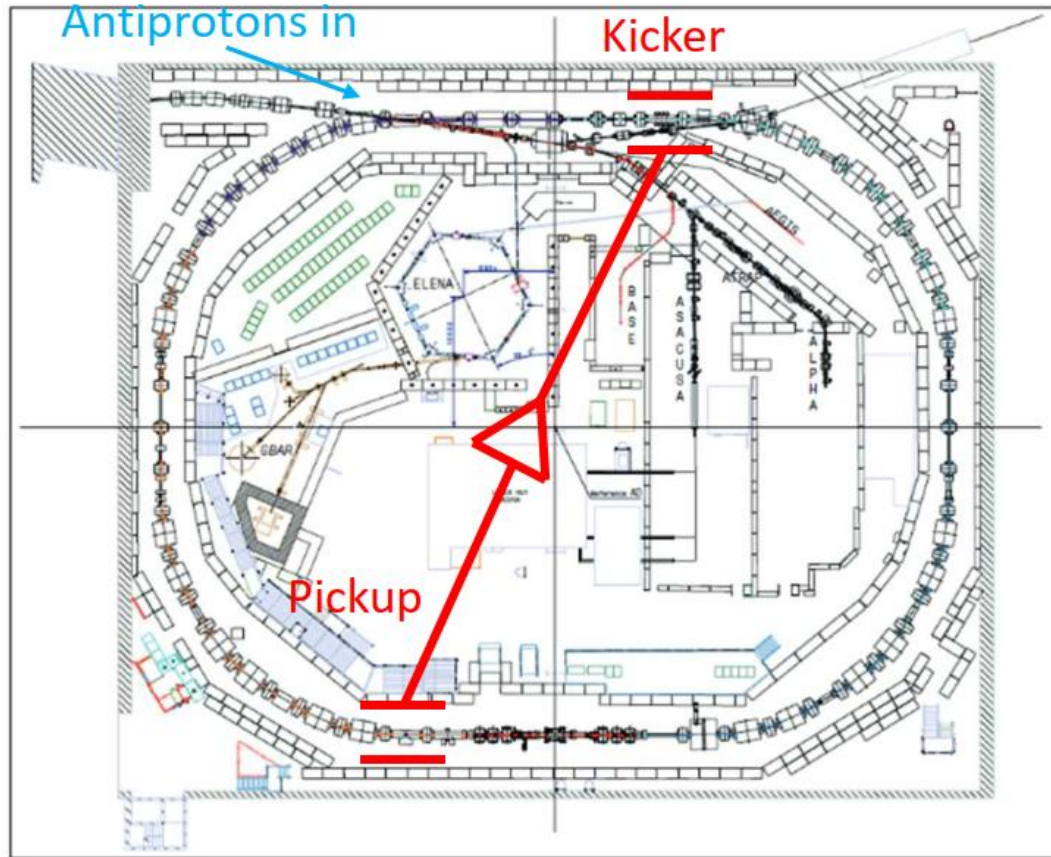


- Antiproton Decelerator:
 - Spowalnia energię z 3,6 GeV do 5,3 MeV
 -
- ELENA - The Extremely Low Energy Antiproton Synchrotron (2018)
 - Zwalnia z 5,3 MeV do 100 keV



1984 - Nagroda Nobla za chłodzenie antyprotonowe dla Simona van der Meera

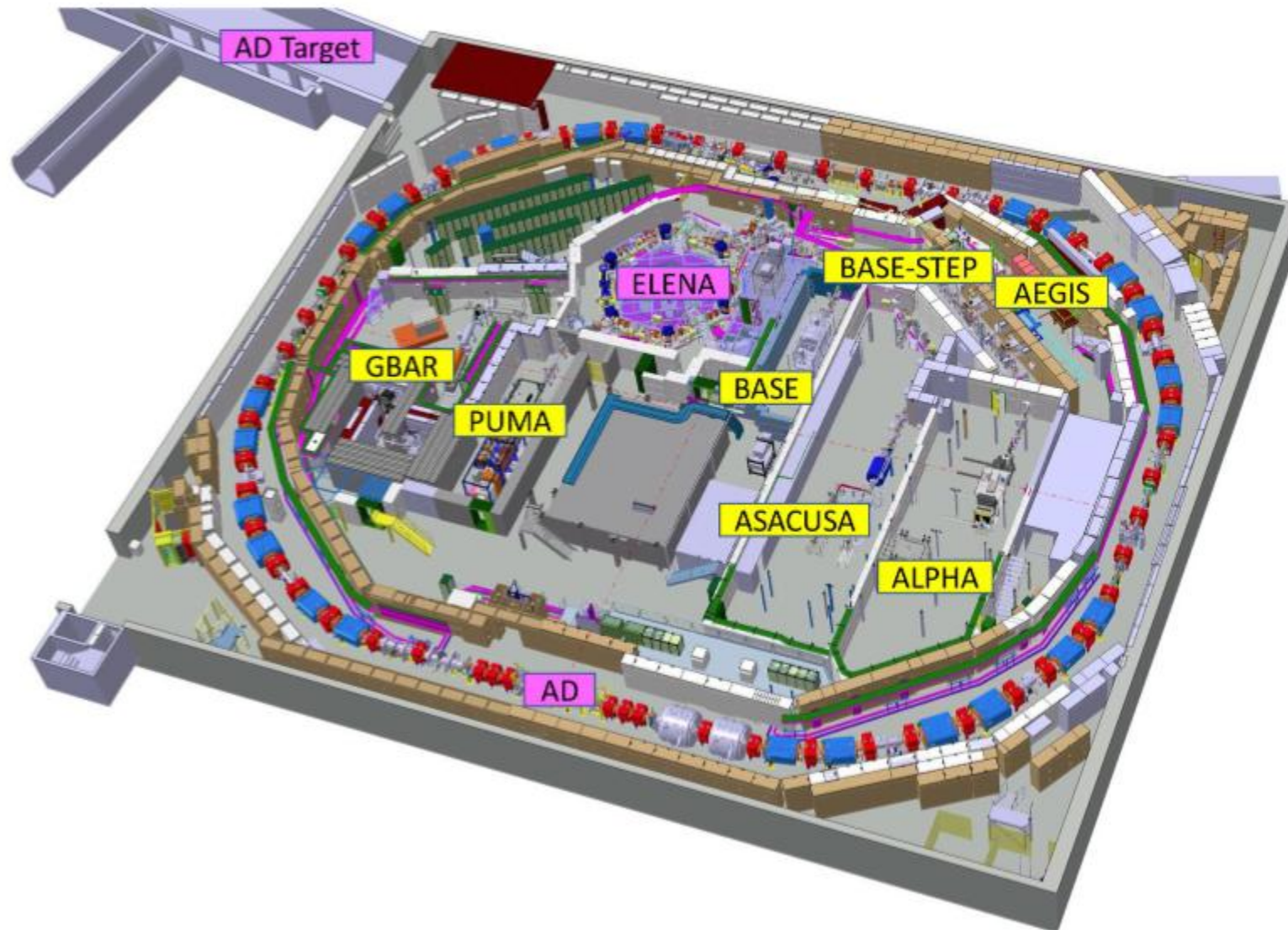
- Celem chłodzenia stochastycznego jest zmniejszenie rozproszenia energii i rozbieżności kątowej wiązki naładowanych cząstek. Podczas tego procesu cząstki są „sprężane” w cieńszą wiązkę o mniejszym rozproszeniu energii i mniejszej rozbieżności kątowej. Poprzez zwiększenie gęstości cząstek do wartości zbliżonej do wymaganej energii, technika ta poprawiła jakość wiązki.



- 2 stages of stochastic cooling reduces momentum spread (4σ) from 1% \rightarrow 0.1% \rightarrow 0.015%



The AD/ELENA-Facility

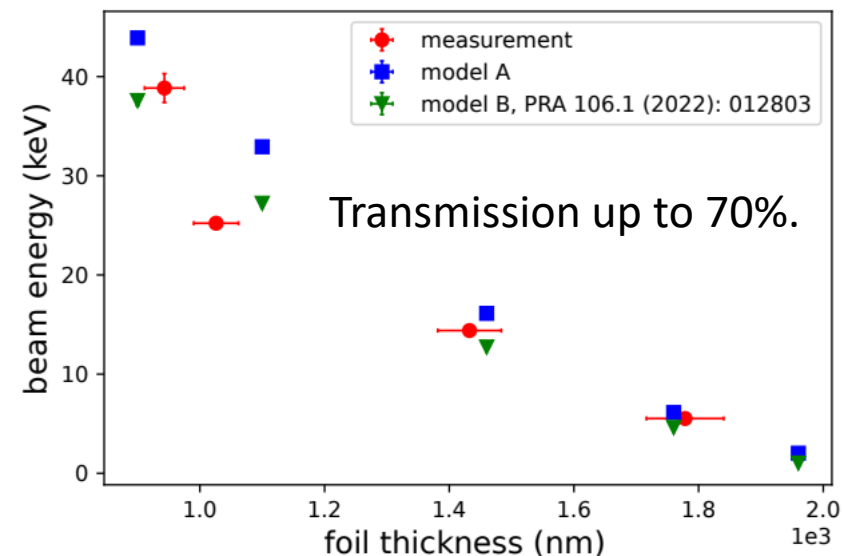
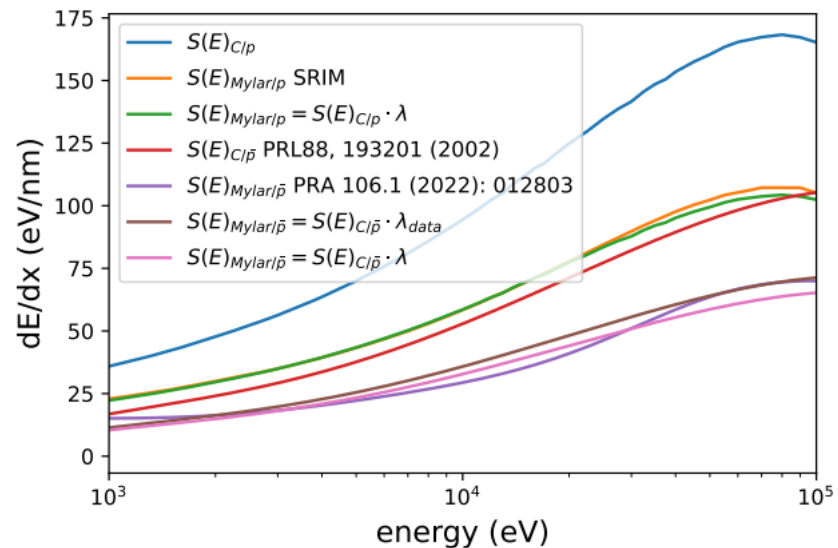
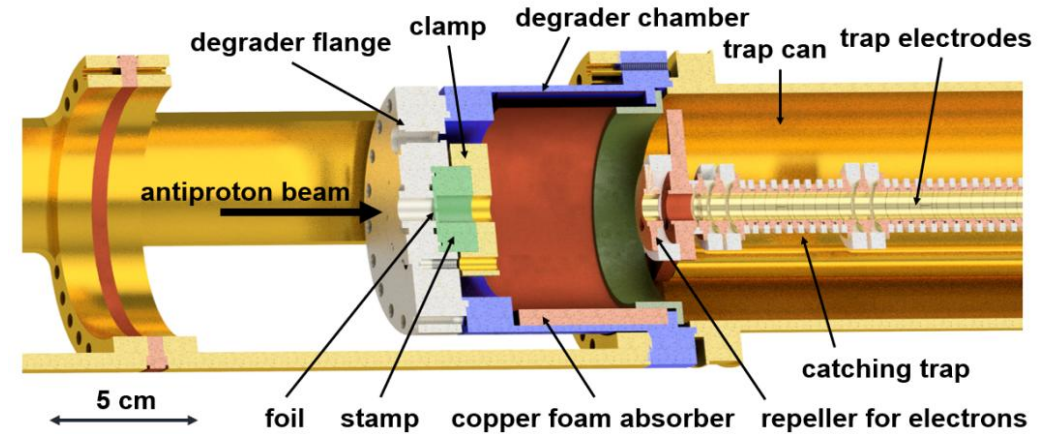
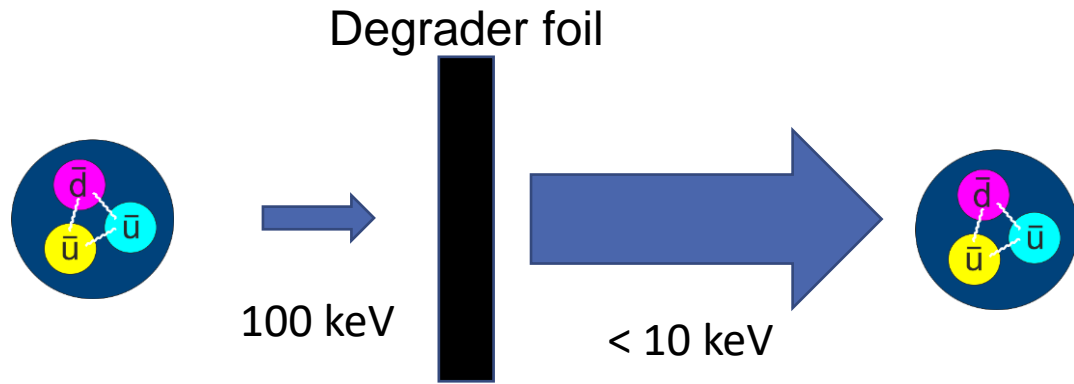


60 instytutów badawczych/universytetów – 350 naukowców – 6 aktywnych kolaboracji



Ostatni krok zwalniania

- Energia 100 keV jest nadal zbyt wysoka, aby móc uwięzić antyprotony.
- Ostatni etap zwalniania odbywa się przy użyciu folii degradującej.
- Strata energii pochodzi z sumy rozpraszania elektronów i rozpraszania Rutherforda z jąder





Ile kosztuje gram antymaterii?

W 2018

Koszt energii elektrycznej wyniósł 67 milionów franków szwajcarskich, a roczne zużycie energii elektrycznej wyniosło 1,25 TWh

10% wydane na Proton Synchrotron, AD zajmuje $\sim 2,4 \text{ s} / 112 \text{ s} = 2\%$ cykli

Produkcja antyprotonów kosztuje około 130 000 CHF rocznie

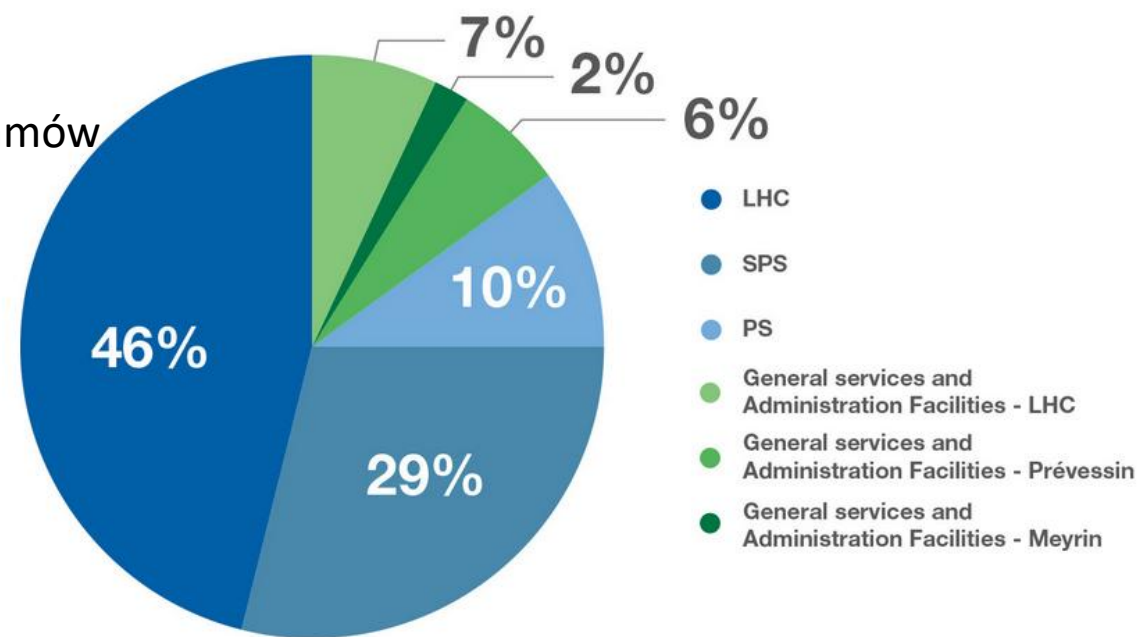
~ 10 bilionów antyprotonów produkowanych rocznie ~ 12 pikogramów

Koszt za gram ~ 8000 bilionów franków szwajcarskich
(100x światowego PKB/rok)

- Nie wliczając osób obsługujących maszynę i kosztów sprzętu!

Nie jest to tani sposób na produkcję dużej ilości antymaterii.

Albo patrząc na to z innej strony – koszt na cząsteczkę
12 nano franków szwajcarskich lub 40 centów za strzał





Pułapkowanie antymaterii



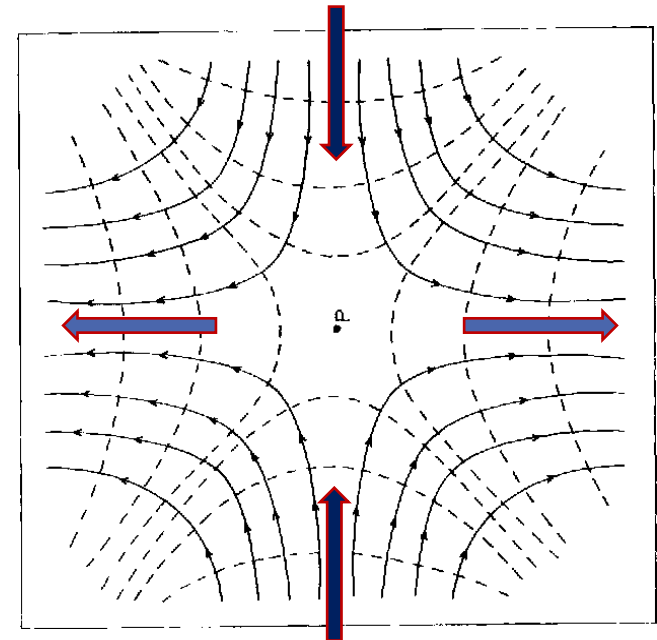
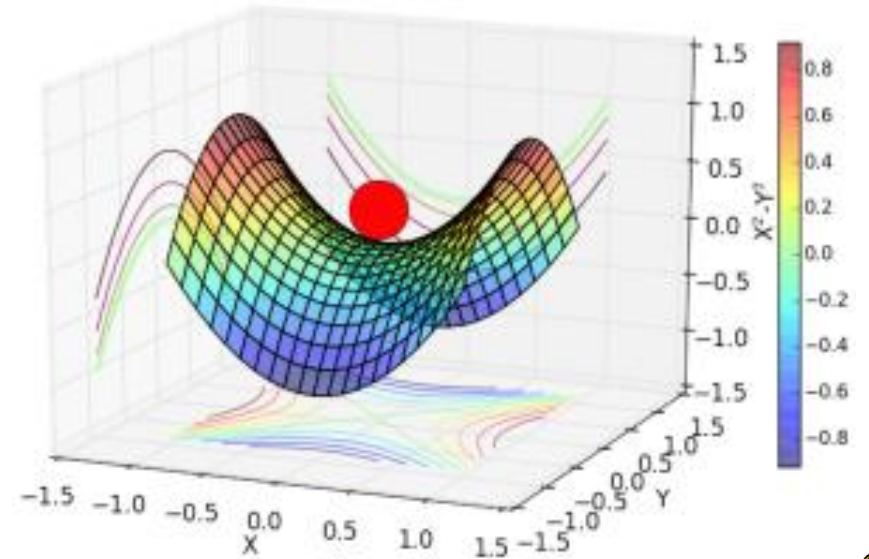
- **Twierdzenie Earnshawa** - Naładowane ciało nie może być utrzymywane w stabilnej równowadze stacjonarnej przez siły elektrostatyczne pochodzące od innych naładowanych ciał. Po raz pierwszy udowodnił to brytyjski matematyk Samuel Earnshaw w 1842 r.
- **Twierdzenie Earnshawa w najprostszej postaci:**

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) = 0$$

Dlatego w wolnej przestrzeni nie występują żadne lokalne minima i maksima potencjału pola, jedynie punkty siodłowe.

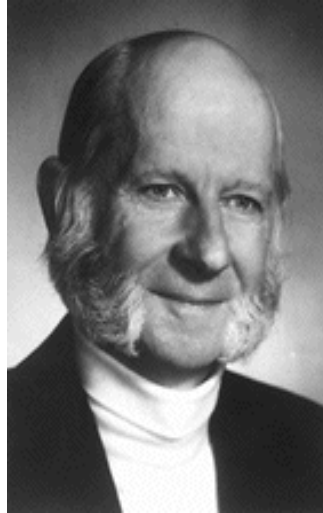
- Najprostszym rozwiązaniem byłoby rozwiązanie harmoniczne:

$$\Phi(x, y, z) = C_2 \left(z^2 - \frac{x^2 + y^2}{2} \right)$$
- Elektryczny potencjał kwadrupolowy jest najprostszym harmonicznym, stacjonarnym rozwiązaniem równania Laplace'a i spełnia twierdzenie Earnshawa.



Stydatyczne

Hans Dehmelt
(1922 - ...)



Dynamiczne

Wolfgang Paul
(1913 - 1993)



**Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki w 1989 r.
dla Hansa Dehmelta i Wolfganga Paula
„za rozwój techniki pułapki jonowej“.**

Pułapka Penninga

Pułapka Paula



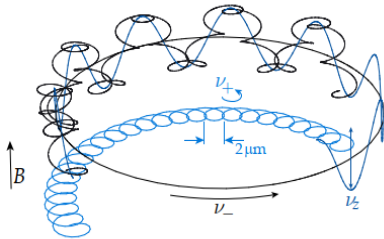
Dwa rozwiązania

- Pułapka Penninga
- Stacjonalny potencjał

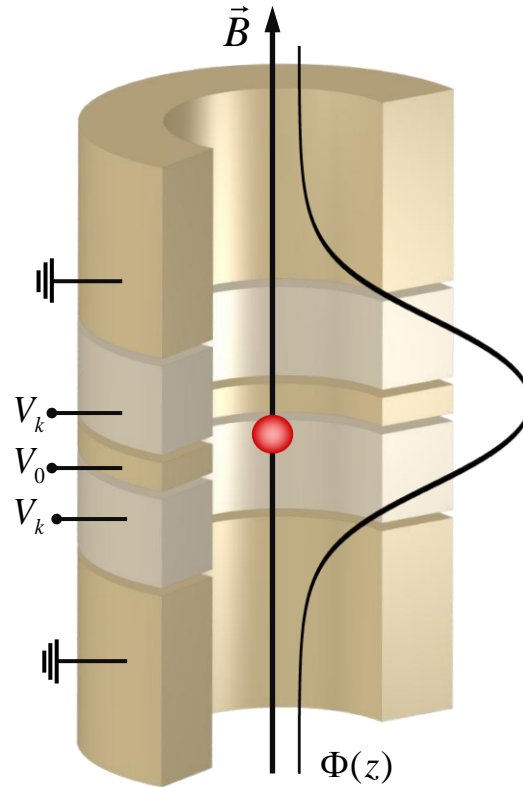
$$\phi(z, \rho) = V_0 C_2 \left(z^2 - \frac{\rho^2}{2} \right)$$

- Stacjonarne pole magnetyczne

$$\mathbf{B} = B_0 \mathbf{e}_z$$



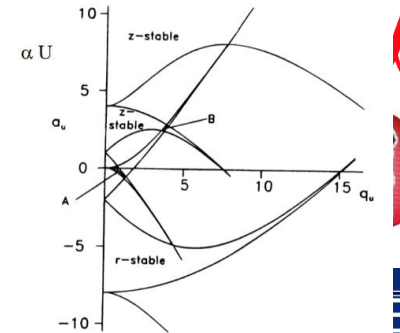
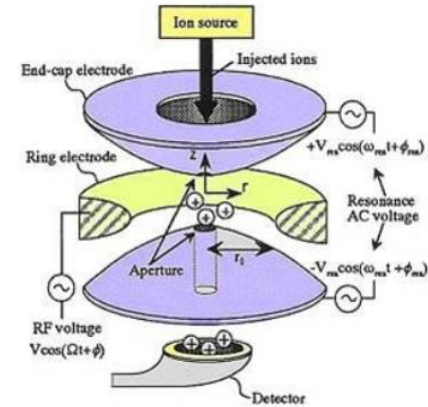
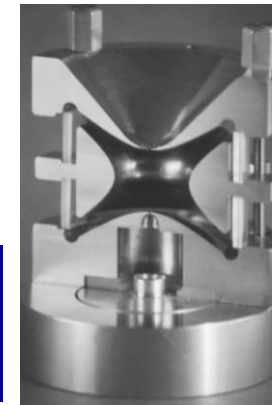
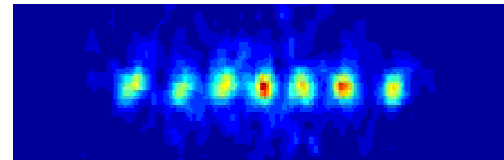
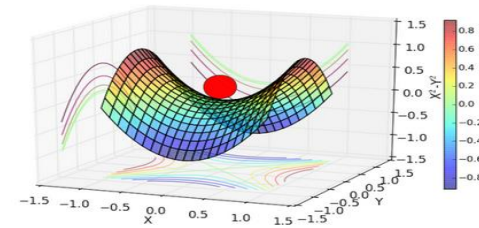
- Stosowane w pomiarach podstawowych wielkości, takich jak masa, moment magnetyczny itp.



- Pułapka Paula
- Dynamiczny potencjał

$$\phi_0(z, \rho) = C_2 \left(z^2 - \frac{\rho^2}{2} \right)$$

$$\phi(z, \rho, t) = \phi_0(z, \rho)(V_0 + U_0 \cos(\Omega t))$$



BARDZO DROGA

STOSUNKOWO TANIA





Pułapka Penninga

- Pułapkuje:**

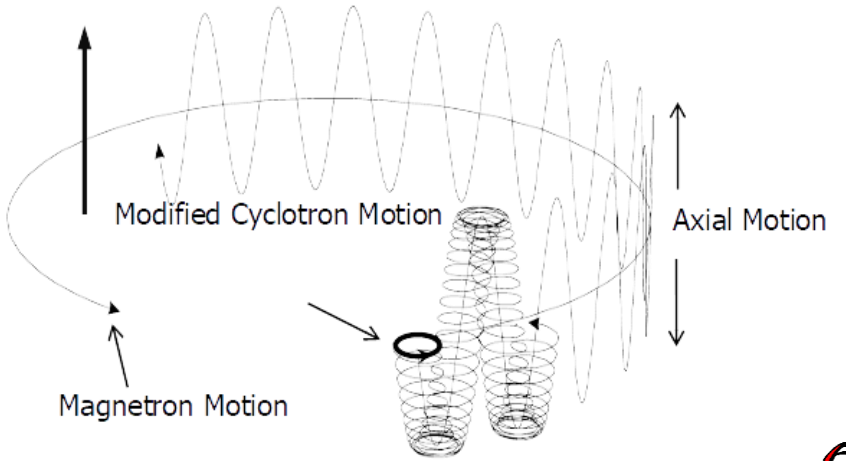
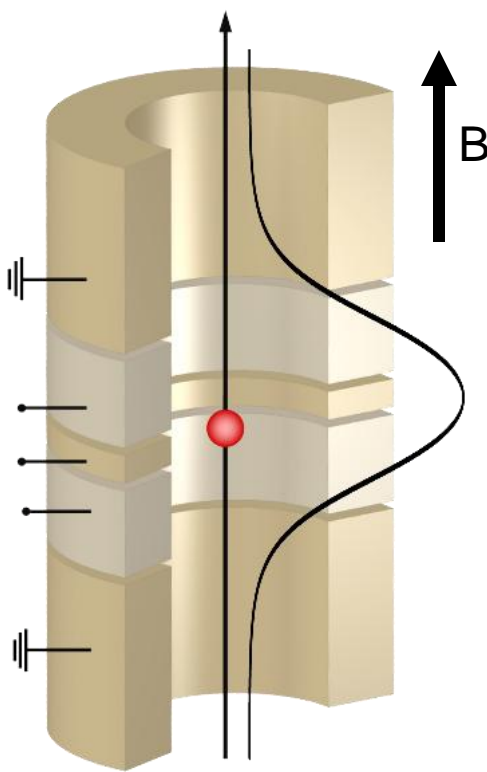
-> ograniczenie radialne: $\vec{B} = B_0 \hat{z}$

-> 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)

$$v_c = \sqrt{v_+^2 + v_z^2 + v_-^2} \longleftrightarrow v_c = \frac{1}{2\pi} \frac{q_{ion}}{m_{ion}} B$$



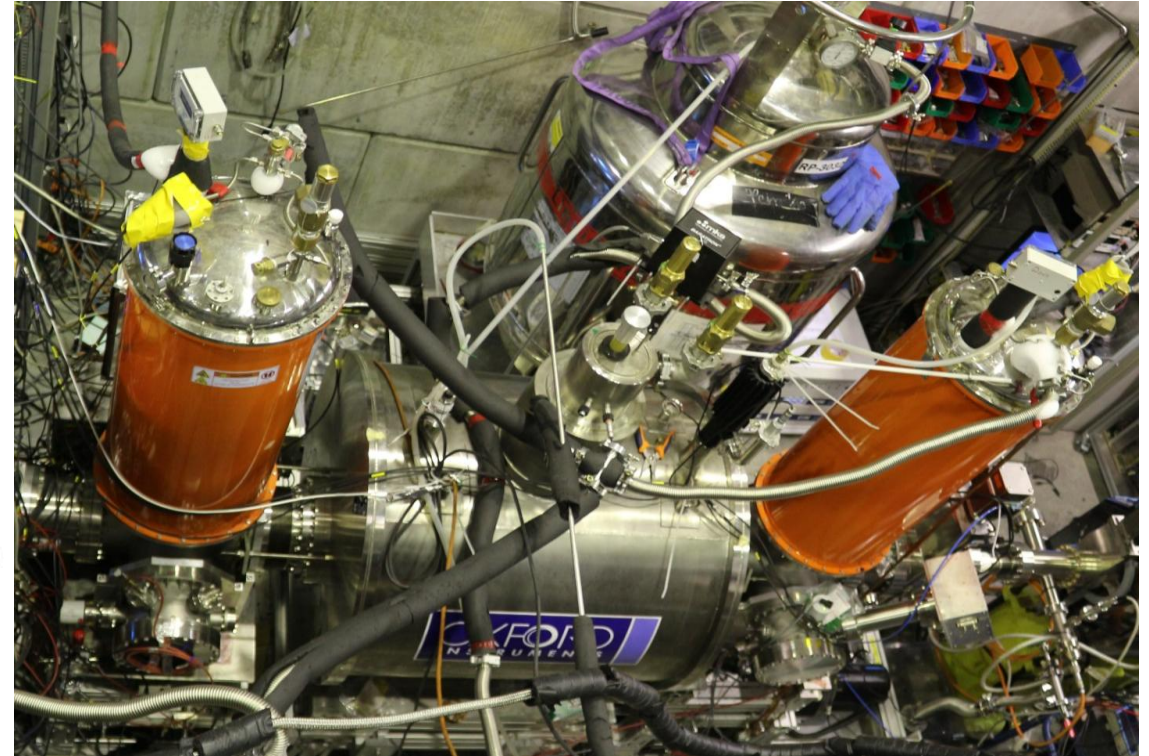
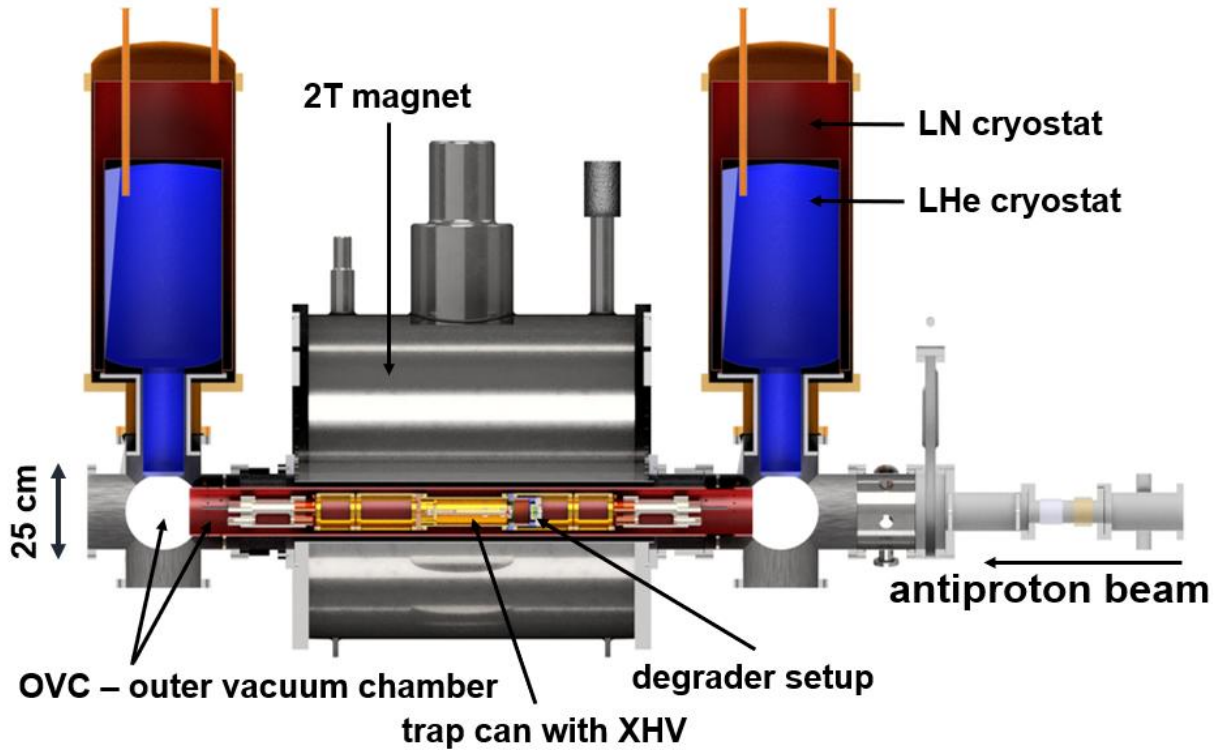
Axial	680 kHz	$v_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2C_2 q V_0}{m}}$
Magnetron	8 kHz	$v_- = \frac{1}{2} \left(v_c - \sqrt{v_c^2 - 2v_z^2} \right)$
Modified Cyclotron	28.9 MHz	$v_+ = \frac{1}{2} \left(v_c + \sqrt{v_c^2 - 2v_z^2} \right)$

Pojedyncza cząstka elementarna w pułapce Penninga to jeden z najprostszych układów, jaki można sobie wyobrazić!



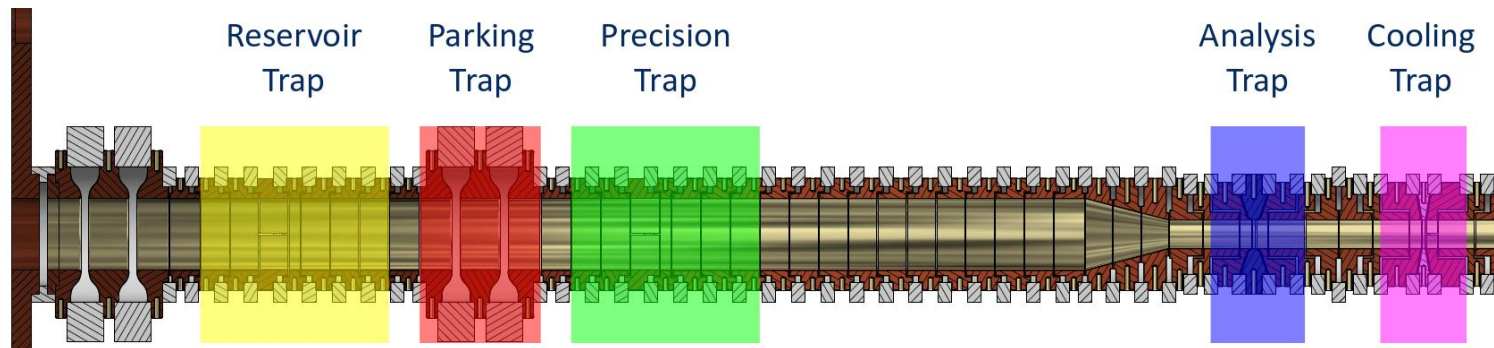
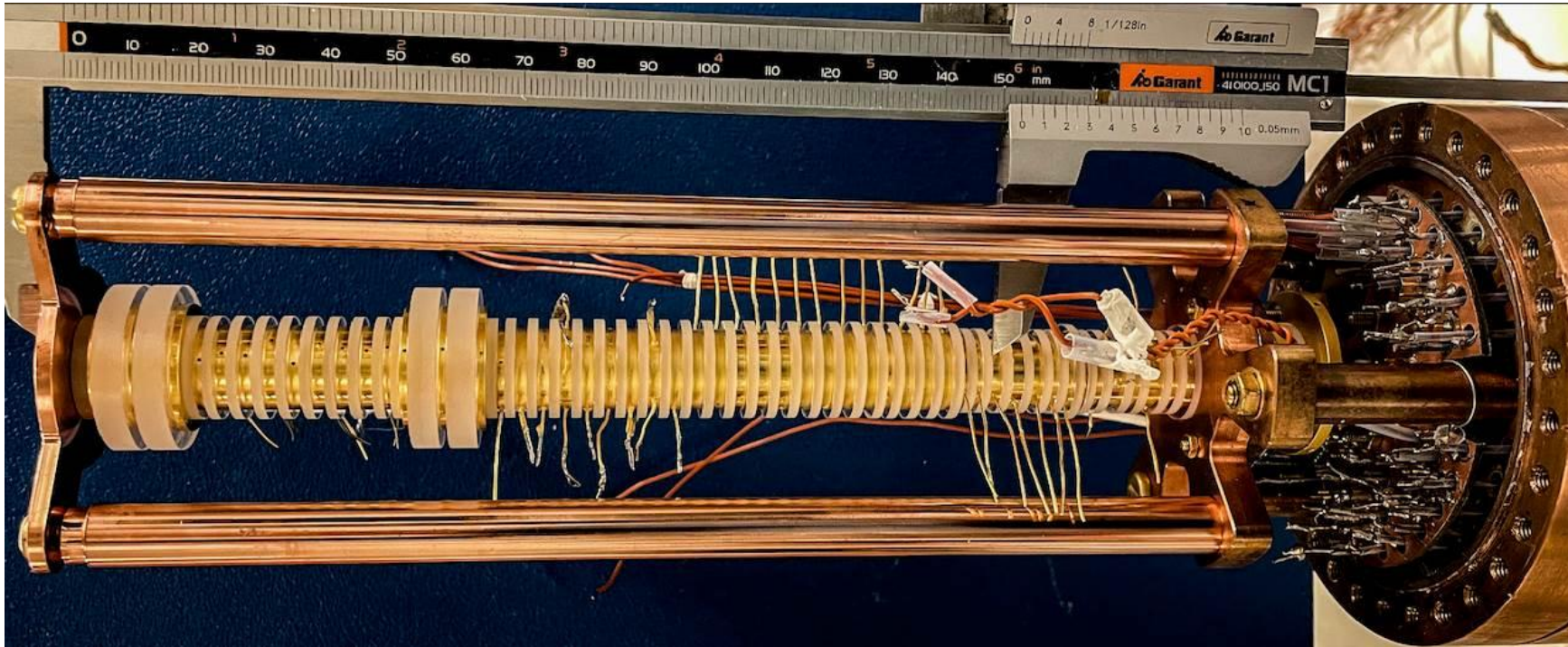


Pułapka Penninga – magnes nadprzewodzący





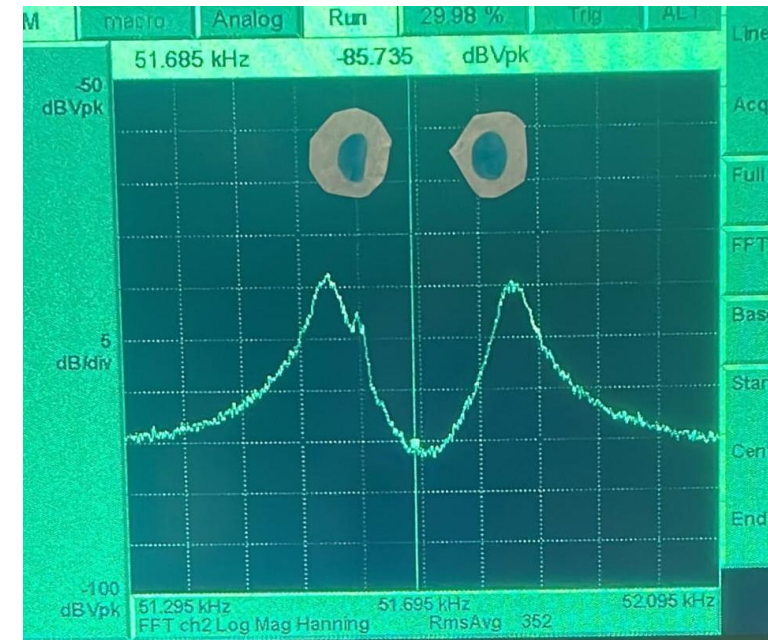
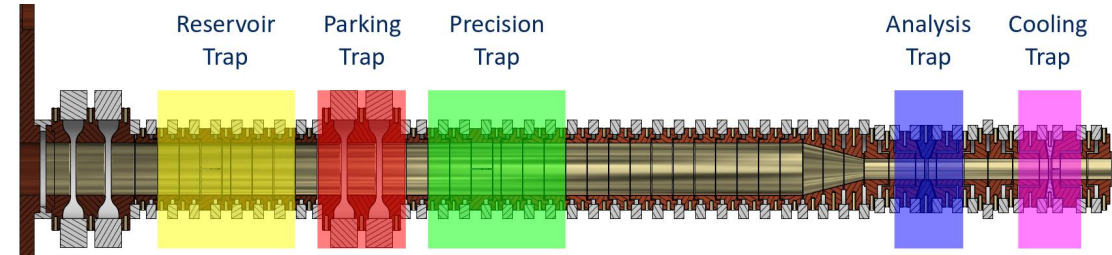
Typowy precyzyjny system pułapek Penninga





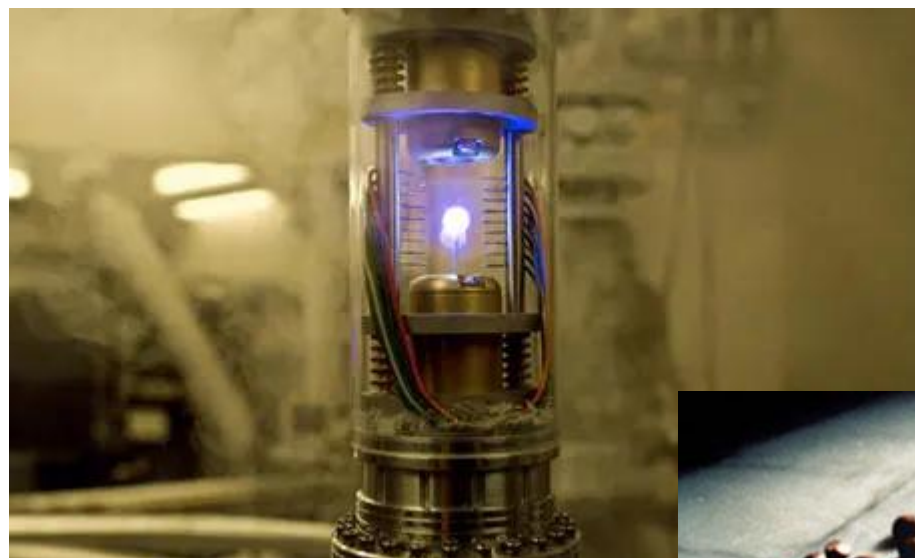
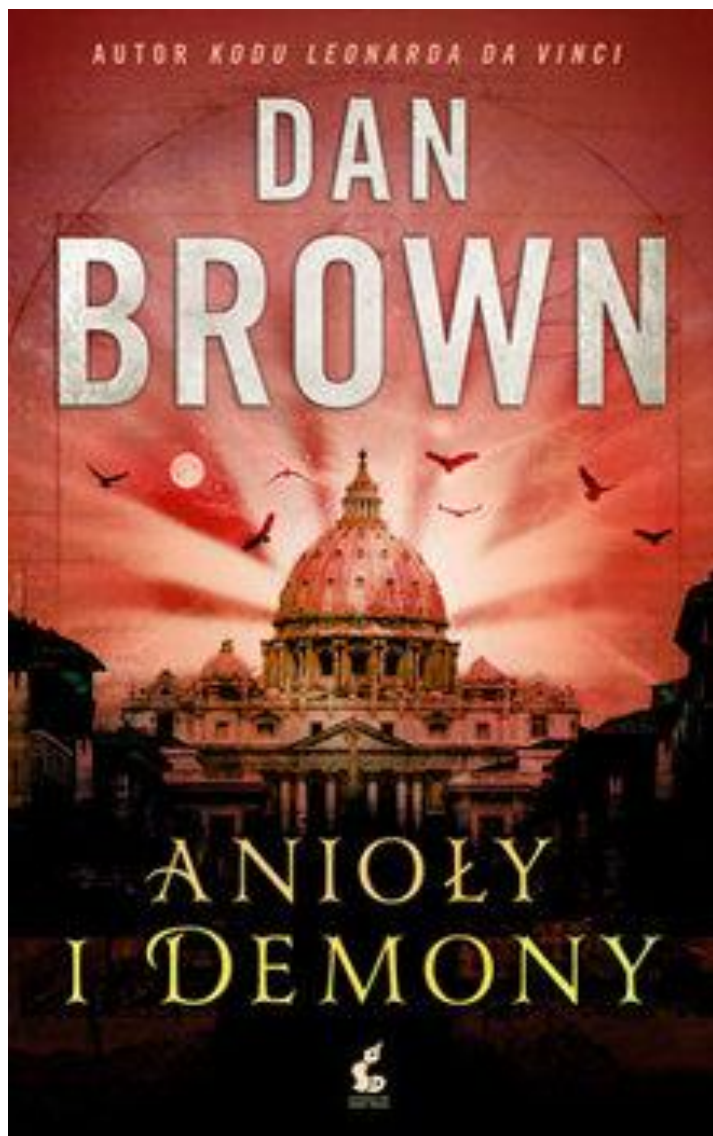
Specjalne miejsce (we Wszechświecie?) – zbiornik na antyprotony w BASE

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



Lokalny Wszechświat z Antymaterii	
objętość	0.0001 ³ m ³
Liczba barionów	1.65*10 ⁻⁷
Liczba antybarionów	100
Stosunek Antybariony/Bariony	5.9*10⁸



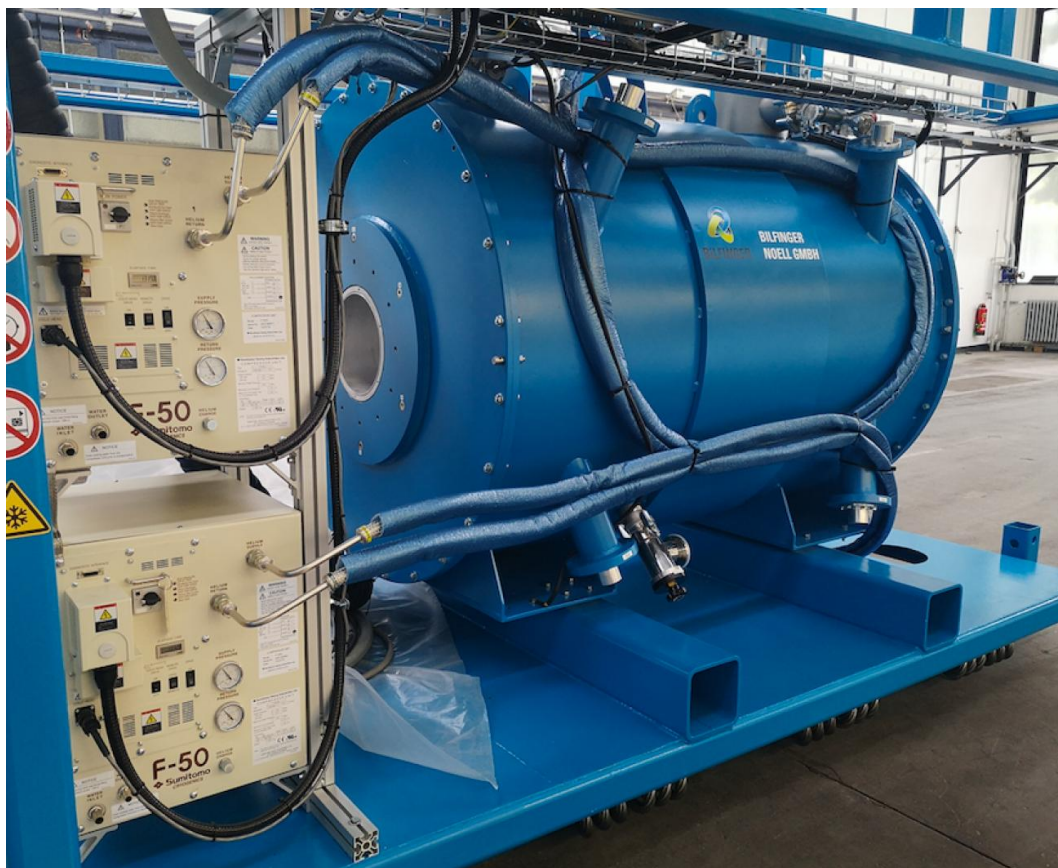


...ale w rzeczywistości cała wyprodukowana do tej pory antymateria podgrzałaby zaledwie jedną filiżankę kawy o 1 stopień Celsjusza.

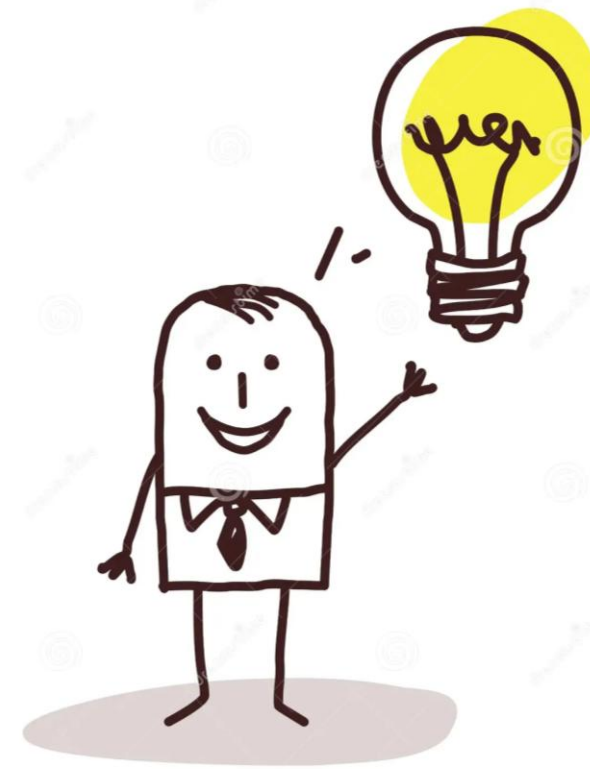


Transport Antymaterii

- Eksperymenty BASE-STEP i PUMA



Pytanie do was wszystkich:
Czy wiecie, jaki jest najdokładniejszy test
Modelu Standardowego?



Najbardziej precyzyjny test Modelu Standardowego

- W przypadku elektronu i pozytonu wartość $g/2$ różni się od przewidywanej wartości równania Diraca wynoszącej 1 o około jedną część na tysiąc ze względu na oddziaływania z fluktuującą próżnią kwantową (T. Aoyama, T. Kinoshita, and M. Nio, *Atoms* 7, 28 (2019)).

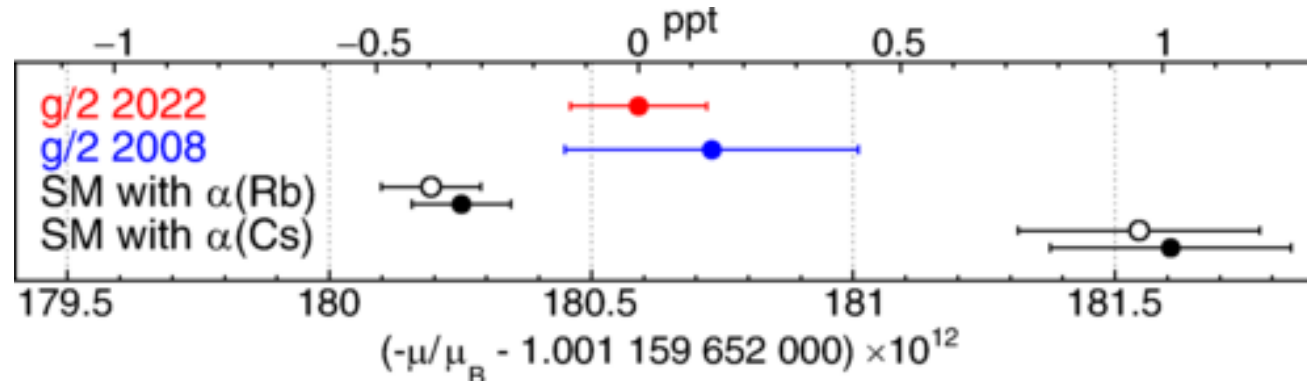
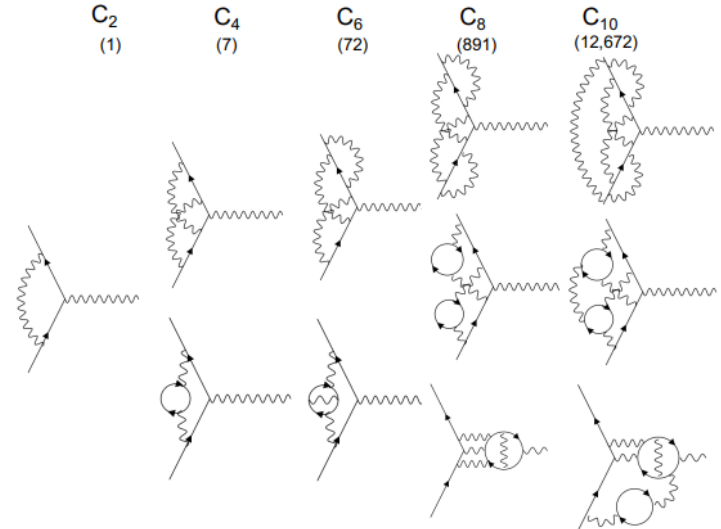
$$\frac{g}{2} = 1 + C_2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + C_4 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + C_6 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + C_8 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + C_{10} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 + \dots + a_{\mu, \tau} + a_{\text{hadron}} + a_{\text{weak}}$$

- Elektron $g/2$ jest najdokładniej mierzoną właściwością cząstki elementarnej, której wartość mierzona jest przez Northwestern / Harvard w 2023 (*Phys. Rev. Lett.* **130**, 071801):

$$\frac{g_{e^-}}{2} = 1.001\,159\,652\,180\,59(13) [0.13 \text{ ppt}],$$

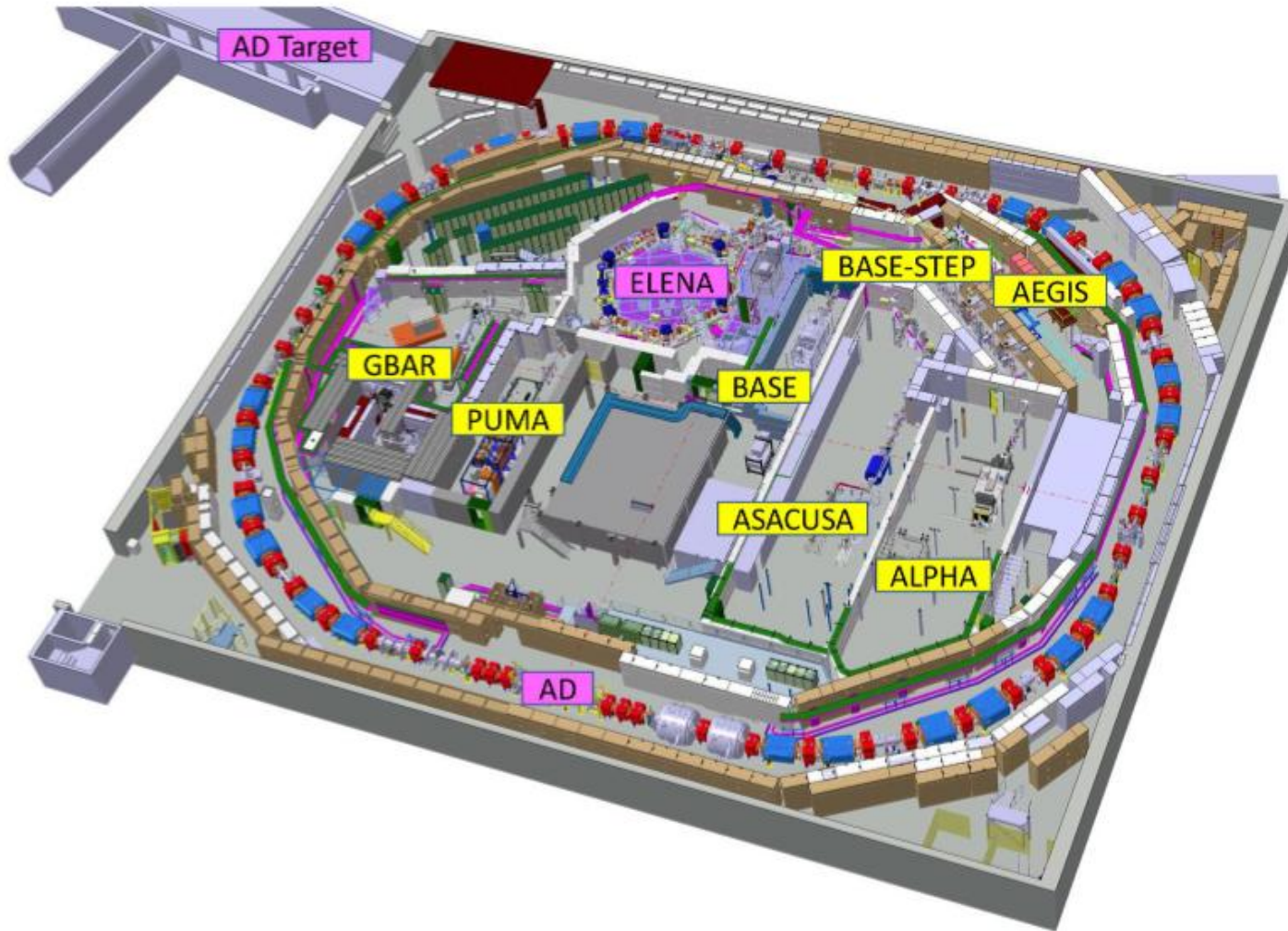
- W 1987 roku na Uniwersytecie Waszyngtońskim zmierzono pozyton $g/2$ z 33-krotnie mniejszą dokładnością:

$$\frac{g_{e^+}}{2} = 1.001\,159\,652\,187\,9(43)$$





Hala AD/ELENA



Antywodor

Spektroskopia

ALPHA,
Spektroskopia 1S-2S
antywodoru

ASACUSA, ALPHA
Spektroskopia GS-HFS w
antywodorze

Grawitacja

ALPHA, AEgIS, GBAR
Testy Słabej Zasady
Równoważności Swobodnego
Spadku

Antyprotony

Antyprotony

BASE, BASE-STEP
Fundamentalne właściwości
antyprotonów, Testy Słabej
Zasady Równoważności
Zegarów, badanie oddziaływań
ciemnej materii z antymaterią



Egzotyczne atomy

ASACUSA
Spektroskopia Antiprotonic
helium



Fizyka Jądrowa

PUMA
Rozpraszanie
antyprotonów/jąder w celu
badania skórek neutronowych



60 instytutów badawczych/universytetów – 350 naukowców – 6 aktywnych kolaboracji



Dziękuję bardzo za uwagę

- Podsumowanie wykładu:
 - Asymetria barionowo-antybarionowa jako motywacja do pomiaru podstawowych własności antimaterii.
 - Podejście fizyki wysokich energii kontra fizyki niskich energii.
 - Różne „proste” układy z antimaterii.
 - Produkcja pozytonów.
 - Produkcja antyprotonów.
 - Deceleratory antyprotonów.
 - Pułapkowanie cząstek, w szczególności pułapka Penninga.
 - Przechowywanie antyprotonów.
 - Transport antyprotonów.

