

# Исследование свойств антивещества в эксперименте BASE (ЦЕРН)

Соловьев В.М.

Семинар ОФВЭ

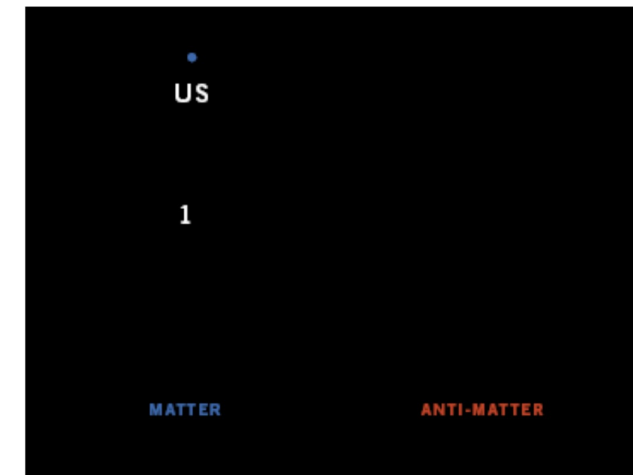
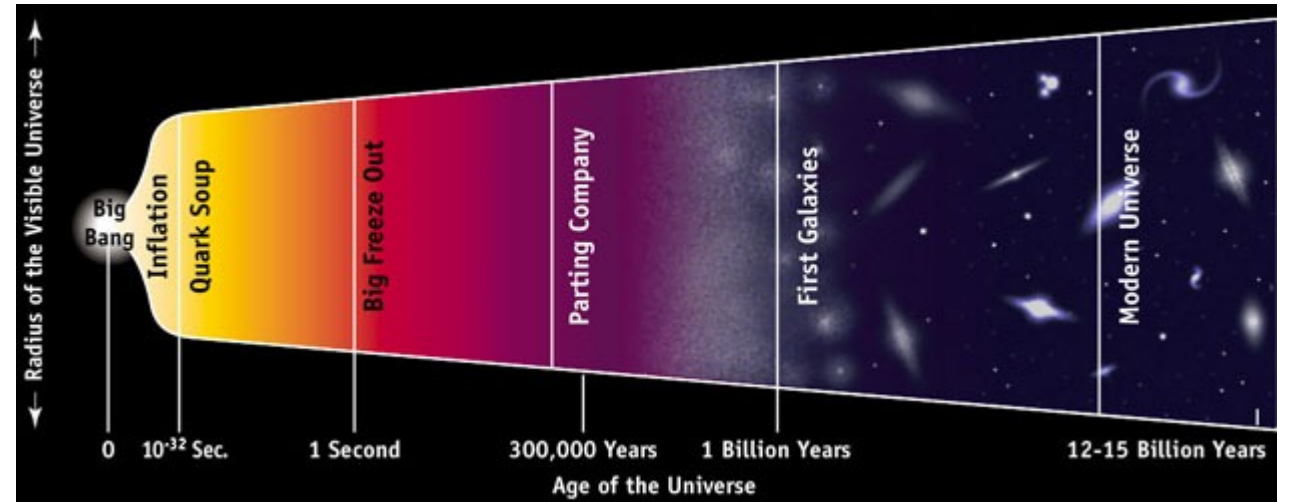
16 ноября 2021

# План доклада

- Мотивация
- История исследования антивещества
- Комплекс по изучению антивещества в ЦЕРН
- Эксперимент BASE
- Исследование свойств антипротонов
- Заключение

# Мотивация

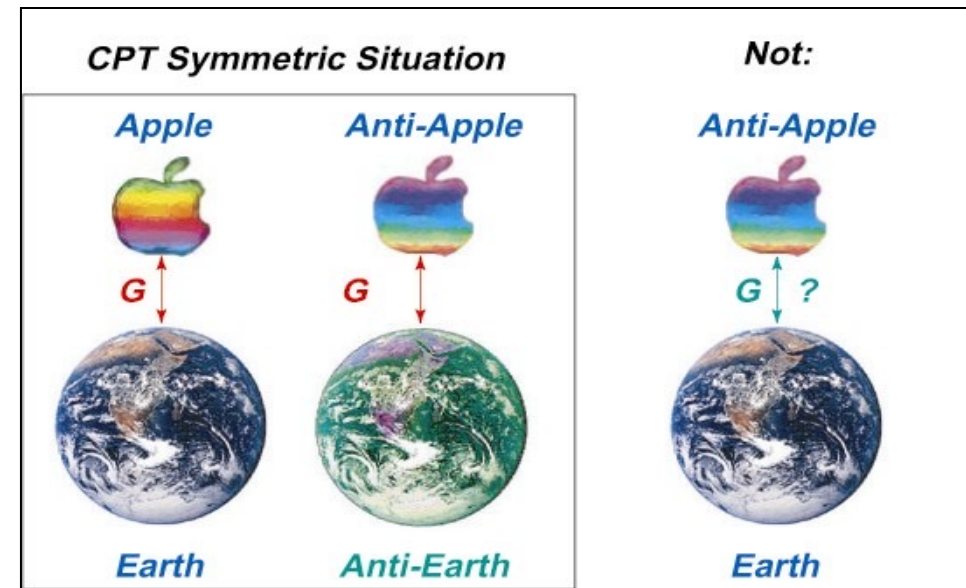
- Откуда возникла асимметрия вещества-антивещества во Вселенной?
- Есть ли фундаментальное отличие между веществом и антивеществом?
- Связь свойств частиц и античастиц:
  - CPT-инвариантность
  - Равенство инертной и гравитационной масс (Weak Equivalence Principle - WEP)



# CPT-инвариантность и WEP

- CPT-теорема утверждает, что зарядовое сопряжение, пространственная инверсия и обращение времени оставляют физические законы неизменными
- Как следствие:
  - частицы и античастицы должны иметь равные  $m, \tau, |q|, |\mu|$
  - спектры атомов и антиатомов должны совпадать

- WEP - равенство инертной и гравитационной масс  $m_I = m_G$
- Из CPT-теоремы следует, что  $m_I = \bar{m}_I$
- Как соотносятся между собой  $m_G$  и  $\bar{m}_G$ ?
- Если  $m_G \neq \bar{m}_G$ , то либо нарушена CPT-инвариантность, либо WEP

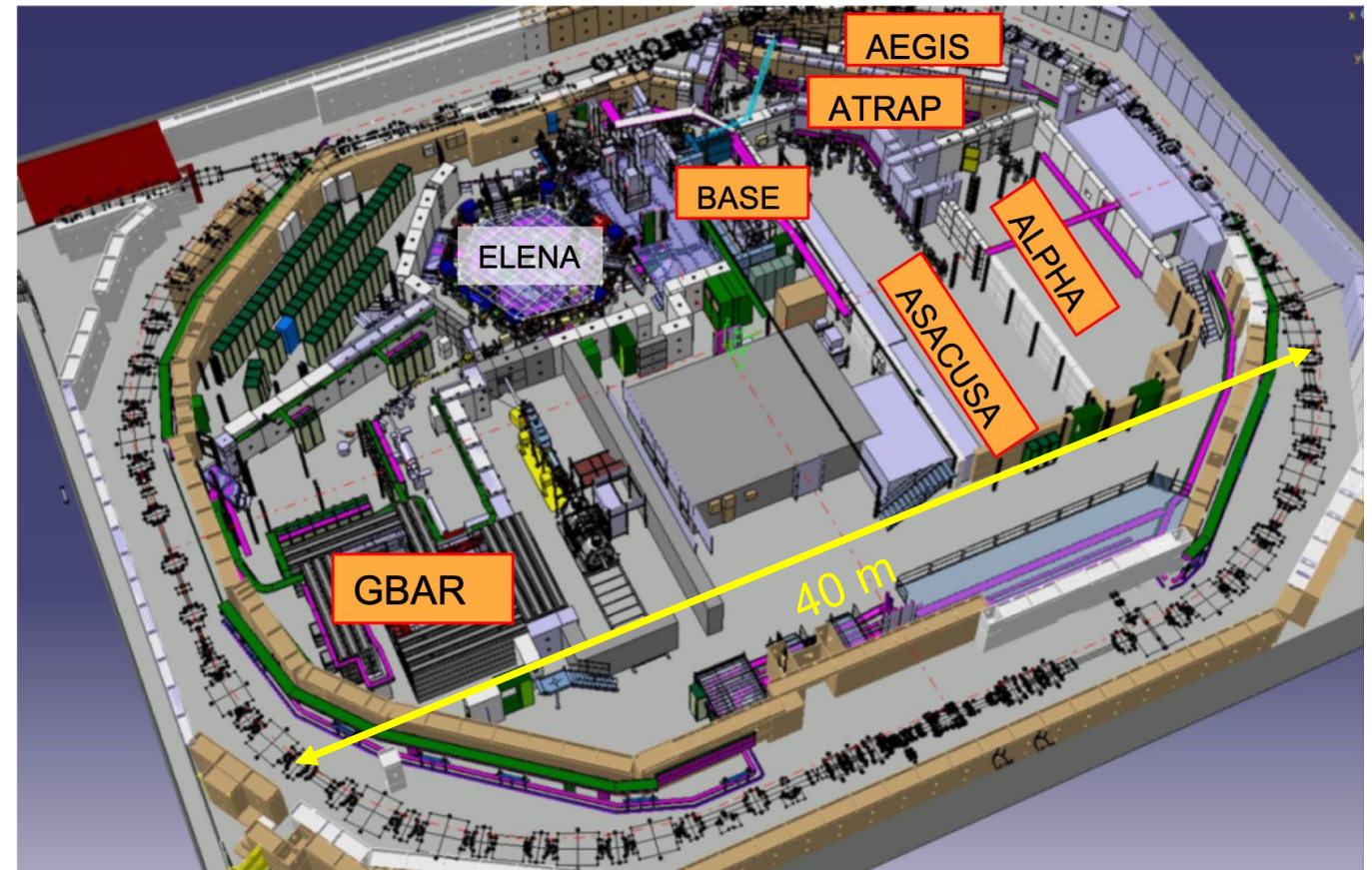


# Антивещество: от гипотезы до наблюдения

- 1928 г. – уравнение Дирака, которое имеет два решения: одно для электрона, другое для позитрона (Нобелевская премия 1933 г.)
- 1932 г. – открытие позитрона в космических лучах (К. Андерсон – Нобелевская премия 1936 г.)
- 1955 г. – открытие антипротона на ускорителе Беватрон (Э. Сегре, О. Чемберлен – Нобелевская премия 1959 г.)
- 1956 г. – открытие антинейтрона на ускорителе Беватрон
- 1964 г. – открытие нарушения CP-симметрии в распадах нейтральных каонов (Д. Кронин, В. Фитч - Нобелевская премия 1980 г.)
- 1965 г. – открыт антидейтрон в ЦЕРН (А. Дзикаки) и BNL (Л. Ледерман)
- 1978 г. – антипротоны циркулировали на протяжении на протяжении 85 часов в эксперименте ICE (Initial Cooling Experiment) в ЦЕРН
- 1981 г. – первые протон-антипротонные соударения на ускорителе ISR в ЦЕРН
- 1995 г. – впервые получены атомы антиводорода на LEAR в ЦЕРН
- 1997 г. – утвержден проект Antiproton Decelerator (AD) в ЦЕРН
- 2002 г. – эксперименты ATHENA и ATRAP на AD получили «холодное» антивещество
- 2011 г. – удержание ~300 атомов антиводорода более 16 минут в эксперименте ALPHA

# Комплекс по изучению антивещества в ЦЕРН

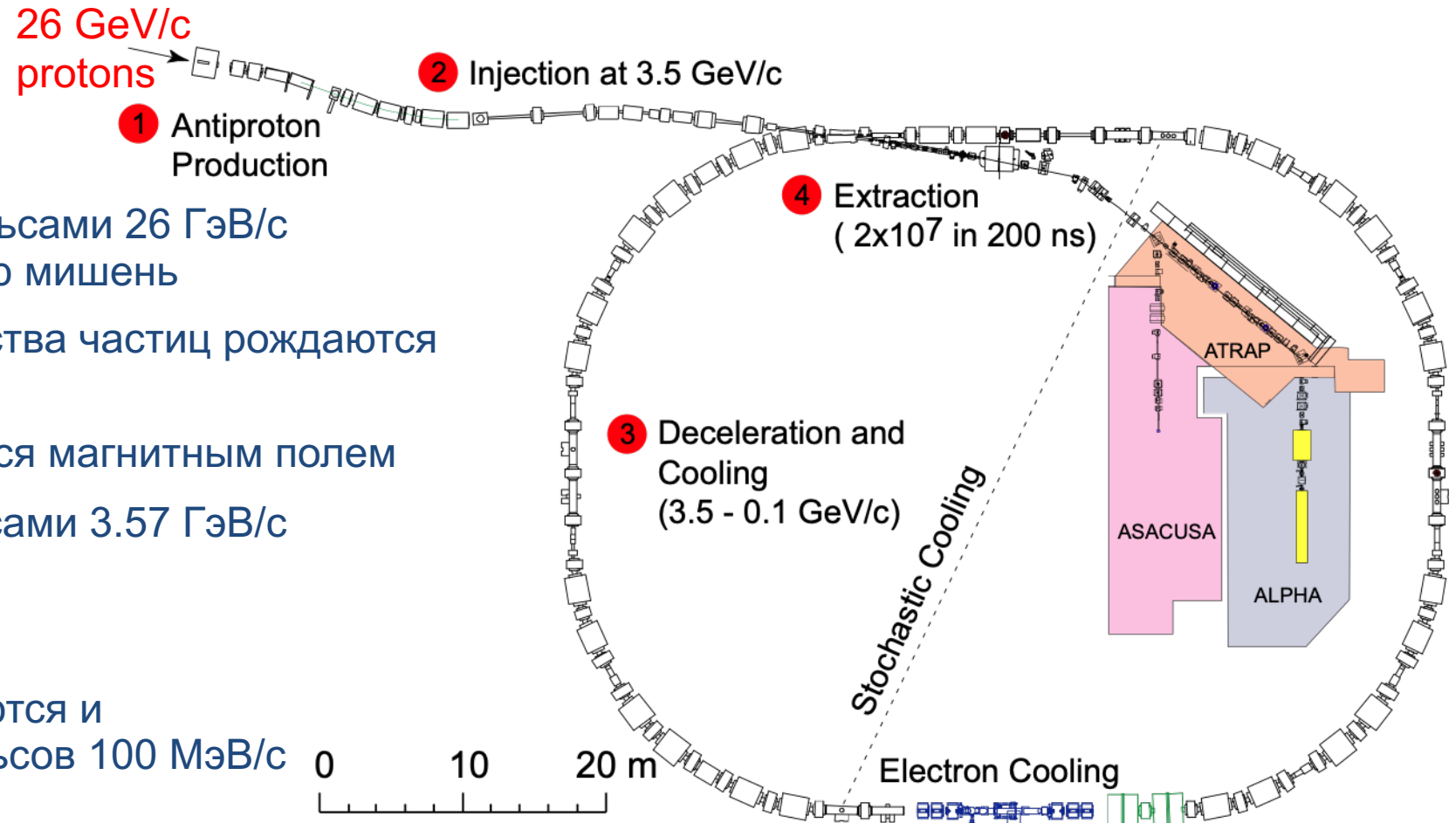
- Antiproton Decelerator (AD) был запущен в 2000 г.
- Работают несколько экспериментов
- Свойства антипротона: **BASE**
- Спектроскопия антиводорода (1S-2S): **ALPHA**
- Изучение сверхтонкой структуры антиводорода: **ALPHA, ASACUSA**
- Спектроскопия антипротонного гелия: **ASACUSA**
- Гравитационные эксперименты с антиводородом: **ALPHA, AEGIS, GBAR**



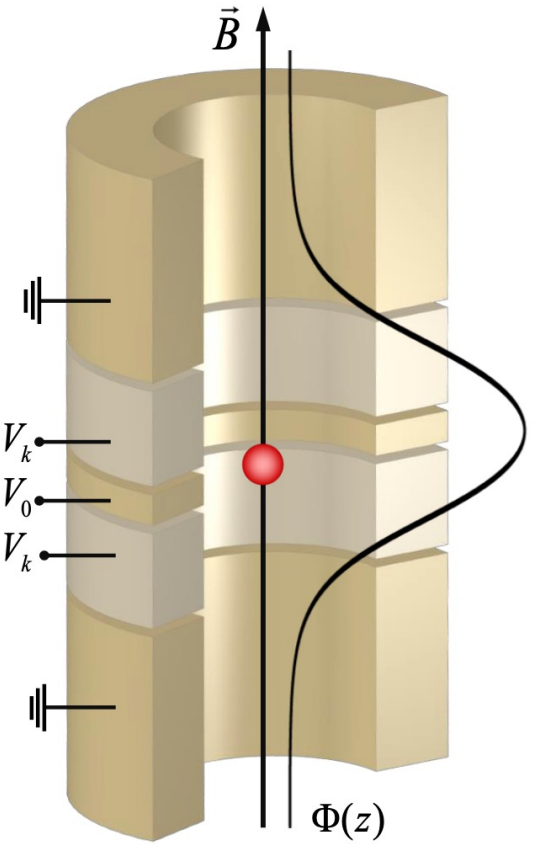


# Комплекс по изучению антивещества в ЦЕРН

- Протоны из PS с импульсами 26 ГэВ/с попадают на иридиевую мишень
- При этом среди множества частиц рождаются антипротоны
- Антипротоны отбираются магнитным полем
- Антипротоны с импульсами 3.57 ГэВ/с инжектируются в AD
- $\sim 4 \cdot 10^{-6} \bar{p}/p$
- Антипротоны охлаждаются и замедляются до импульсов 100 МэВ/с (кин. энергий 5.3 МэВ)
- Эксперименты могут захватить антипротоны с кинетическими энергиями  $< 10$  кэВ
- В экспериментах используются фольги для замедления. При этом 99% пучка теряется



# Ловушка Пеннинга – основной инструмент для исследований



$\vec{B} = B_0 \vec{e}_z$  ( $B_0 = 1.945$  Тл) **BASE**

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

аксиальная частота:  $\nu_z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2C_2 V_0} \frac{q}{m}$

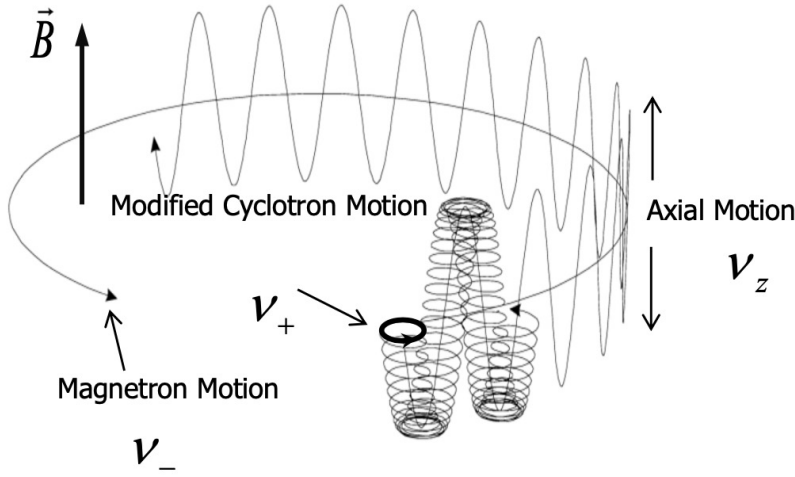
модифицированная циклотронная частота:  $\nu_+ = \frac{1}{2} \left( \nu_c + \sqrt{\nu_c^2 - 2\nu_z^2} \right)$

магнетронная частота:  $\nu_- = \frac{1}{2} \left( \nu_c - \sqrt{\nu_c^2 - 2\nu_z^2} \right)$

$\nu_c^2 = \nu_+^2 + \nu_-^2 + \nu_z^2$



циклотронная частота:  $\nu_c = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{q}{m} \right) B_0$



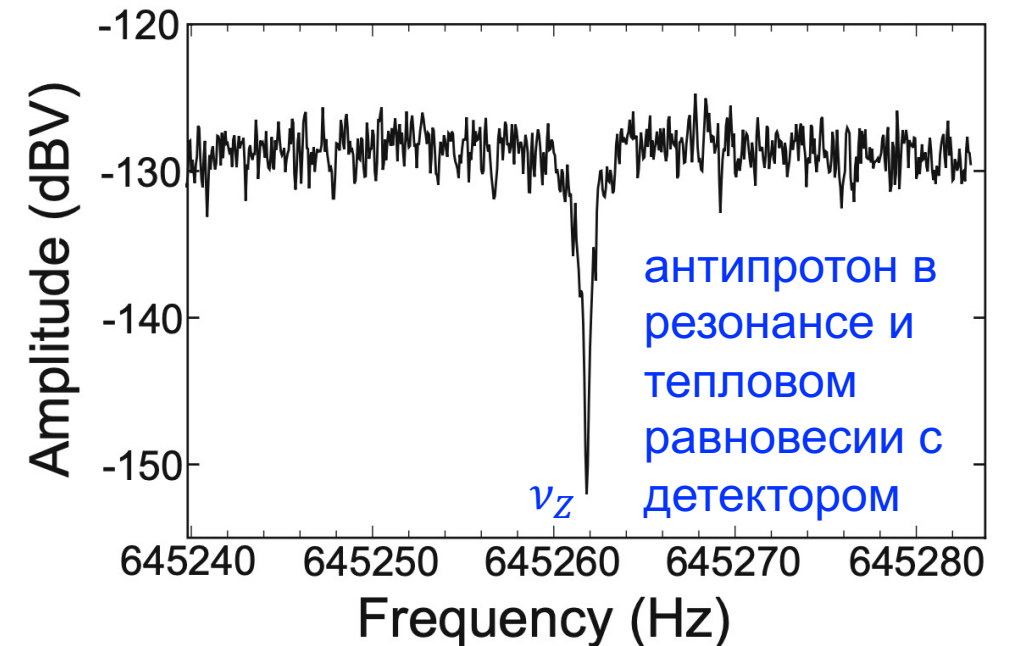
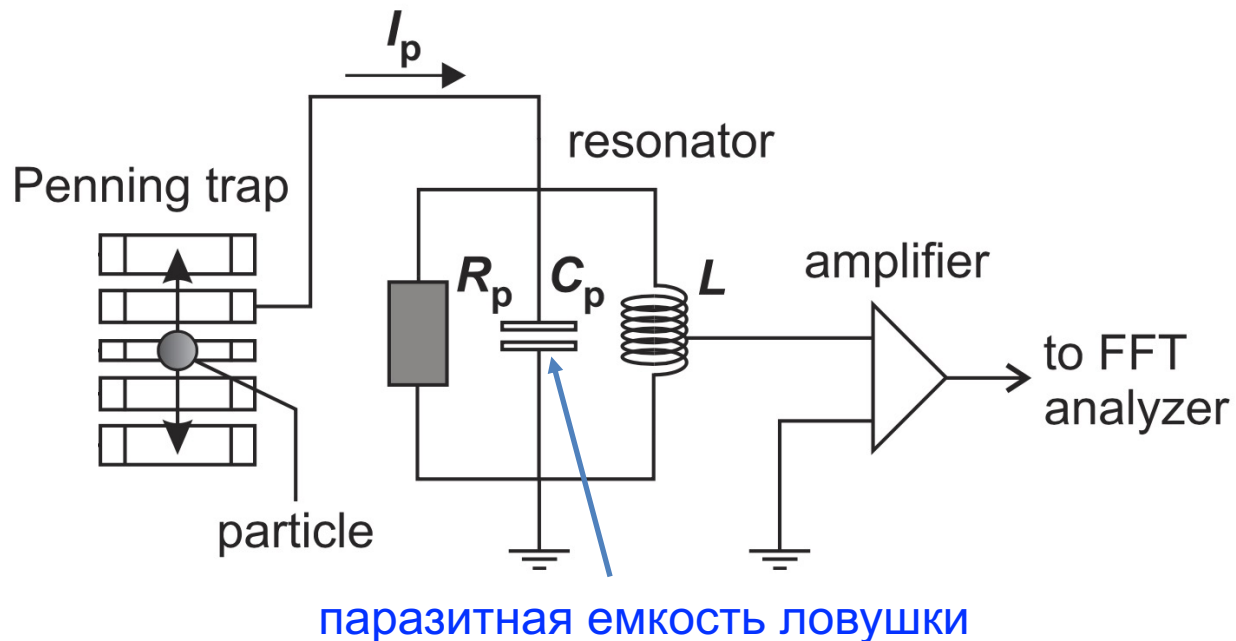
**BASE** →

$\nu_+ \approx 29.65$ MHz	$\nu_z \approx 540 \div 680$ kHz	$\nu_- \approx 7$ kHz
---------------------------	----------------------------------	-----------------------

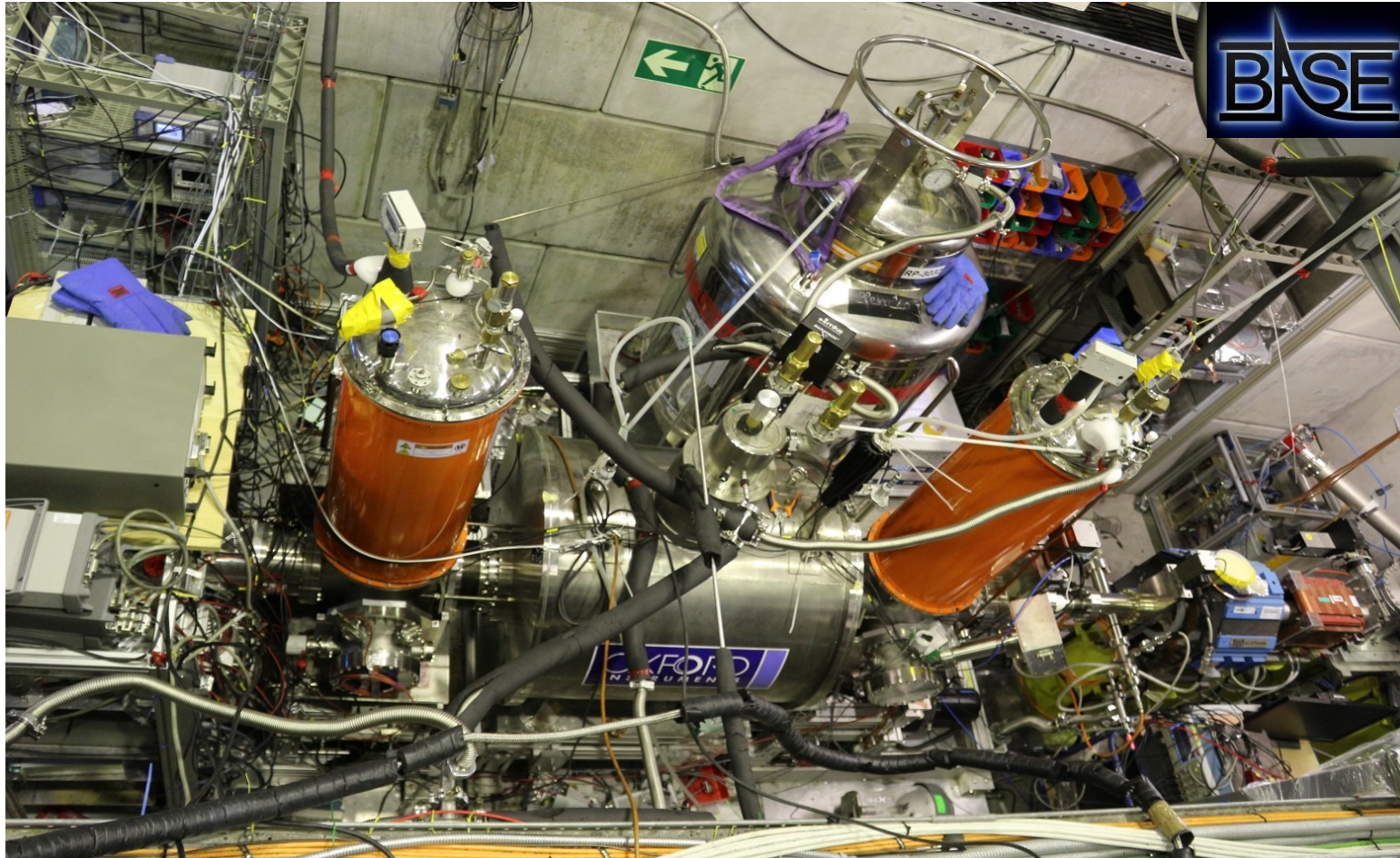


# Измерение частот

- Движение частиц наводит слабые токи ( $\sim$  фА) на электродах ловушки
- Для измерения используется детектирующая система, состоящая из сверхпроводящего контура, малошумящего усилителя и Фурье преобразователя
- Снимается спектр теплового шума детектора



# Эксперимент BASE



Задачи:

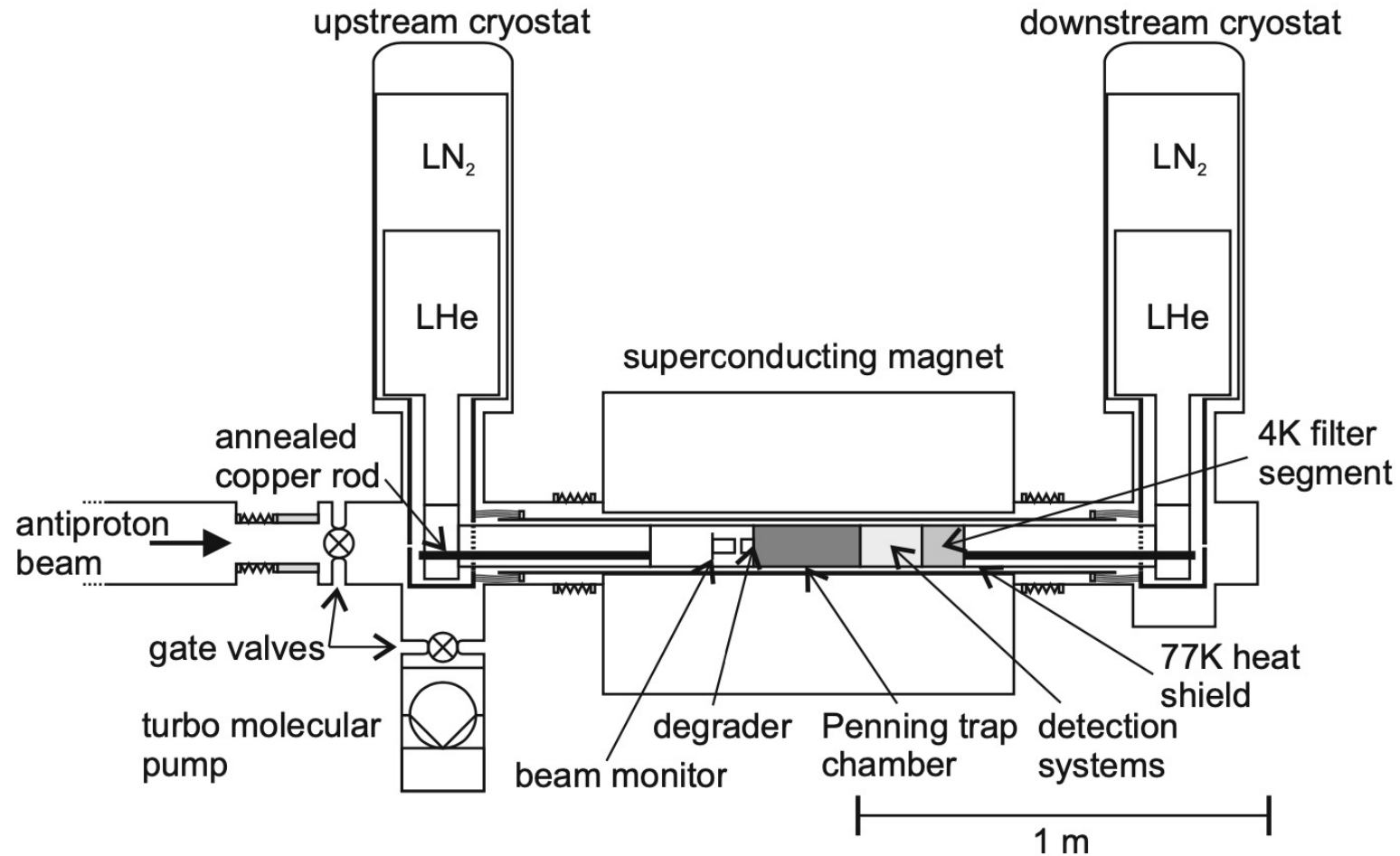
- Точное измерение отношения  $q/m$  для антипротона
- Точное измерения магнитного момента антипротона

Коллаборация ~ 23 чел.

BASE (CERN) – эксперименты с антипротонами

BASE (Mainz) – эксперименты с протонами

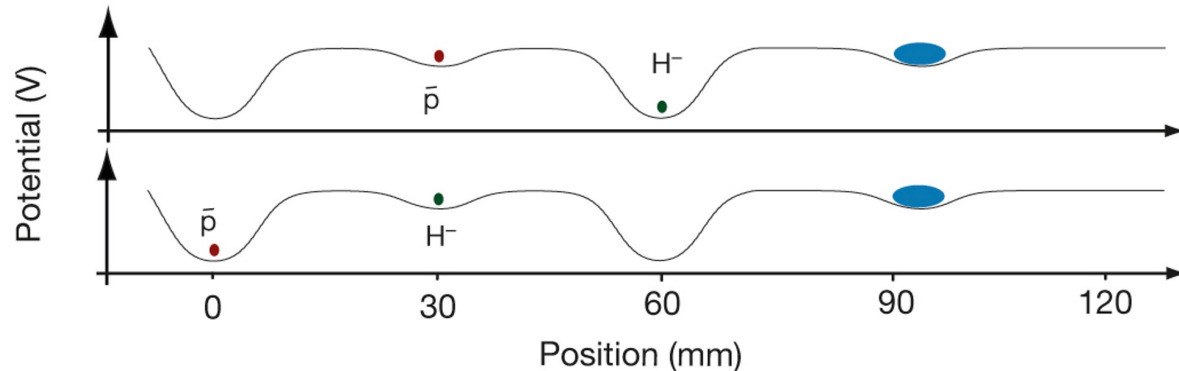
# Экспериментальная установка



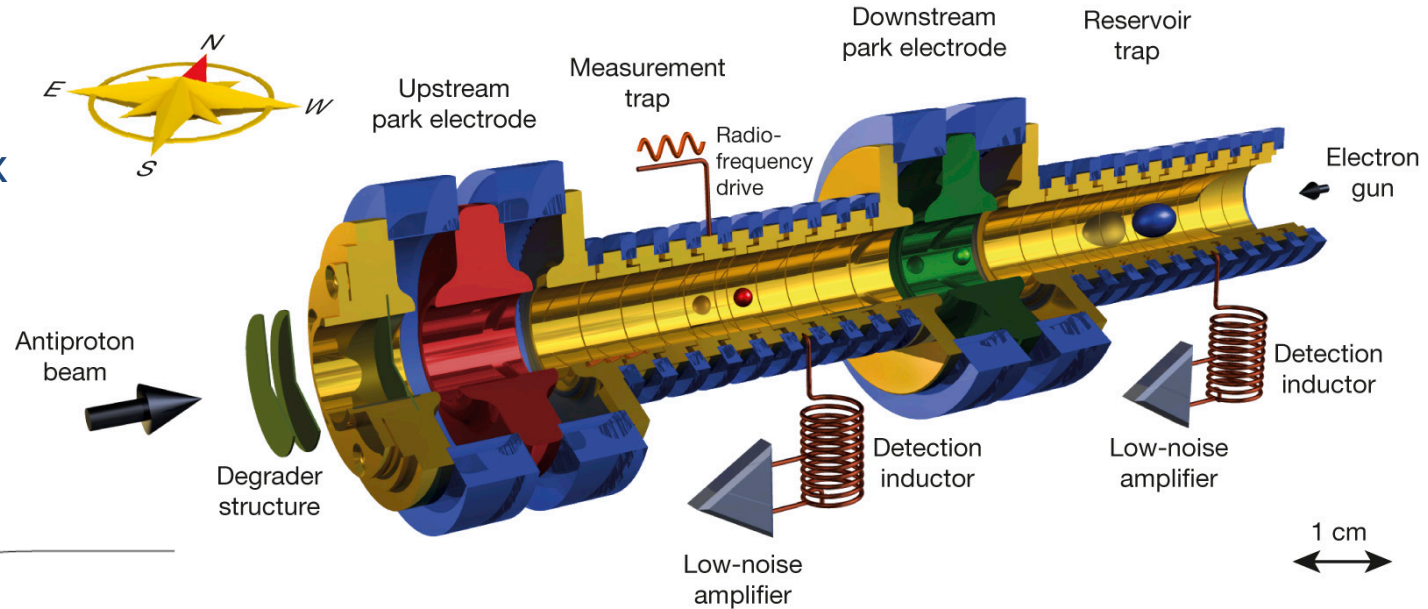


# Сравнение $q/t$ для $p$ и $\bar{p}$

- Наиболее точная проверка СРТ
- Измерялось отношение циклотронных частот  $\nu_c = (qB_0)/(2\pi t)$  для  $p$  и  $\bar{p}$
- Вместо  $p$  был взят ион  $H^-$  – не нужно менять полярность



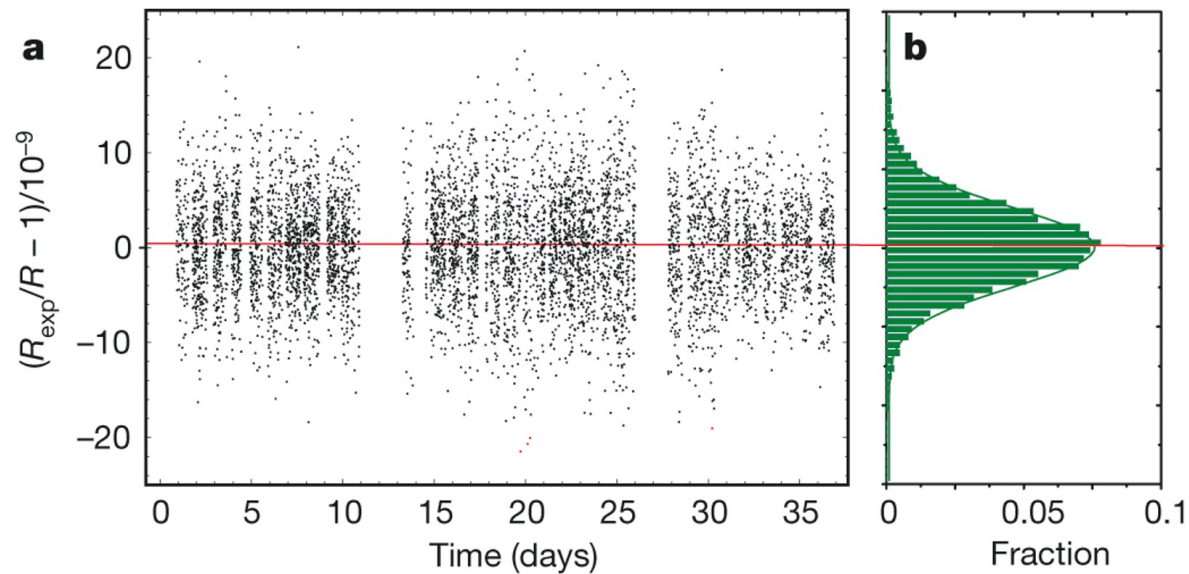
- Длительность цикла измерения 220-240 с



- Измерения проводились при тепловом равновесии с установкой при  $\sim 5$  К
- Последовательно измерялись частоты  $\nu_z$  и  $\nu_+$
- $\nu_-$  определялась как  $\nu_- \approx \nu_z^2 / 2\nu_+$

# Сравнение $q/m$ для $p$ и $\bar{p}$

- Проведено 6521 измерение за 35 дней



- Наблюдается сохранение CPT-симметрии с точностью:

- Измерялась величина:

$$R_{exp} = \frac{v_{c,\bar{p}}}{v_{c,H^-}} = \frac{(q/m)_{\bar{p}}}{(q/m)_{H^-}}$$

- Окончательно:

$$R_{exp,c} = 1.001089218755(69)$$

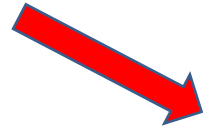


$$\frac{(q/m)_{\bar{p}}}{(q/m)_p} - 1 = 1(69) \times 10^{-12}$$

# Измерение $\mu_{\bar{p}}$

- Магнитный момент антипротона:

$$\mu_{\bar{p}} = -\frac{g_{\bar{p}}}{2} \mu_N \quad \mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$



- Циклотронная частота:

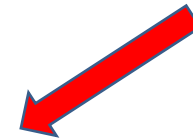
$$\nu_c = \frac{1}{2\pi} \frac{e}{m_{\bar{p}}} B_0$$



$$\frac{\nu_L}{\nu_c} = \frac{g_{\bar{p}}}{2} = -\frac{\mu_{\bar{p}}}{\mu_N}$$

- Ларморовская частота:

$$\nu_L = \frac{g_{\bar{p}}}{2\pi} \frac{e}{2m_{\bar{p}}} B_0$$



- Таким образом, измеряя  $\nu_c$  и  $\nu_L$ , можно измерить магнитный момент антипротона в единицах ядерного магнетона
- Трудность точного измерения  $\mu_{\bar{p}}$  заключается в его малости (в  $\sim 660$  раз меньше  $\mu_{e^+}$ )



# Измерение $\mu_{\bar{p}}$

- Для измерения  $\nu_L$  используется эффект Штерна-Герлаха
- Для это создается магнитное поле:

$$B_z(\rho, z) = B_0 + B_2(z^2 - \rho^2/2)$$

- Потенциал  $\Phi = -\vec{\mu}_{\bar{p}}\vec{B}(z)$  добавляется к электростатическому потенциалу ловушки

- Это связывает магнитный момент антипротона  $\vec{\mu}_{\bar{p}}$  (а значит и его спиновое состояние) с аксиальной частотой  $\nu_z$

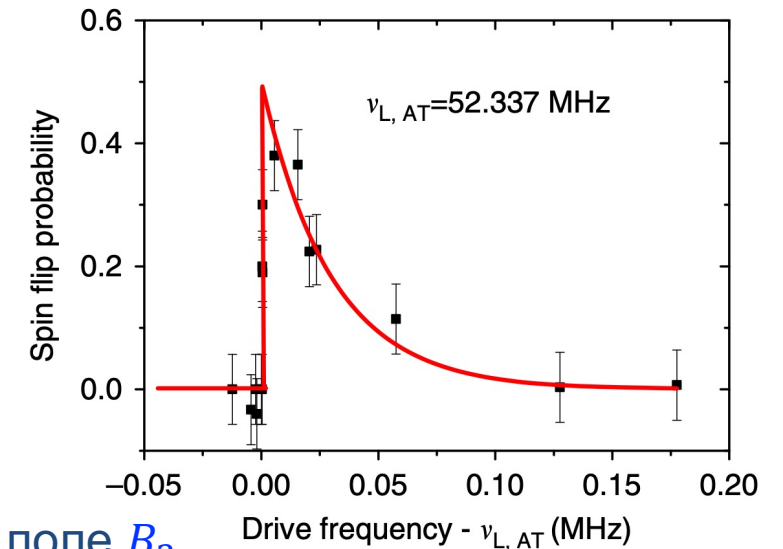
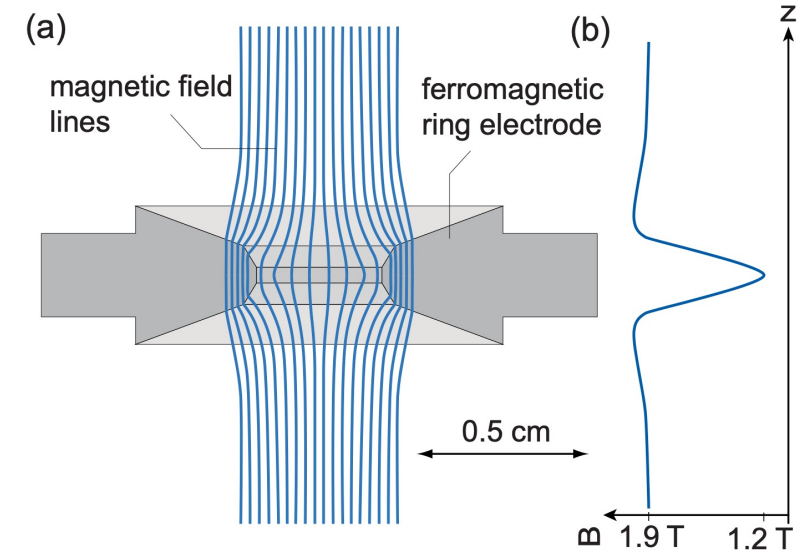
- При воздействии на антипротон внешним магнитным полем с частотой близкой к  $\nu_L$  возникает переворот спина (spin-flip)

- Переворот спина приводит к изменению частоты  $\nu_z$ :

$$\Delta\nu_{z,SF} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\mu_{\bar{p}}B_2}{m_{\bar{p}}\nu_z}$$

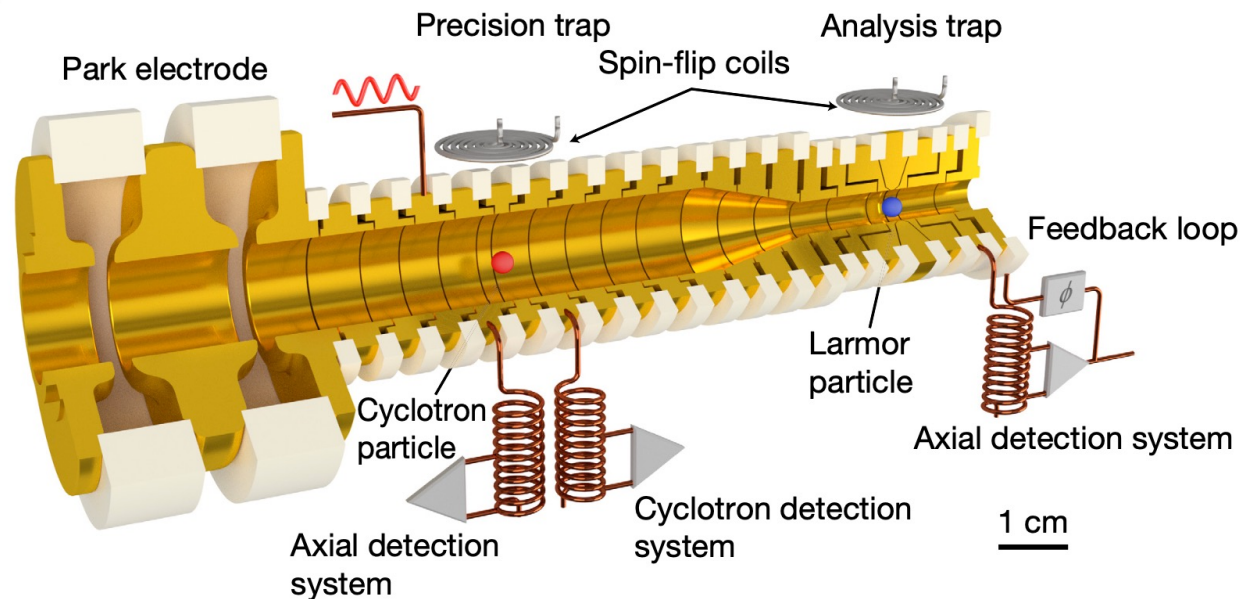
- Антипротон обладает малым  $\mu_{\bar{p}}$ . Необходимо сильное магнитное поле  $B_2$

$B_2 = 272 \text{ kT/m}^2$	$\nu_z \approx 675 \text{ kHz}$	$\Delta\nu_{z,SF} \approx 172 \text{ mHz}$
----------------------------	---------------------------------	--



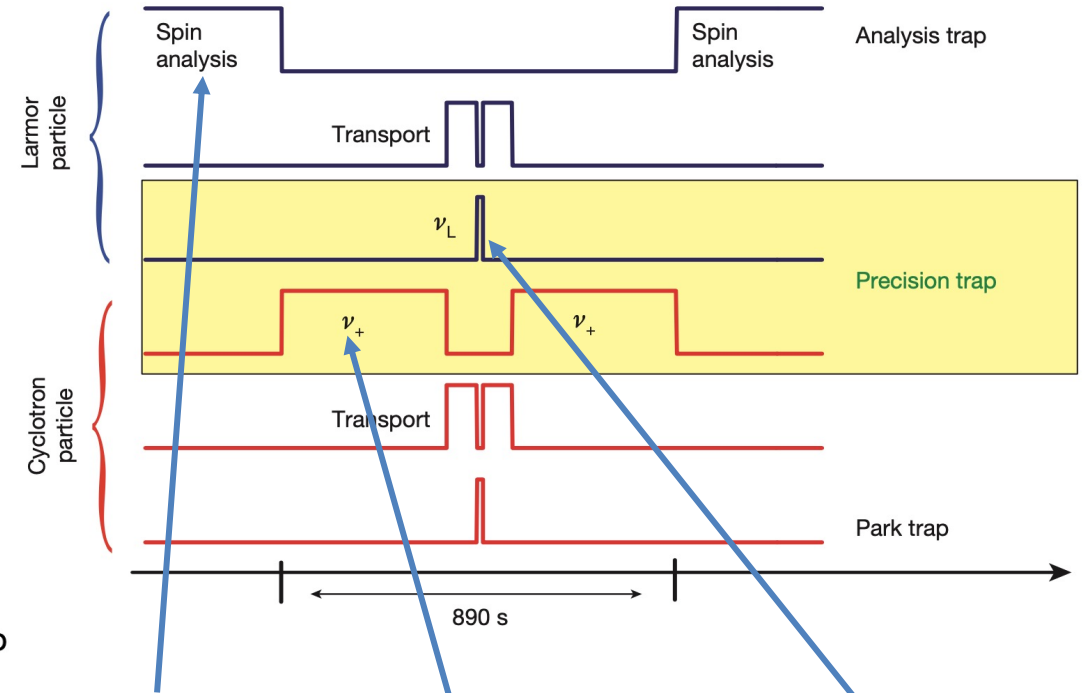
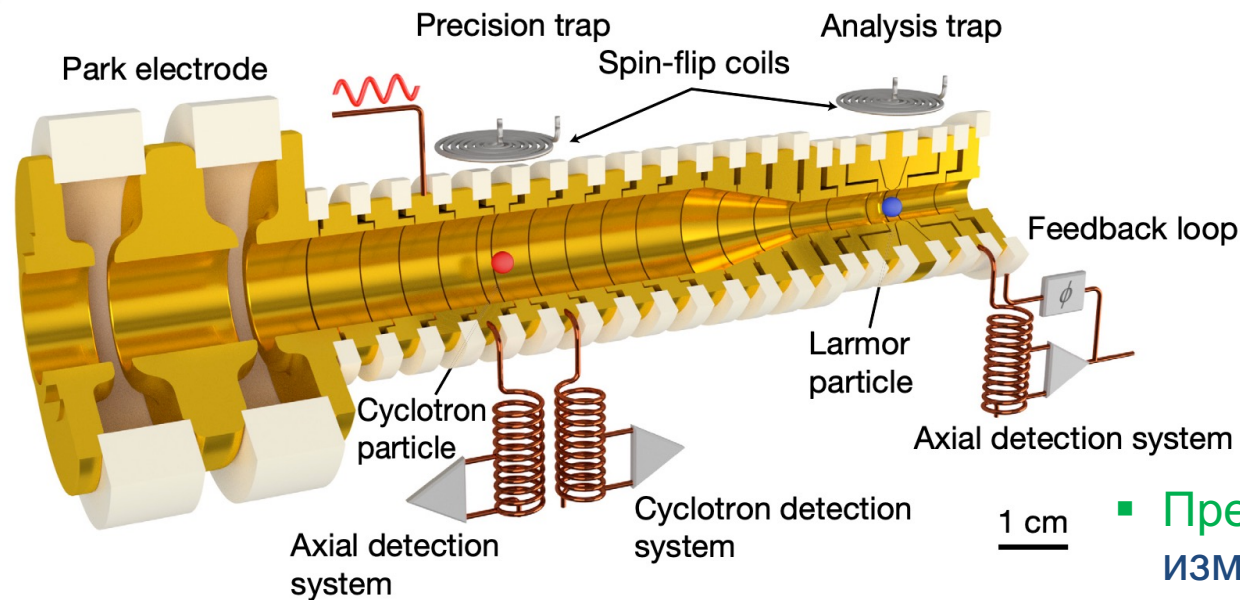
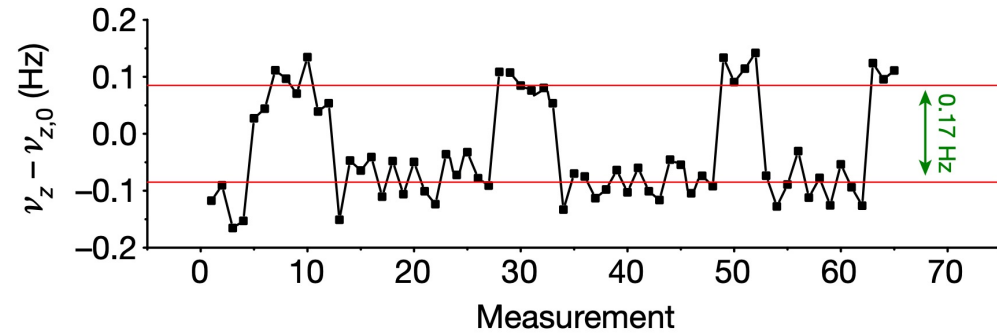
# Измерение $\mu_{\bar{p}}$

- Двойная ловушка Пеннинга – состоит из Precision trap (PT) и Analysis trap (AT)
- Однородное магнитное поле  $B_0$  в PT, неоднородное  $B_z(z) = B_0 + B_2 z^2$  в AT



- **Особенность:** используется 2 антипротона
- Холодный антипротон ( $E_+/k_B < 0.05 K$ ) в AT
- Горячий антипротон ( $E_+/k_B \approx 350 K$ ,  $E_-/k_B \approx 90 mK$ ) в PT
- **Преимущество:** метод позволяет сократить время измерения в  $\sim 3$  раза
- **Недостаток:** измерения проводятся с частицами при разных энергиях  $E_+$  и  $E_-$  – дополнительная систематика

# Измерение $\mu_{\bar{p}}$



Определение  
спинового  
состояния

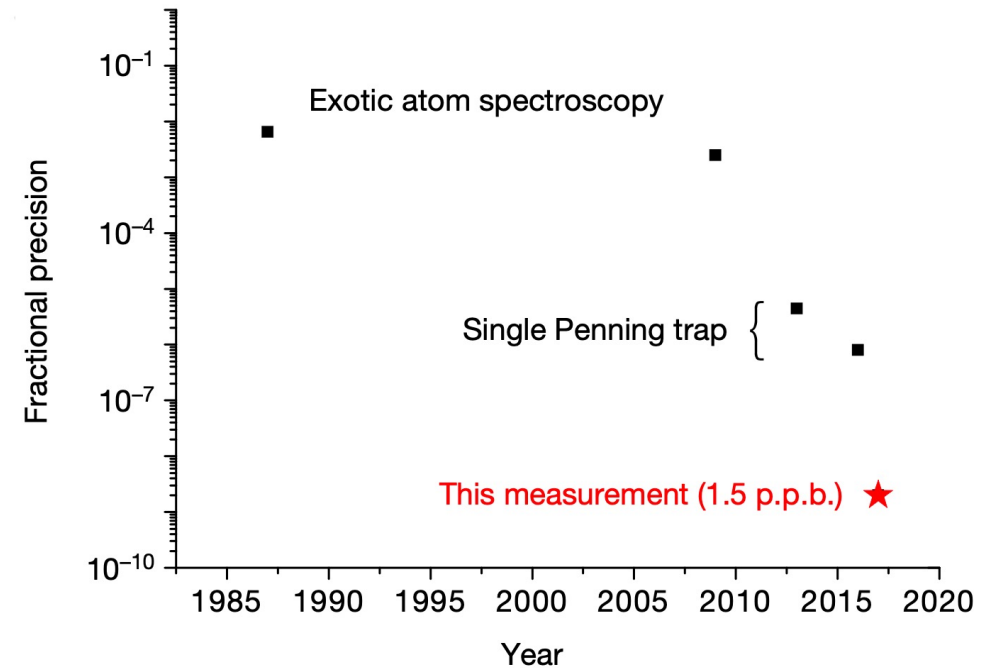
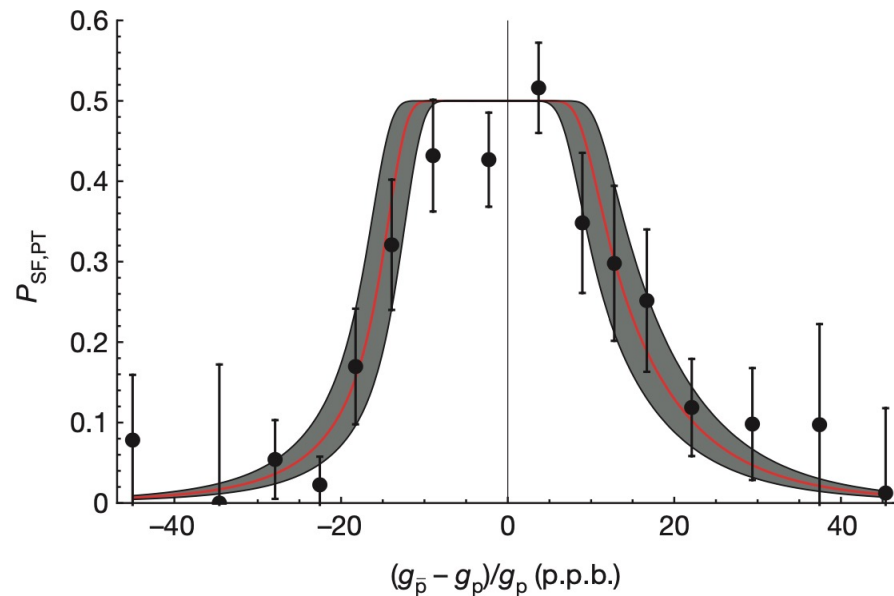
Измерение  $\nu_c$

Воздействие с  
частотой  $\nu_{rf}$

- Преимущество: метод позволяет сократить время измерения в  $\sim 3$  раза, так как не требуется охлаждения циклотронной моды после измерения  $\nu_c$

# Измерение $\mu_{\bar{p}}$

- Для  $k$ -го цикла измерения определяется вероятность переворота спина в РТ в зависимости от  $\Gamma_k = \nu_{rf,k}/\nu_{c,k} = g_{\bar{p},k}/2$ . Максимум при  $g_{\bar{p}}/2$  (т.к.  $g_{\bar{p}}/2 = \nu_L/\nu_c$  !)



$$\frac{g_{\bar{p}}}{2} = 2.792\,847\,344\,1(42)$$

C. Smorra et al., Nature 550, 371 (2017)

$$\frac{g_p}{2} = 2.792\,847\,350(9)$$

A. Mooser et al., Nature 509, 596 (2014)

$$\frac{g_p}{2} = 2.792\,847\,344\,62(82)$$

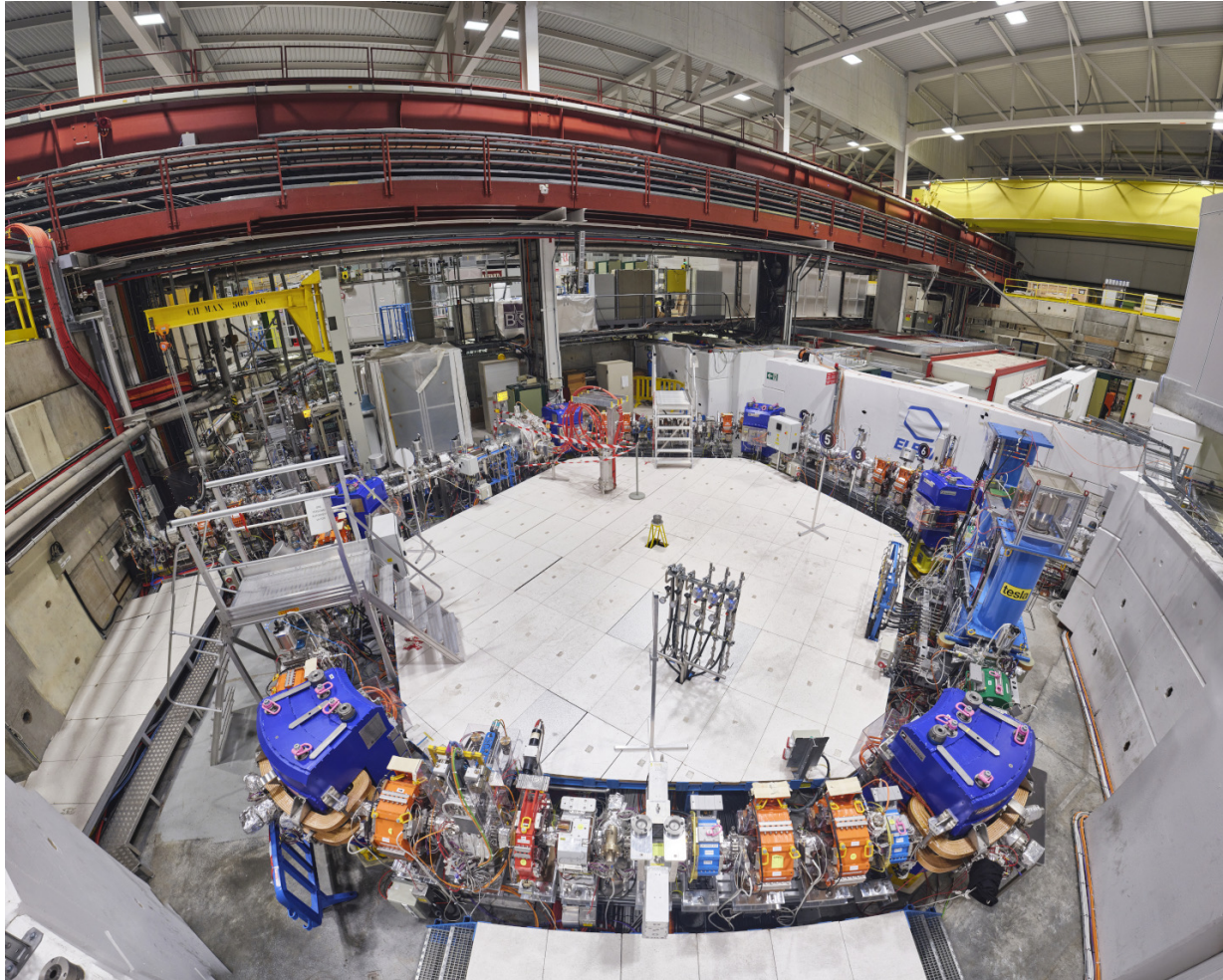
G. Schneider et al., Science 358, 1081 (2017)

# Заключение

- В ЦЕРН проводится ряд экспериментов на Antiproton Decelerator по изучению свойств антивещества
- Основными задачами этих экспериментов являются: проверка СРТ-инвариантности и принципа эквивалентности гравитационной и инертной масс
- Эксперимент BASE проводит исследования с антипротонами
- Были измерены с высокой точностью следующие свойства антипротона: отношение заряда к массе и магнитный момент
- Сравнение измеренных свойств антипротона с аналогичными свойствами протона не подтвердило нарушение СРТ-инвариантности
- В настоящий момент идет разработка новой установки для поиска аксионоподобных частиц (axionlike particles)



# ELENA

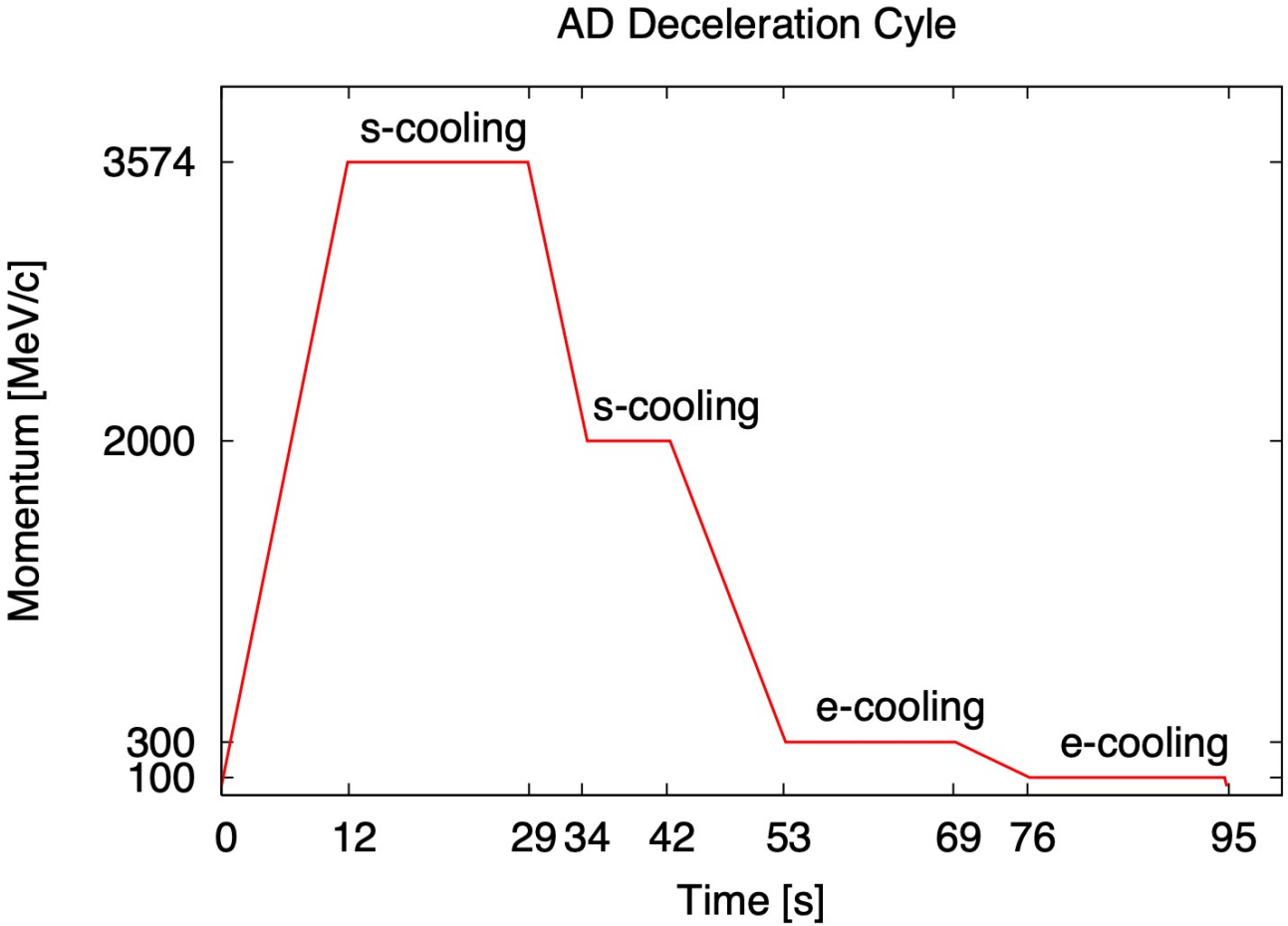


- The Extra Low Energy Antiproton ring (ELENA)
- Замедление антипротонов с 5.3 МэВ до 100 кэВ
- Позволит увеличить число захваченных антипротонов в экспериментах в  $\sim 10$  раз
- Первые антипротоны инжектированы и циркулировали в 2018 г.
- Полноценное функционирование ожидается к концу LS2

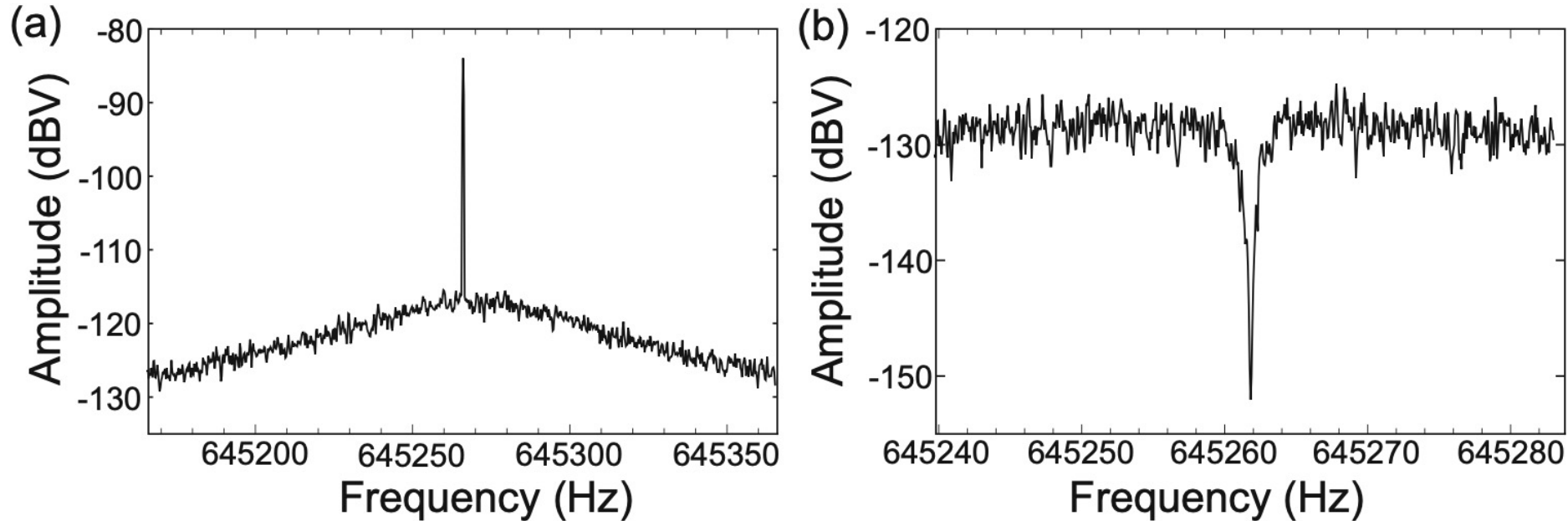


**Спасибо за внимание!**

# AD deceleration cycle



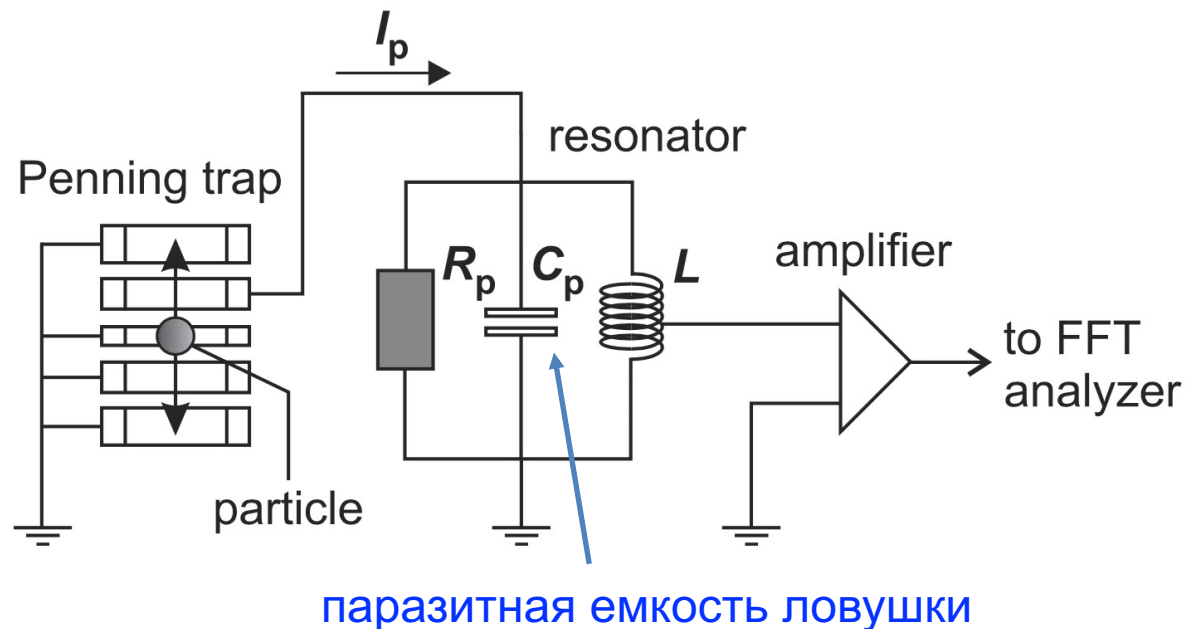
# Image-current



**Fig. 5.** Detection of the image-current signal of single particles in the BASE Penning-trap system. (a) A single antiproton is excited with an rf-drive at  $\nu_{rf} = 1290538 \text{ Hz} \approx 2\nu_z$  and the power dissipation of the excited particle is observed at the frequency  $\nu_{rf}/2$  in the FFT-spectrum. (b) A single antiproton in thermal equilibrium with the detection system generates a short at its axial frequency. A dip signal with 25 dB signal-to-noise ratio is observed.

# Измерение частоты $\nu_z$

- Движение частиц вдоль оси  $z$  наводит слабые токи ( $\sim$  фА) на электродах ловушки
- Детектор состоит из сверхпроводящего контура (с высокой добротностью  $Q$ ) и малошумящего усилителя
- При резонансе контур действует (эквивалентен) как сопротивление  $R_p = 2\pi\nu_0 LQ$

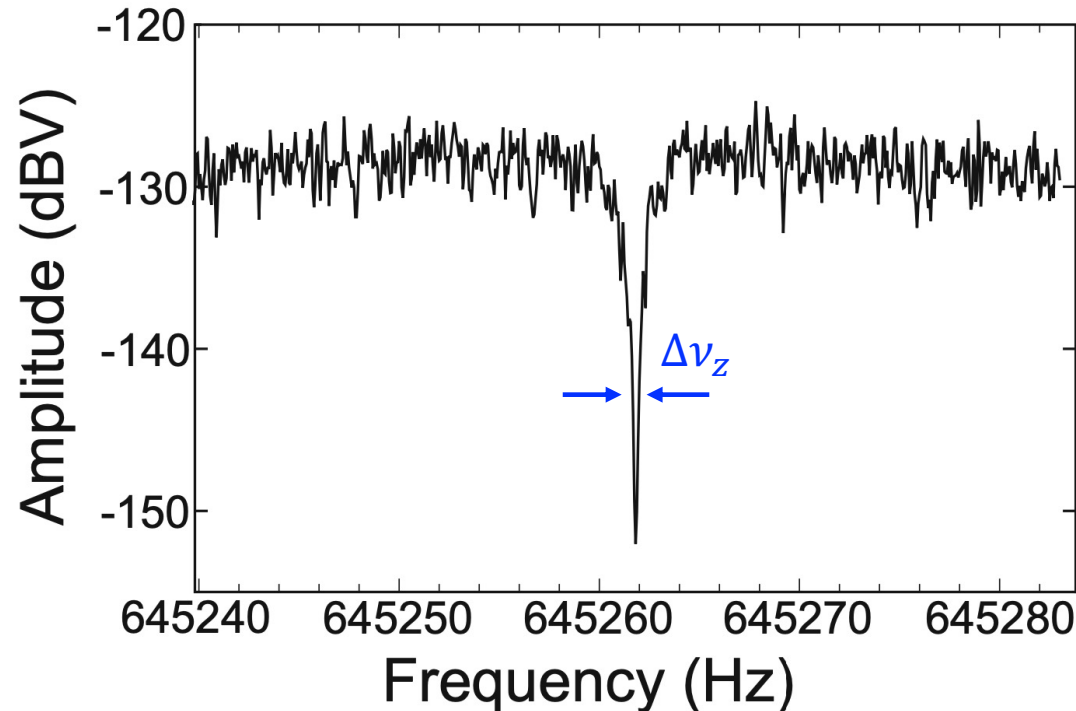
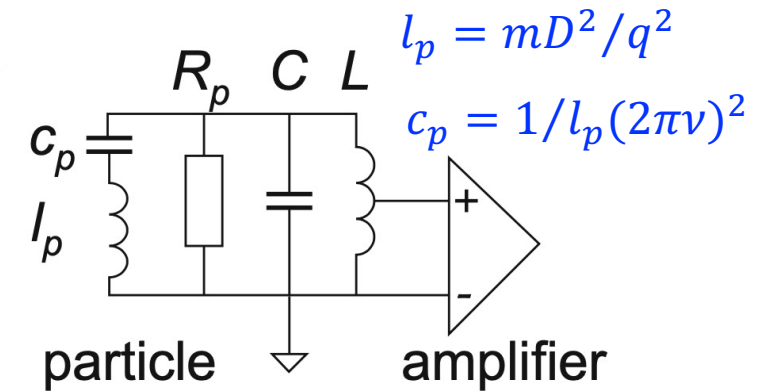


- Аксиальная частота частицы  $\nu_z$  настраивается на резонансную частоту контура  $\nu_0$  путем изменения напряжения на ловушке
- Измеряется падение напряжения  $V_p = R_p I_p$ , где  $I_p = \frac{2\pi q}{D} \nu_z z$ ,  $D$  – эффективное расстояние между электродами ( $\sim 10$  мм)
- Частица с аксиальной частотой, настроенной на резонанс, охлаждается резистивно с постоянной затухания:

$$\gamma = \frac{q^2 R_p}{D^2 m}$$

# Измерение частоты $\nu_z$

- Когда частица охлаждена до теплового равновесия с системой, она начинает выступать в качестве последовательного резонансного контура с  $l_p$  и  $c_p$



- Это приводит к возникновению провала на спектре теплового шума детектора при аксиальной частоте частицы  $\nu_z$
- Ширина провала зависит от числа частиц  $N$  в ловушке:

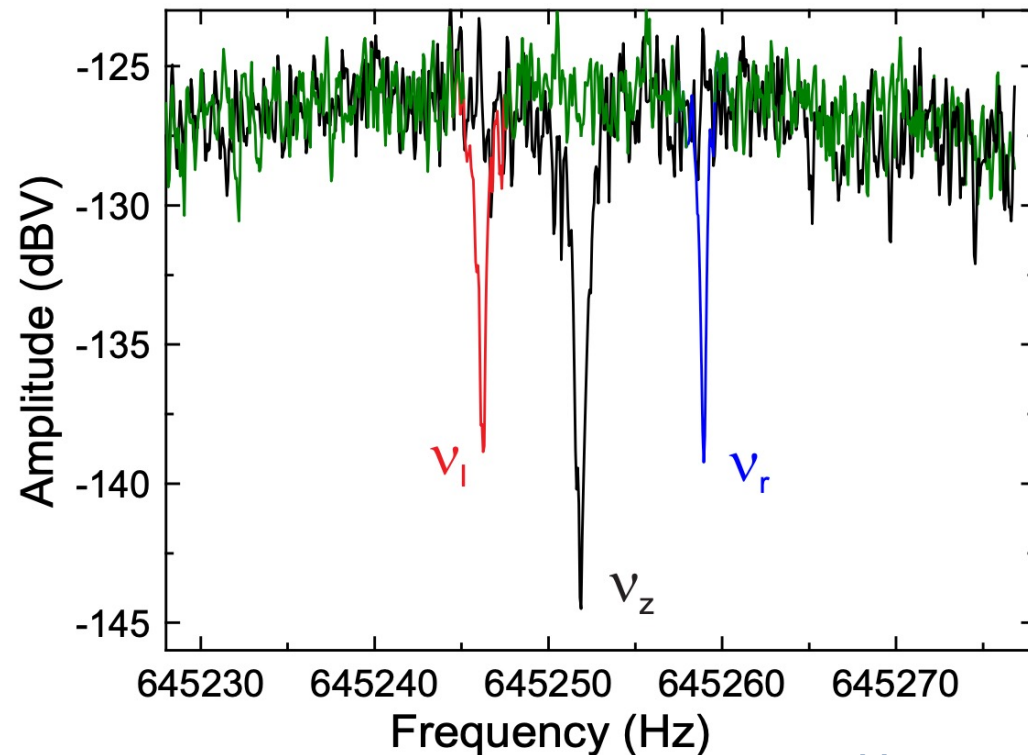
$$\Delta\nu_z = \frac{N q^2 R_p}{2\pi D^2 m}$$

- Это позволяет контролировать число частиц

# Измерение частот $\nu_+$ и $\nu_-$

- На электрод ловушки подается радиочастотный сигнал, который создает электрическое поле:

$$E_{rf} = E_0 \sin(2\pi\nu_{rf}t)(z\vec{e}_\rho + \rho\vec{e}_z)$$



- Частота сигнала зависит от того, какую частоту необходимо измерить ( $\nu_+$  или  $\nu_-$ ):

$$\nu_{rf} = \nu_+ - \nu_z \quad \nu_{rf} = \nu_- + \nu_z$$

- Это приводит к модуляции аксиального движения:

$$z(t) = z_0 \sin\left(\frac{1}{2}\Omega_0 t\right) \cos(2\pi\nu_z t)$$

$$\Omega_0 = qE_0 / (4\pi m \sqrt{\nu_\pm \nu_z})$$

$$\nu_l = \nu_z - \Omega_0 / 4\pi \quad \nu_r = \nu_z + \Omega_0 / 4\pi$$

- Окончательно:  $\nu_+ = \nu_{rf} + \nu_r + \nu_l - \nu_z$

- Частоту  $\nu_-$  можно вычислить (не измеряя):  $\nu_- \approx \nu_z^2 / 2\nu_+$

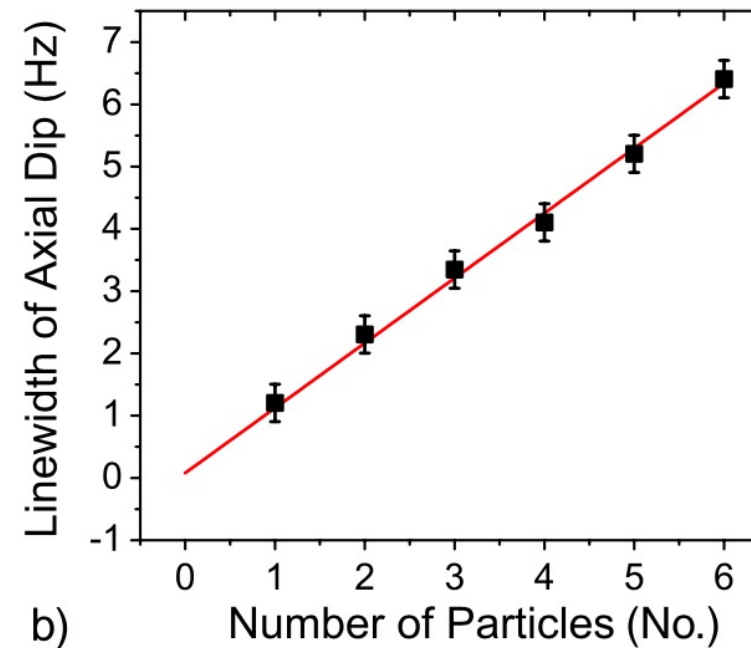
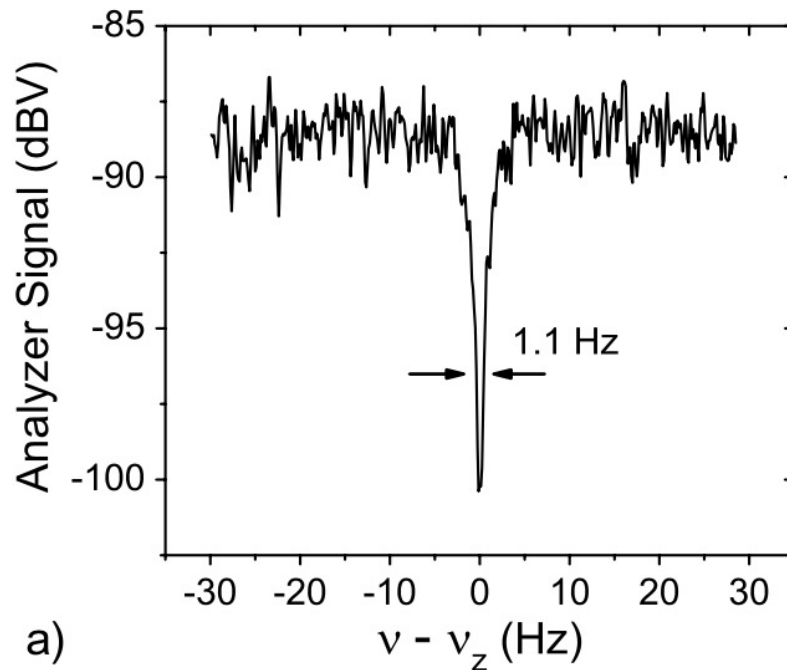


# Выделение одной частицы

$$\Delta\nu_z = \frac{1}{2\pi} \frac{NR}{m} \frac{q^2}{D^2} = N \times 1.1 \text{ Hz},$$

$D$  – характерный размер камеры

$N$  – число частиц



# Масса $H^-$

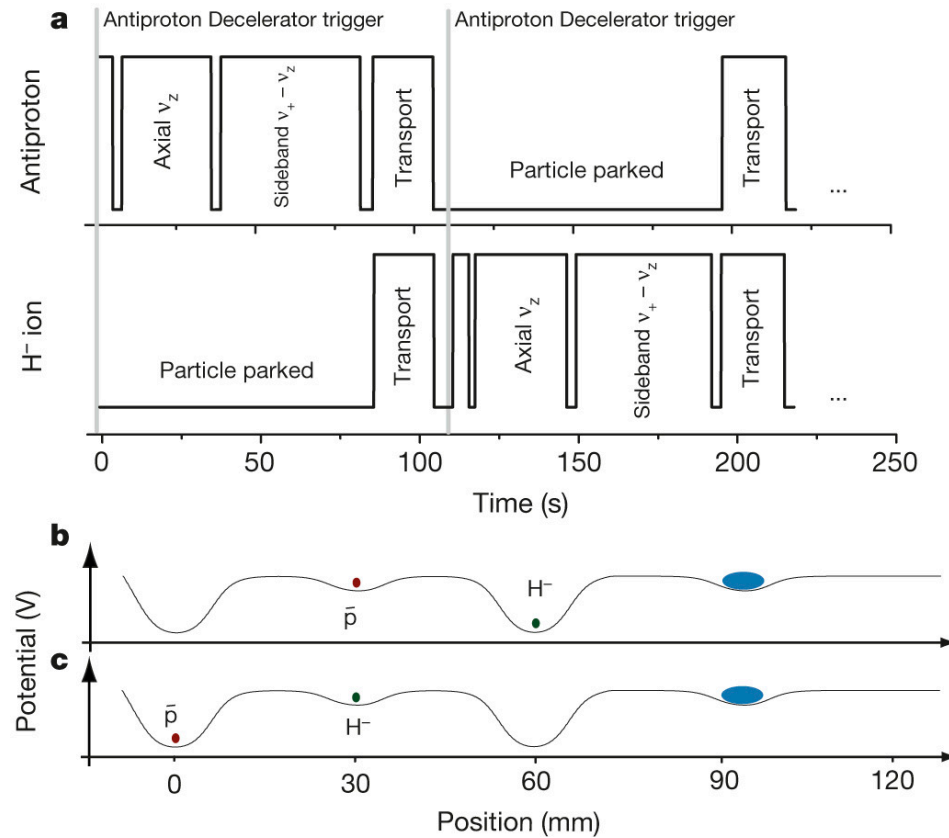
The mass of the negative hydrogen ion is

$$m_{H^-} = m_p \left( 1 + 2 \frac{m_e}{m_p} + \frac{\alpha_{\text{pol},H^-} B_0^2}{m_p} - \frac{E_b}{m_p} - \frac{E_a}{m_p} \right) \quad (2)$$

where  $m_e/m_p$  is the electron-to-proton mass ratio<sup>25</sup>,  $(\alpha_{\text{pol},H^-} B_0^2)/m_p$  is the polarizability shift<sup>9</sup>,  $E_b/m_p$  is the electron binding energy<sup>26</sup> and  $E_a/m_p$  is the electron affinity of hydrogen<sup>27</sup>.

S. Ulmer *et al.* *Nature* **524**, 196 (2015)

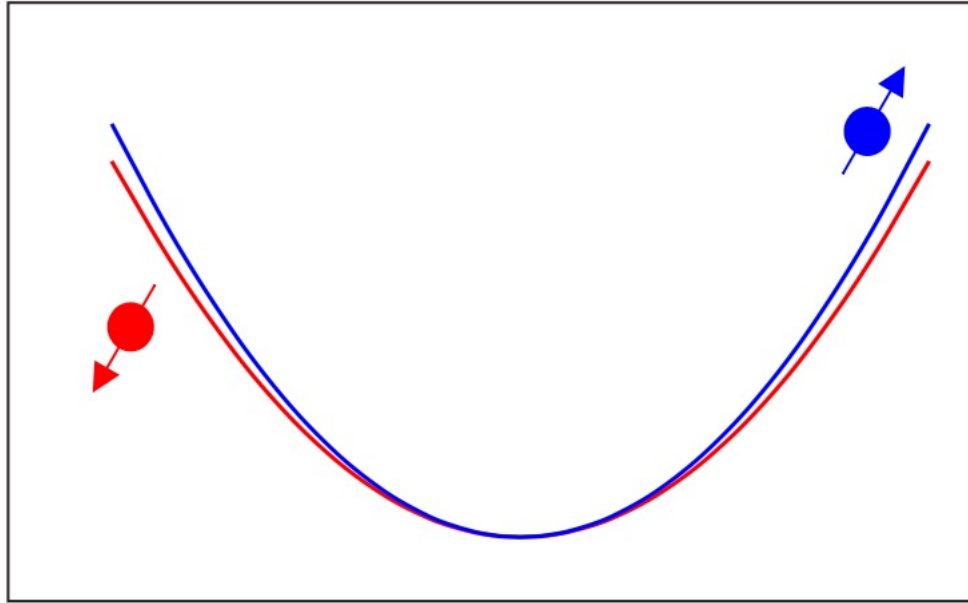
# Цикл измерения $q/t$ для $p$ и $\bar{p}$



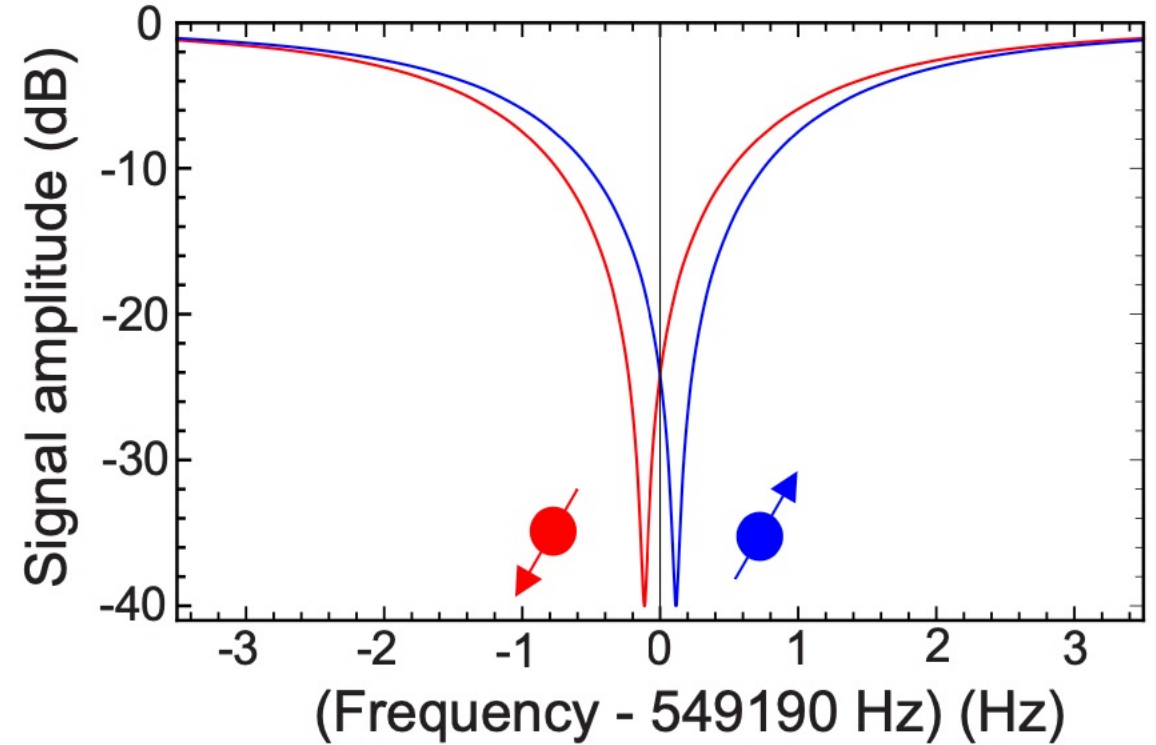
S. Ulmer *et al.* *Nature* **524**, 196 (2015)

# Измерение $\mu_{\bar{p}}$

Effective Potential (a. u.)



Axial Position (a. u.)



$$\Delta\nu_{z,SF} = \frac{1}{2\pi^2} \frac{\mu_{\bar{p}} B_2}{m_{\bar{p}} \nu_z} = \frac{1}{2\pi} \frac{\hbar \nu_L}{m_{\bar{p}} \nu_z} \frac{B_2}{B_0}$$

# Spin-flip probability

$$P_{\text{SF,PT}}(\Gamma_k, g_{\bar{p}}, \Omega_R) = \frac{1}{2} \left( 1 - \exp \left[ -\frac{1}{2} \Omega_R^2 t_{\text{rf}} \chi_L(\Gamma_k, g_{\bar{p}}) \right] \right)$$

with  $\Omega_R = \mu_{\bar{p}} b_{\text{rf}} / \hbar$  being the angular Rabi frequency of the spin-flip drive, where  $b_{\text{rf}}$  is the magnetic field amplitude of the spin-flip drive in the perpendicular direction to the  $z$ -axis.  $t_{\text{rf}} = 8$  s is the Larmor drive duration,  $\Gamma_k = \nu_{\text{L,rf},k} / \langle \nu_{\text{c},k} \rangle$  is the probed  $g/2$ -factor ratio,  $g_{\bar{p}}$  is the antiproton  $g$ -factor, and  $\chi_L(\Gamma_k, g_{\bar{p}})$  is the Larmor lineshape function.

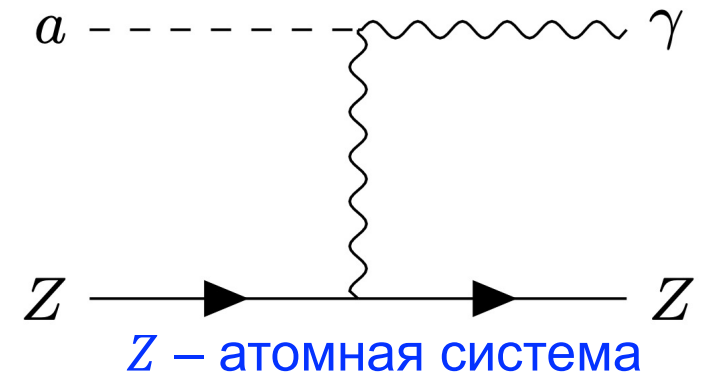
$$\chi_L(\Gamma_k, g_{\bar{p}}) = \frac{4}{\pi} \Re \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P_1 P_2}{(P_1 + P_2)^2} \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right)^{2n} \frac{1}{\left( n + \frac{1}{2} \right) P_1 - \frac{1}{2} P_2 - 2\pi i \langle \nu_{\text{c}} \rangle \left( \Gamma_k - \frac{g_{\bar{p}}}{2} \left( 1 + \frac{\Delta \nu_{\text{c}}}{\nu_{\text{c}}} \right) \right)} \right]$$

# Поиск аксионов

- Аксион – нейтральная частица, которая могла бы объяснить сохранение CP-симметрии в сильном взаимодействии
- Многие расширения СМ предсказывают существование аксионоподобных частиц (axionlike particles, ALPs) в некотором диапазоне масс и констант связи
- ALPs – кандидаты на роль частиц темной материи
- Взаимодействие ALPs с полями  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  задается лагранжианом:

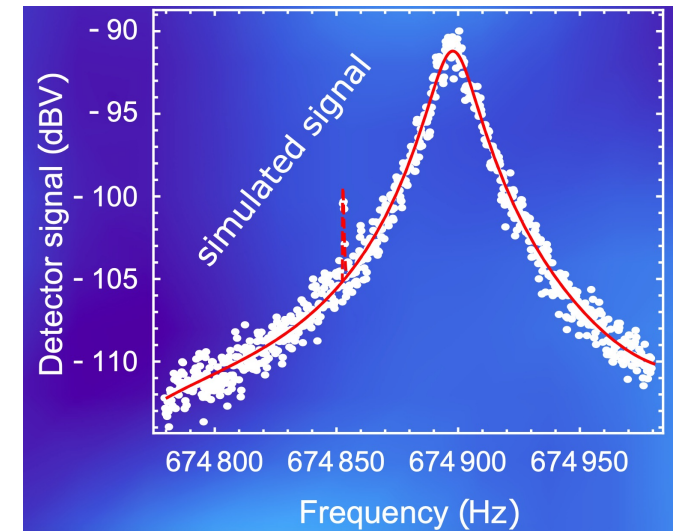
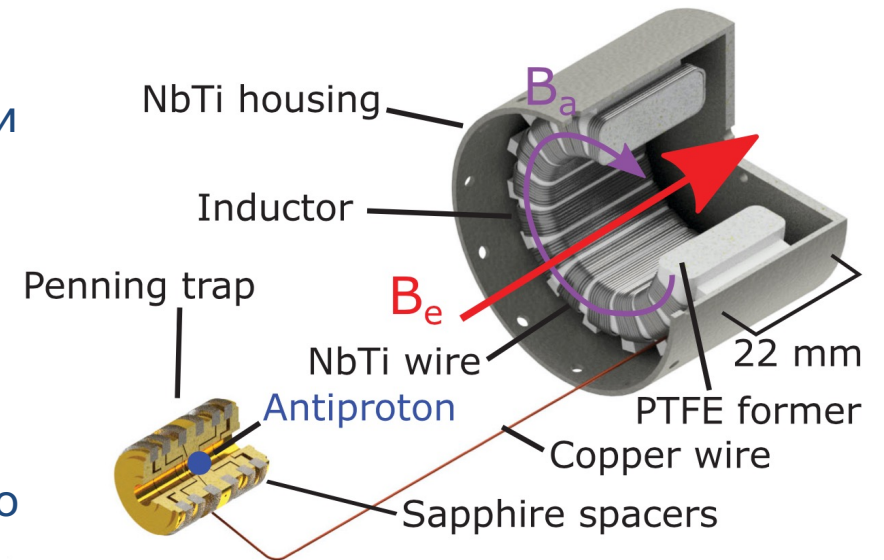
$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -g_{a\gamma} a(x) \vec{E}(x) \vec{B}(x), \quad g_{a\gamma} \text{ – константа взаимодействия ALPs и фотонов}$$

- ALPs образуют классическое поле  $a(x)$  осциллирующее с частотой близкой к  $c/\lambda_a = m_a c^2/h$   $\lambda_a$  – комптоновская длина волны
- ALPs могут конвертироваться в фотоны в сильном магнитном поле (обратный эффект Примакова)



# Поиск аксионов

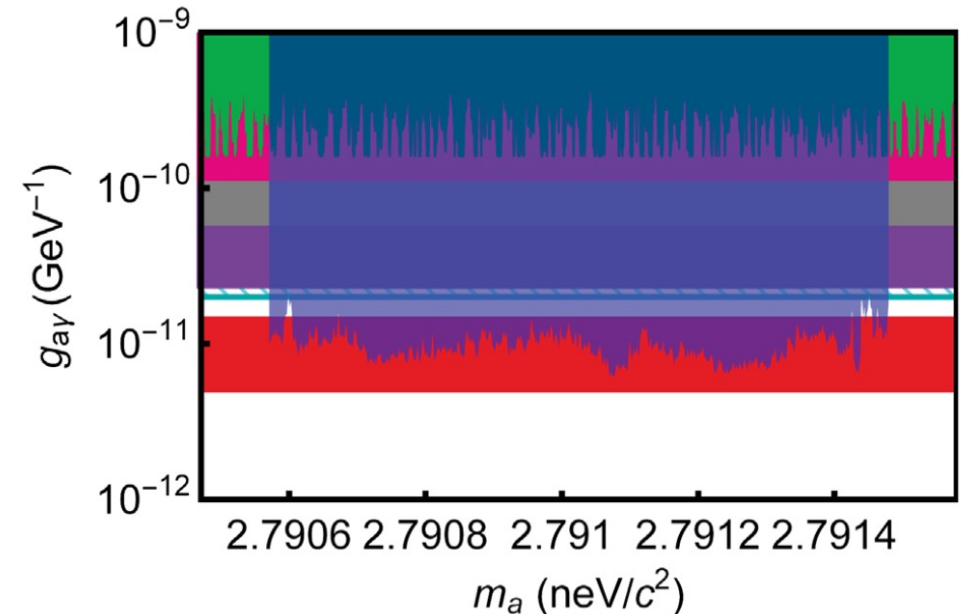
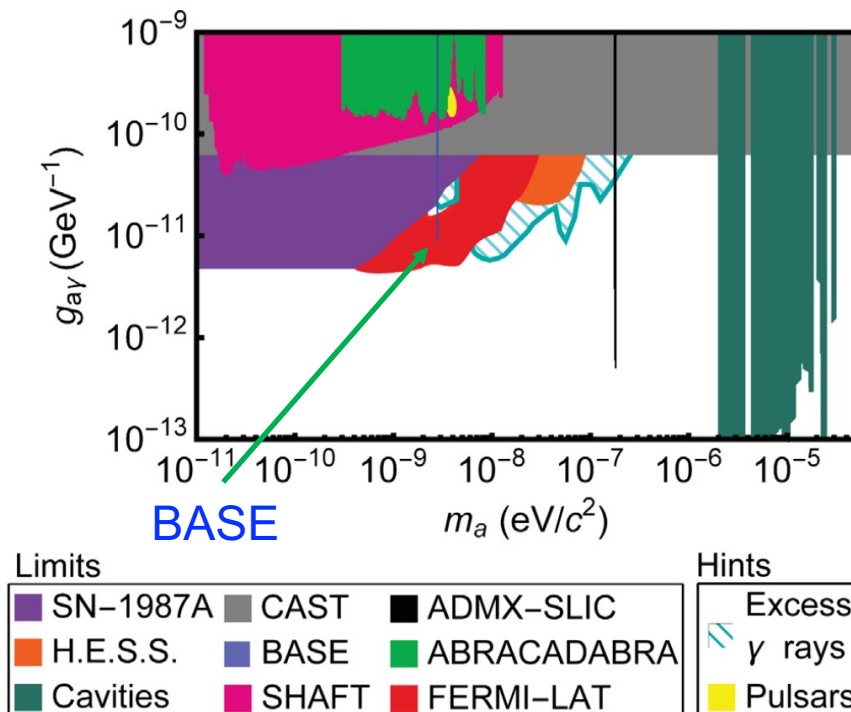
- Экспериментальная установка состоит из ловушки Пеннинга и катушки индуктивности
- Магнитное поле  $|\vec{B}_e| = 1.85$  Тл направлено по оси катушки
- Катушка индуктивности и паразитная емкость ловушки образуют LC контур
- LC контур служит для регистрации наведенных токов от антипротона. Также он чувствителен к изменениям магнитного потока в области катушки
- Осциллирующее поле ALPs приводит к возникновению осциллирующего магнитного поля  $\vec{B}_a(g_{a\gamma})$  с частотой  $\nu_a = (m_a/2h)(2c^2 + \vec{v} \cdot \vec{v})$
- Поле  $\vec{B}_a$  приводит к возникновению переменного тока
- Сигнал от ALPs проявился бы как пик на шумовом спектре
- Ловушка Пеннинга и антипротон служат для точной калибровки детектора (измерения сопротивления и температуры)





# Поиск аксионов

- Были проанализированы шумовые спектры в интервале частот 200 Гц
- Были установлены пределы на  $g_{a\gamma}$  в узком диапазоне масс  $m_a$  в районе 2.791 нэВ



- Пределы сравнимы с пределами FERMI-LAT в этом диапазоне масс
- В настоящий момент идет разработка экспериментальной установки с конденсаторами переменной емкости, которая позволит увеличить диапазон доступных для измерения частот до 500 кГц ÷ 1.2 МГц
- Для увеличения чувствительности, планируется работать при более сильных магнитных полях (до 7 Тл)

# Поиск аксионов

- Взаимодействие ALPs с фотонами приводит к изменению уравнений Максвелла:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = g\vec{B} \cdot \vec{\nabla}a + \rho_{el},$$
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = g\left(\vec{E} \times \vec{\nabla}a - \vec{B} \frac{\partial a}{\partial t}\right) + \vec{j}_{el}$$

- То есть в присутствии внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0$  ALPs создают плотность тока:

$$\vec{j}_a = -g\vec{B}_0 \dot{a}$$

Который осциллирует с частотой:

$$\omega = m_a \left( 1 + \frac{1}{2} \vec{v} \cdot \vec{v} \right)$$

# Поиск аксионов

- Было проанализировано 1950 спектров в диапазоне аксиальных частот 200 Гц
- Диапазон был разбит на  $m$  интервалов частот
- Спектры усреднялись и в итоге был получен набор данных  $\bar{d}(n) = \{\bar{d}(n)_1, \dots, \bar{d}(n)_m\}$
- Полученный набор данных анализировался при помощи функции правдоподобия:

$$\mathcal{L}(\bar{d}(n) | \{g_{a\gamma}, \nu_a, \mathbf{b}\}) = \prod_{i=1}^m \lambda(n)_i^{-N} \exp \left[ -N \frac{\bar{d}(n)_i}{\lambda(n)_i} \right]$$

- Profile log likelihood:

$$\begin{aligned} \Theta(\nu_a, g_{a\gamma}) = & 2 \ln [\mathcal{L}(\bar{d} | \{g_{a\gamma}, \nu_a, \hat{\mathbf{b}}\})] \\ & - 2 \ln [\mathcal{L}(\bar{d} | \{g_{a\gamma} = 0, \hat{\mathbf{b}}\})] \end{aligned}$$