

# Спин в накопителях (COSY, PTR, NICA) как детектор аксионов

Н.Н. Николаев

Институт теоретической физики им. Ландау РАН

ПИАФ, 23 сентября 2022 г

HEP INSPIRE: ~6000 публикаций с упоминанием аксионов

ПИАФ: классические работы А.А. Ансельма и Н.Г. Уральцева по прохождению света сквозь стену под личиной аксионов (арионов)

## От классиков до работ по поиску аксионов на ускорителях:

- R. D. Peccei and H. R. Quinn. "CP Conservation in the Presence of Instantons". Phys. Rev. Lett., 38, 1440 (1977)
- S. Weinberg. "A New Light Boson?" Phys. Rev. Lett., 40, 223 (1978).
- F. Wilczek. "Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons". Phys. Rev. Lett., 40, 279 (1978)
- P. V. Vorob'ev, A. I. Kakhidze, and I. V. Kolokolov. "Axion wind: A Search for cosmological axion condensate". Phys. Atom. Nucl., 58, 959 (1995).
- P. Sikivie. "Invisible Axion Search Methods". Rev. Mod. Phys., 93(1), 015004 (2021) Свежий обзор, 300 ссылок, без обсуждения ускорительных экспериментов).
- S.N.Vergeles, N.N. Nikolaev, Y.N.Obukhov, A.J.Silenko and O.V.Teryaev, General relativity effects in precision spin experimental tests of fundamental symmetries, arXiv:2204.00427 [hep-th], УФН, в печати.
- A.Silenko, Relativistic spin dynamics conditioned by dark matter axions, e-Print: 2109.05576 [hep-th]
- N.N. Nikolaev, Spin of protons in NICA and PTR storage rings as an axion antenna, [JETP Letters, 115\(11\), 523-530 \(2022\)](#)
- Y. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov, V. Ladygin, A. Melnikov, N.Nikolaev and E. Syresin, Quasi-Frozen Spin Concept of Magneto-Optical Structure of NICA Adapted to Study the Electric Dipole Moment of the Deuteron and to Search for the Axion, JACoW IPAC2022 (2022) МОРОТК024
- S.Karant et al. [JEDI], First Search for Axion-Like Particles in a Storage Ring Using a Polarized Deuteron Beam, arXiv:2208.07293 [hep-ex].

## Загадка CP (P & T) сохранения в Квантовой Хромодинамике

$$L_{\bar{\theta}} = -\frac{1}{32\pi^2} \bar{\theta} g_S^2 G^{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a \quad \tilde{G}_{\mu\nu}^a = \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} G^{a\rho\sigma}$$

$$G^{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a = \partial_\mu K^\mu, \quad K^\mu = \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \left( A_\nu^a G_{\rho\sigma} - \frac{1}{3} g_s f^{abc} A_\nu^a A_\rho^b A_\sigma^c \right)$$

Квантовая аномалия Адлера-Белла-Джекива и инстантонный вакуум

$$\partial_\mu J_A^\mu = -\frac{N}{32\pi^2} \bar{\theta} g_S^2 G^{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a + 2i \bar{\Psi}_R \mathbf{M} \Psi_L$$

Киральное вращение  $\rightarrow$  CP- несохранение в фермионном секторе

$$L_{CPV} = 3m^* \bar{\theta} (\bar{\Psi} i\gamma_5 \Psi). \quad m^* = \frac{m_u m_d m_s}{m_u m_d + m_u m_s + m_d m_s} \approx \frac{m_u m_d}{m_u + m_d}$$

## P- и T-несохраняющий статический ЭДМ нейтрона

$$d_N \sim \bar{\theta} \frac{m^*}{\Lambda_{QCD}} \mu_N \approx \bar{\theta} \times 10^{-16} \text{ e} \cdot \text{cm} \quad \text{КХД допускает} \quad \bar{\theta} \sim 1$$

Киральное подавление  $\kappa_{(a)} \sim \frac{m^*}{\Lambda_{QCD}} \approx 10^{-2}$  к ядерному магнетону

$$d_n < 1.8 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm} \quad \rightarrow \quad \bar{\theta} \sim 10^{-10}$$

Точная  $U(1)_{PQ}$  киральная симметрия если есть безмассовый кварк

КХД угол  $\rightarrow$  динамическое псевдоскалярное поле  $\bar{\theta} \rightarrow \frac{1}{f_{(a)}} a(x)$

Всякая уважающая себя симметрия интересна только если она нарушена

Спонтанное нарушение PQ симметрии  $\rightarrow$  легкий псевдоскалярный аксион

Соотношение Вайнберга

$$m_{(a)} \approx m_\pi \frac{f_\pi}{f_{(a)}} \frac{\sqrt{m_u m_d}}{m_u + m_d},$$

# Реликтовые аксионы - отличный кандидат на темную материю

- Когерентное поле галактических аксионов  $a(x) = a_0 \cos(\omega_{(a)}t - \mathbf{k}_{(a)} \cdot \mathbf{x})$

- Аксионная темная материя

$$\omega_{(a)} = \frac{m_{(a)}c^2}{\hbar} \quad a_0 = \frac{1}{m_{(a)}} \sqrt{\frac{2\rho_{\text{DM}}\hbar}{c^3}}$$

- Осциллирующий ЭДМ нуклонов и псевдомагнитное поле (аксионный ветер) за счет движения спина в галактическом аксионном поле (Silenko, NNN)

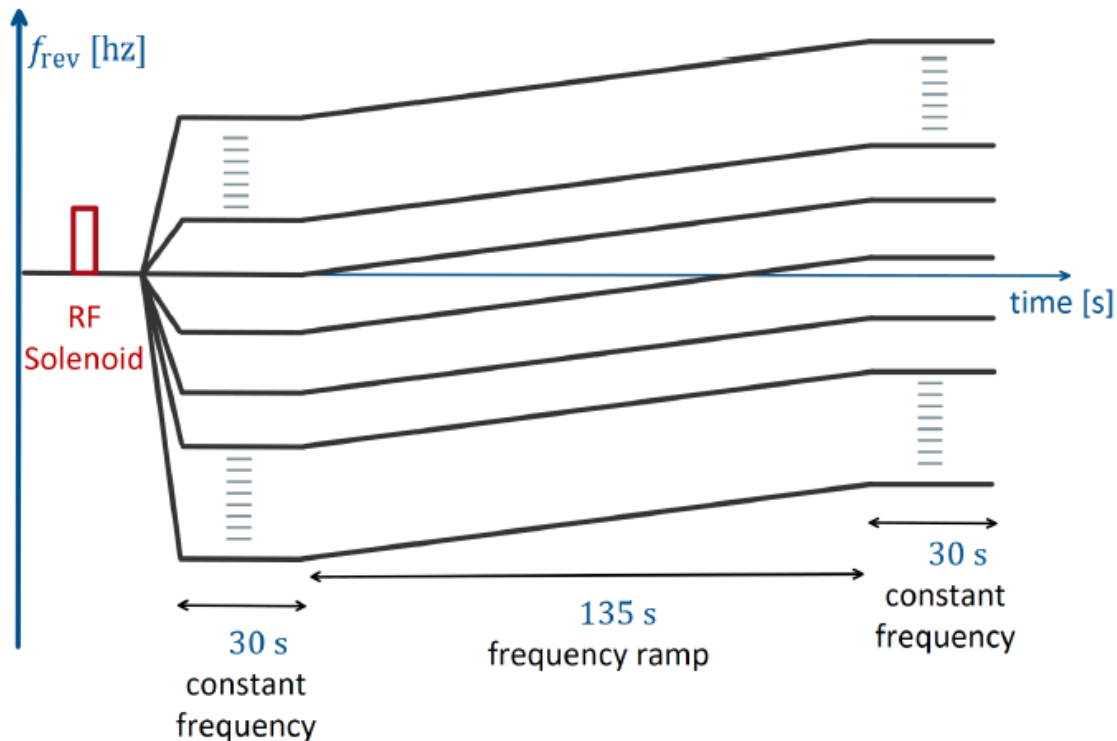
$$\Omega^{\text{ax}} = \frac{a_0}{f_{(a)}} g_f \left[ \omega_{(a)} \sin(\omega_{(a)}t) \frac{\mathbf{v}}{c} - \kappa_{(a)} \gamma \cos(\omega_{(a)}t) \frac{\mathbf{v}}{c} \times \boldsymbol{\Omega}_c \right]$$

- **Скорость на орбите кольца на 3 порядка выше скорости движения Земли относительно центра Галактики.**
- Киральное подавление роли осциллирующего ЭДМ. Для спина в накопителе псевдомагнитное поле работает как радиочастотный соленоид.
- **Спин как аксионная антенна:** спонтанное вращение спина из вертикали в плоскость кольца и **наоборот**, если **прецессия в резонансе** с осцилляциями аксионного поля.
- Масса аксиона **неизвестна**: надо угадать массу аксиона сканируя по частоте прецессии спина (**типичный метод Фруассара-Стора**).
- **Общая проблема всех поисков аксиона резонансными методами.**

# Deuterons, JEDI @ COSY (arXiv:2208.07293 [hep-ex])

- Частота прецессии спина  $f_s = G\gamma f_{rev}$

Revolution frequency	$f_{rev}$ [Hz]	750602.6
Spin resonance frequency	$f_{sol}$ [Hz]	629755.3
Spin tune frequency	$f_{spin}$ [Hz]	120847.3
Lorentz factor	$\gamma$ [1]	1.126
Beam velocity	$\beta$ [c]	0.460
Orbit circumference	$l$ [m]	183.57



Put the spin in the ring plane

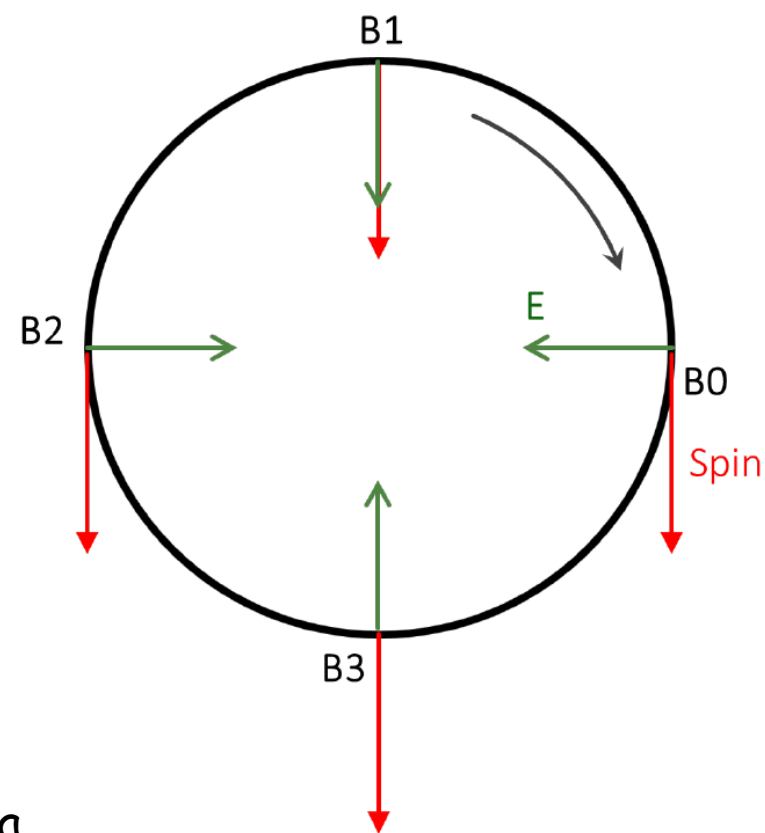
Ramp the magnetic field preserving the orbit and maintaining long spin coherence time:  
103 ramps  $f_s = 119.997$  kHz to 121.457 kHz

Look for a sudden buildup of the vertical polarization

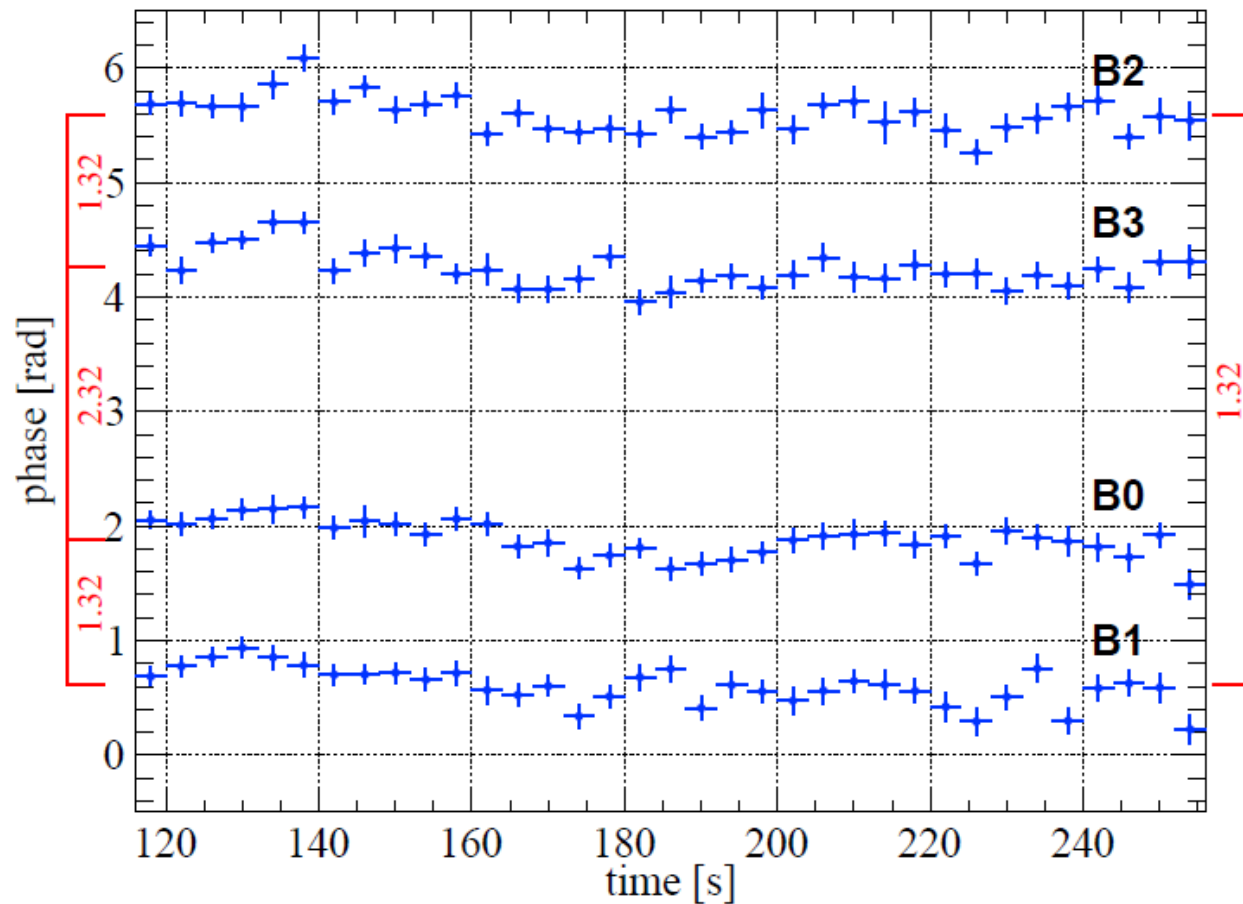
Axion mass range 4.95-5.02 neV/c<sup>2</sup>

## О проблеме начальной фазы

- Накопление вертикальной поляризации
- Резонансное вращение вертикального спина в горизонтальную плоскость радиочастотным соленоидом
- Например сканируя по частоте по Фруассару-Стора
- **Ложка дегтя:** угадали частоту, но фаза аксионного поля
- **неизвестна:** аксионное поле нельзя ни включить, ни выключить
- «Неправильная» относительная фаза  $\Delta$  спина и аксиона: соленоид не вращает спин смотрящий по магнитному полю аксиона-соленоида
- Амплитуда сигнала пропорциональна  $\cos \Delta$
- **JEDI:** 4 банча с разнонаправленными спинами: кому-то с фазой повезет
- Техника **JEDI:** временная метка, спиновые фазы банчей измеримы поляриметрией прецессирующей горизонтальной поляризации.
- Фурье-анализ осциллирующего с частотой прецессии спина сигнала с поляриметра
- Императив: большое время когерентности горизонтальной поляризации. JEDI: для дейтронов достигнуты **1500 с** (техника Коопа-Шатунова)

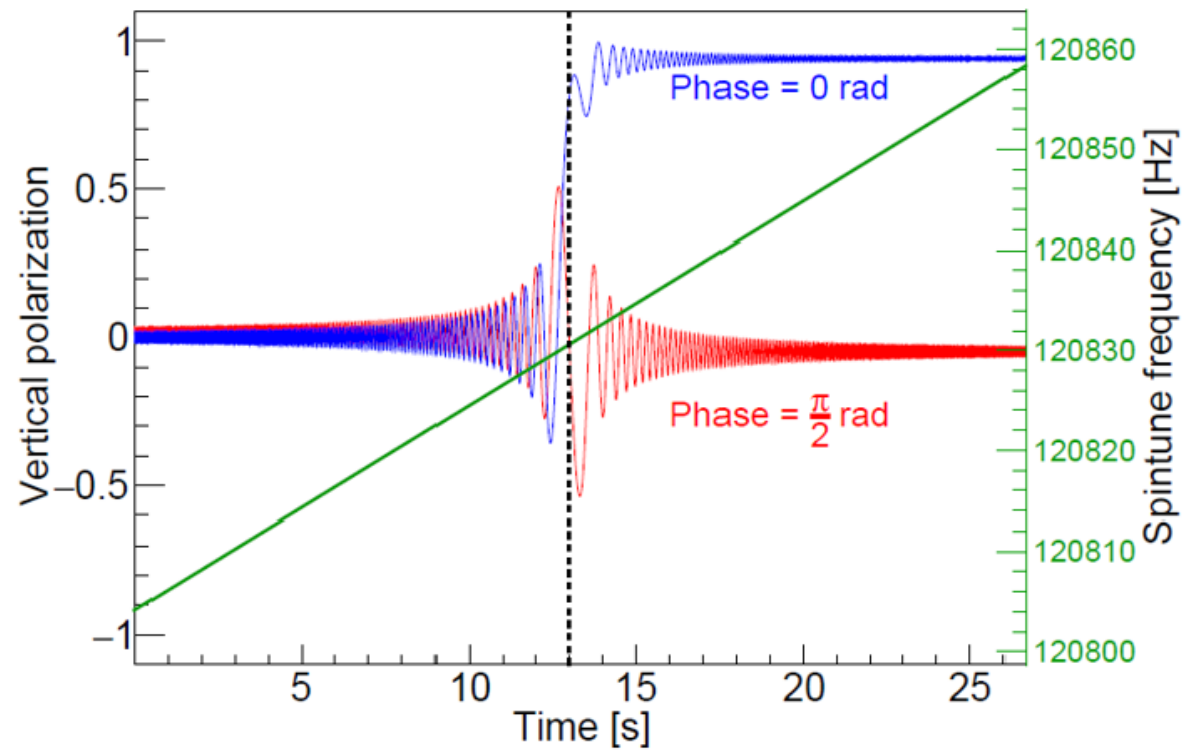


# JEDI: измерение фаз 4-х банчей





# JEDI: сигнал аксиона с удачной и неудачной спиновыми фазами



Временная ширина скачка  $\sim 3$  с

- Калибровка чувствительности эксперимента по вращению спина радиочастотным фильтром Вина
- Наведенный аксионным полем **осциллирующий ЭДМ** как спиновый ротатор **эквивалентен** фильтру Вина с радиальным магнитным полем
- Вклады ЭДМ ( $\cos \omega t$ ) и псевдомагнитного поля ( $\sin \omega t$ ) в сигнал аксиона складываются когерентно

## JEDI: периодический флип вертикальной поляризации резонансным фильтром Вина

Вертикальная поляризация дает право-левую асимметрию  $A_{LR}$  во внутреннем поляриметре

Непрерывная перекачка поляризации в горизонтальную и наоборот.

**Затухание** вертикальной поляризации за счет декогеренции **горизонтальной**

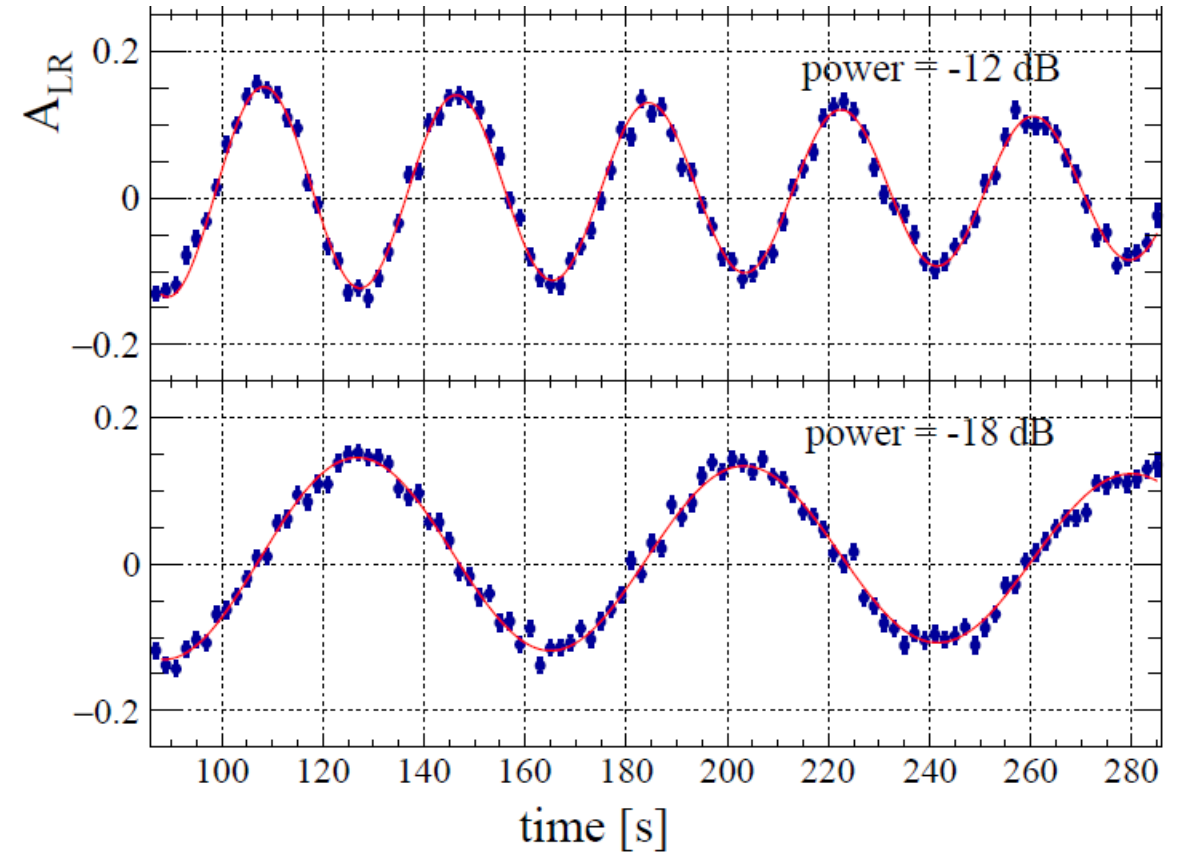
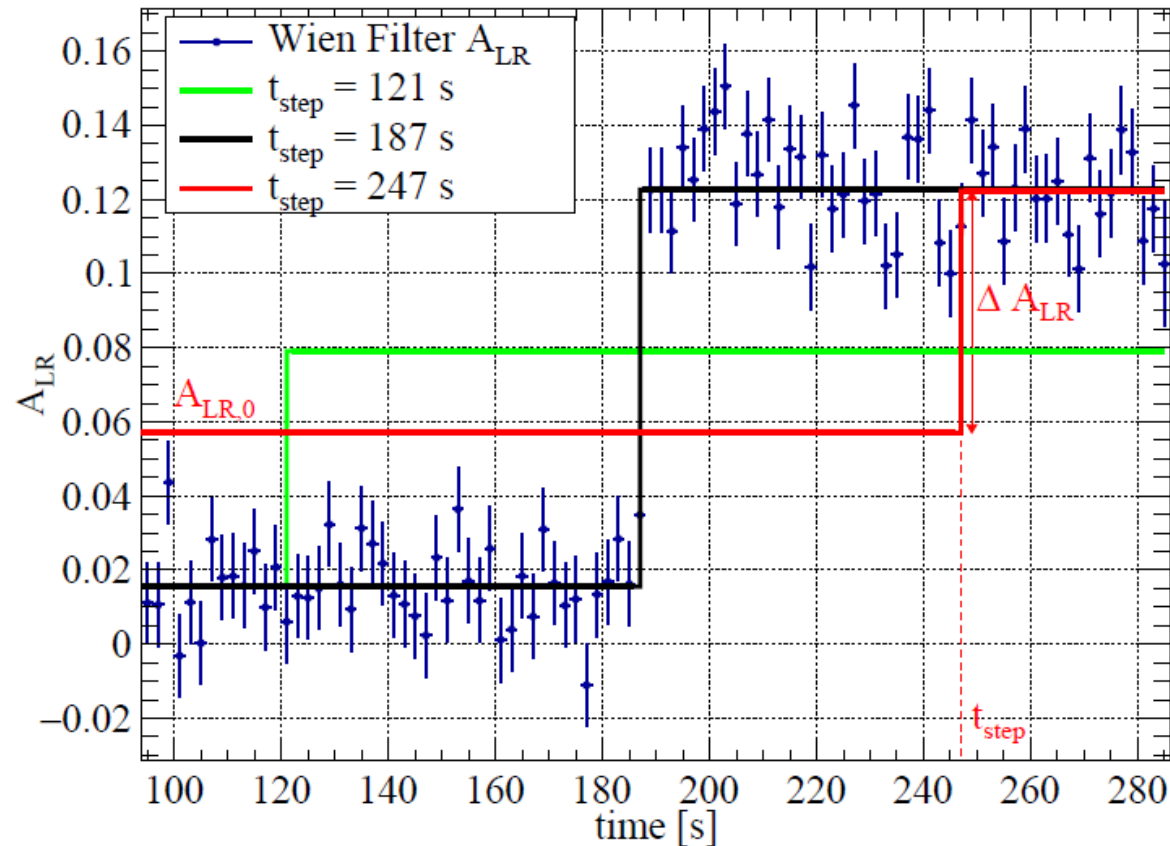


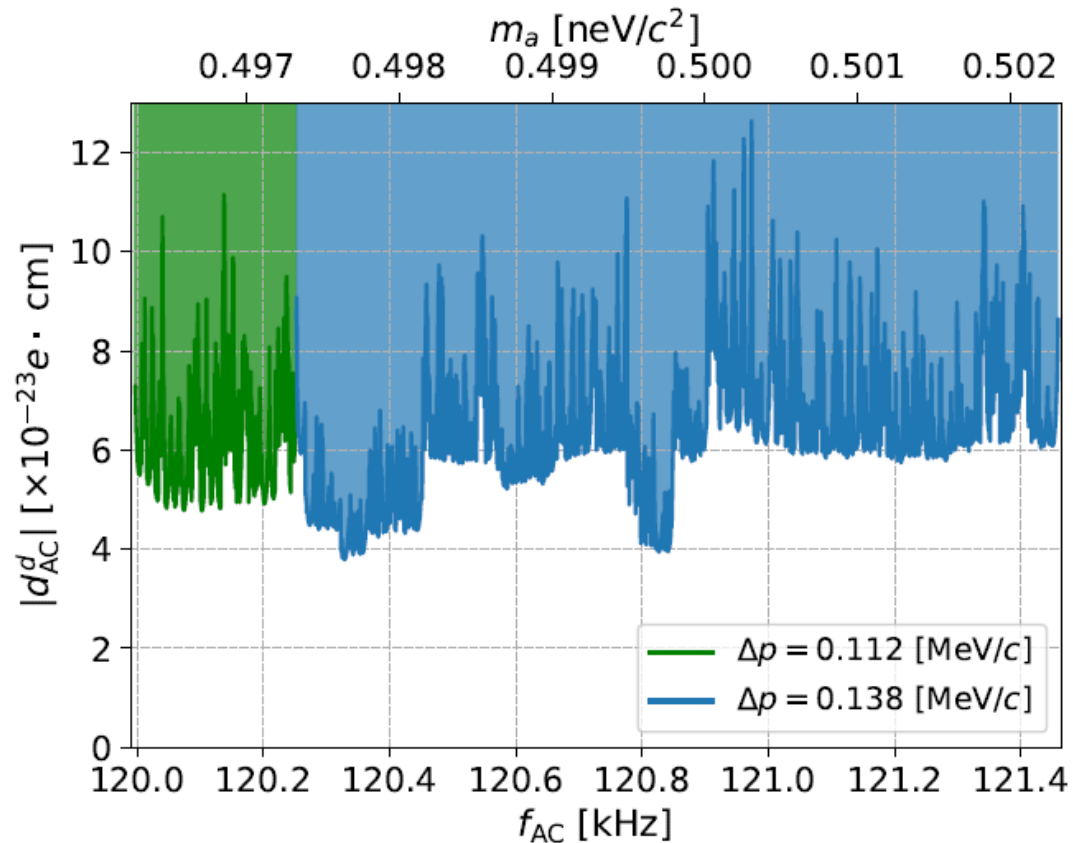
FIG. 4. Measurements of the oscillating left-right asymmetry proportional to the vertical polarization produced by the continuous operation of the Wien filter at various power levels (noted in figure). The horizontal axis is time in seconds. The Wien filter was on continuously. Data from all four bunches were combined into a single asymmetry.

# JEDI: Имитация аксионного поля радиочастотным фильтром Вина: пример скачка вертикальной поляризации при сканировании частоты прецессии спина



Калибровка *COSY* как аксионной антенны : пересчет от поля в в фильтре Вина длиной 1 м к амплитуде аксионного псевдомагнитного поля на всей 180 м окружности *COSY*

# JEDI: исключенная область ЭДМ дейтрона



Чувствительность к осциллирующему ЭДМ на порядки выше чем к статическому ЭДМ --- нет систематического фона от вращения спина в паразитных магнитных полях за счет гигантского магнитного момента

## JEDI на мировом фоне

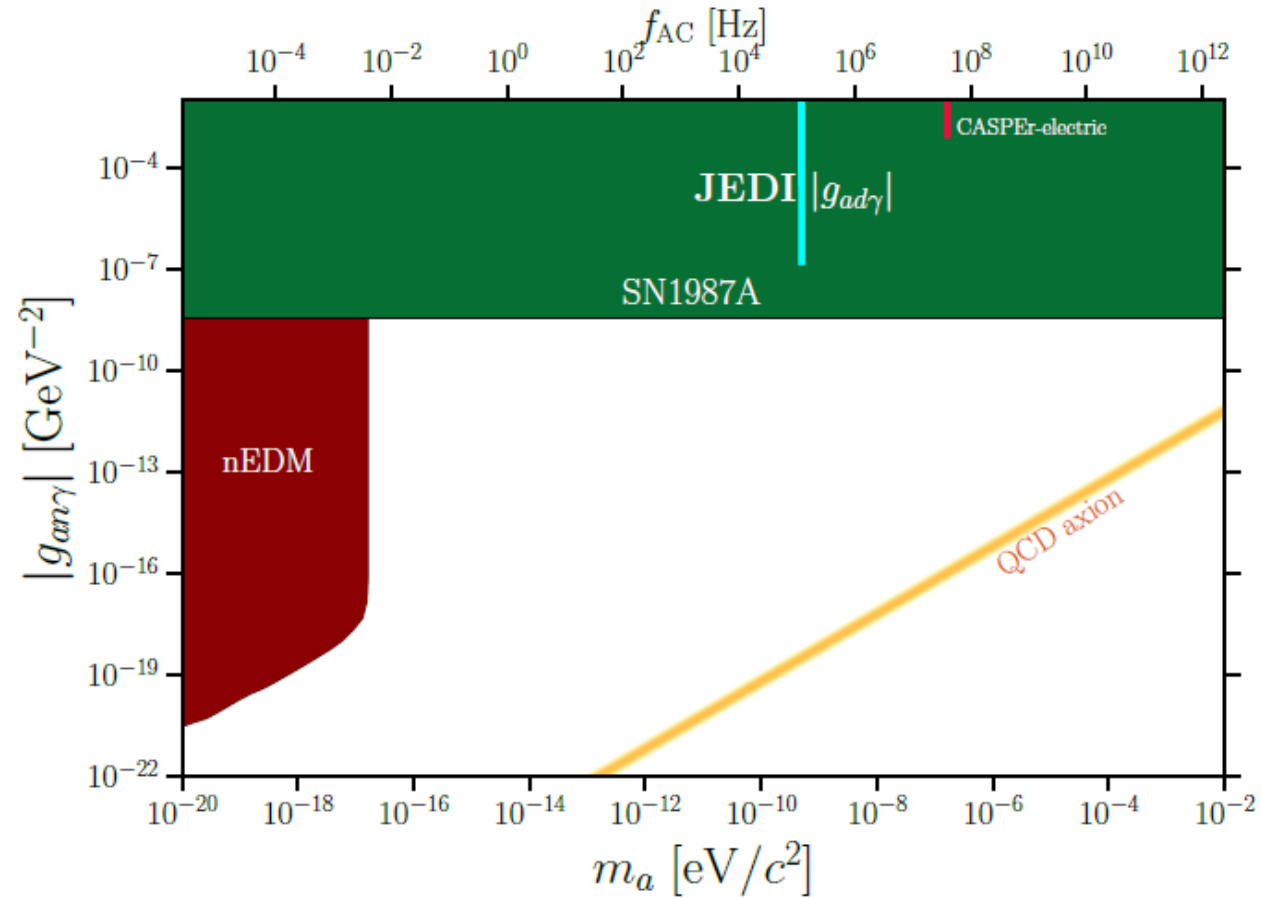


FIG. 19. The upper bound on  $|g_{ad\gamma}|$  from this experiment (in cyan) is shown along with the bound on  $|g_{an\gamma}|$  from experiments such as nEDM [12] and CASPER-electric [55] in different shades of red. Also, seen in green is the constraint from the SN1987A supernova energy loss. Figure courtesy [6, 56].

## Расширение области диапазона частот доступных спину в накопителе как аксионной антенне

- PTR (Prototype Test Ring, [CPEDM Collaboration](#)): гибридное магнитное + электростатическое удержание на орбите. **Прототип** кольцевого накопителя протонов с замороженным спином (частота прецессии спина равна циклотронной частоте)
- NICA с прямолинейным байпасом

## Гибридный PTR, протоны с энергией 45 МэВ (SPEDM Collab.)

Вращение импульса

$$\Omega_c = \frac{q}{m\gamma} \left( -\mathbf{B} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{E}}{v^2} \right)$$

Вращение спина

$$\Omega_s^{\text{mdm}} = \frac{q}{m} \left\{ -G \mathbf{B} + \left( G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{E}}{c^2} \right\}$$

$$\Omega_s^{\text{edm}} = -d \{ \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \}.$$

Замороженный спин

$$\Omega_s^{\text{mdm}} = \nu_s \dot{\Omega}_c = 0$$

Вращение спина только за счет ЭДМ

Прототип чисто электрического протонного (232 МэВ) кольца с замороженным спином для прецизионного поиска ЭДМ

Спин в таком PTR для поиска аксионов непригоден

## PTR как аксионная антенна

NNN

- Снимаем условие замороженности спина
- Меняем синхронно  $E$  и  $B$  поля, сохраняя циклотронную частоту

$$\Delta B = \frac{1}{v^2} [\mathbf{v} \times \Delta E]$$

- Частота прецессии спина растет

$$\nu_s = -G_p \gamma \frac{\Delta E}{E_0}$$

- Аксионный резонанс при

$$\omega_a = -G_p \gamma \Omega_c \frac{\Delta E}{E_0}$$

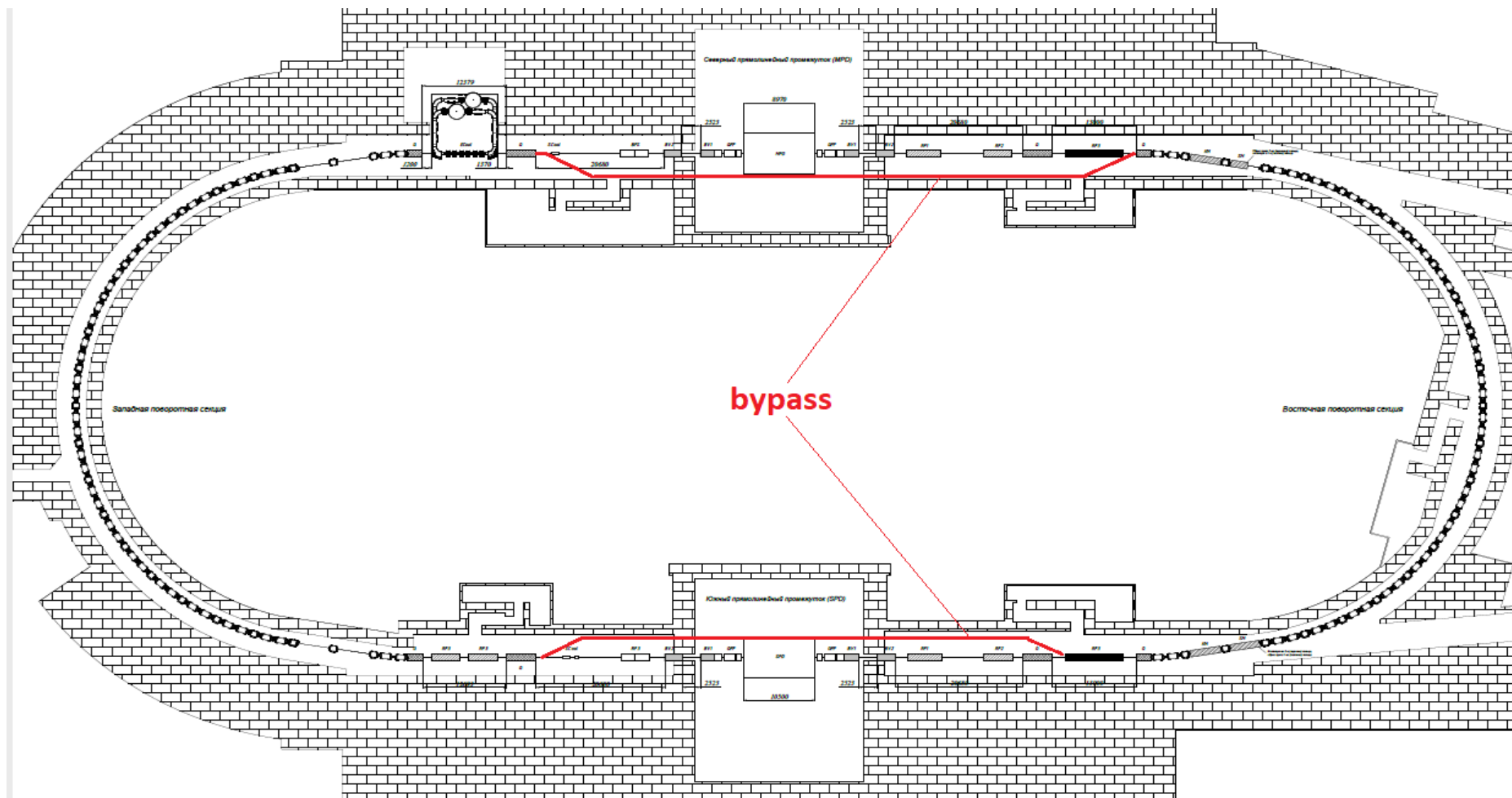
- Диапазон частот от 0 до  $\sim 0.5$  MHz (массы аксиона до нескольких наноЭв/ $c^2$ ) в зависимости от магнитных полей, достижимых в магнитах с воздушной обмоткой.



# Смена парадигмы для протонов

- **Подход JEDI:** работа с горизонтальной поляризацией требует циклы с продолжительностью  $\sim 200$  с. Возможно только для дейтронов.
- Ожидаемое время когерентности горизонтальной поляризации протонов и в лучшем случае  $< 10$  с.
- Пока на COSY не удалось добиться даже 1 с.
- **Новая парадигма:** спонтанное вращение вертикального спина в прецессирующий горизонтальный.
- Плюсы: (1) огромное время жизни вертикальной поляризации,  
(2) однозначное выделение осциллирующей спиновой асимметрии  
вверх-вниз от горизонтального спина,  
(3) шансы на регистрацию сигнала даже при коротком времени  
когерентности горизонтального спина  
(4) нет проблемы начальной спиновой фазы  
(5) нет нужды в спин-флиппере

## Байпасс на НИКА (Ю.В. Сеничев и др.)



## Замена прямой секции статическим фильтром Вина ФВ

- Перемежающиеся магнитные диполи и электростатические дефлекторы столь же хороши, как и непрерывный фильтр Вина
- 1:1 телескоп для импульса, но вращает спин вокруг вертикальной оси
- Независимо от силы полей, ФВ не влияет на энергию и траекторию пучка
- Полоса частоты прецессии спина **протонов** при фиксированной энергии пучка

$$\Delta f_s = \frac{(1+G) q E L}{2\pi m c^2 \gamma^2 \beta^2} f_{\text{rev}} \rightarrow 2 \times 35 / \gamma^2 \beta \text{ kHz}$$

- Сканируем по электрическому полю от 0 нуля до максимального  $E = 5 \text{ МэВ/м}$ , удвоение полосы частот до 140 kHz если переполюсовать электрическое поле.
- Байпасс длиной  $\sim 100 \text{ м}$ , в пересчете на непрерывный ФВ длина около  $L = 25 \text{ м}$
- **Сигнал аксиона:** спонтанное появление прецессирующей горизонтальной поляризации при сканировании по электрическому полю в обоих байпассах
- Нет нужды в спин-флиппере, но обязателен внутренний поляриметр как у JEDI

## Заключение:

- Разрешение проблемы CP-несохранения аксонами столь красиво, что природа не могла эту возможность пропустить
- **Аксион возможный источник темной материи**
- Кроме канонического КХД аксиона возможны аксионоподобные частицы с неканическими константами связи: **вопрос открытый**
- Преимущество ускорительных спиновых экспериментов против лабораторных: **усиление псевдомагнитного поля на 3 порядка**
- PTR как часть пост-LHC программы CERN ????
- **NICA уникален возможностью байпасса --- не упустим этот шанс!**
- Сверх поисков ЭДМ байпасс на NICA позволяет расширение полосы масс искомых аксионов на два порядка против изученной JEDI на COSY
- **Байпасс позволяет сканировать по массе аксиона при фиксированной энергии пучка !**
- Новое оборудование: кроме электрических дефлекторов **только внутренний поляриметр** прецессирующей горизонтальной поляризации
- **Простота эксперимента**

Спасибо за терпение и внимание!

# QFS at NICA (Yu. Senichev et al): bypass with the radial E-field to rotate EDM

