



**Разработка систем управления и сохранения  
поляризации протонов и дейtronов в  
проекте “Новый Нуклotron”**

**Е.Д. Цыплаков<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>МФТИ, Долгопрудный, <sup>2</sup>ОИЯИ, Дубна

Специальность 1.3.18 — «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Материалы диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

# Актуальность работы

• **Тренд в современных экспериментах:** Ведущие лаборатории мира проектируют установки нового поколения с возможностью работы с **поляризованными пучками**, что необходимо для изучения тонких эффектов в структуре материи, недоступных с неполяризованными пучками:

- NICA (ОИЯИ, Дубна);
- EIC (США);
- HIAF/EicC (Китай).

• **Ключевая технологическая проблема:** Основное препятствие — **сохранение поляризации при ускорении**. Прохождение спиновых резонансов разрушает поляризацию и ухудшает качество пучка, что напрямую снижает эффективность экспериментов.

• **Фундаментальная научная значимость:** Исследования с поляризованными пучками направлены на решение неразрешенных проблем Стандартной модели, таких как:

- Иерархия масс и углов смешивания.
- Масштабы и природа CP-нарушения.
- Происхождение барионной асимметрии Вселенной.
- Поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) частиц.
- Вклад глюонов в спин протона («спиновой кризис»).

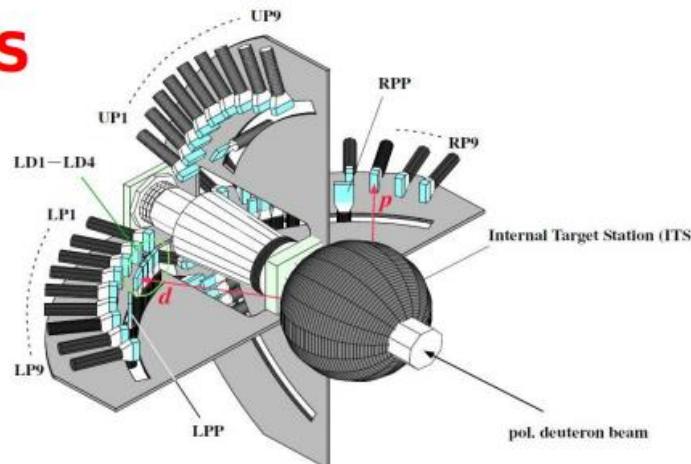
• **Практический вклад работы:** Разработаны и численно подтверждены методы ускорения с сохранением поляризации. Для комплекса NICA:

- Разработан пакет программ в среде Mathematica, на языке Python и на основе спин-трекинг кода Zgoubi, которые позволяют проводить верификацию экспериментальных данных на Нуклotronе с теоретическими расчетами.
- Разработаны подходы подавления резонансной деполяризации в Нуклotronе, которые позволят формировать высокоинтенсивные пучки протонов.
- Разработана методика управления поляризацией дейtronов в кольце Нуклотрона.
- Представлен концептуальный проект нового инжектора в форме «восьмерки» — ускорителя, работающего в режиме спиновой прозрачности без сибирских змеек.
- Программа первоочередных экспериментов для отработки технологий по сохранению и управлению спином частиц.

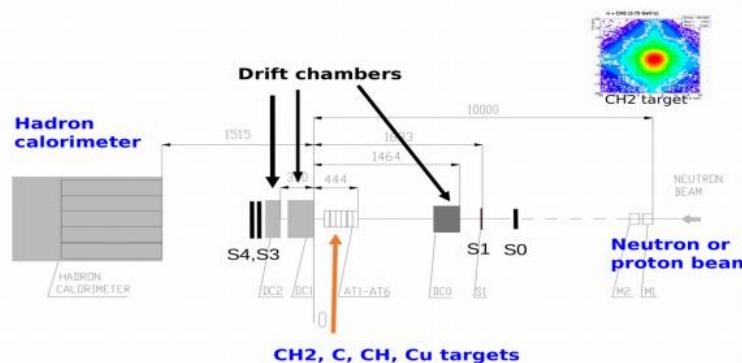
• **Перспективы:** Исследование создает основу для **уникальных высокоточных экспериментов на коллайдере NICA**, усиливая его конкурентоспособность. Это вносит значимый научно-технологический вклад в мировой мегапроект по поиску физики за пределами Стандартной модели.

# Ускорительный комплекс коллайдера NICA

DSS

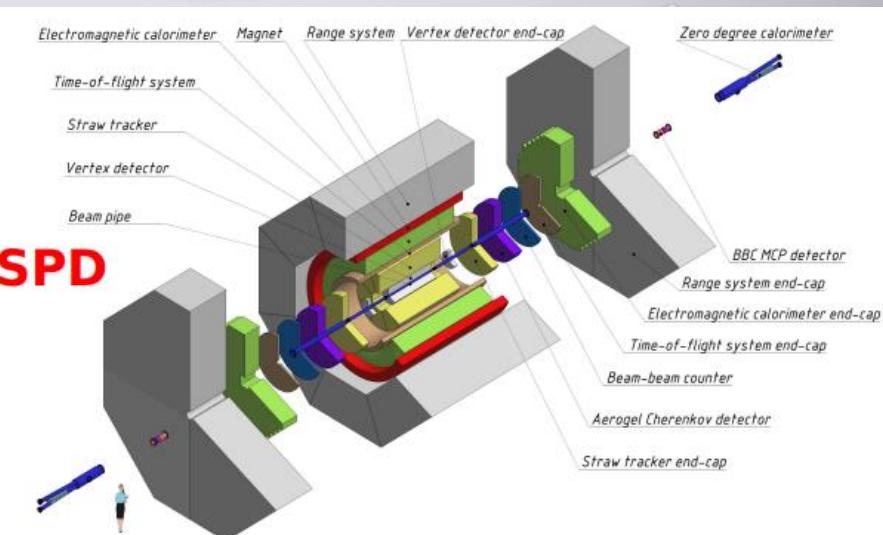


ALPOM-2



Что нужно?

- Сохранение поляризации во всем диапазоне энергий не менее 70%
- Обеспечение продольной и поперечной поляризации р и d
- Инструменты осуществления многократных переворотов поляризации



# Общая теория спинового движения в синхротронах

$$\mathcal{L} = -m_0 c^2 \sqrt{1 - \beta^2} + e \vec{A} \cdot \vec{v} - e\phi \quad \frac{d}{dt} \vec{S} = [\vec{\Omega}_t \times \vec{S}]$$

$$\vec{\Omega}_t = -\frac{e}{\gamma mc} \left( (1 + \gamma G) \vec{H}_{\perp} + (1 + G) \vec{H}_{\parallel} + \left( \frac{1}{\gamma + 1} + G \right) [\vec{E} \times \vec{\beta}] \right)$$

$$G = g \frac{A}{2Z} - 1 - \text{аномальная часть гиromагнитного отношения}$$

## Равновесная замкнутая орбита

$\vec{n}(\theta + 2\pi) = \vec{n}(\theta)$  – **периодическая ось прецессии**

$$\vec{S} = J \cdot \vec{n} + \vec{S}_{\perp}, \quad J = \vec{S} \cdot \vec{n}, \quad \vec{S}_{\perp} \perp \vec{n}$$

Вектор спина вращается вокруг  $n$ -оси:

Если  $\vec{S}_0 \parallel \vec{n} \Rightarrow \vec{S}_0 = \vec{S}_{2\pi}$

Если  $\vec{S}_0 \perp \vec{n} \Rightarrow \vec{S}_{2\pi} \perp \vec{n}, \angle(\vec{S}_0, \vec{S}_{2\pi}) = \Psi = 2\pi\nu$

$\nu$  – частота прецессии спина (**спиновая частота**)

$$\cos \pi\nu = \frac{1}{2} Sp(U) \quad \vec{n}_s(0) = \frac{i}{2 \sin \pi\nu} Sp(\vec{\sigma}U)$$

$G_p \approx 1.7928$  – протоны

$G_d \approx -0.1426$  – дейтроны

## Сила спинового резонанса

Вектор поляризации изменяется вблизи спиновых резонансов:  $\nu = k + k_x v_x + k_y v_y + k_{\gamma} v_{\gamma}$

**Резонансная система** вращается вокруг вертикального направления с резонансной частотой  $\nu_k$ .

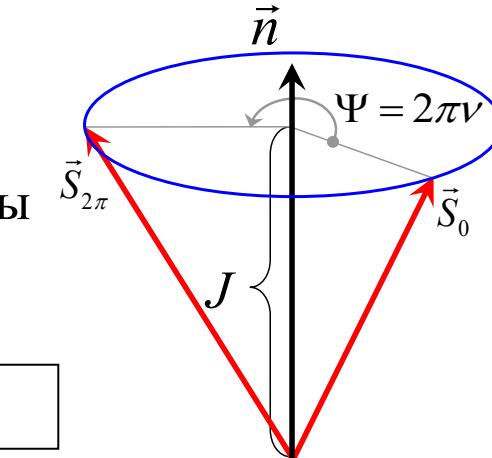
Спин вращается в **поле**:  $\vec{h} = \epsilon \vec{e}_y + \omega_{\perp} \vec{e}_{\perp}$ .

$\epsilon = \nu - \nu_k$  – отстройка от резонанса

$\omega_{\perp}$  – сила резонанса (Фурье гармоника)

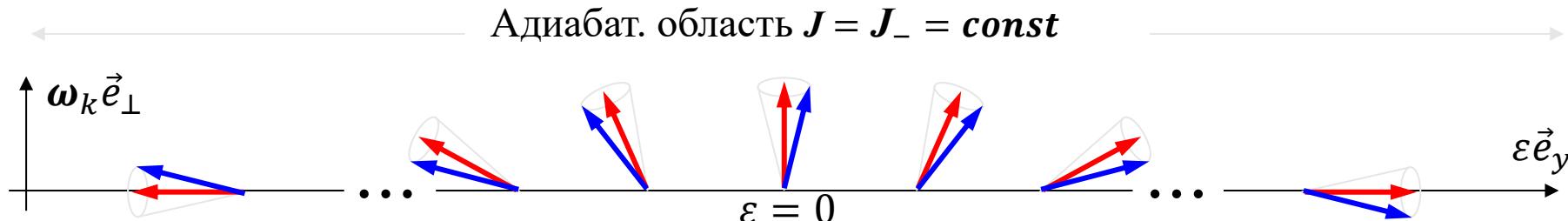
$$\omega_{\perp} = \frac{1}{L} \int_0^L [\nu(\nu^2 + G) K_y^2 + i(\nu^2 - 1) K'_y] y e^{i\nu \int_0^z K_y dz'} dz$$

$$S_f = S_i \left( 2e^{-\frac{\pi \omega_{\perp}^2}{2 \epsilon'}} - 1 \right) \quad \text{– формула Фруассарт-Стора}$$

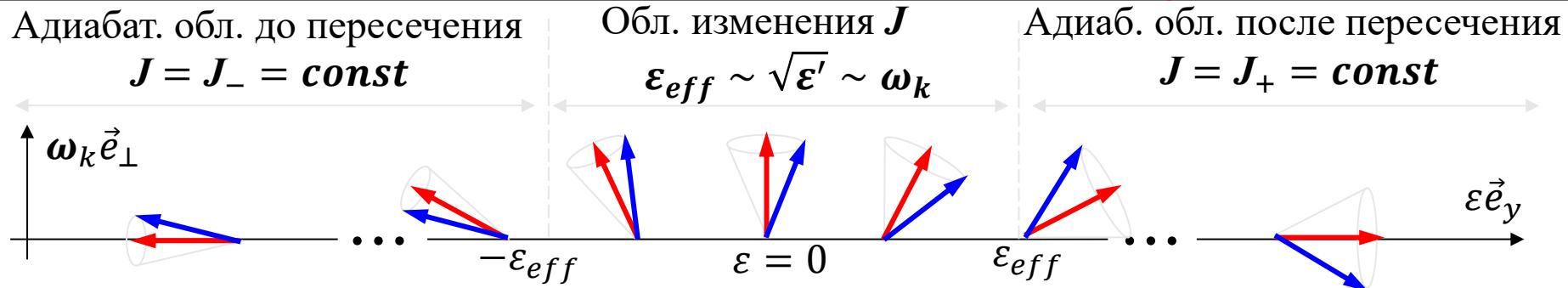


# Пересечение спинового резонанса

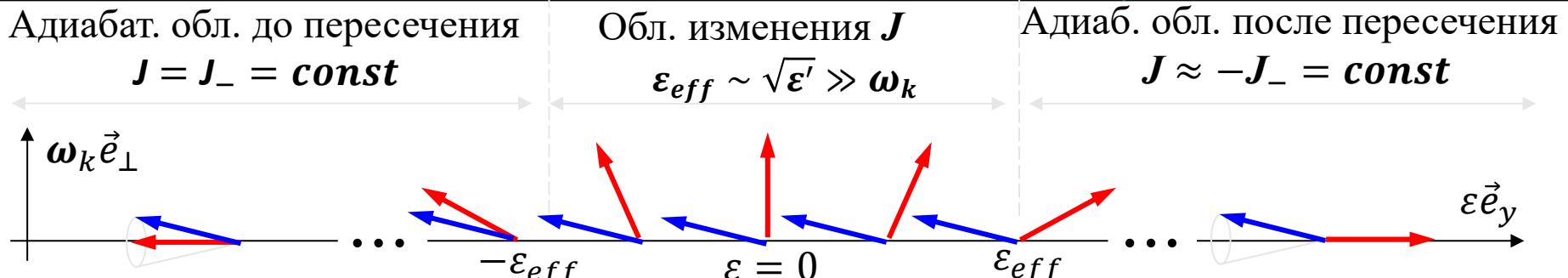
Медленное пересечение:  $\varepsilon' \ll \omega_k^2$



Промежуточное пересечение:  $\varepsilon' \sim \omega_k^2$



Быстрое пересечение:  $\varepsilon' \gg \omega_k^2$



# Аналитические расчеты и численное интегрирование

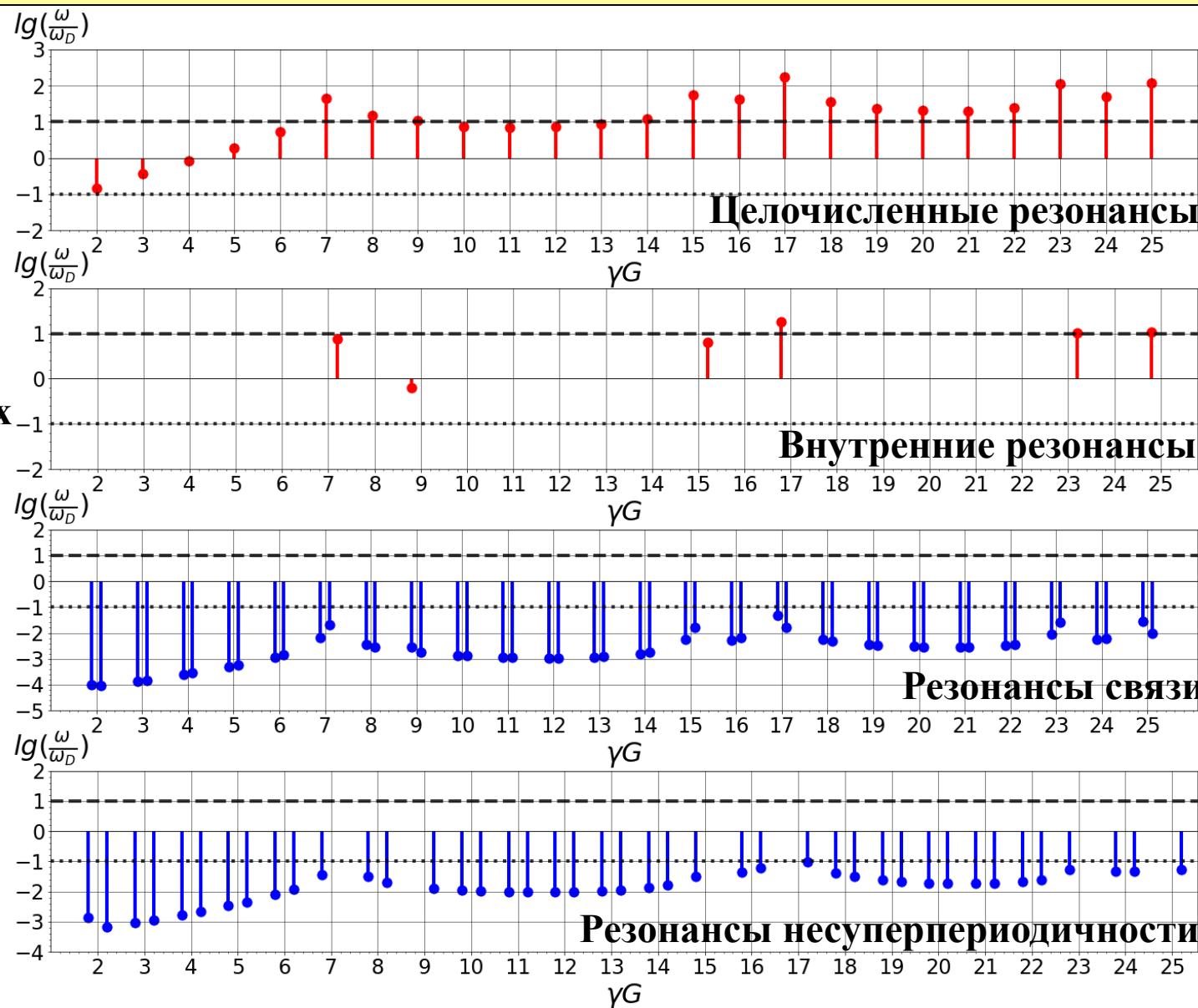
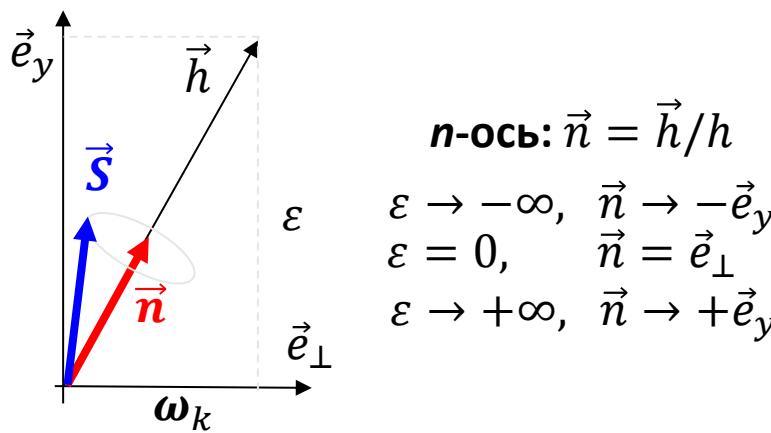
$$\frac{dB}{dt} = 0.6 \frac{T_{\text{л}}}{c} \quad \omega_D = 8.2 \cdot 10^{-4}$$

$$\nu_x = 7.1 \quad \nu_y = 7.2$$

$$\sigma_{\Delta y} = 1 \text{мм} \quad \varepsilon_{rms}^{norm} = 1.0 \text{мм} \cdot \text{мрад}$$

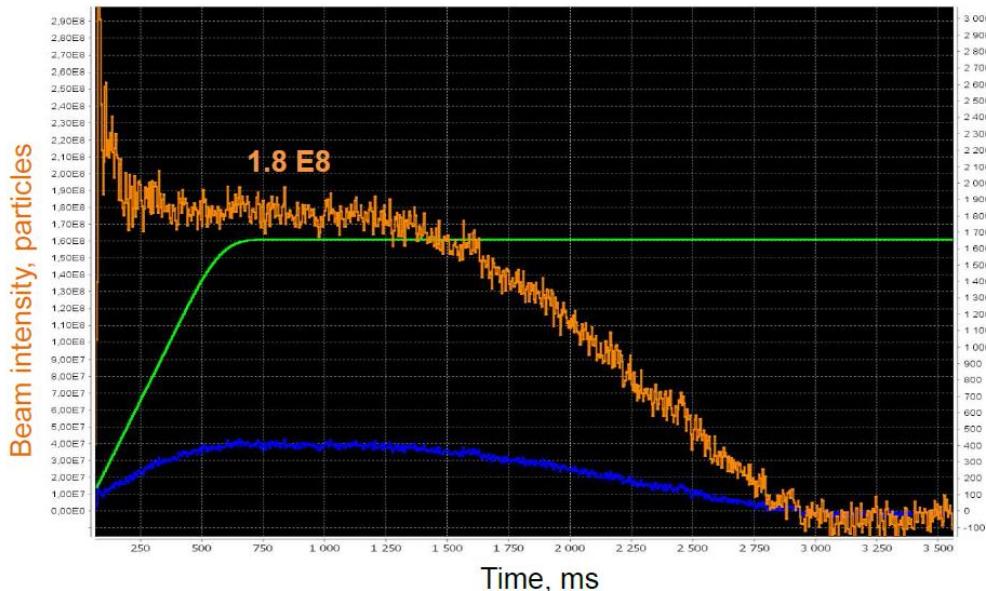
$$\sigma_{\Delta \alpha} = 0.1 \text{мрад} \quad \sigma_{\Delta g} = 0.1\%$$

Вектор поляризации изменяется вблизи спиновых резонансов:  $\nu_k = k + k_x \nu_x + k_y \nu_y + k_\gamma \nu_\gamma$

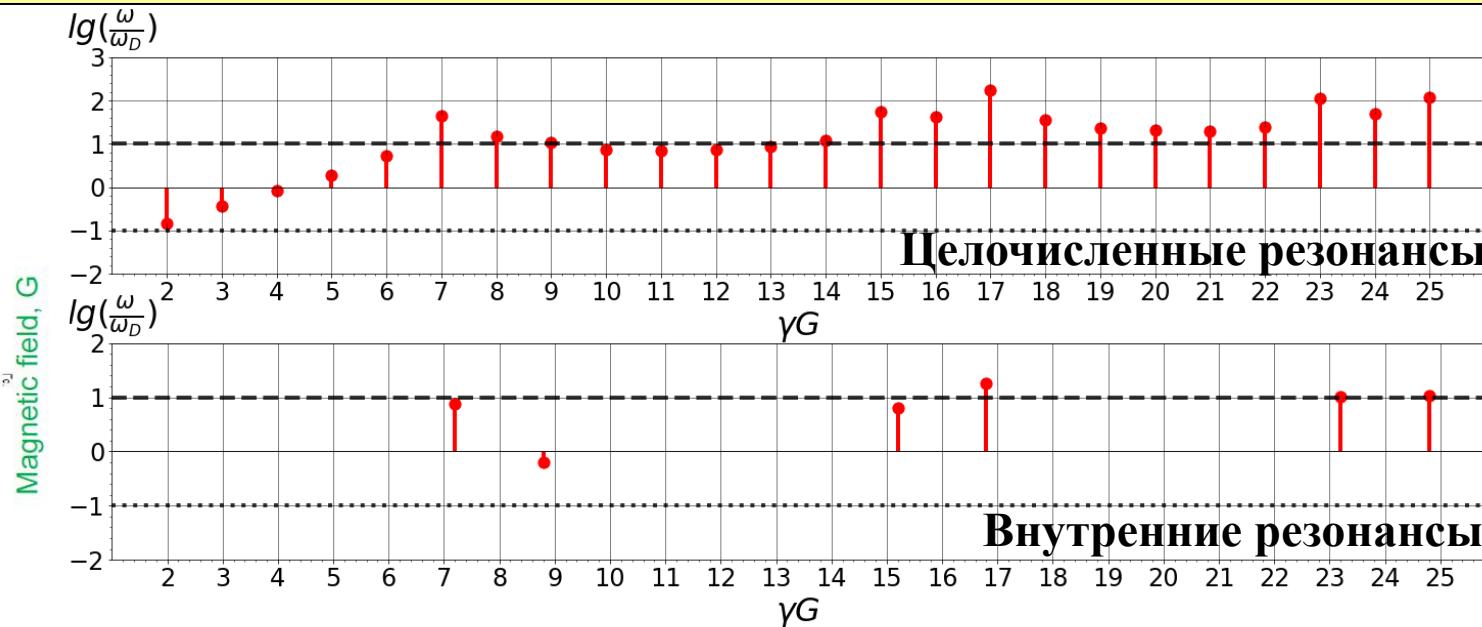
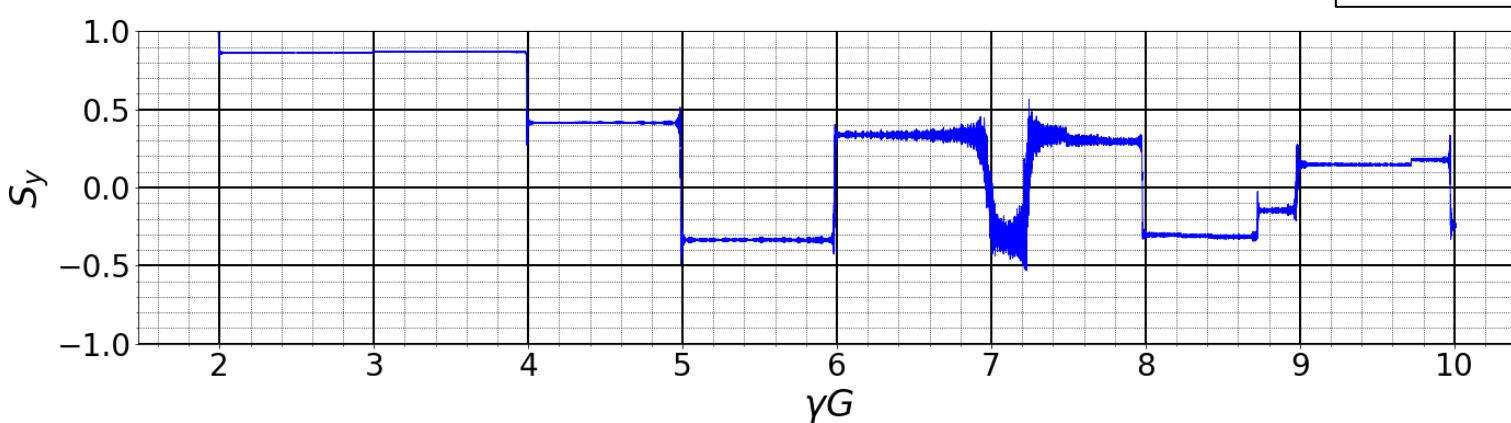


# Аналитические расчеты и численное интегрирование

Сеанс №53 2017 года



$$S_y = 0.354 \pm 0.022$$



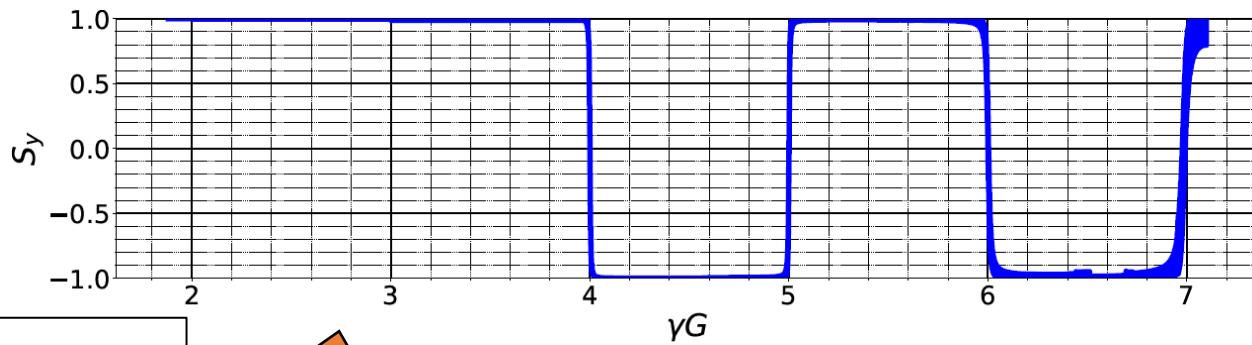
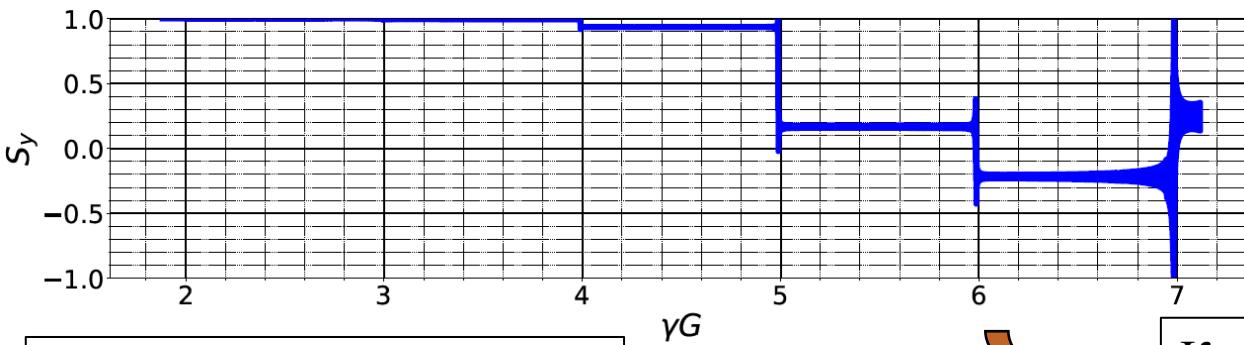
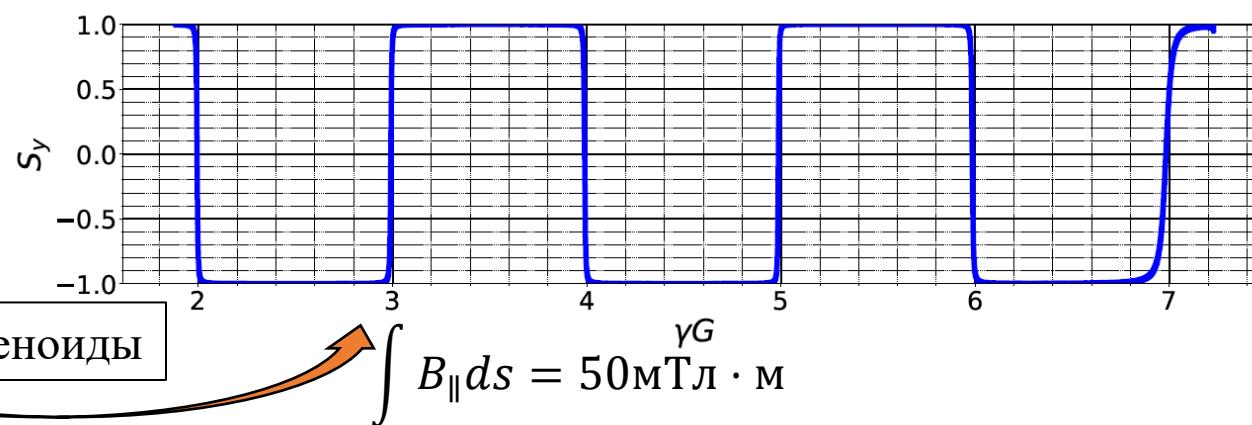
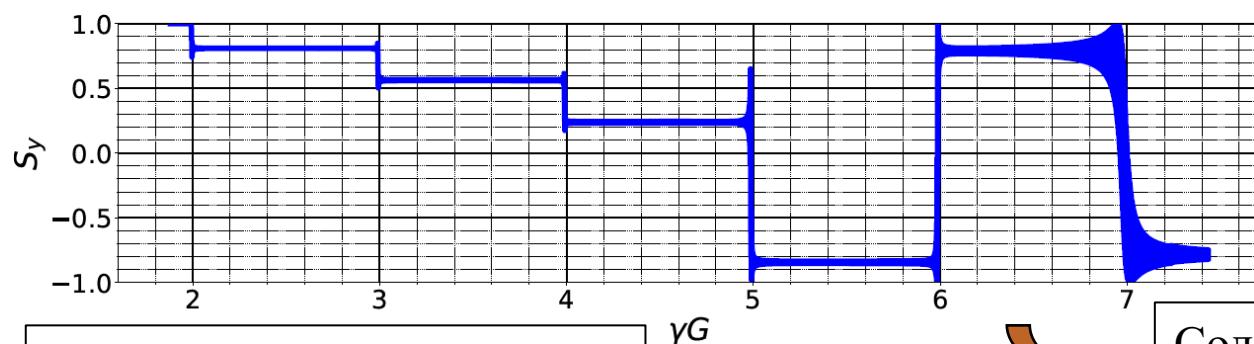
$$\frac{dB}{dt} = 0.6 \frac{\text{Tл}}{\text{с}} \quad \omega_D = 8.2 \cdot 10^{-4}$$

$$\nu_x = 7.1 \quad \nu_y = 7.2$$

$$\sigma_{\Delta y} = 3 \text{мм} \quad \varepsilon_{rms}^{norm} = 2.0 \text{мм} \cdot \text{мрад}$$

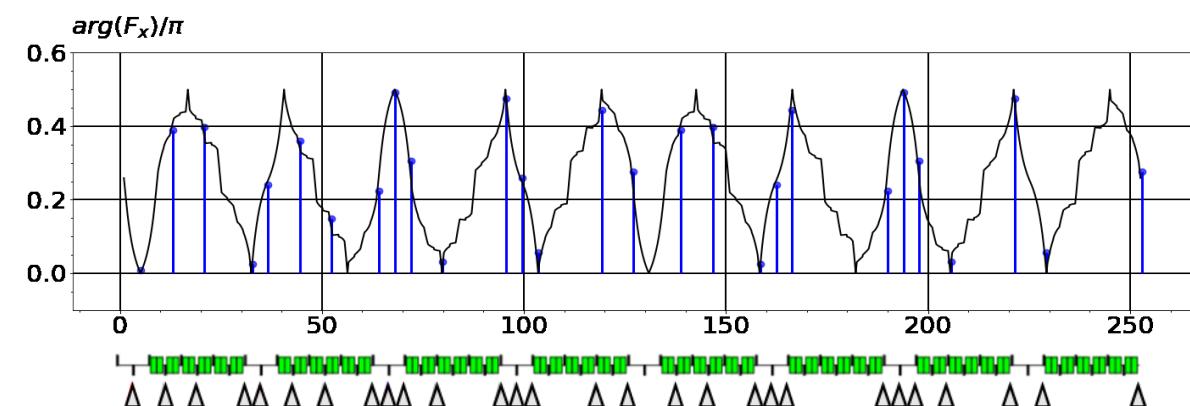
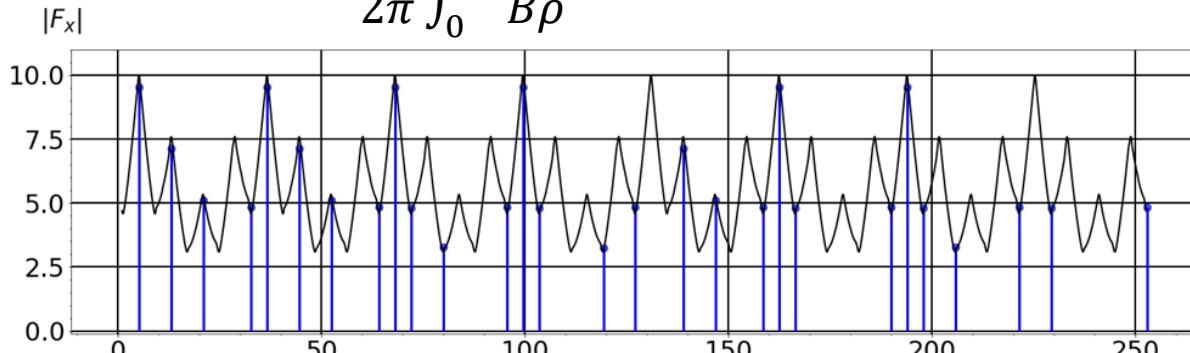
# Сохранение поляризации протонов при ускорении до 3.5 ГэВ/с с использованием слабых магнитных полей

Ближняя перспектива

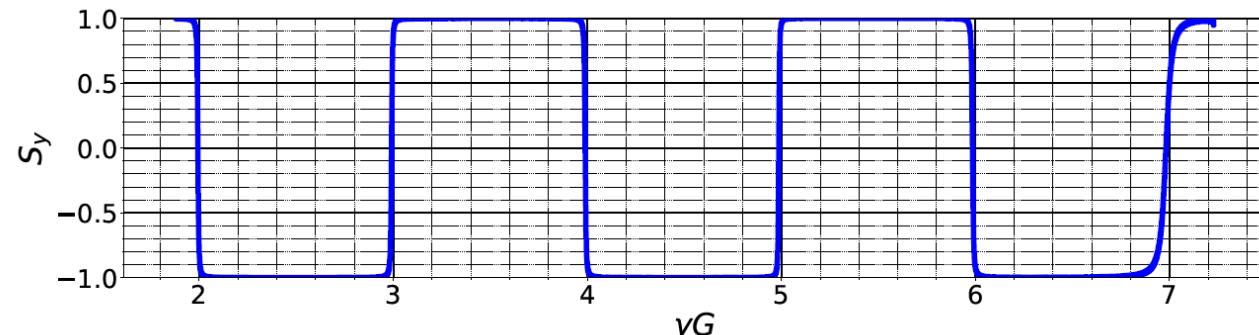


# Сохранение поляризации протонов при ускорении до 3.5 ГэВ/с с использованием слабых магнитных полей

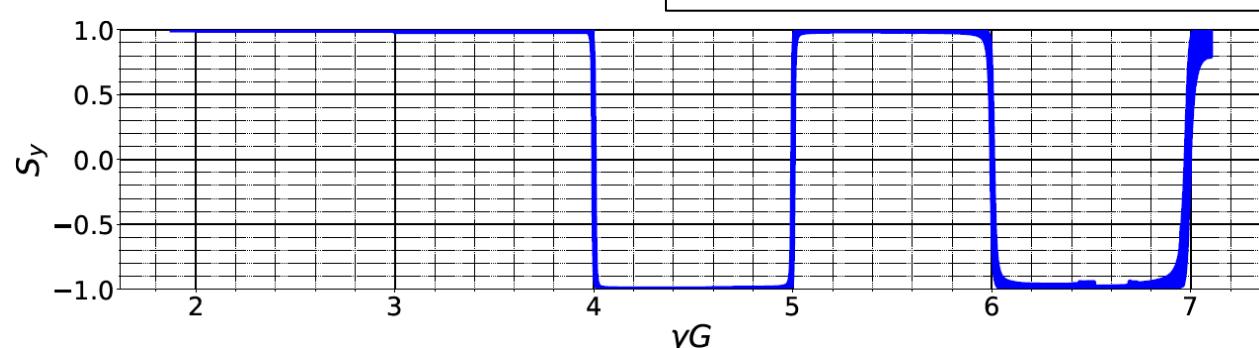
$$\vec{\omega} = \frac{1}{2\pi} \int_0^L \frac{\vec{F}_x b_x}{B\rho} dz$$



Ближняя перспектива



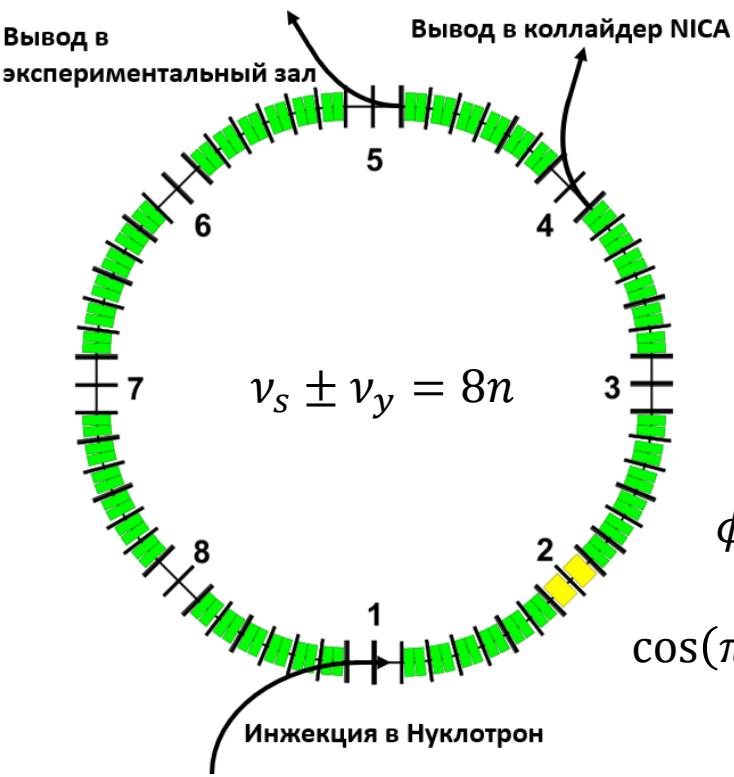
Искажение орбиты до 10мм



Искажение орбиты до 2мм

**Результат:** совместное использование слабого соленоида и корректирующих диполей обеспечат ускорение протонов без потери поляризации в диапазоне энергий до первого внутреннего резонанса

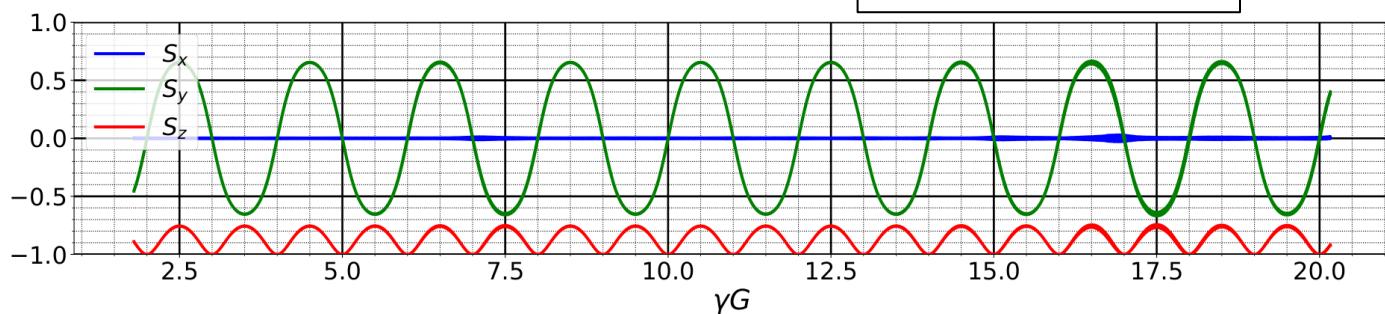
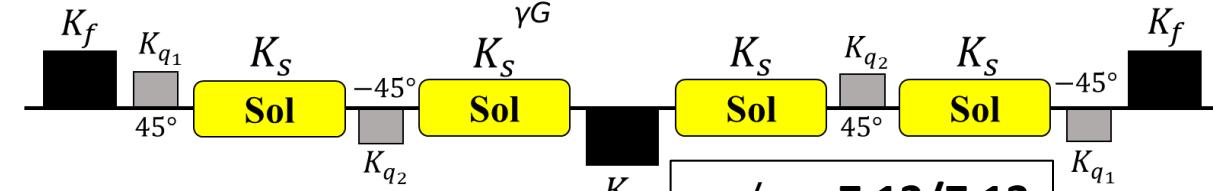
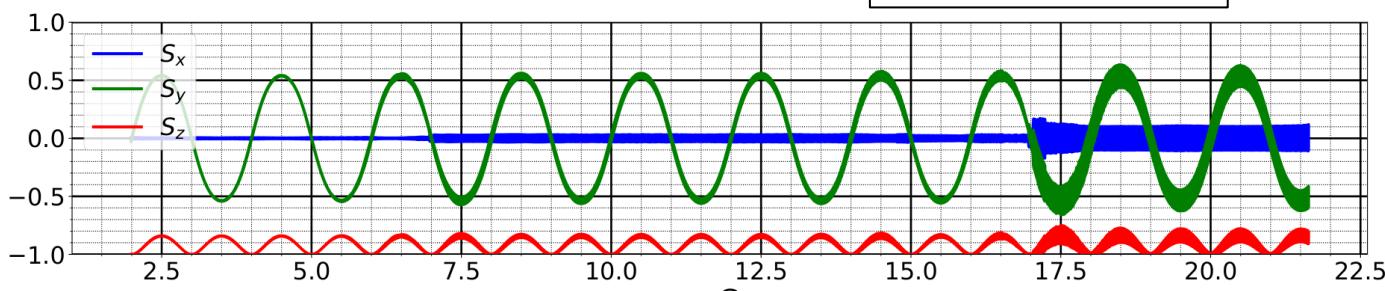
# Сохранение поляризации протонов во всем диапазоне энергий пучка в Нуклotronе



$$\phi_z = \frac{1}{2} \frac{BL}{B\rho} (1 + G)$$

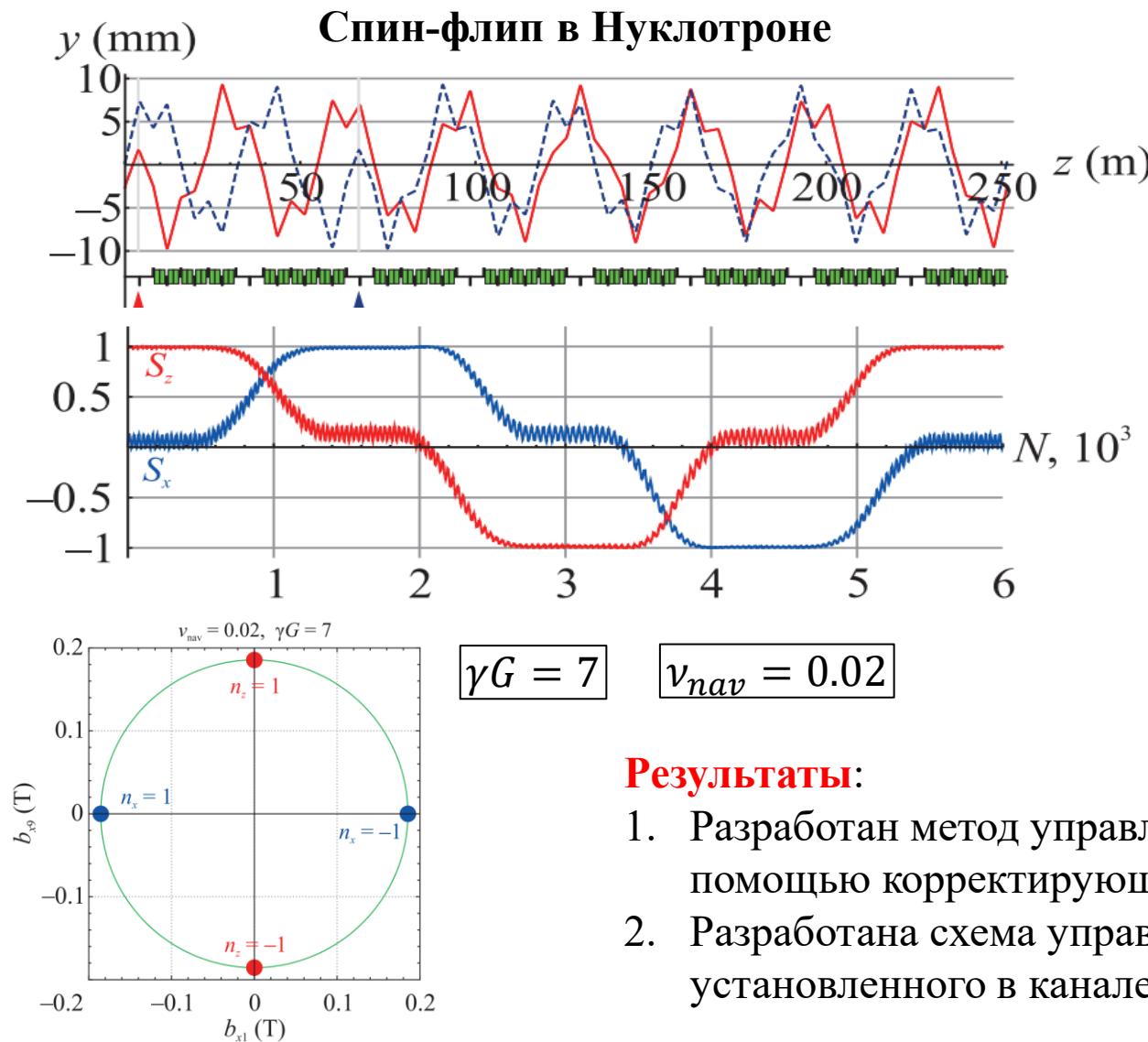
$$\cos(\pi\nu_s) = \cos(\pi\gamma G) \cos(\phi_z)$$

**Результат:** разработан подход по ускорению поляризованных протонов без потери поляризации с применением частичной соленоидальной (50%-60%) змейки и сформулированы требования на выбор бетатронных частот

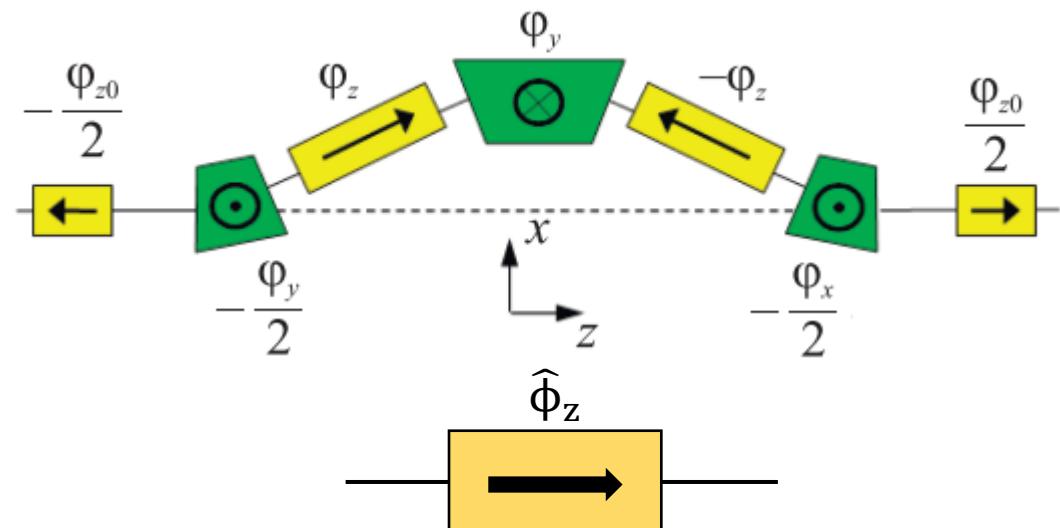


# Управление поляризацией протонов в инжекционном комплексе

Ближайшая перспектива



3D спиновый ротатор в канале транспортировки из Нуклотрона в экспериментальный зал



## Результаты:

1. Разработан метод управления поляризацией в Нуклotronе в плоскости кольца с помощью корректирующих магнитов на целочисленных резонансах.
2. Разработана схема управления поляризацией с помощью 3D спинового ротатора, установленного в канале транспортировки в экспериментальный зал.

# Адиабатические перевороты спина дейtronов на индуцированных внутренних резонансах

$$\gamma G = kN \pm \nu_\gamma$$

$$\omega \propto \sqrt{\varepsilon_y}$$

Отстройка от резонанса  $\varepsilon_y$  в процессе пересечения будет иметь колебательный характер и определяться как:

$$\varepsilon_\gamma = \langle \gamma \rangle G \pm \langle \nu_\gamma \rangle + k + \Delta_\gamma \cos(\nu_\gamma(\theta - \theta_0) + \Phi_\gamma)$$

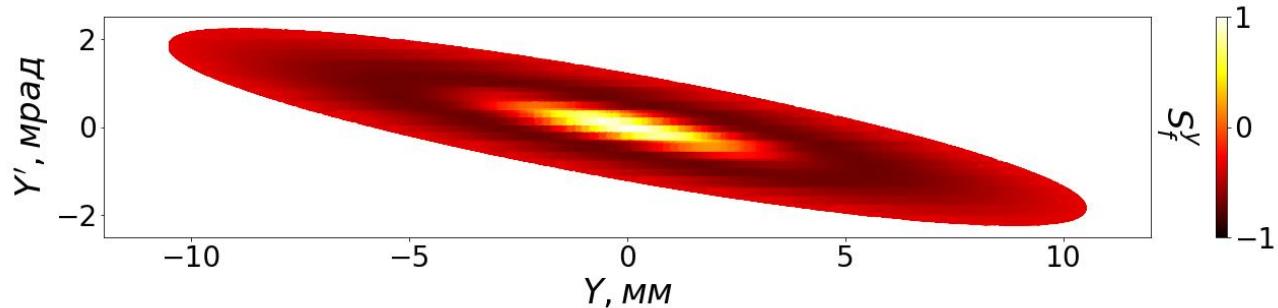
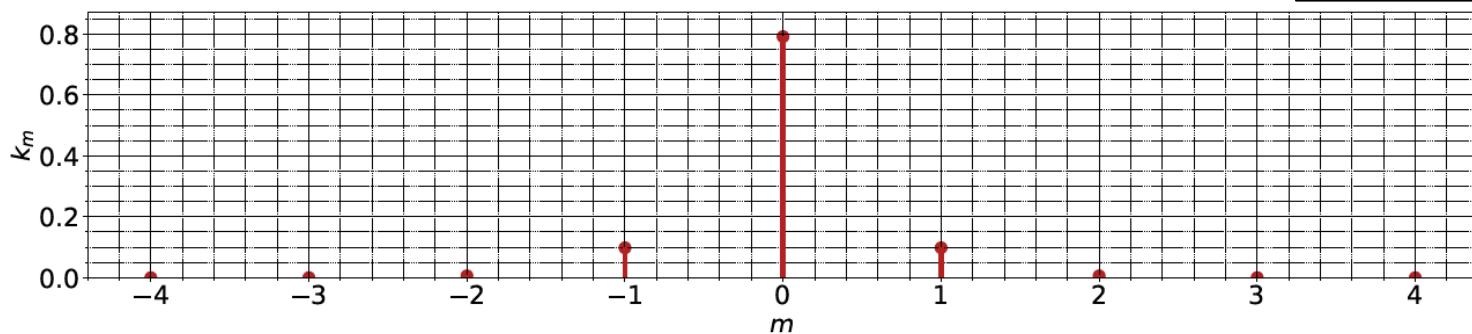
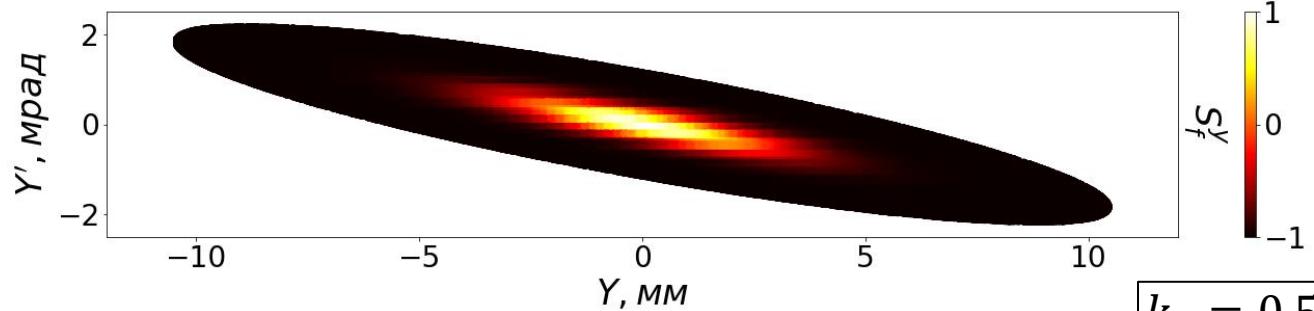
$$\Delta_\gamma = (\gamma G \beta^2 \pm \xi_y) \frac{\Delta p}{p}$$
 - амплитуда модуляции внутреннего резонанса

$$\omega_k = \omega_{\perp} J_k \left( \frac{\Delta_\gamma}{\nu_\gamma} \right) e^{ik\Phi_\gamma} \quad k_m = e^{-k_\gamma^2} I_m(k_\gamma^2)$$

$$\omega_k = \omega_{\perp} I_k(k_\gamma^2) e^{-k_\gamma^2} \quad k_\gamma = \frac{\sigma_p}{2\nu_\gamma} (\xi_y \pm \gamma G \beta^2)$$

В модели пересечения уединенных сателлитных спиновых резонансов:

$$S_f = S_i \prod_{i=-\infty}^{+\infty} (-1 + 2e^{-k_m \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_D}})$$

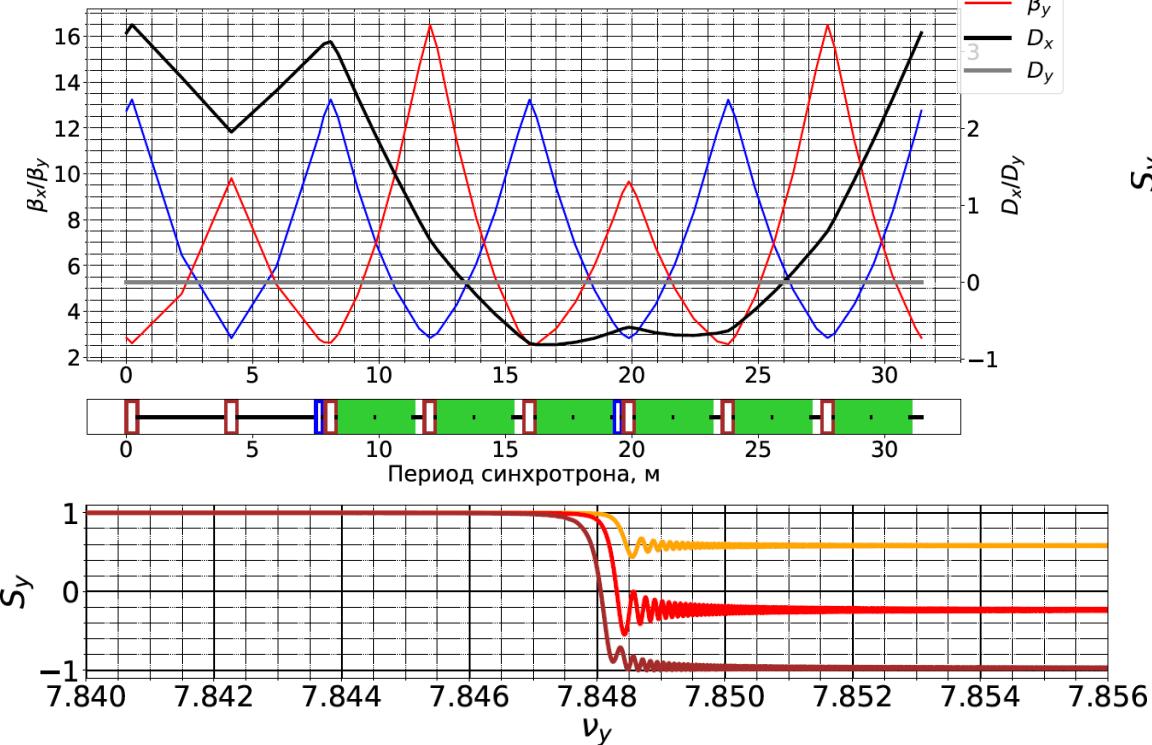


# Адиабатические перевороты спина дейtronов на индуцированных внутренних резонансах

Случай уединенных сателлитов

$$\nu_\gamma \gg \omega$$

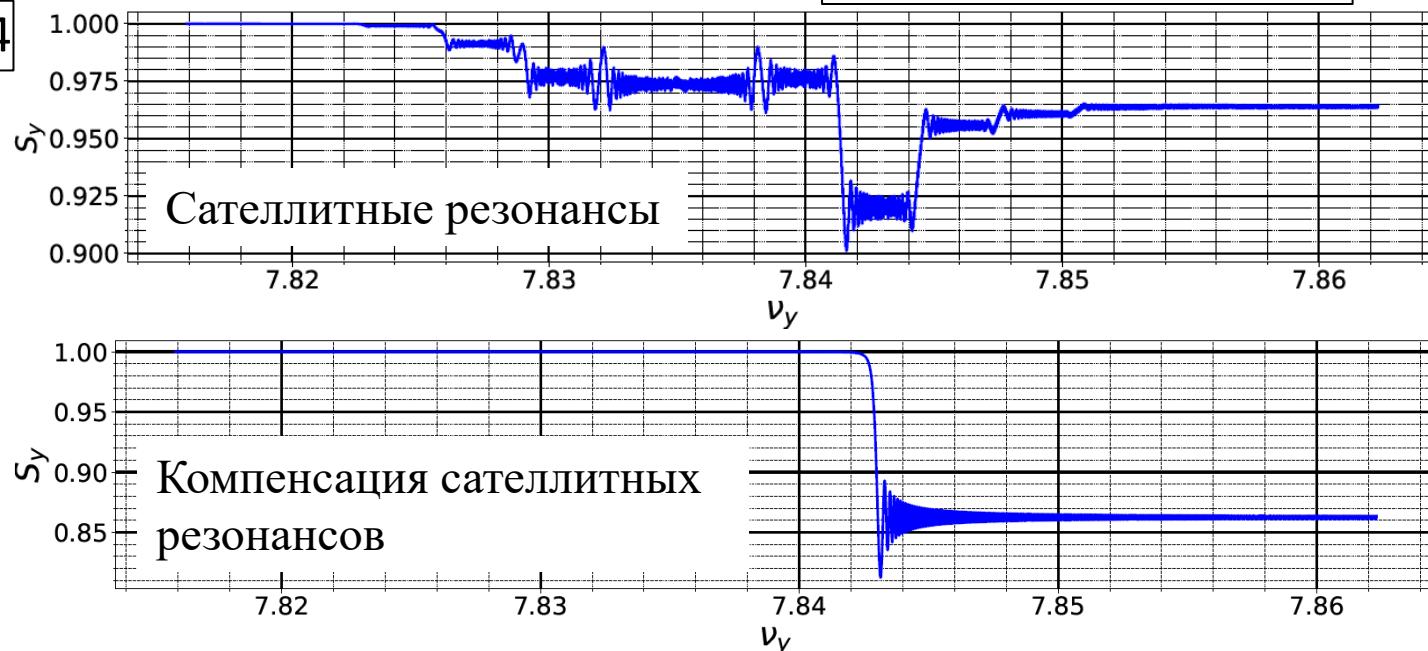
$$k_\gamma = \frac{\sigma_p}{2\nu_\gamma} (\xi_y \pm \gamma G \beta^2)$$



$$\nu_x = 7.10$$

$$\nu_y = 7.84$$

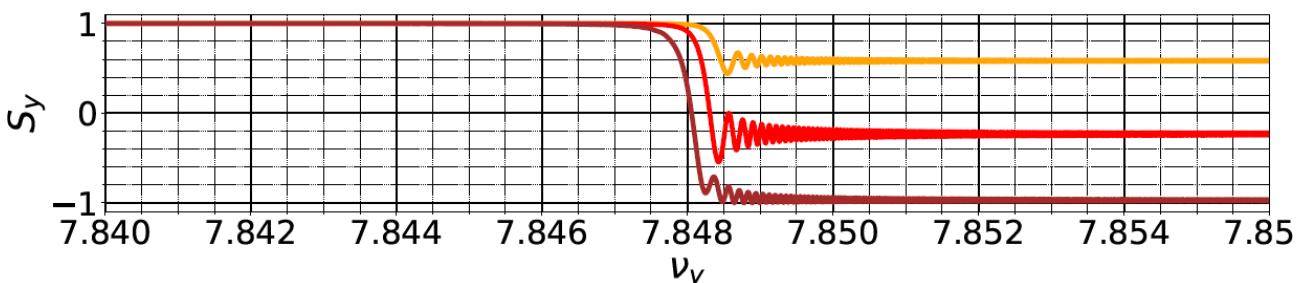
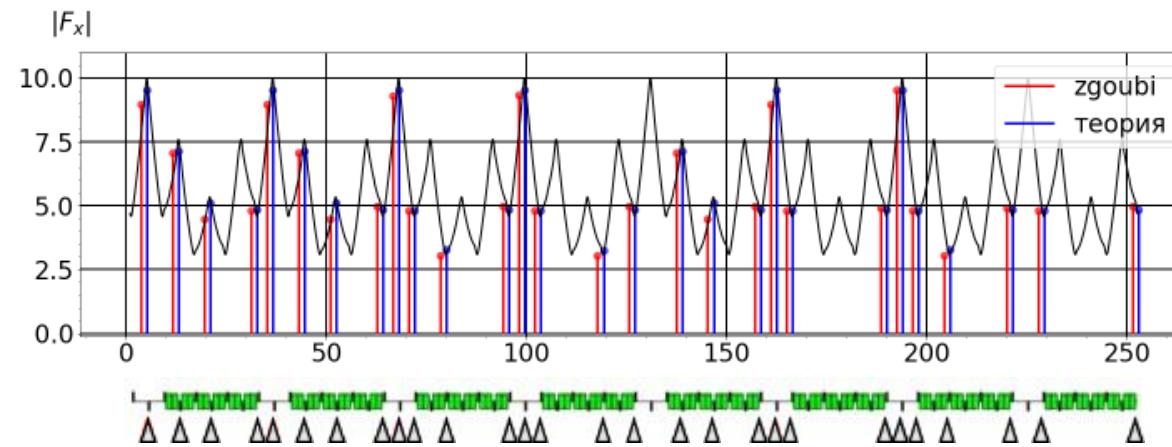
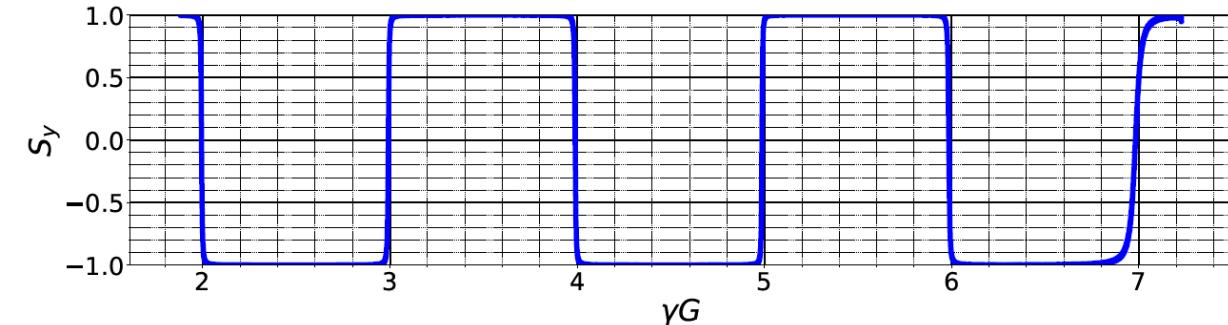
**Ближняя перспектива**



$$\langle S_f \rangle = -1 + 5.0 \cdot 10^2 \frac{\Delta \nu_y}{\varepsilon_y^{rms} T}, \quad \frac{\Delta \nu_y}{\varepsilon_y^{rms} T} < 10^{-3}$$

**Результат:** разработан метод спин-флипа дейтронов на индуцированном внутреннем резонансе

# Первоочередные эксперименты с поляризованными пучками



- Сохранение поляризации протонов с помощью корректирующих магнитов и слабого соленоида
- Измерение силы целых спиновых резонансов
- Измерение спиновой функции отклика
- Компенсация силы целого спинового резонанса
- Спин-флип дейtronов на внутреннем спиновом резонансе

# Концепция нового инжекционного кольца Нуклotronа

На низких энергиях целесообразно использовать соленоиды, которые не искажают равновесную орбиту. Интеграл продольного поля для соленоидальной змейки зависит от импульса частиц и вычисляется для протонов и дейtronов как:

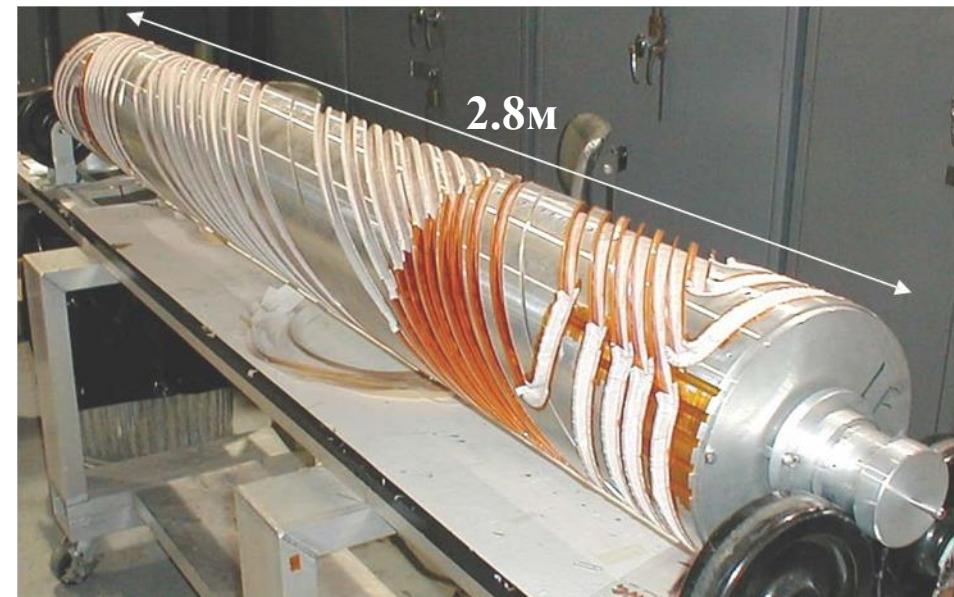
$$(B_{\parallel}L)_{proton} [\text{Тл} \cdot \text{м}] = 3.75p [\text{ГэВ}/c]$$

$$(B_{\parallel}L)_{deuteron} [\text{Тл} \cdot \text{м}] = 12.2p [\text{ГэВ}/c]$$

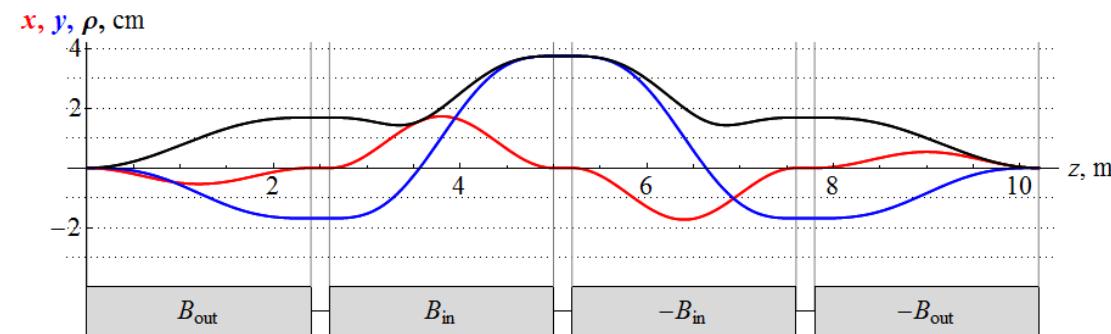
Для поворота спина протонов и дейtronов на  $180^\circ$  диполем в релятивистском пределе требуется интеграл поля равный:

$$(B_{\perp}L)_{proton} = 5.5 [\text{Тл} \cdot \text{м}]$$

$$(B_{\perp}L)_{deuteron} = 140 [\text{Тл} \cdot \text{м}]$$

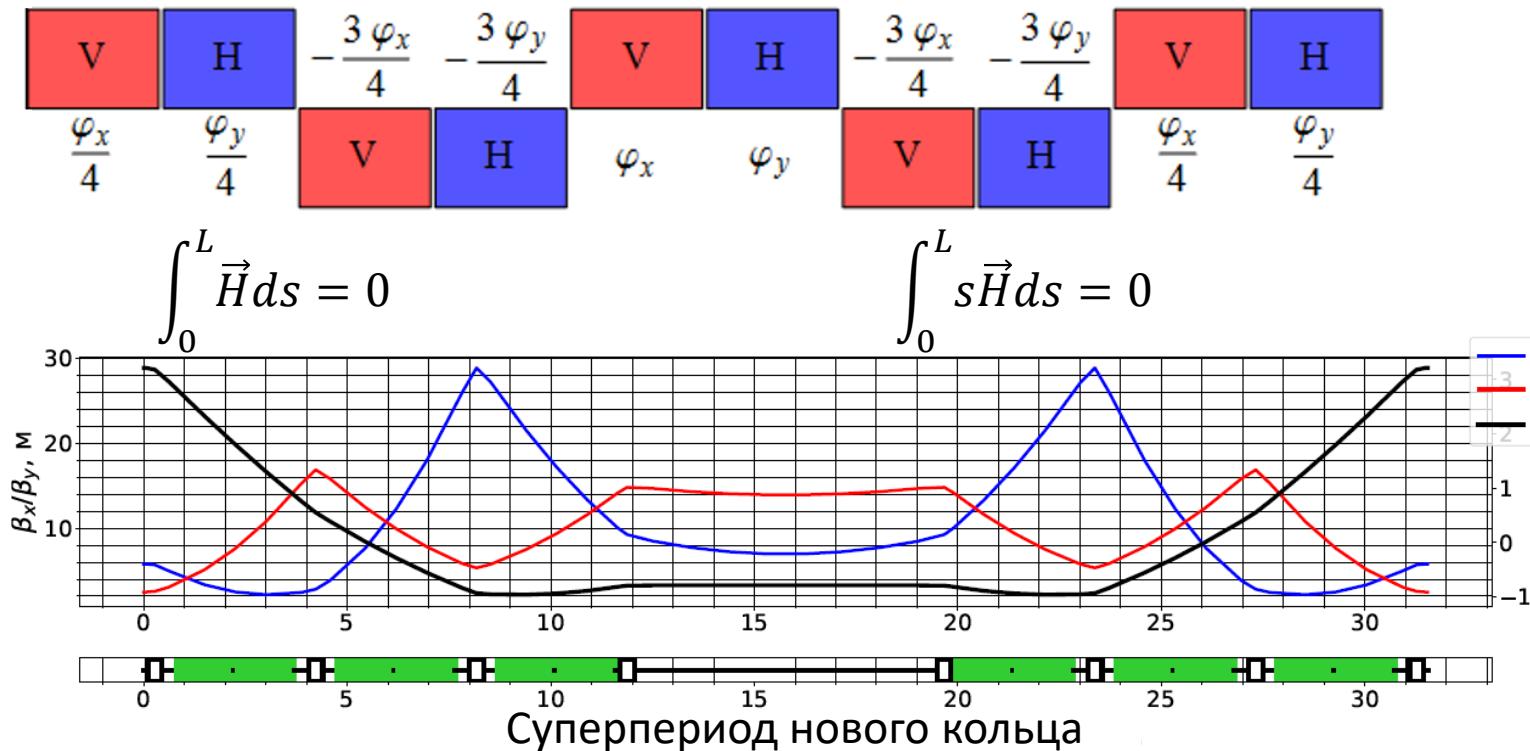


100%-snake:  $\gamma = 21.3$ ,  $B_{out} = 1.23 \text{ T}$ ,  $B_{in} = 4. \text{ T}$ ,  $L_{tot} = 10.2 \text{ m}$

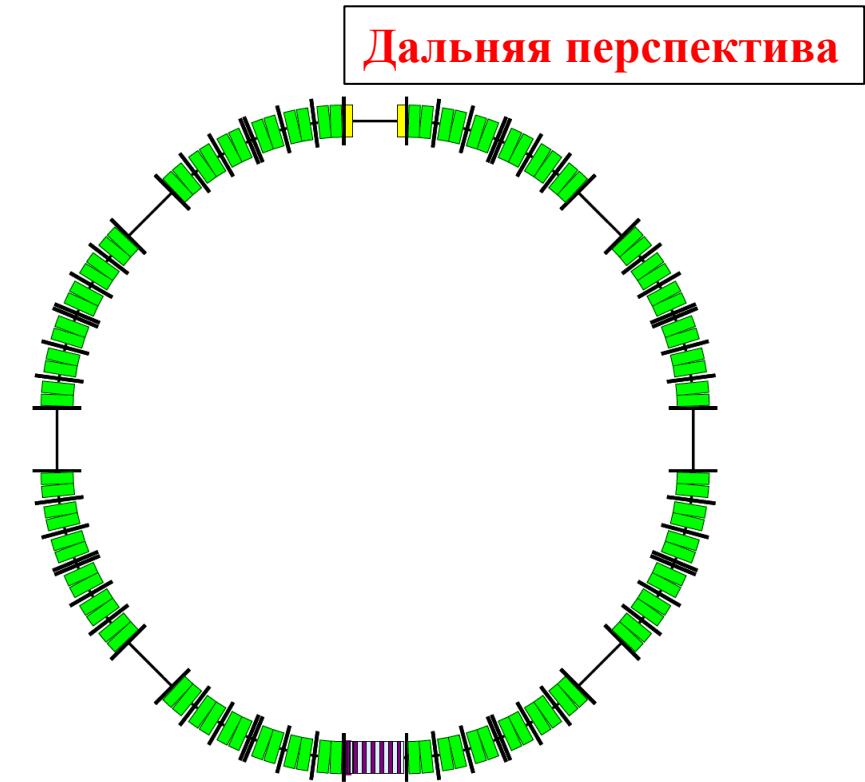


В диапазоне энергий Нуклотрона на энергии 3.5 ГэВ/с отклонение замкнутой орбиты составит более 20 см. Выбор этой энергии в качестве нижней границы рабочего диапазона змейки в Нуклотроне обусловлен тем, что в диапазоне до 3.5 ГэВ/с отсутствуют внутренние спиновые резонансы.

# Концепция нового инжекционного кольца Нуклotronа



Бетатронные частоты, $\nu_x/\nu_y$	6.7/4.8
Натуральная хроматичность, $\xi_x/\xi_y$	-10.7/-6.3
Максимальные значения бета-функций, $\beta_x^{max}/\beta_y^{max}, \text{ м}$	28.9/16.9
Максимальное значение дисперсионной функции, $D_x, \text{ м}$	3.2
Критическая энергия, $\gamma_{tr}$	14.0

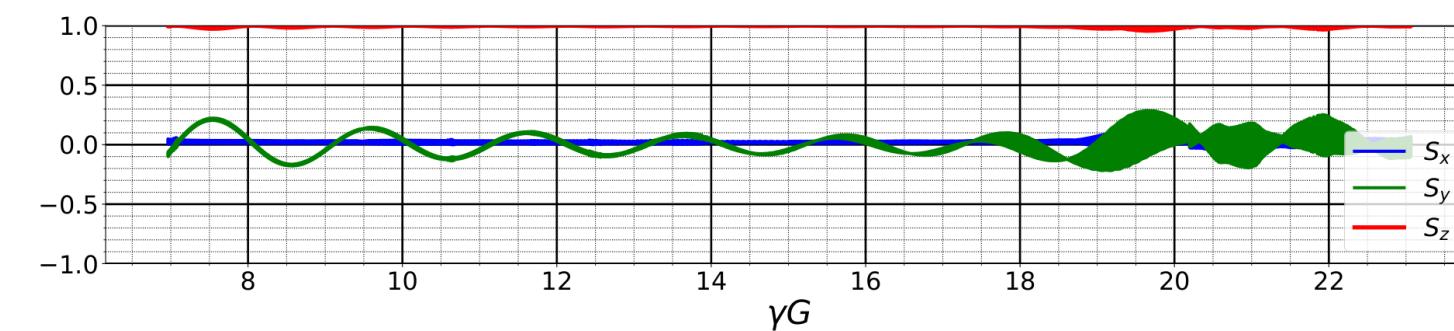
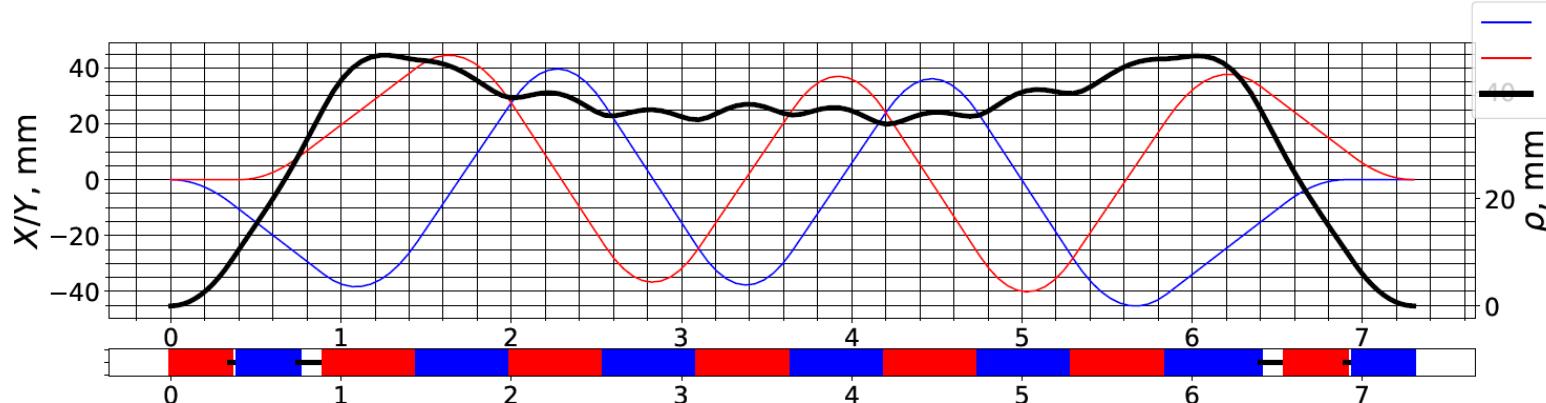
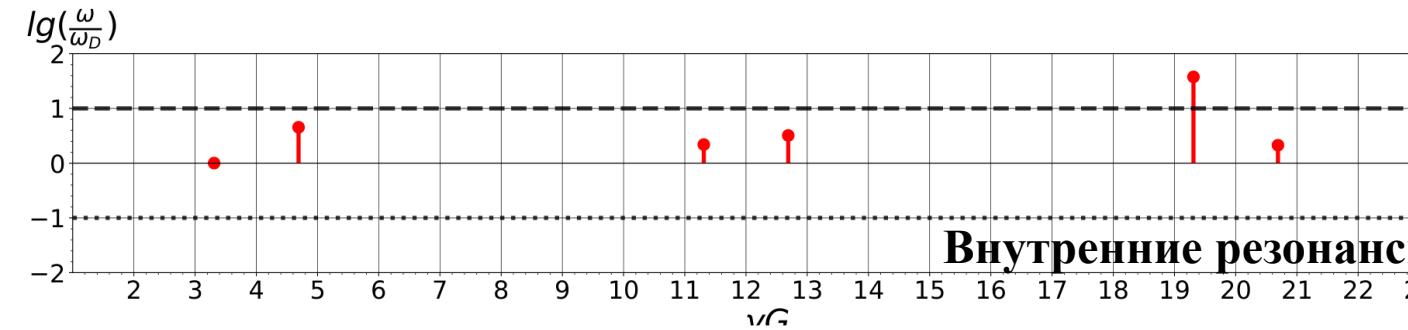


## Результаты:

1. Разработана компактная сибирская змейка на дипольных магнитах
2. Разработана магнито-оптическая структура обновленного Нуклотрона без критической энергии с размещением змеек на продольных и поперечных полях

# Концепция нового инжекционного кольца Нуклotronа

Дальняя перспектива

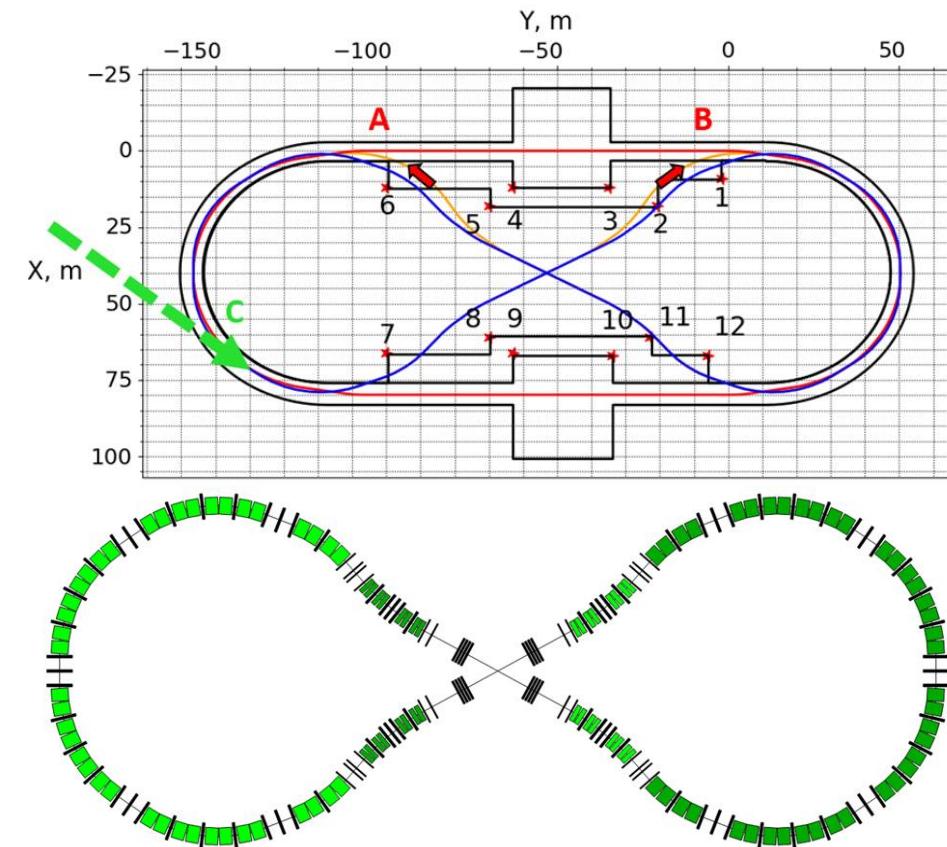


## Особенности змейки:

- компактность;
- интеграл поперечных полей змейки практически не зависит от энергии (пропорционален скорости пучка);
- отклонение орбиты спадает как  $1/\gamma$  (на энергии 2.6 ГэВ для протонов сдвиг орбиты достигает 40 мм).

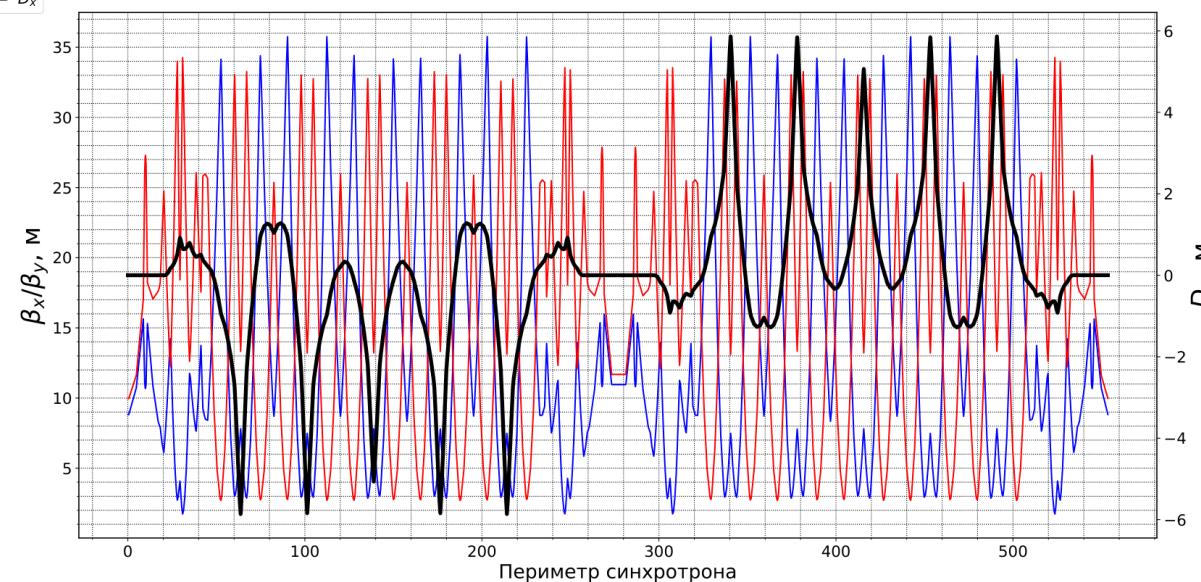
Дипольные змейки являются альтернативой соленоидальному на высоких энергиях и решают проблему сохранения поляризации в ускорительных комплексах NICA, У-70 и в ускорителях сверхвысоких энергий таких как RHIC, LHC.

# Концепция нового инжекционного кольца в виде "восьмёрки"



$\beta_x$   
 $\beta_y$   
 $D_x$

Дальняя перспектива

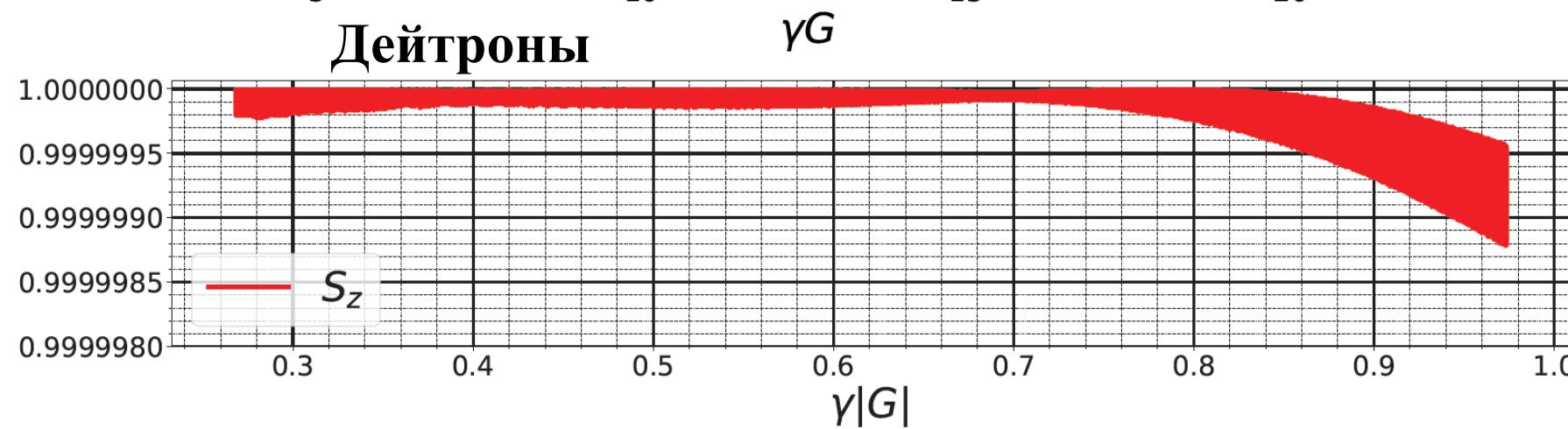
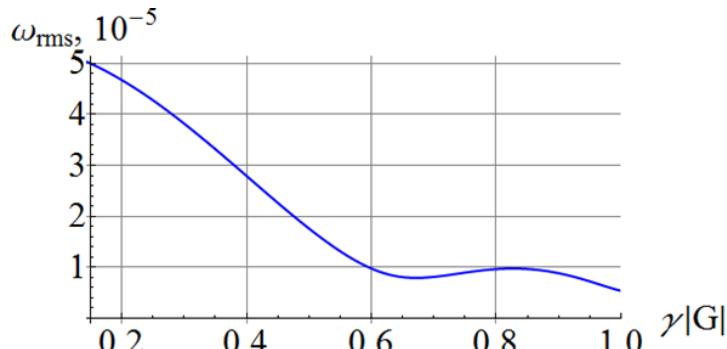
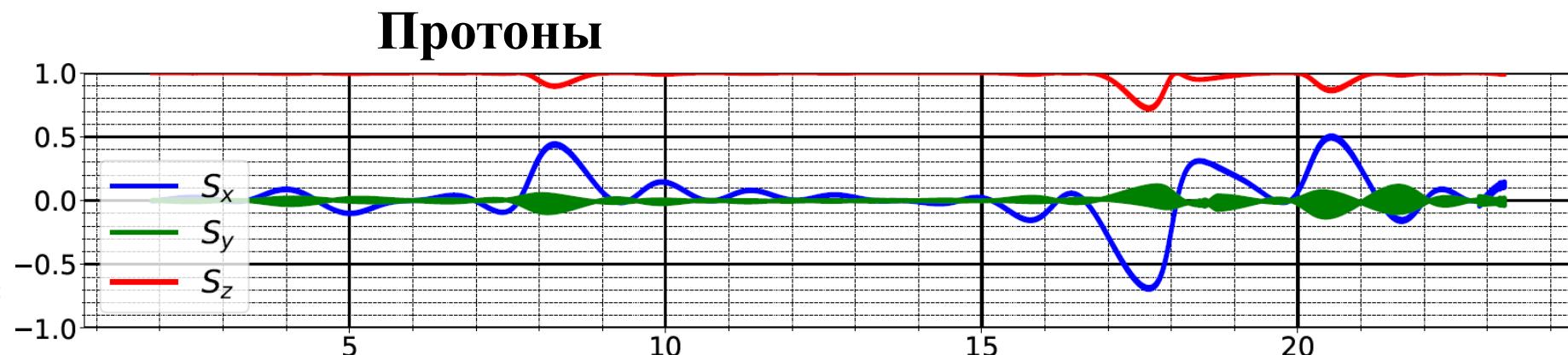
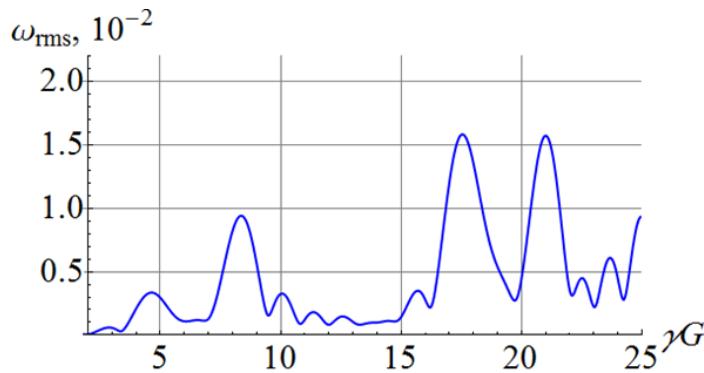


Бетатронные частоты, $v_x/v_y$	10.6/8.8
Натуральная хроматичность, $\xi_x/\xi_y$	-13.7/-17.5
Максимальные значения бета-функций, $\beta_x^{max}/\beta_y^{max}$ , м	35.7/34.4
Критическая энергия, $\gamma_{tr}$	13.0

**Результат:** разработана магнито-оптическая структура инжектора поляризованных пучков в коллайдер NICA без критической энергии, размещенная в пределах здания коллайдера NICA (синхротрон формы-8), в котором исключена резонансная деполяризация в процессе ускорения любого сорта частиц

# Концепция нового инжекционного кольца в виде "восьмёрки"

Дальняя перспектива



Стабилизация продольной поляризации протонов и дейtronов слабым соленоидом  
с интегралом поля  $B_{\text{sol}}L_{\text{sol}} = 2 \text{ Тл} \cdot \text{м}$

# Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика анализа динамики спина при ускорении пучков в синхротронах:
  - Комплекс программ для аналитического расчета резонансной деполяризации пучка протонов и дейtronов в Нуклotronе;
  - Методика расчета спиновых характеристик пучка с применением численного интегрирования уравнений движения спина и пучка в Нуклotronе;
  - Валидация методики расчета динамики спина на данных эксперимента по ускорению поляризованных протонов в Нуклotronе и сравнение с независимой методикой;
2. Комплекс мер по сохранению и управлению поляризацией протонов и дейtronов в Нуклotronе:
  - Метод преднамеренного увеличения мощности спинового резонанса с помощью слабых магнитных полей;
  - Схема сохранения поляризацией протонов во всем диапазоне энергий Нуклотрона с помощью частичной змейки на базе быстроциклических соленоидов;
  - Схема контроля направления поляризацией протонов на выведенном пучке с помощью спинового ротатора;
  - Метод спин-флипа дейtronов на индуцированном внутреннем спиновом резонансе.
3. Концептуальный проект нового инжектора поляризованных пучков в коллайдер NICA:
  - Инжектор с компактными змейками на дипольных магнитах, размещенный в существующем тоннеле Нуклотрона;
  - Инжектор в формы-8 для ускорения поляризованных частиц любого сорта, размещенный в здании коллайдера NICA.

# Апробация работы и Публикации

## Выступления

- Спиновый навигатор для управления поляризацией протонов и дейtronов в коллайдере NICA/JINR // 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ. 18-23 ноября 2019 г.;
- Control of the polarization of protons and deuterons in the NICA complex in the spin transparency mode // SPD collaboration meeting. 3-6 октября 2022 г.;
- Preservation of the proton polarization up to 13.5 GeV/c in the Nuclotron at JINR using partial snakes based on dynamic solenoids // XIX Workshop on High Energy Spin Physics, DSPIN-23 (Efremov-90). 4-8 сентября 2023 г.;
- Preservation of the proton polarization up to 3.5 GeV/c in the Nuclotron at JINR using correcting dipoles and a weak solenoid // The XXVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" 18-23 сентября 2023 г.;
- Проект нового Нуклotronа (JINR) // 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ. 3-8 апреля 2023 г.;
- Сибирские змейки на поперечных магнитных полях для сохранения и управления поляризацией протонов в коллайдере NICA/ОИЯИ // XXIX Международная конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'25, 15-19 сентября 2025г.

## Публикации

- Система спин-флипа протонов на базе корректирующих диполей Нуклотрона/ОИЯИ на спиновом резонансе  $\gamma G = 7$  / Ю.Н. Филатов (и др.) // Письма в ЭЧАЯ – 2023 – т. 118 (6) (BAK);
- Спиновый навигатор на базе корректирующих диполей Нуклотрона/ОИЯИ / Ю.Н. Филатов (и др.) // Письма в ЖЭТФ – 2022 – т. 116 (7) (BAK);
- Система спин-флипа дейtronов на базе корректирующих квадруполей нуклотрона ОИЯИ / Е.Д. Цыплаков (и др.) // Письма в ЭЧАЯ – 2024 – т. 55 (4) - Р. 736-740 (BAK);
- Сохранение поляризации протонов в нуклotronе ОИЯИ до 3,5 ГэВ/с с помощью корректирующих диполей и слабого соленоида / Ю.Н. Филатов (и др.) // Письма в ЭЧАЯ – 2024 – т. 55 (4) - Р. 731-735 (BAK);
- Сохранение и контроль направления поляризации протонов для спиновых экспериментов на Нуклotronе/ОИЯИ / Е.Д. Цыплаков (и др.) // ЯЕТР – 2025 – т. 123 (BAK).
- Figure-8 Synchrotron for Polarized Protons and Deuterons at the NICA Acceleration Complex / Yu. N. Filatov [et al.] // Natural Science Review – 2025 – Vol. 2.

# Участие в грантах РНФ и РФФИ

- Разработка методики эксперимента по тестированию системы спин-флипа в диапазоне импульсов протонов до 3 ГэВ/с в режиме спиновой прозрачности Нуклotronа (ОИЯИ) – РФФИ 2020г.
- Спиновая прозрачность как новый подход к прецизионным поляризационным экспериментам для проверки фундаментальных симметрий на коллайдерах и накопителях: теория и эксперимент – РНФ и DFG 2022г.
- Разработка инновационных технологий в физике поляризованных пучков для реализации программы поляризационных исследований в комплексе NICA, ОИЯИ и расширения программы в область исследований фундаментальных симметрий – РНФ 2025г.

**Thank you for your attention!**