

Поиск аксионов на NICA: почему это интересно?

Н.Н. Николаев
Институт теоретической физики им. Ландау РАН

НИКА, ЛФВЭ, 13 сентября 2022 г

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).
- 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) MOPOTK024
- 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].
- 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].

Загадка CP 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

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

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 $\kappa_{(a)} \sim \frac{m^*}{\Lambda_{QCD}} \approx 10^{-2}$

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

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

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

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 магнитном поле

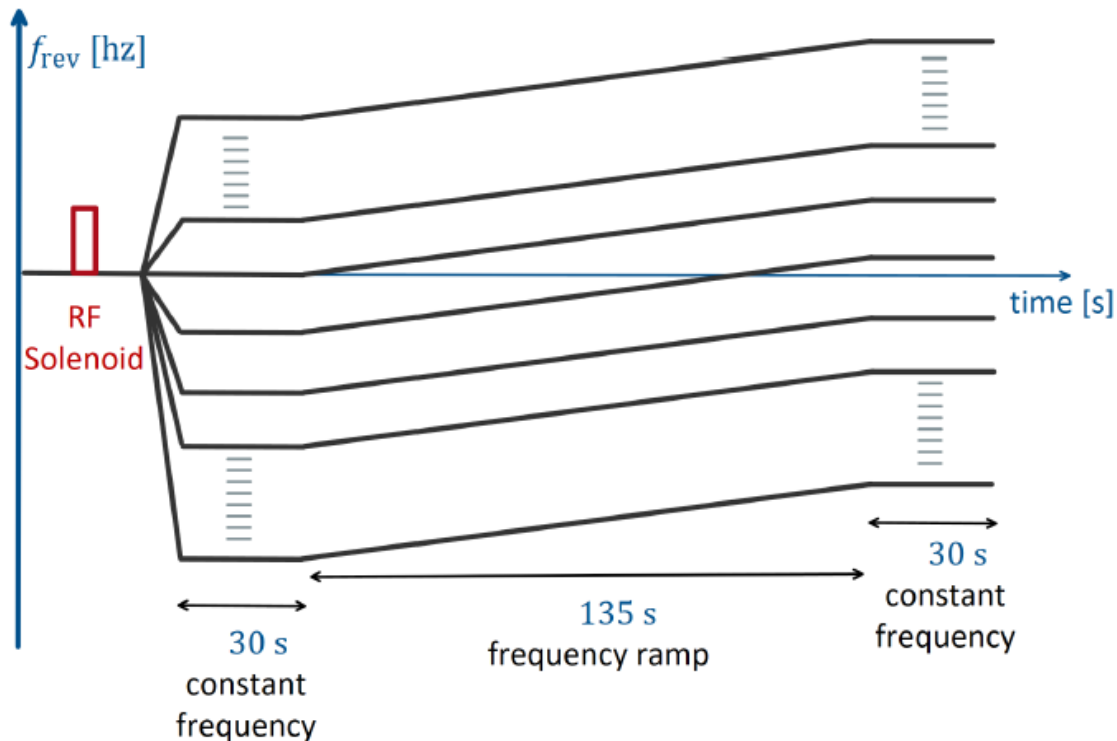
$$\Omega^{\text{ax}} = \frac{a_0}{f_{(a)}} g_f \left[\omega_{(a)} \sin(\omega_{(a)}t) \frac{\mathbf{v}}{c} - \kappa_{(a)} \gamma \cos(\omega_{(a)}t) \frac{\mathbf{v}}{c} \times \boldsymbol{\Omega}_c \right]$$

- **Скорость на орбите кольца на 3 порядка выше скорости движения Земли относительно центра Галактики.**
- Киральное подавление роли ЭДМ. 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 (аксионоподобных частиц) неизвестна: меняем частоту прецессии спина

Deuterons, 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

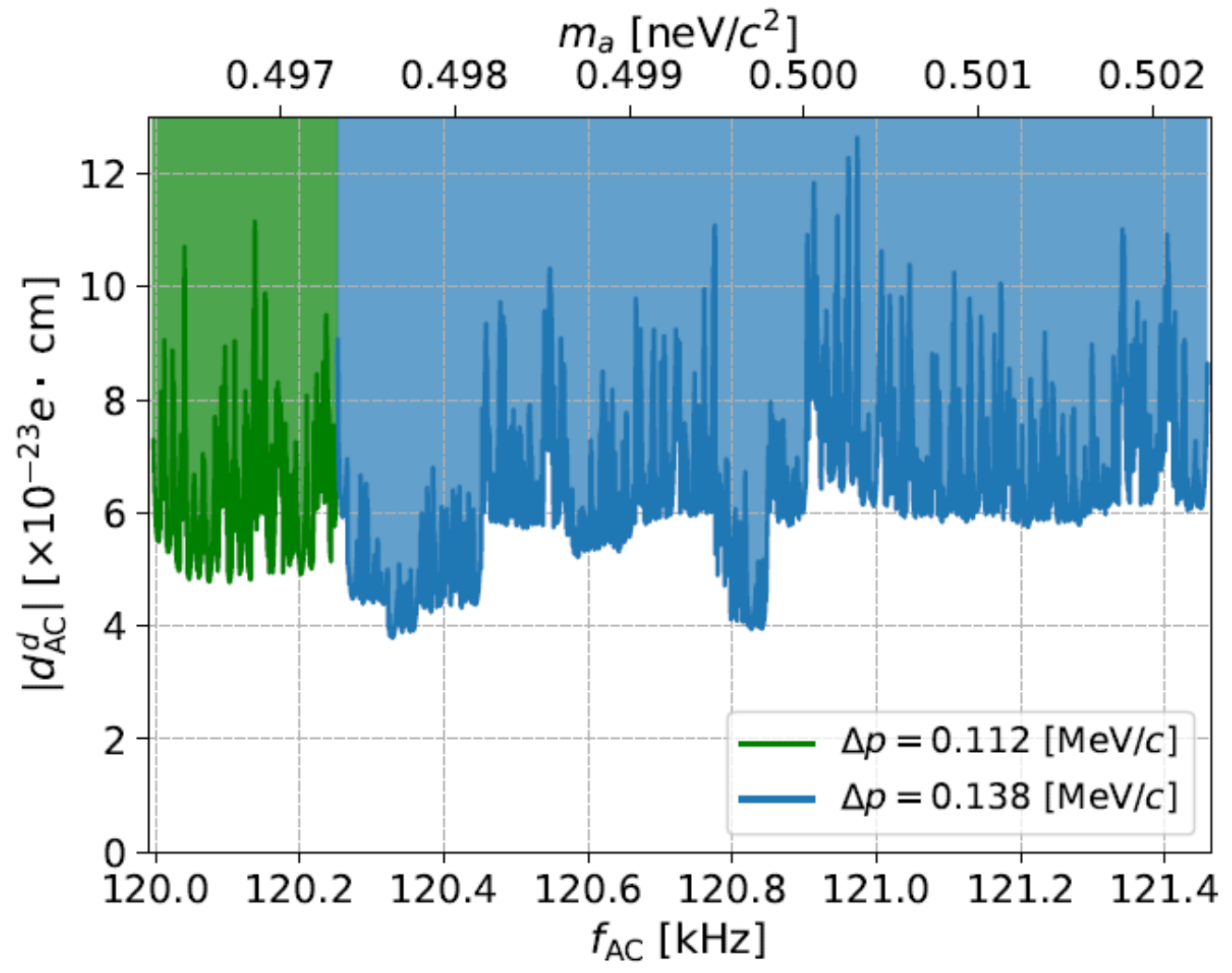


Put the spin in the ring plane, look for a sudden buildup of the vertical polarization

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

Axion mass range 4.95-5.02 neV/c²

Исключенные ЭДМ дейтрона



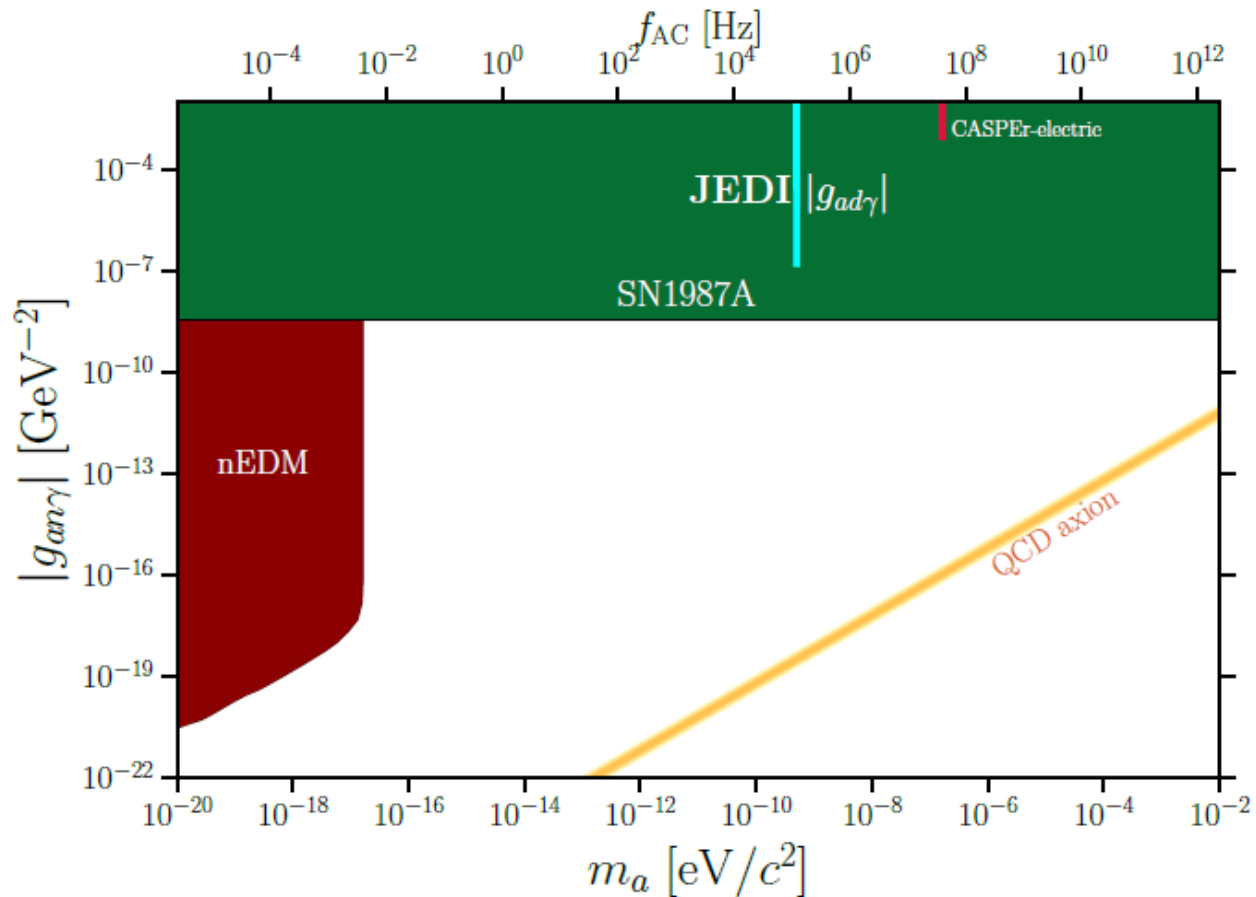
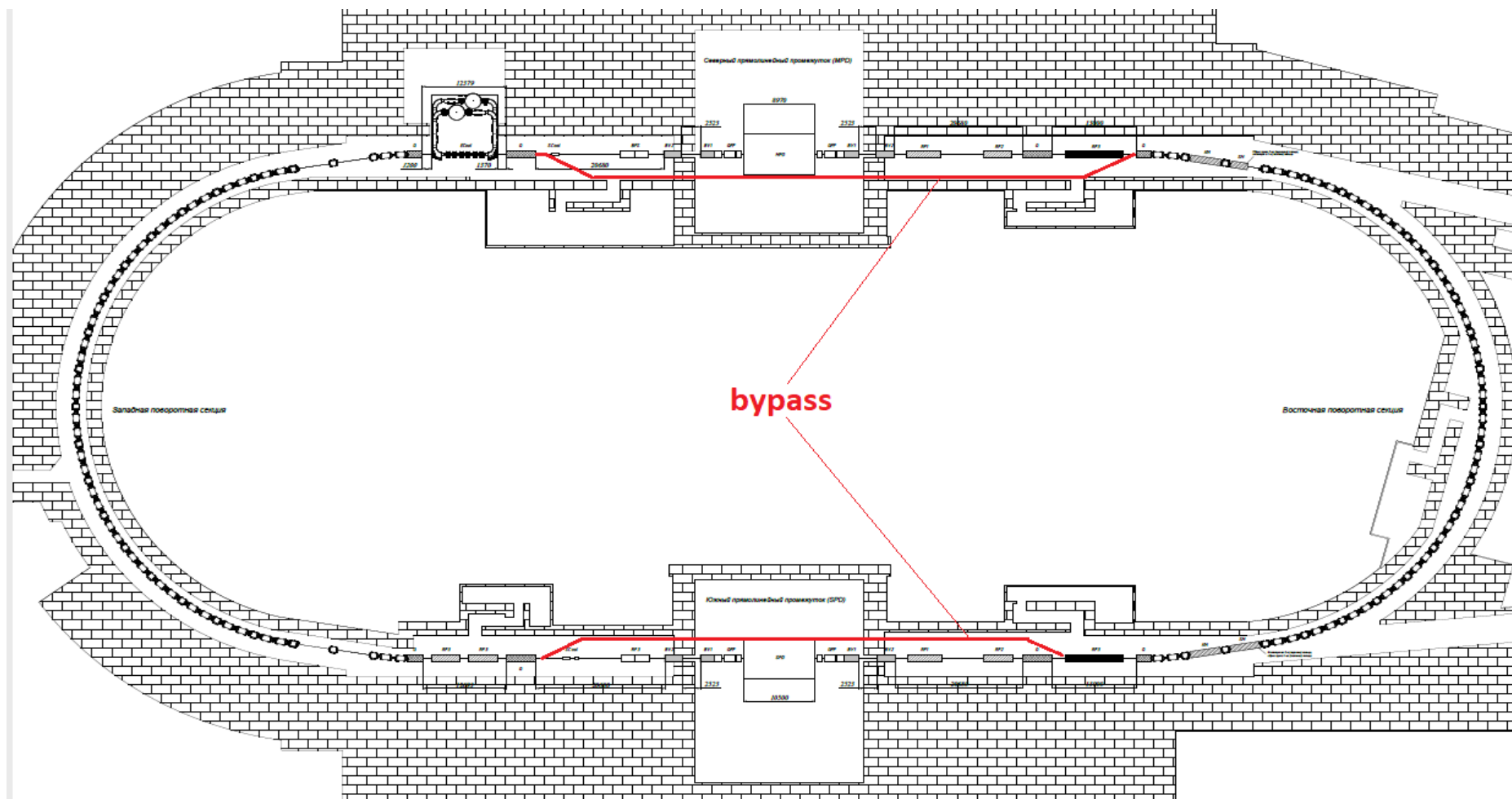


FIG. 19. The upper bound on $|g_{ad\gamma}|$ from this experiment (in cyan) is shown along with the bound on $|g_{an\gamma}|$ from experiments such as nEDM [12] and CASPER-electric [55] in different shades of red. Also, seen in green is the constraint from the SN1987A supernova energy loss. Figure courtesy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

Байпас на НИКА (Ю.В. Сеничев и др.)



Замена прямой секции статическим фильтром Вина ФВ

- Перебегающие 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 если переполюсовать электрическое поле.
- 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 байпасах
- 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
- Согласно HEP INSPIRE около 6000 публикаций с упоминанием аксиона
- 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
- NICA уникален возможностью байпаса --- не упустим этот шарс!
- Сверх поисков ЭДМ байпас на NICA позволяет расширение полосы масс искомым аксионов на два порядка против использованной JEDI на COSY
- Байпас позволяет сканировать по массе аксиона при фиксированной энергии пучка !
- Новое оборудование: кроме электрических дефлекторов только внутренний поляриметр прецессирующей горизонтальной поляризации
- Простота эксперимента

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

