

Аксион: от загадки CP в КХД до спина в накопителях как аксионной антенны

Н.Н. Николаев

Институт теоретической физики им. Ландау РАН

Landau Week-2023, Erevan, 22-29 June, 2023 г

HEP INSPIRE: ~6000 публикаций с упоминанием аксионов

Никаких шансов даже на букву А в этой телефонной книге

План:

- Стандартные слова о проблеме CP-симметрии в КХД
- От θ -члена к аксионам (и аксионоподобным частицам APL)
- Ограничения из отсутствия ЭДМ нейтрона
- Марсель Эме: «Человек проходит сквозь стену»

Алексей Ансельм: свет проходит сквозь стену

- Галактическое аксионное поле и темная материя
- Под каким фонарем искать аксионы и APL ?
- Осциллирующий ЭДМ и псевдомагнитное поле
- Аксионный ЯМР в накопителях: эксперимент JEDI
- Накопитель PTR: широкополосный приемник аксионная антенна
- Байпас делает NICA широкополосным детектором аксионов
- Заключение

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, I.V.Kolokolov.V.F. Fogel, Ferromagnetic detector of (pseudo) Goldstone bosons, JETP Letters, 50 (1989) 65
- 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, УФН, 193, 113 (2023)
- A.Silenko, Relativistic spin dynamics conditioned by dark matter axions, Eur.Phys.J. C 82, 856 (2022)
- 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, [J. Phys.: Conf. Ser. 2420, 012052 \(2023\)](#)
- 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]. Accepted for publication in Phys. Rev. X

Загадка CP (P & T) сохранения в Квантовой Хромодинамике

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

P- и T-несохраняющее и сохраняющее перенормируемость КХД взаимодействие

Никаких ограничений на константу

Но в пертурбативном секторе вклад в действие зануляется:

$$G^{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a = \partial_\mu K^\mu,$$

Топологический ток

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

Загадка CP (P & T) сохранения в Квантовой Хромодинамике cont'd

Квантовая аномалия Адлера-Белла-Джекива и инстантонный вакуум:

Pescei&Quinn (1977,1978), Weinberg (1978), Wilczek (1977)

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

V. Baluni , R. Crewther, P. Di Vvcchia & G.Veneziano (1979)

Киральное вращение \rightarrow CP- несохранение в фермионном секторе

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

Ноль если есть один безмассовый кварк \rightarrow киральная симметрия $U(1)_{PQ}$

P- и T-несохраняющий статический ЭДМ нейтрона

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

КХД допускает $\bar{\theta} \sim 1$

Киральное подавление ЭДМ против ядерного магнетона $\kappa_{(a)} \sim \frac{m^*}{\Lambda_{QCD}} \approx 10^{-2}$

Эксперимент (PSI): $d_n < 1.8 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$ $\rightarrow \bar{\theta} \sim 10^{-10}$.

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

Уважающая себя $U(1)_{PQ}$ интересна только если она нарушена

Спонтанное нарушение PQ симметрии \rightarrow легкий псевдоскалярный аксион

Соотношение Вайнберга для PS(PV) аксион-фермионного взаимодействия (1978),

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

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

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

Масса аксиона?

- Когда случилось спонтанное нарушение PQ симметрии? До или после инфляции?

Спрашивайте экспертов в зале.

- Peccei & Quinn (1978): при электрослабом фазовом переходе. Уже авторам было ясно, что сценарий непроходной: слишком сильное взаимодействие аксиона с веществом.
- Вопрос о фазовом переходе пока остается полностью открытым.
- Сценарии невидимого аксиона с f_a до планковской массы при расширении SM:
 - Kim(1979)-Shifman-Vainshtein-Zakharov (1980), взаимодействие аксиона с лептонами только через радиоправки
 - Dine-Fischler-Srednicki (1981)-Zhitnitsky(1980), прямое аксион-лептонное взаимодействие

- Отзвук ABJ аномалии:

$$L_{a\gamma} = g_{a\gamma} \phi_a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

- Примеры поиска аксиона по $a\gamma\gamma$ взаимодействию через аксиальную аномалию ABJ:

$$L_{a\gamma} = g_{a\gamma} \phi_a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

- **Свет проходит сквозь стену** (Ансельм 1985) : в магнитном поле сверхмощный лазер рождает невидимый аксион (эффект Примакова), который за стеной обратным эффектом Примакова дает свет. Или просто смотреть «телескопом» на известный источник аксионов (Солнце). Идут (готовятся) в поле индустриального масштаба эксперименты в DESY и CERN.
- Версия подхода Ансельма: гамма-кванты сверхвысокой энергии 250 ТэВ от GRB 221009A с $z=0.15$ продрались сквозь реликтовое излучение в обличье аксионов **без гибели по Никишову** до Млечного Пути, и затеком возродились фотоном в пределах Млечного Пути (Троицкий (2022))
- Галоскоп в радиодиапазоне (Sikivie 1983); аксион проникает в резонатор в сильном магнитном поле и в резонаторе можно возбудить электрическое поле, если масса аксиона = частоте резонатора. Было с десятков галоскопов, несколько самых продвинутых близки к порогу чувствительности для KSVZ. Полоса чувствительности привязана к размеру резонатора. Для галактического гало **решаем уравнения Максвелла в учете ABJ аномалии**. Гиротропная среда (Мандельцвейг, Шапиро (1969))
- Свежий новый вариант: перешептывание резонаторов через непроницаемую стенку. (D. Salnikov et al. 2023)

Реликтовые аксионы как кандидат на темную материю

- Конденсат галактических аксионов: Preskill, Wise, Wilczek (1983), Abbott, Sikivie (1983), Dine, Fischler (1983)

$$a(x) = a_0 \cos(\omega_{(a)}t - \mathbf{k}_{(a)} \cdot \mathbf{x})$$
$$\omega_{(a)} = \frac{m_{(a)}c^2}{\hbar} \quad a_0 = \frac{1}{m_{(a)}} \sqrt{\frac{2\rho_{\text{DM}}\hbar}{c^3}}$$

- Массы от 10^{-7} до 10^{-22} эВ/ c^2

- Вириальная скорость в звездном скоплении

$$v = 10^{-3} c$$

- Время стабильности фазы

$$\tau_a = \frac{\hbar}{m_a v^2}$$

- Длина когерентности

$$l_a = \frac{\hbar}{m_a v}$$

больше размеров лаборатории для легких аксионов

- Движение спина в псевдоскалярном конденсате: PV (PS) лагранжиан Вайнберга есть взаимодействие спина с (псевдо)магнитным полем **пропорциональным скорости относительно конденсата**

Воробьев, Колоколов, Фогель, Письма в ЖЭТФ 50, 58 (1989); Barbieri (1989); Pospelov, Ritz, Voloshin (2008); Stadnik, Flambaum (2014); Graham, Rajendran (2011)

спин + магнитное поле \rightarrow магноны, ЯМР, ...

MADMAX dielectric haloscope (DESY, > 2030), dipole field 9 T, opening 1.34 m, frequency range 10-100 GHz

$$L_{a\gamma} = g_{a\gamma} \phi_a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

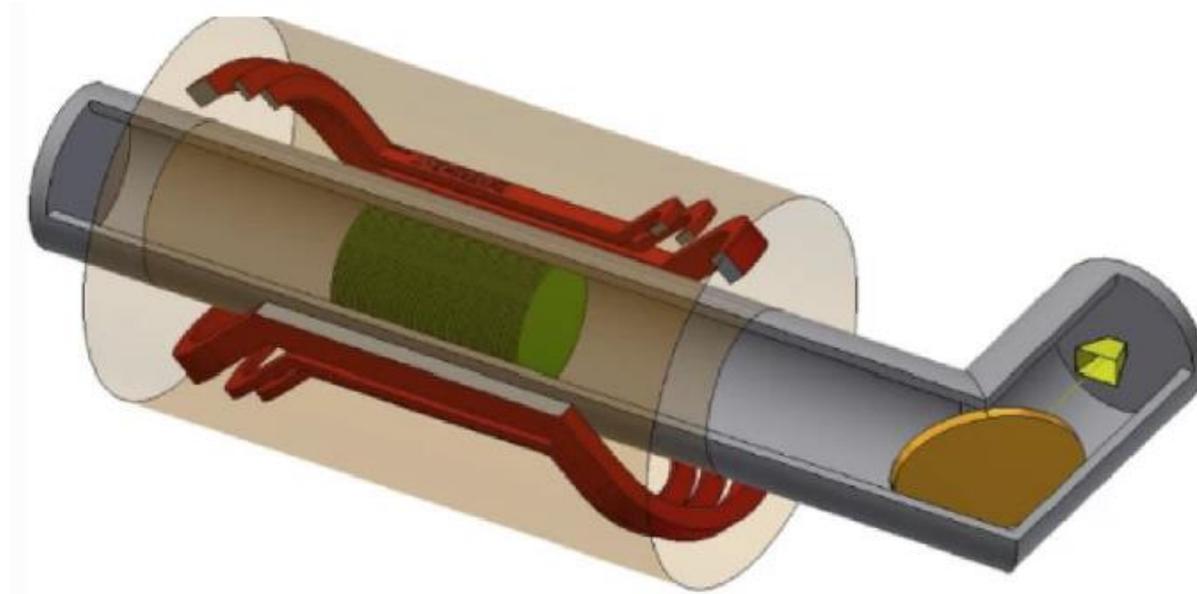


Figure 2: Preliminary baseline design of the MADMAX approach (copied from [13]). In the Figure, the three parts of the experiment are shown: (1) magnet (red racetracks); (2) booster, consisting of the mirror (copper disk at the far left) and the dielectric disks (green); (3) the receiver, consisting of the horn antenna (yellow) and the cold preamplifier inside a separated cryostat. The focusing mirror is shown as an orange disk at the right .

DESY, > 2028, гелиоскоп: 10 м соленоид, 2 Т, массы 1-10 КэВ, споткнулись на том, что кроме России никто не может поставить нужный сверхпроводящий кабель

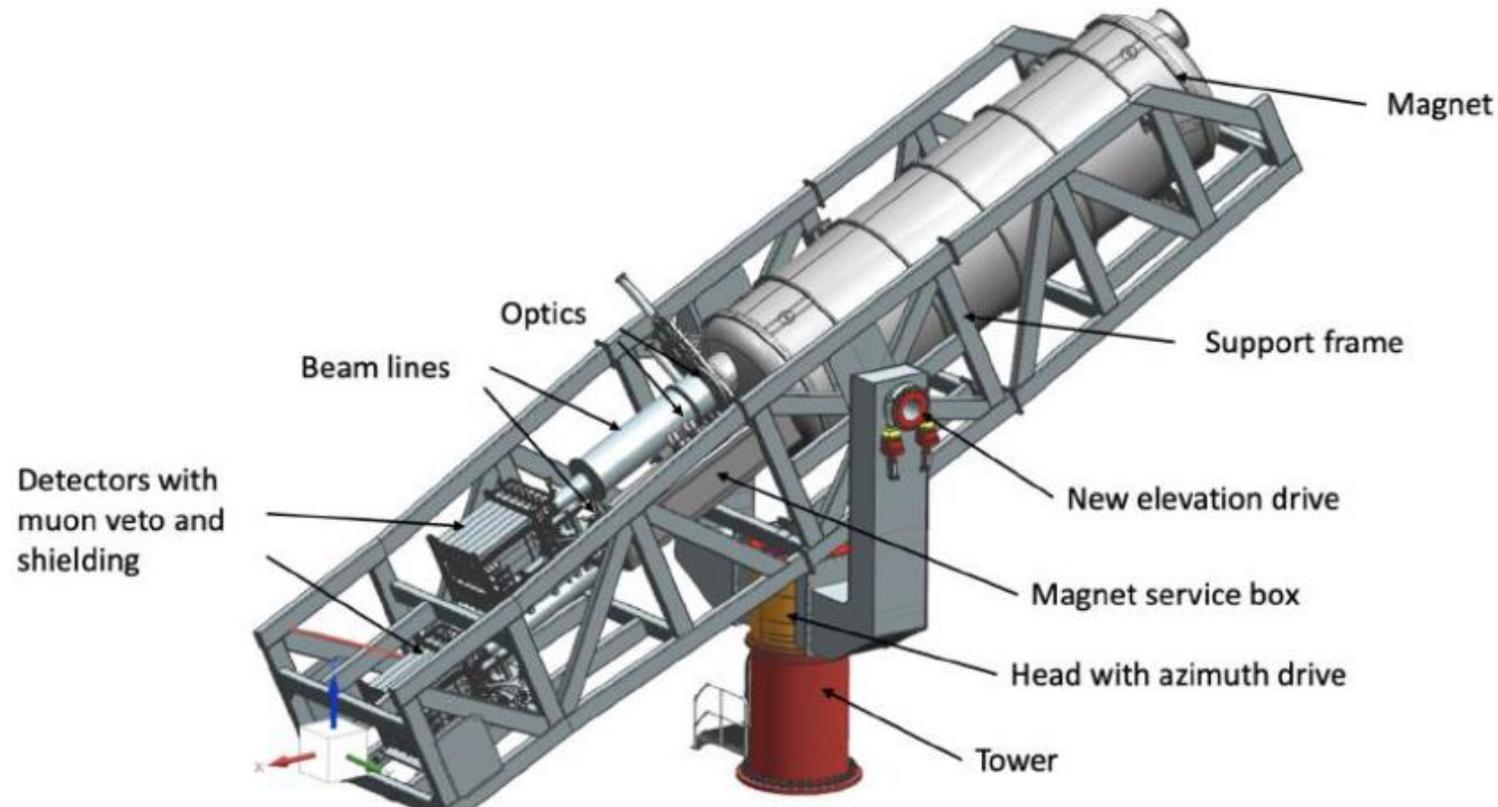
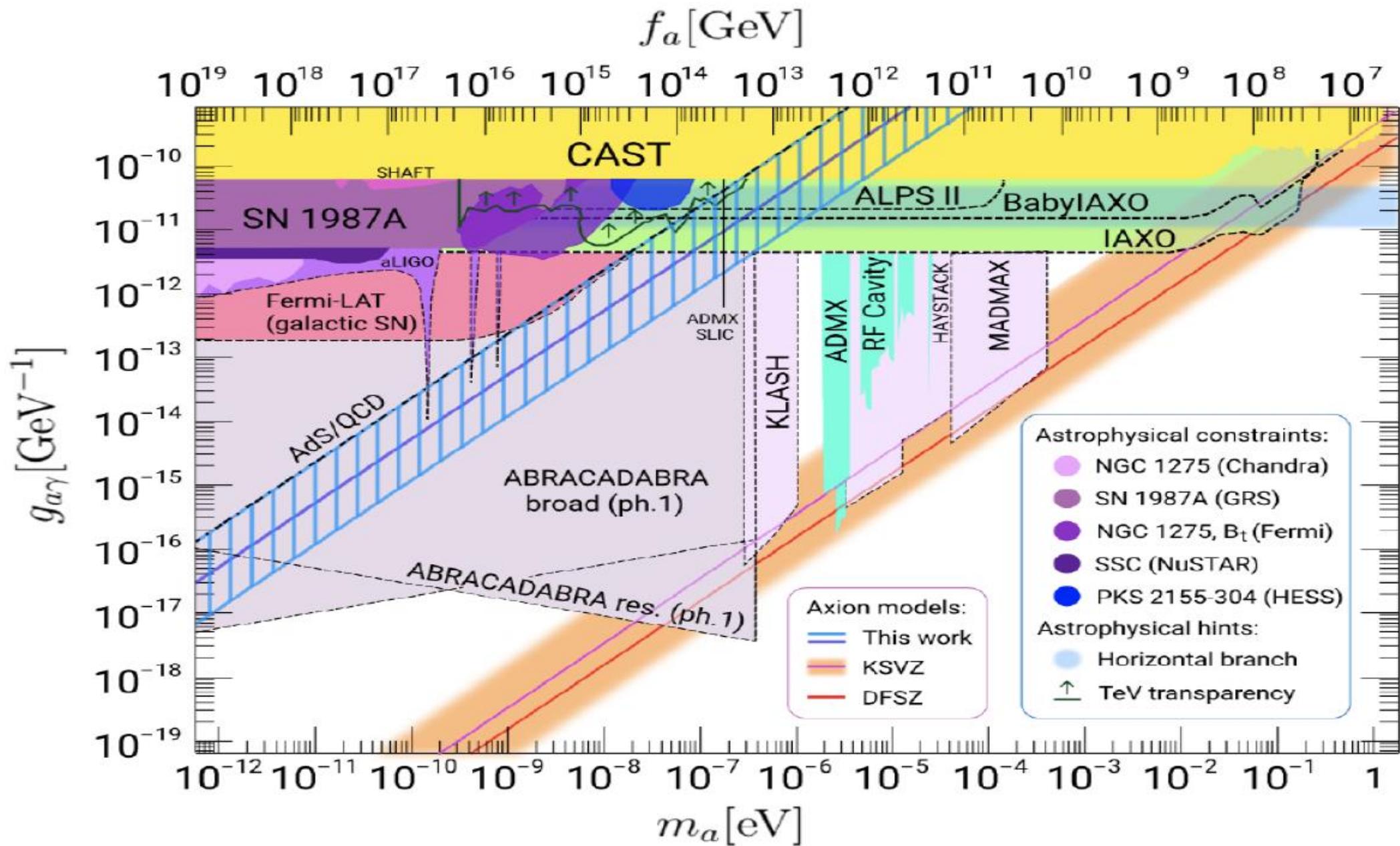


Figure 3: Overview of the BabyIAXO experiment. The system features a total length of ~ 21 m [19].



ЭВМ и взаимодействие Вайнберга: спин в накопителях как аксионная антенна

- Спин в накопителе: осциллирующий ЭДМ нуклонов и псевдомагнитное поле (Silenko (2022), NNN (2022))

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

Псевдомагнитное поле ЭДМ в терминах циклотронного вращения

- Спин как аксионная антенна: спонтанное вращение спина из вертикали в плоскость кольца и наоборот, если прецессия спина в удерживающем В-поле накопителя в резонансе с осцилляциями аксионного поля.
- Скорость на орбите кольца на 3 порядка выше скорости «холодного» спина на Земле
- Псевдомагнитное поле всегда касательно к орбите → радиочастотный соленоид по всему кольцу
- ЭДМ вращает спин чрез переносное $\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ на орбите → радиочастотный фильтр Вина
- У двух ротаторов спина оси вращения перпендикулярны, но они сдвинуты по фазе на $\pi/2$ → после усреднения по Боголюбову-Крылову два вращения спина складываются когерентно
- Киральное подавление роли осциллирующего ЭДМ.
- Общая проблема всех поисков аксиона резонансными методами: под тем ли фонарем смотрим?
- Масса аксиона неизвестна: надо угадать массу аксиона сканируя по частоте прецессии спина (типичный метод Фруассара-Стора).

Deuterons, $p = 0.97 \text{ GeV}/c$, JEDI @ COSY (arXiv:2208.07293 [hep-ex])

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

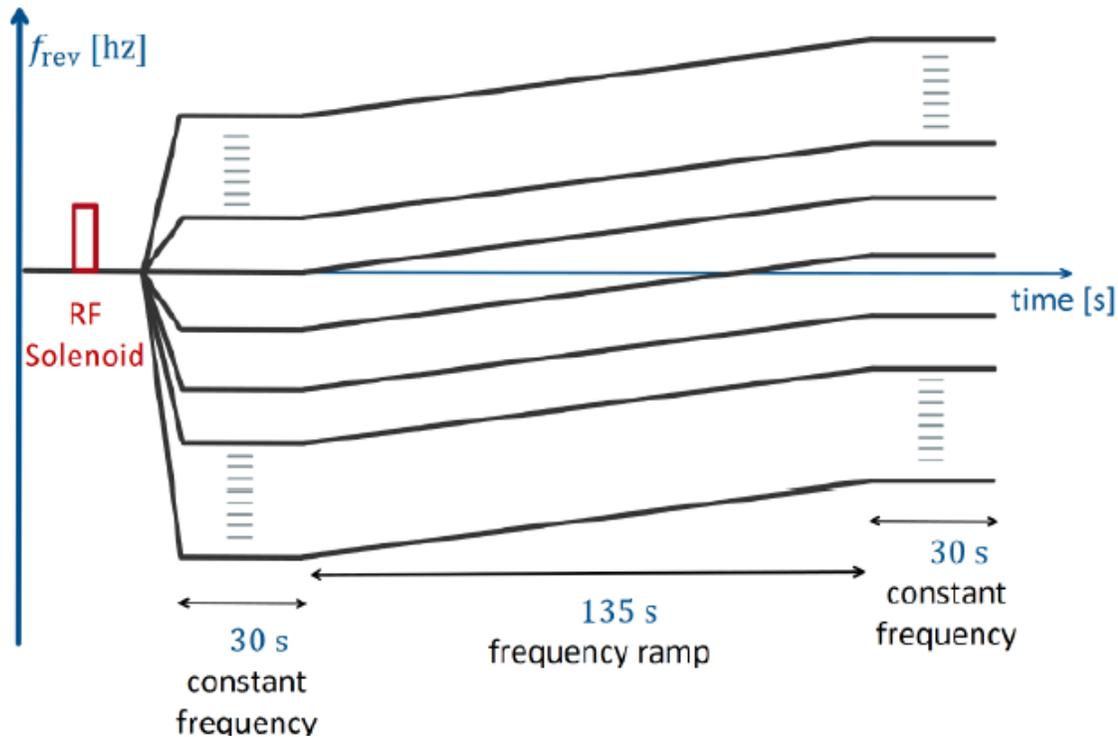
Revolution frequency	f_{rev} [Hz]	750602.6
Spin resonance frequency	f_{sol} [Hz]	629755.3
Spin tune frequency	f_{spin} [Hz]	120847.3
Lorentz factor	γ [1]	1.126
Beam velocity	β [c]	0.460
Orbit circumference	l [m]	183.57

Put the spin in the ring plane

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

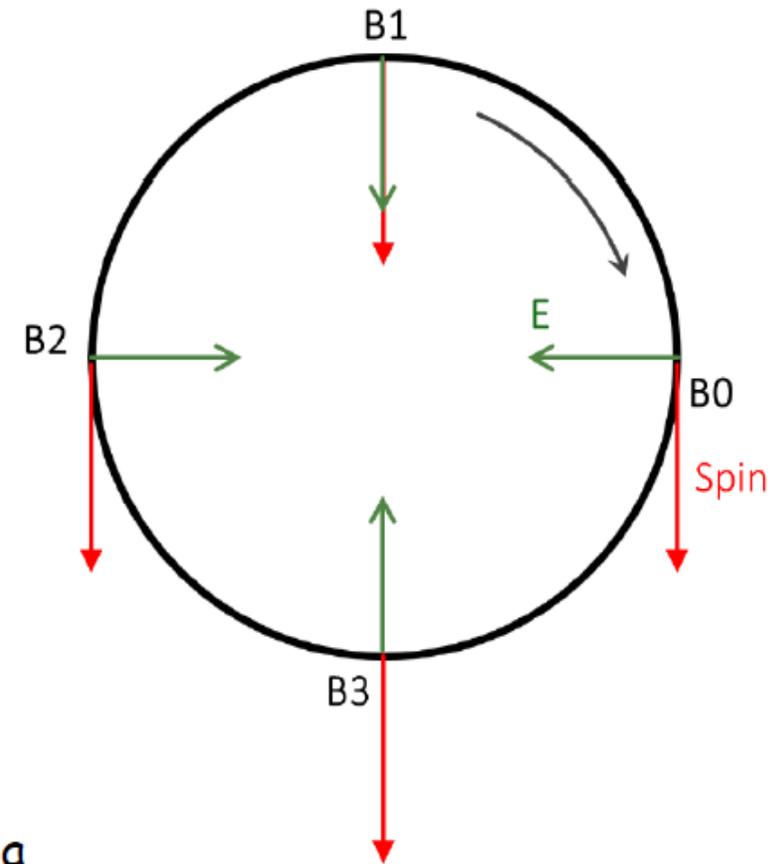
Look for a sudden buildup of the vertical polarization

Axion mass range $4.95\text{-}5.02 \text{ neV}/c^2$

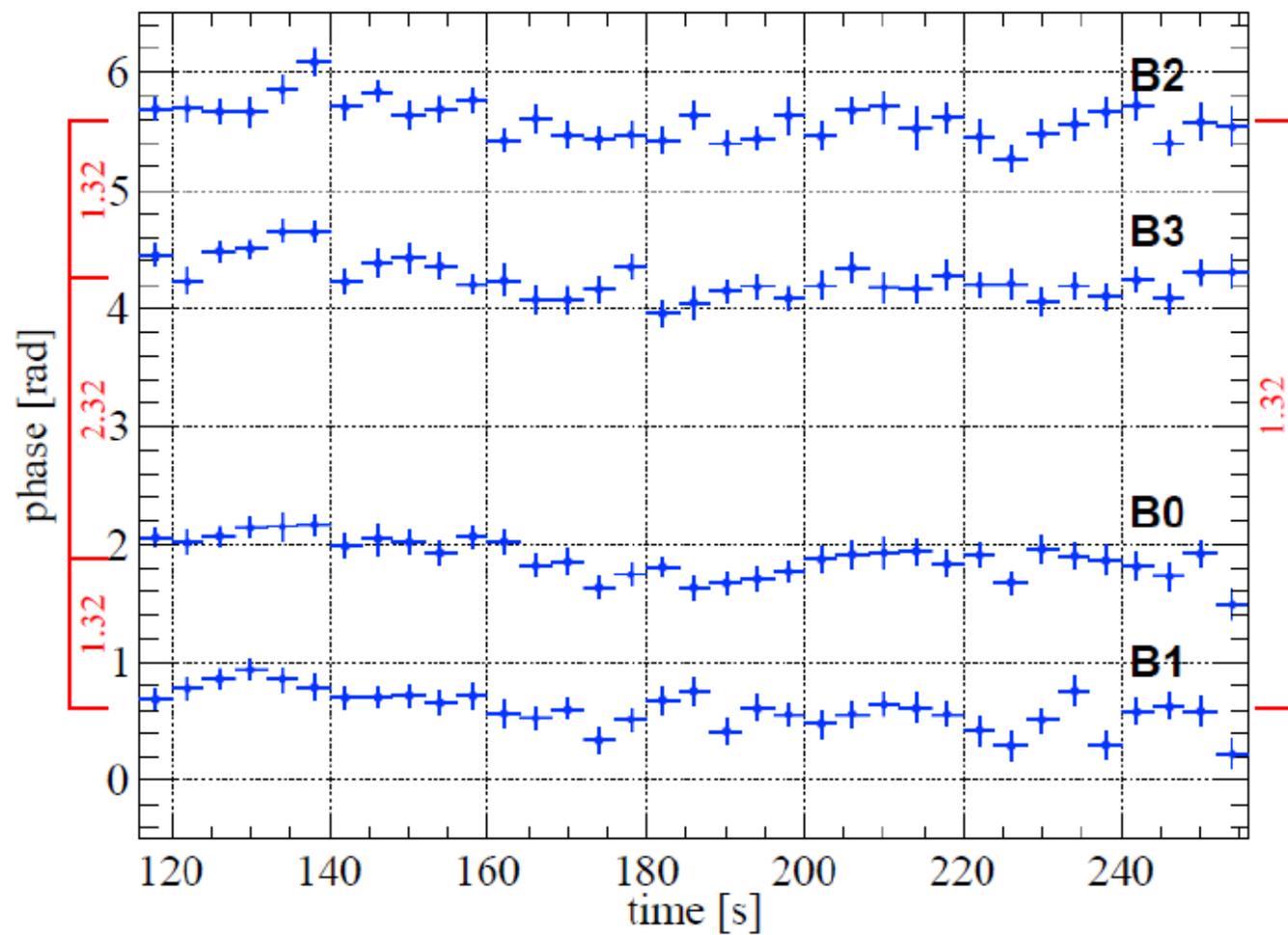


О проблеме начальной фазы

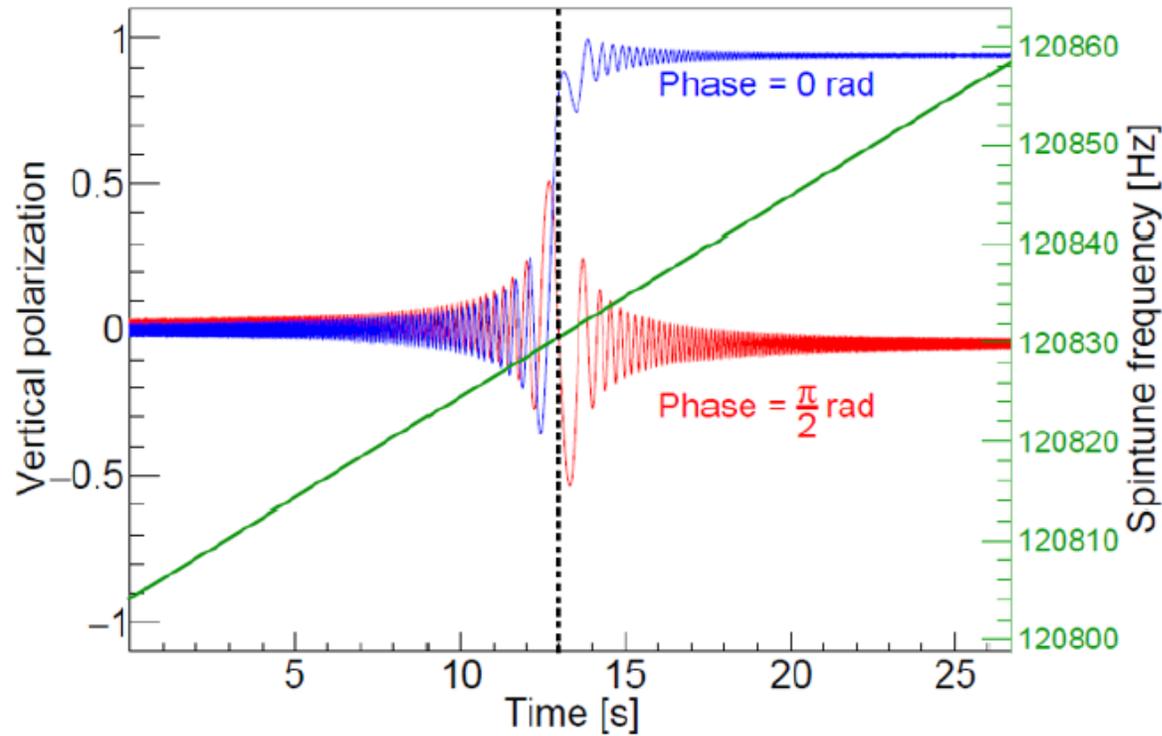
- Накопление вертикальной поляризации
- Резонансное вращение вертикального спина в горизонтальную плоскость радиочастотным соленоидом
- Например сканируя по частоте по Фруассару-Стора
- **Ложка дегтя:** угадали частоту, но фаза аксионного поля
- **неизвестна:** аксионное поле нельзя ни включить, ни выключить
- «Неправильная» относительная фаза Δ 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** поляризацией 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 ~ 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 поляризации**

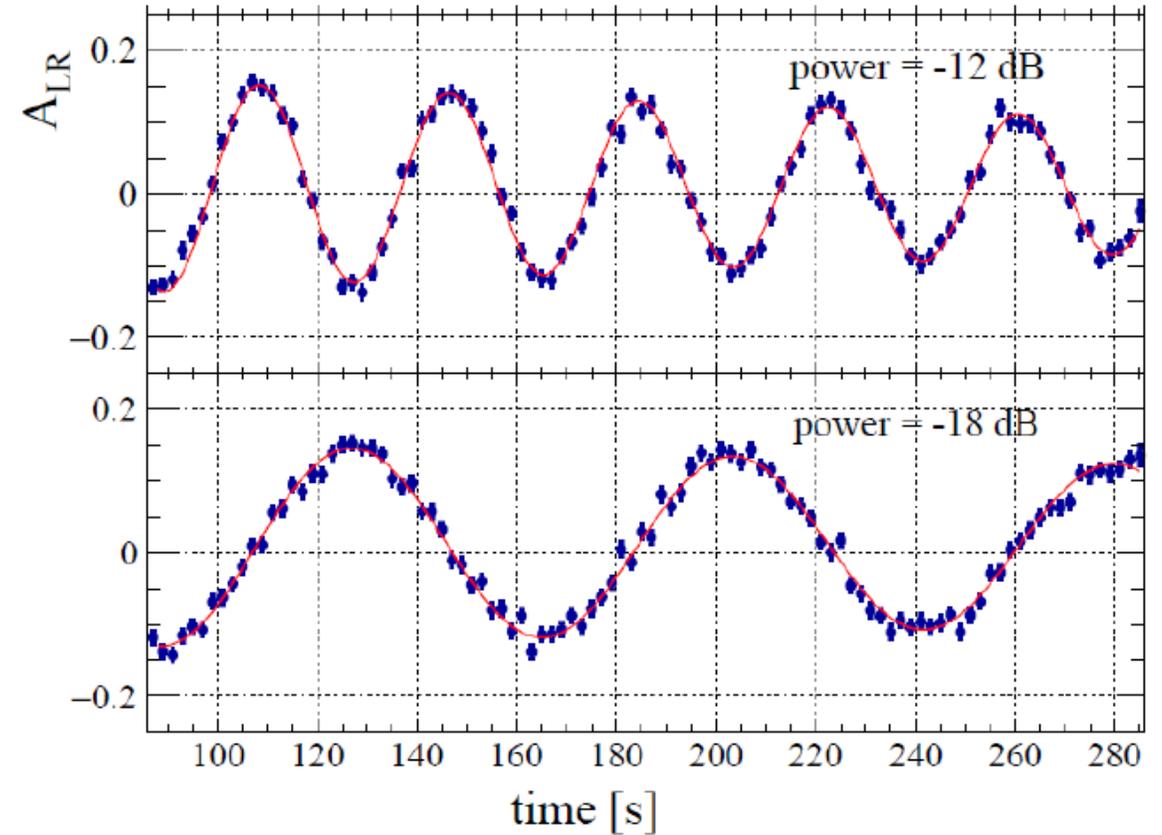
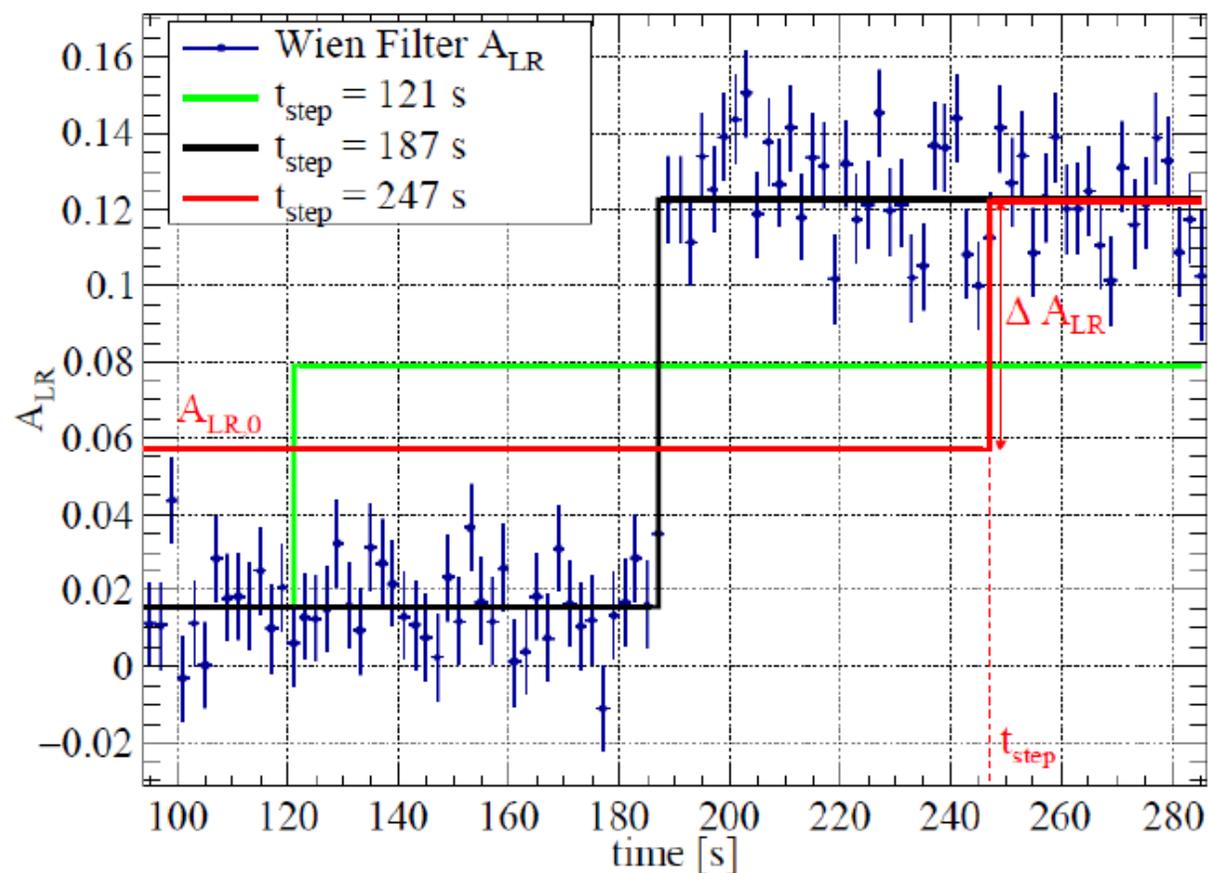


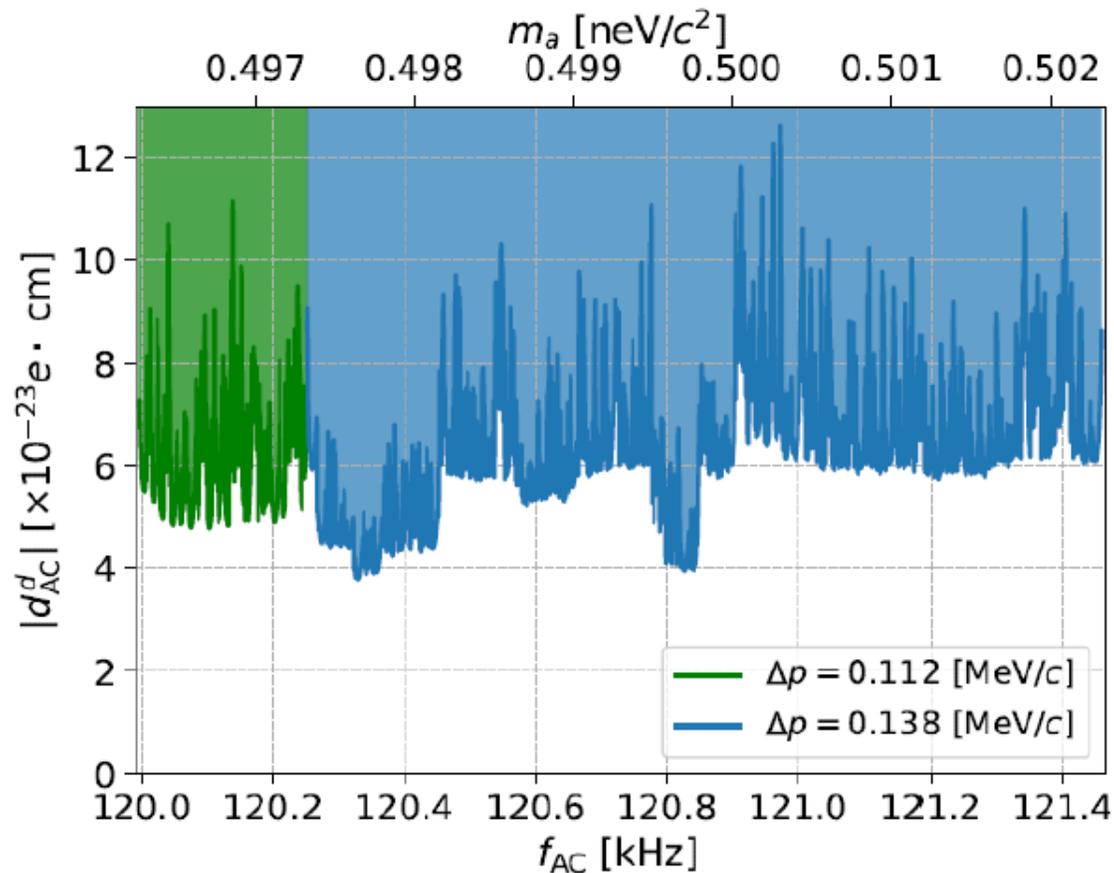
FIG. 4. Measurements of the oscillating left-right asymmetry proportional to the vertical polarization produced by the continuous operation of the Wien filter at various power levels (noted in figure). The horizontal axis is time in seconds. The Wien filter was on continuously. Data from all four bunches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

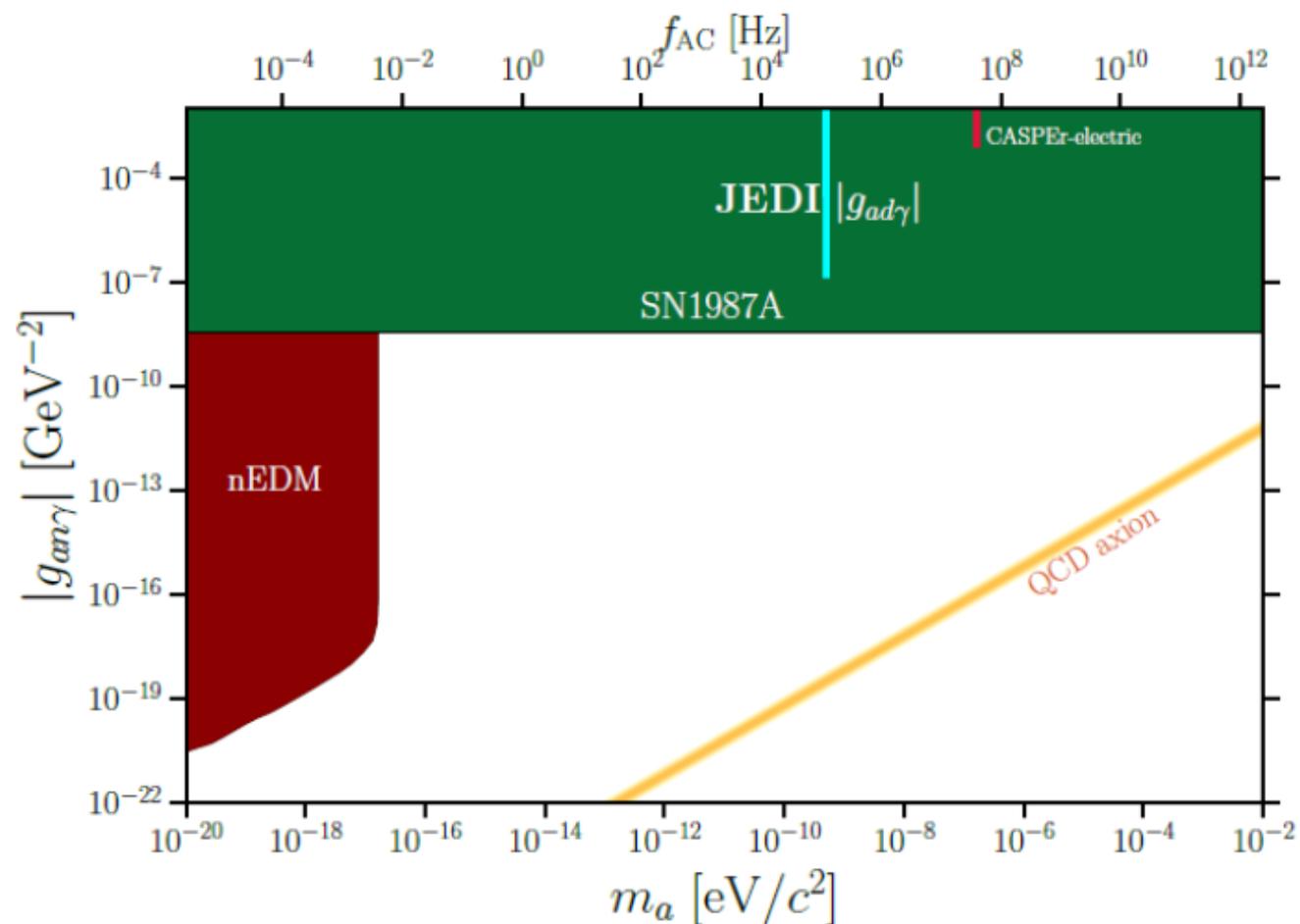


FIG. 19. The upper bound on $|g_{ad\gamma}|$ from this experiment (in cyan) is shown along with the bound on $|g_{an\gamma}|$ from experiments such as nEDM [12] and CASPEr-electric [55] in different shades of red. Also, seen in green is the constraint from the SN1987A supernova energy loss. Figure courtesy [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)
- Мечты: чисто электростатическое кольцо с чувствительностью к ЭДМ протонов с замороженным спином на уровне 10^{-29} е см (CPEDM Collab)
- Квазизамороженный спин Ю. Сеничева и др.: надежнее измерять сдвиг частоты вращения спина за счет ЭДМ
- Планы поиска и ЭДМ, и аксионф на NICA с прямолинейным байпасом
- Вначале PTR

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

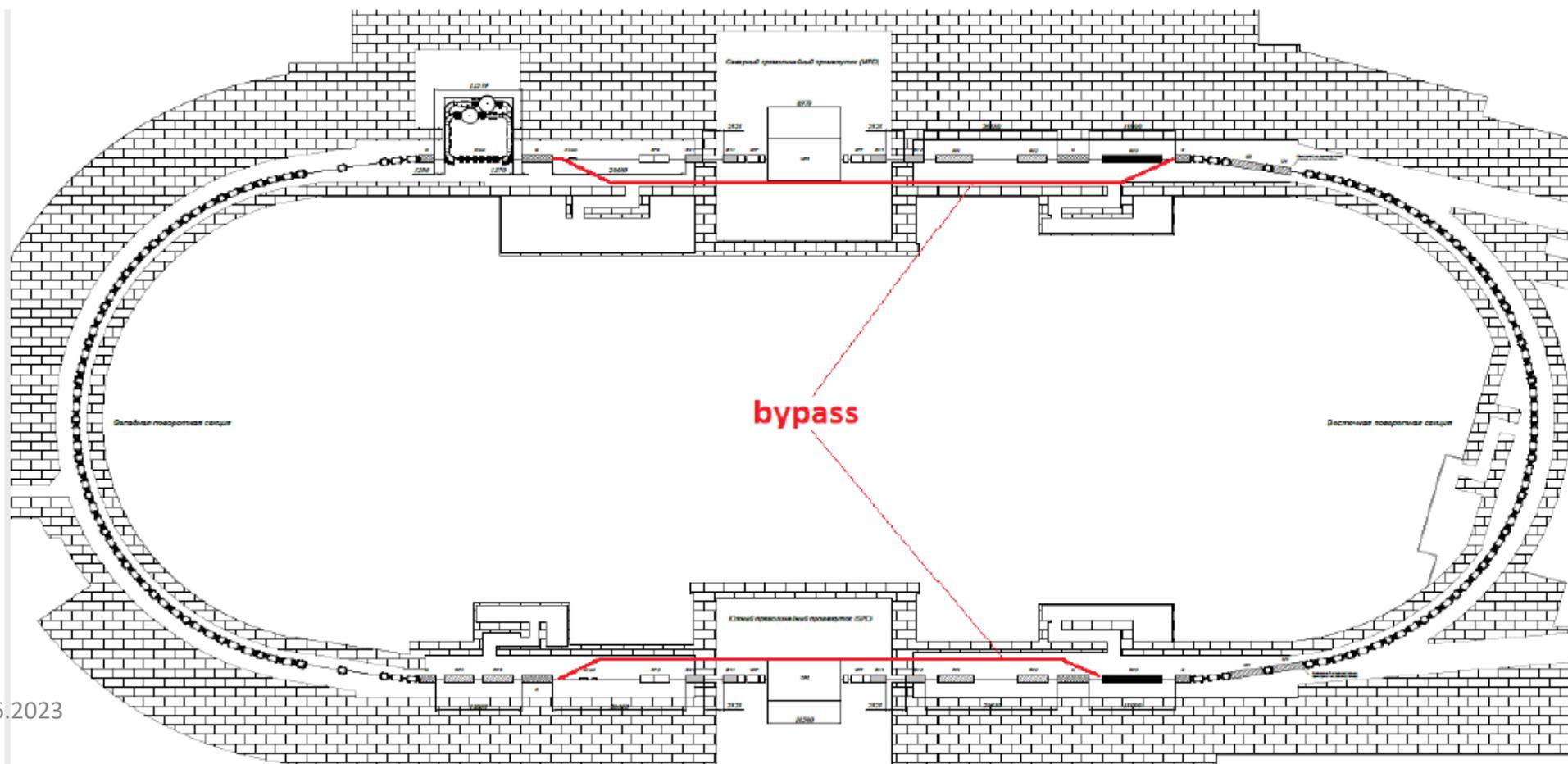
- Аксионный резонанс при $\omega_a = -G_p \gamma \Omega_c \frac{\Delta E}{E_0}$

- Диапазон частот от 0 до ~ 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 ~ 200 с. Возможно только для дейтронов.
- Ожидаемое время когерентности горизонтальной поляризации протонов в самом идеальном случае < 150 с.
- Пока на COSY не удалось добиться даже 1 с (причина была объяснена Алексеем Мельниковым: близость к спиновому резонансу)
- **Новая парадигма (NNN):** спонтанное вращение вертикального спина в прецессирующий горизонтальный.
- Плюсы: (1) огромное время жизни вертикальной поляризации,
(2) однозначное выделение осцилирующей 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.)



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 неканоническими 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 искомым 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!

