

Разработка систем управления и сохранения поляризации протонов и дейтронов в проекте “Новый Нуклотрон”

Е.Д. Цыплаков^{1 2}

¹МФТИ, Долгопрудный, ²ОИЯИ, 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»).

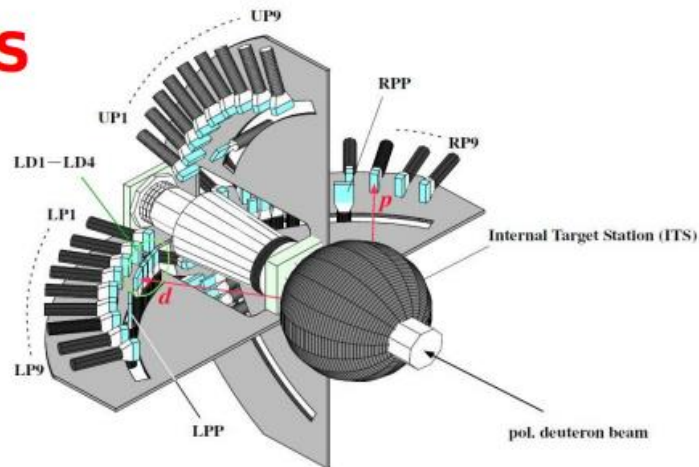
• **Практический вклад работы:** Разработаны и численно подтверждены методы ускорения с сохранением поляризации. Для комплекса NICA:

- Разработан пакет программ в среде Mathematica, на языке Python и на основе спин-трекинг кода Zgoubi, которые позволяют проводить верификацию экспериментальных данных на Нуклотроне с теоретическими расчетами.
- Разработаны подходы подавления резонансной деполяризации в Нуклотроне, которые позволят формировать высокоинтенсивные пучки протонов.
- Разработана методика управления поляризацией дейтронов 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.

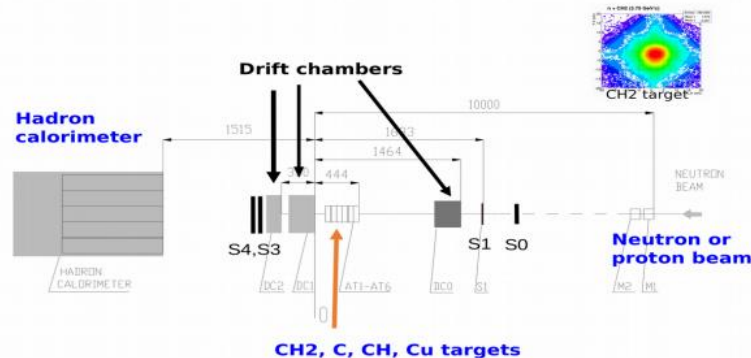
• **Перспективы:** Исследование создает основу для **уникальных высокоточных экспериментов на коллайдере NICA**, усиливая его конкурентоспособность. Это вносит значимый научно-технологический вклад в мировой мегапроект по поиску физики за пределами Стандартной модели.

Ускорительный комплекс коллайдера NICA

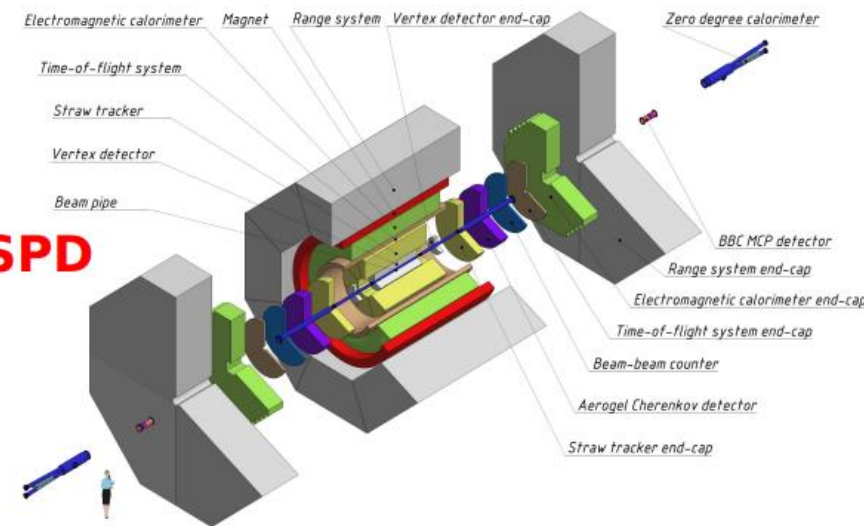
DSS



ALPOM-2



SPD



Что нужно?

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

Общая теория спинового движения в синхротронах

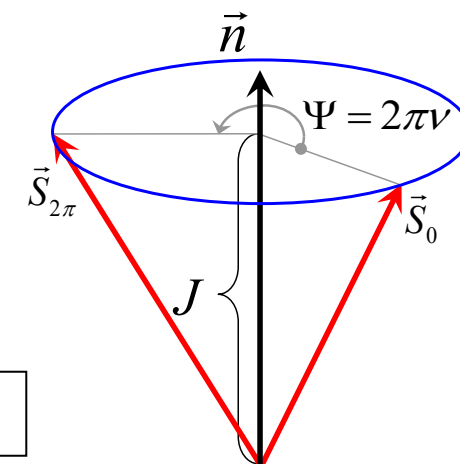
$$\mathcal{L} = -m_0 c^2 \sqrt{1 - \beta^2} + e \vec{A} \cdot \vec{v} - e \phi \quad \frac{d}{dt} \vec{S} = [\vec{\Omega}_t \times \vec{S}]$$

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

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

$$G_p \approx 1.7928 - \text{протоны}$$

$$G_d \approx -0.1426 - \text{дейтроны}$$



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:

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

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

ν – частота прецессии спина (**спиновая частота**)

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

Сила спинового резонанса

Вектор поляризации изменяется вблизи спиновых резонансов: $\nu = k + k_x \nu_x + k_y \nu_y + k_z \nu_z$

Резонансная система вращается вокруг вертикального направления с резонансной частотой ν_k .

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

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

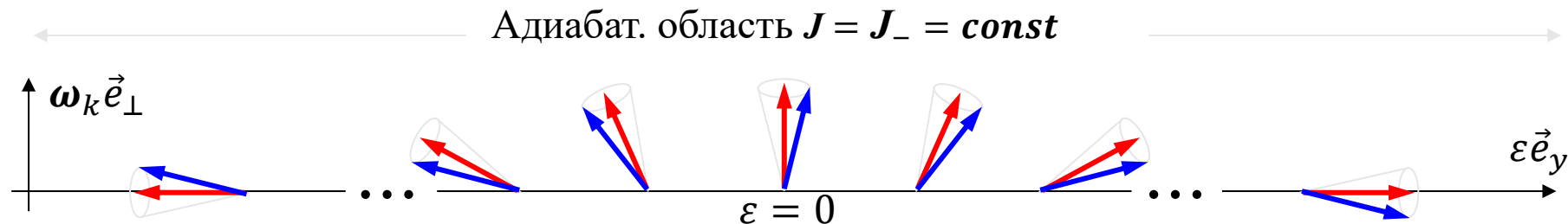
ω_\perp – сила резонанса (Фурье гармоника)

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

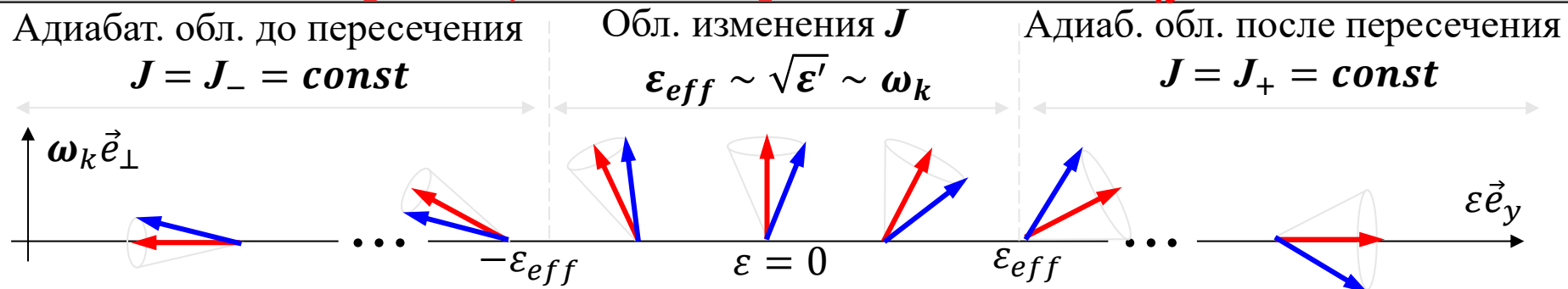
$$S_f = S_i \left(2e^{-\frac{\pi \omega_\perp^2}{2 \varepsilon'}} - 1 \right) - \text{формула Фруассарт-Стора}$$

Пересечение спинового резонанса

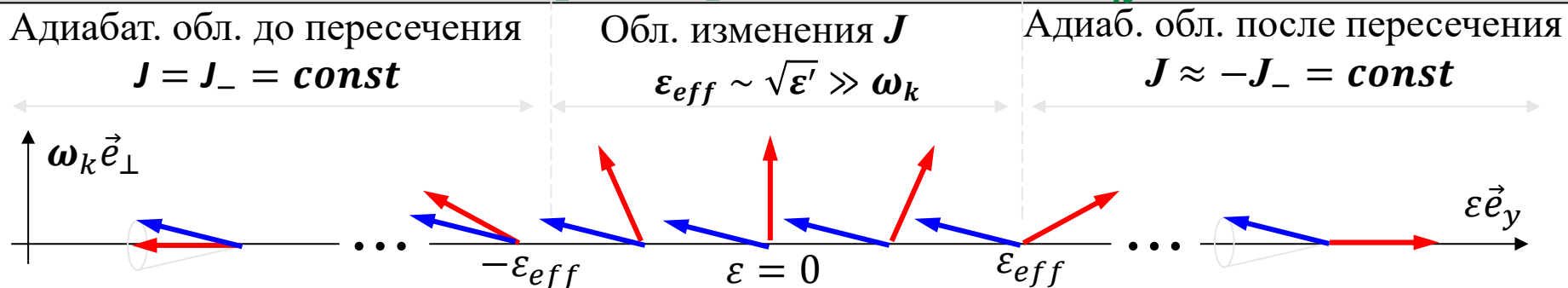
Медленное пересечение: $\varepsilon' \ll \omega_k^2$



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



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



Аналитические расчеты и численное интегрирование

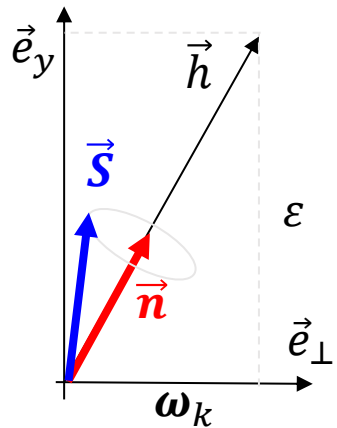
$$\frac{dB}{dt} = 0.6 \frac{T_L}{c} \quad \omega_D = 8.2 \cdot 10^{-4}$$

$$v_x = 7.1 \quad v_y = 7.2$$

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

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

Вектор поляризации изменяется вблизи спиновых резонансов: $v_k = k + k_x v_x + k_y v_y + k_z v_z$

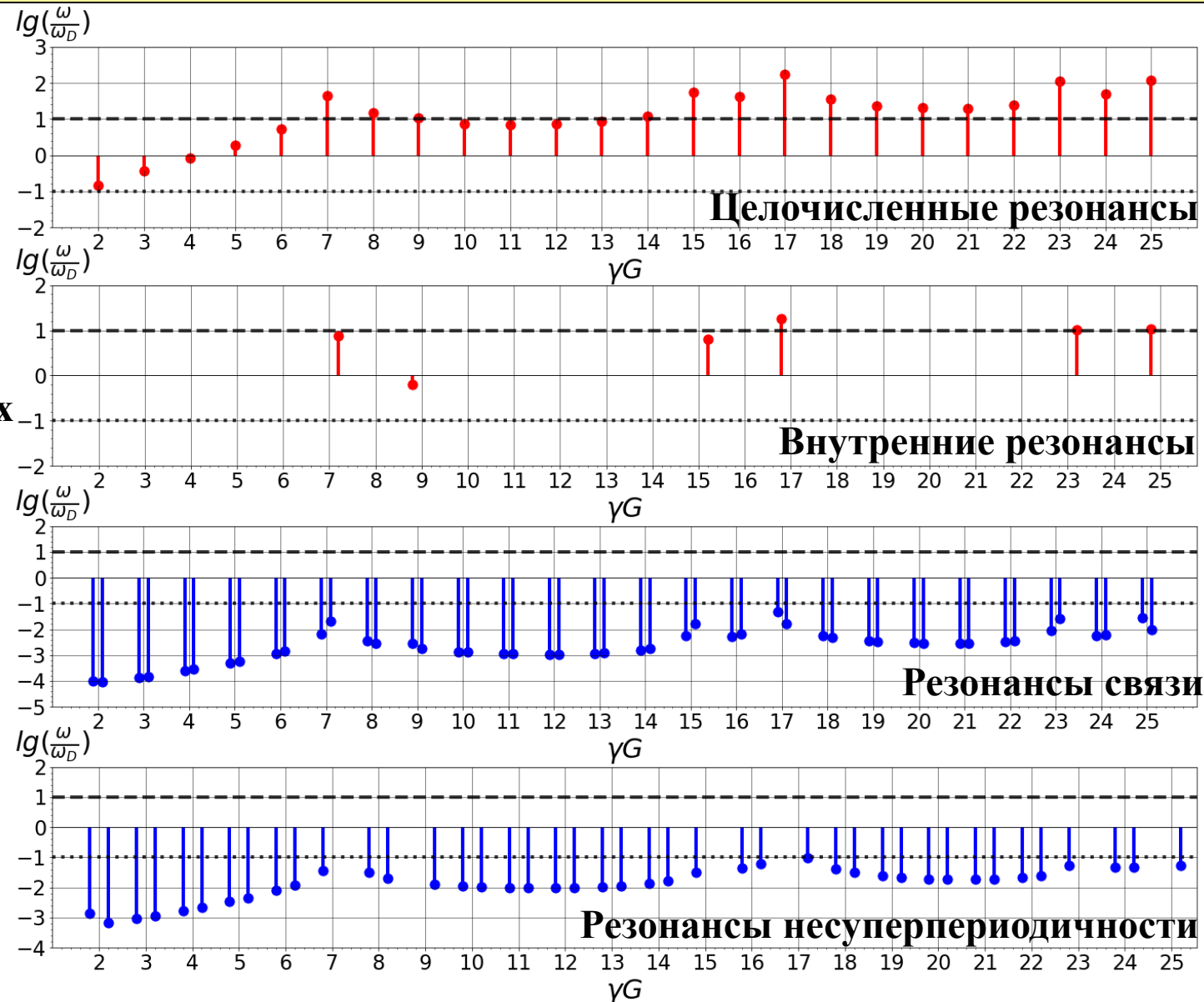


$$n\text{-ось: } \vec{n} = \vec{h}/h$$

$$\varepsilon \rightarrow -\infty, \quad \vec{n} \rightarrow -\vec{e}_y$$

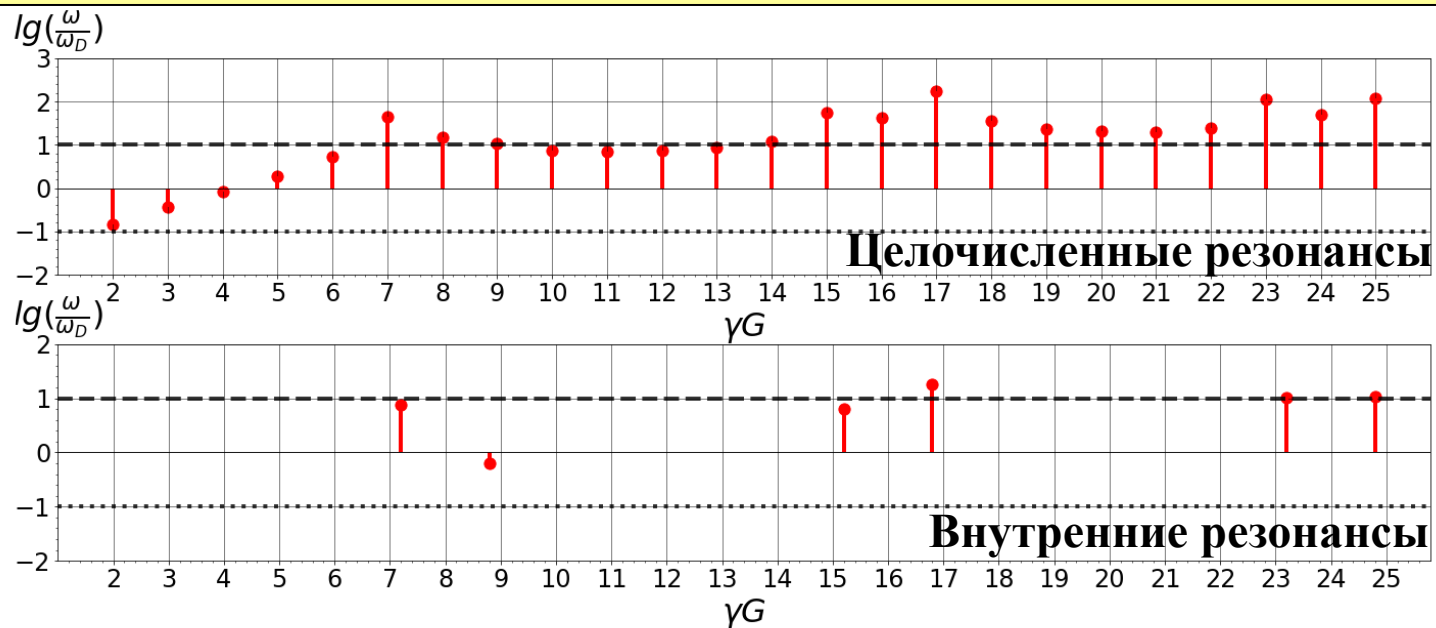
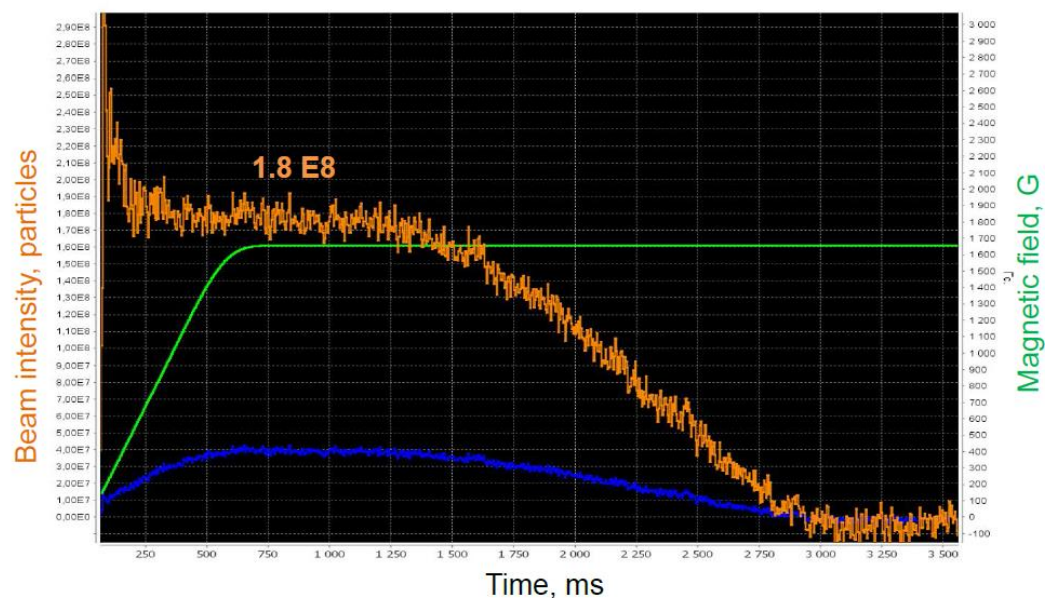
$$\varepsilon = 0, \quad \vec{n} = \vec{e}_\perp$$

$$\varepsilon \rightarrow +\infty, \quad \vec{n} \rightarrow +\vec{e}_y$$



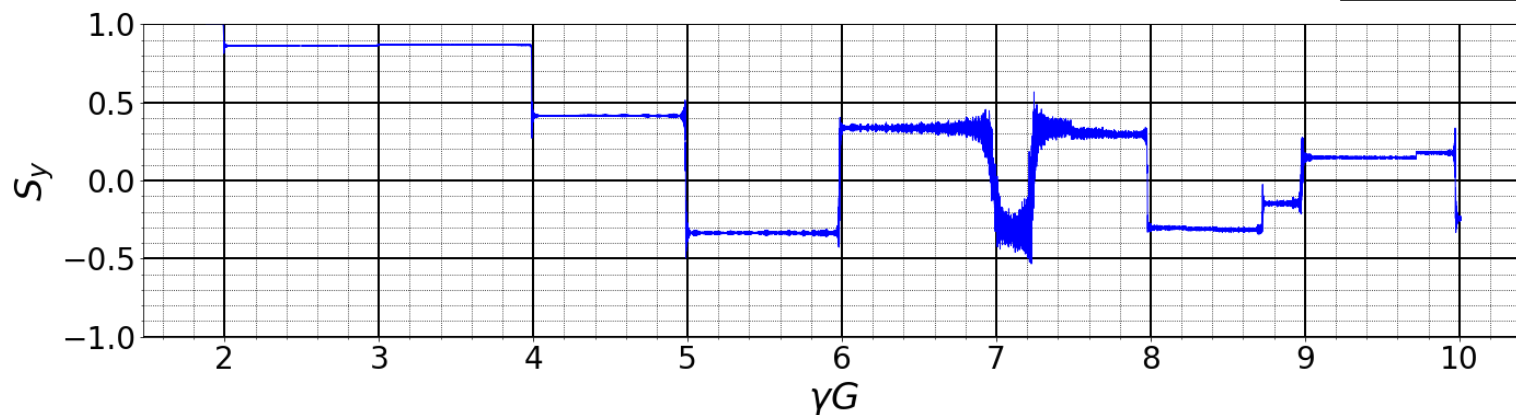
Аналитические расчеты и численное интегрирование

Сеанс №53 2017 года



$$S_y = 0.354 \pm 0.022$$

Zgoubi



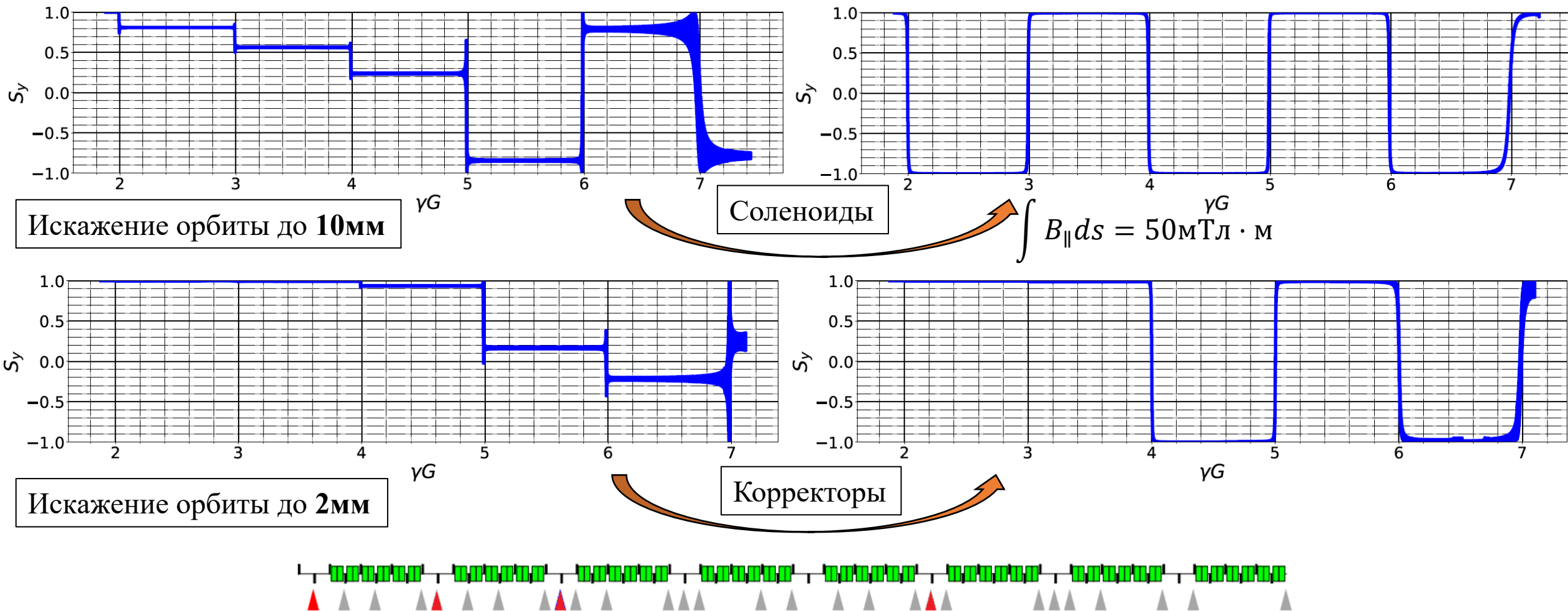
$$\frac{dB}{dt} = 0.6 \frac{T_L}{c} \quad \omega_D = 8.2 \cdot 10^{-4}$$

$$v_x = 7.1 \quad v_y = 7.2$$

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

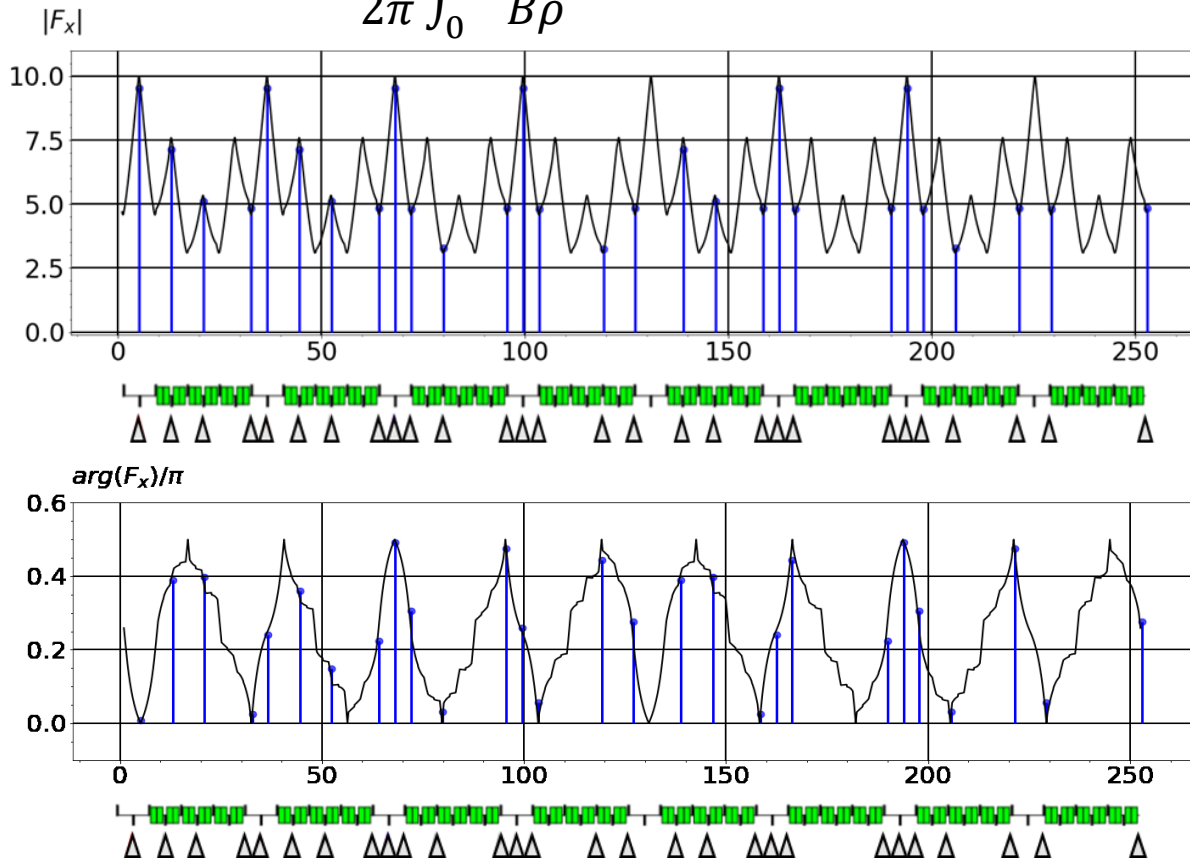
Сохранение поляризации протонов при ускорении до 3.5 ГэВ/с с использованием слабых магнитных полей

Ближняя перспектива

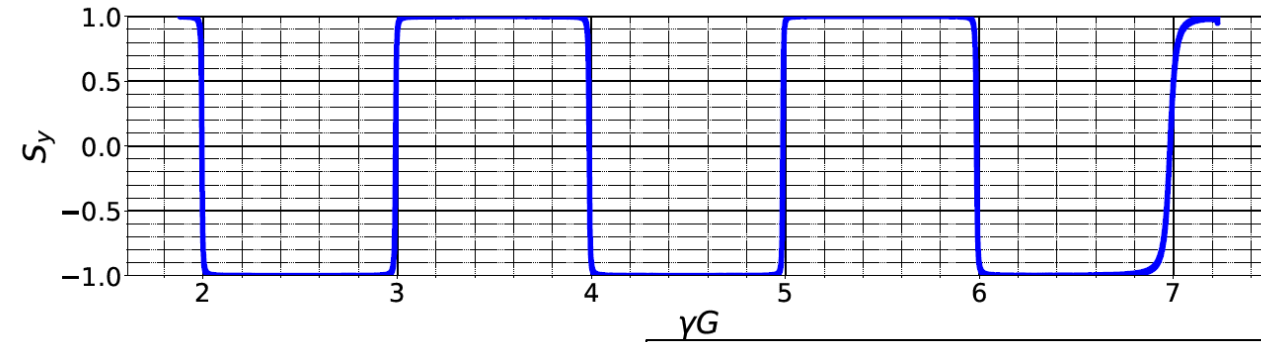


Сохранение поляризации протонов при ускорении до 3.5 ГэВ/с с использованием слабых магнитных полей

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

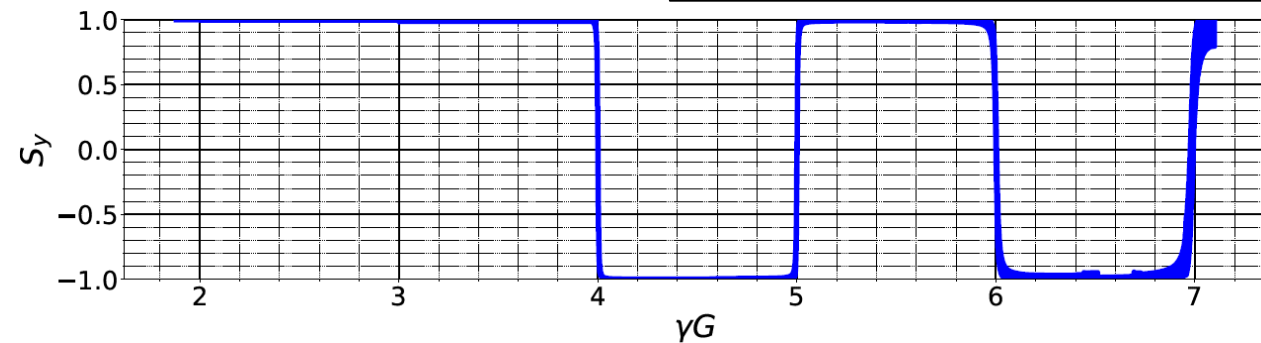


Ближняя перспектива



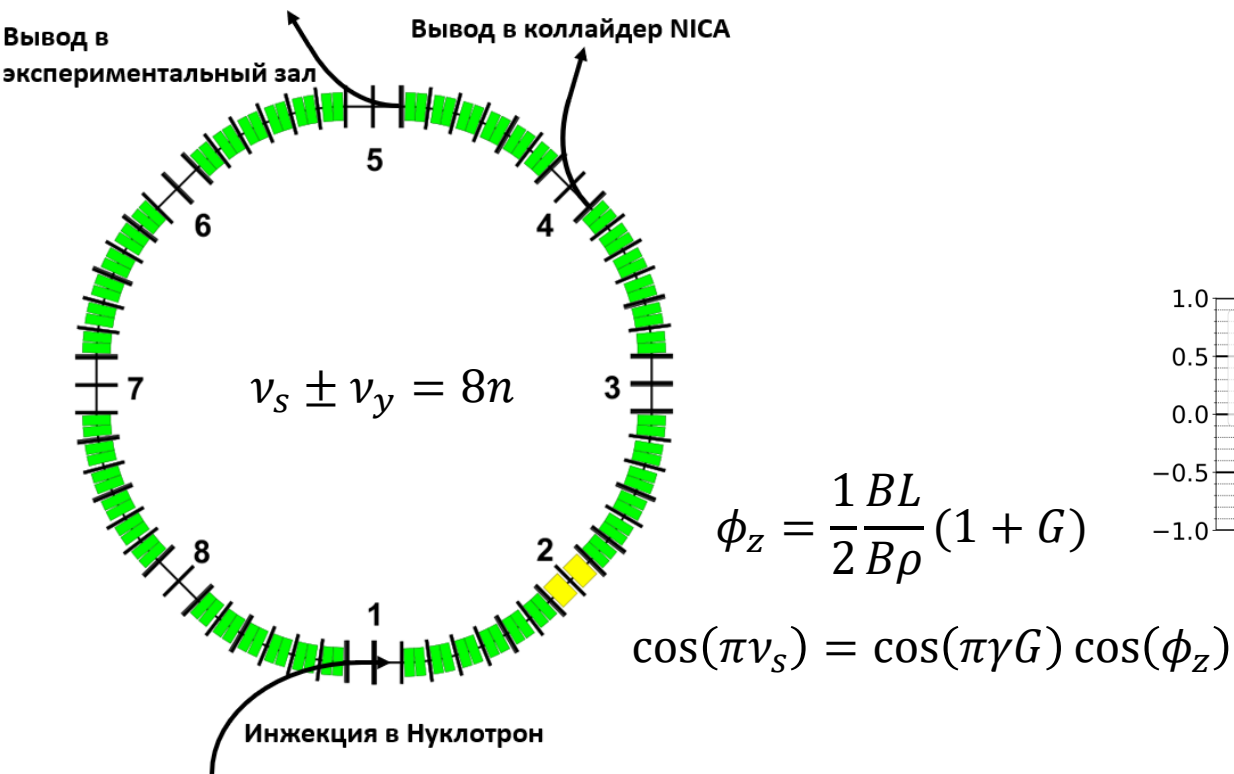
Искажение орбиты до 10мм

Искажение орбиты до 2мм

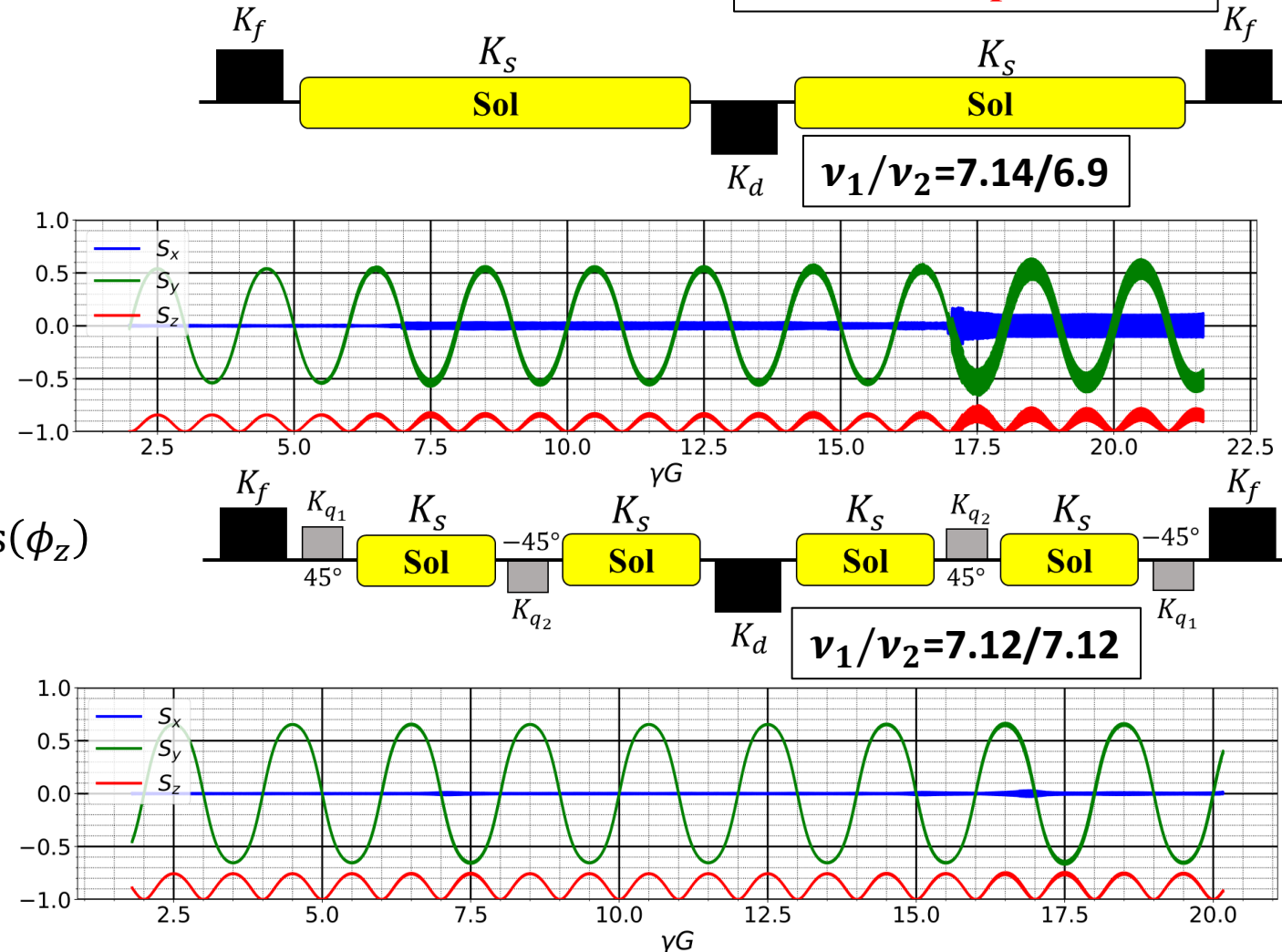


Результат: совместное использование слабого соленоида и корректирующих диполей обеспечат ускорение протонов без потери поляризации в диапазоне энергий до первого внутреннего резонанса

Сохранение поляризации протонов во всем диапазоне энергий пучка в Нуклотроне



Ближняя перспектива

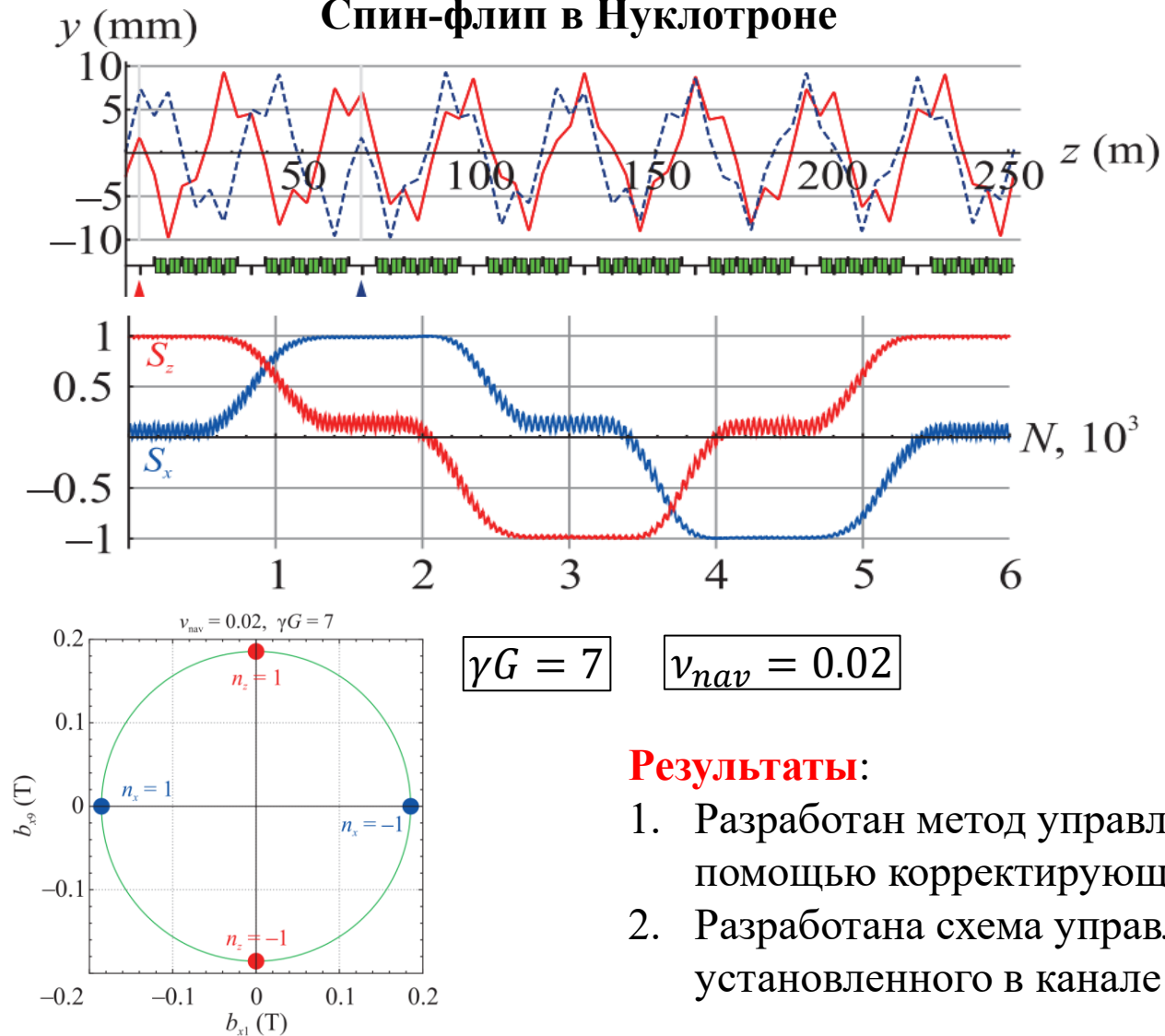


Результат: разработан подход по ускорению поляризованных протонов без потери поляризации с применением частичной соленоидальной (50%-60%) змейки и сформулированы требования на выбор бетатронных частот

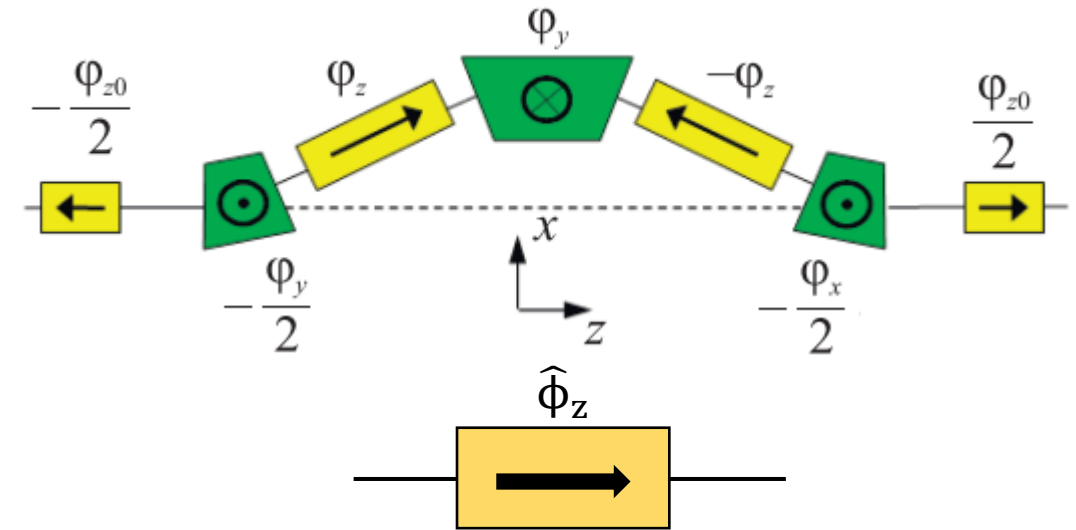
Управление поляризацией протонов в инжекционном комплексе

Ближайшая перспектива

Спин-флип в Нуклотроне



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



Результаты:

1. Разработан метод управления поляризацией в Нуклотроне 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 дейтронов на индуцированных внутренних резонансах

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

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

Отстройка от резонанса ε_γ в процессе пересечения будет иметь колебательный характер и определяться как:

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

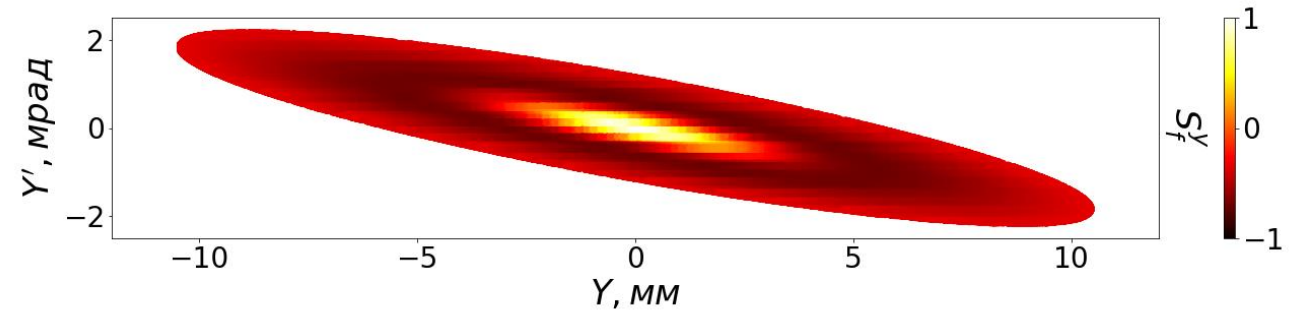
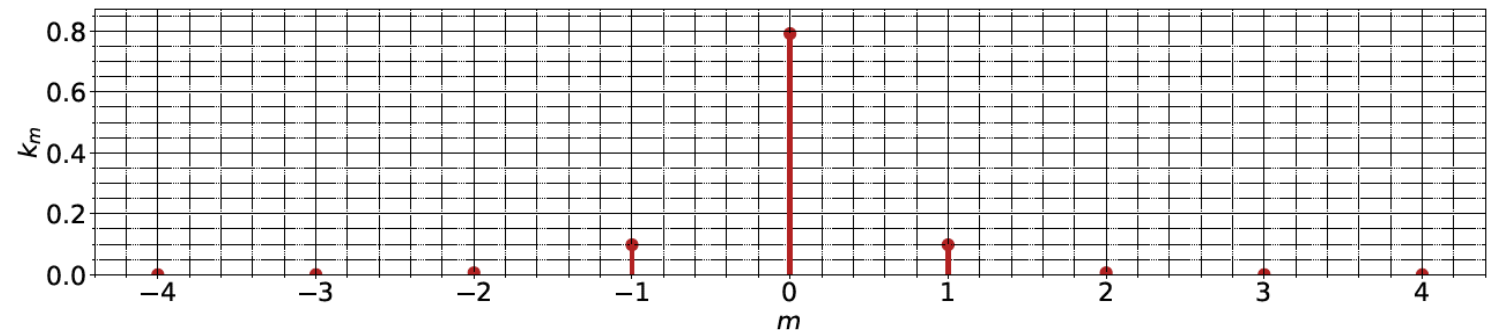
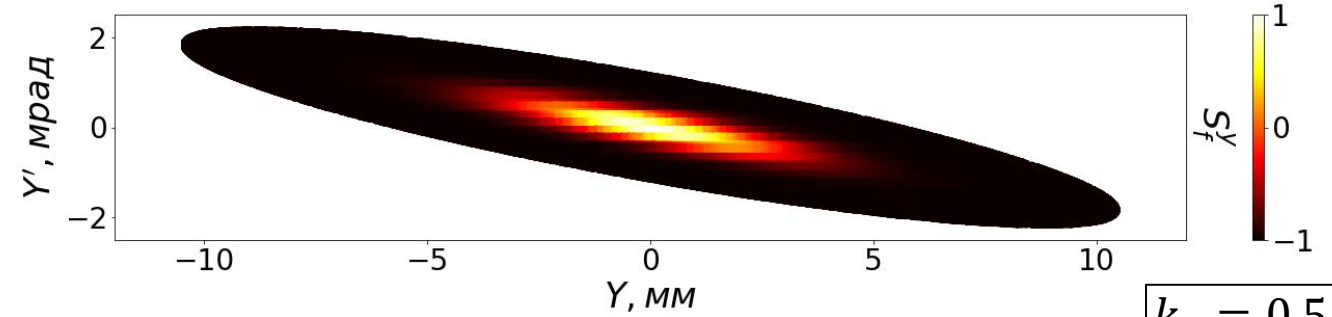
$$\Delta_\gamma = (\gamma G \beta^2 \pm \xi_y) \frac{\Delta p}{p} \quad \text{- амплитуда модуляции внутреннего резонанса}$$

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

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

В модели пересечения уединенных спутных спиновых резонансов:

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



Адиабатические перевороты спина дейтронов на индуцированных внутренних резонансах

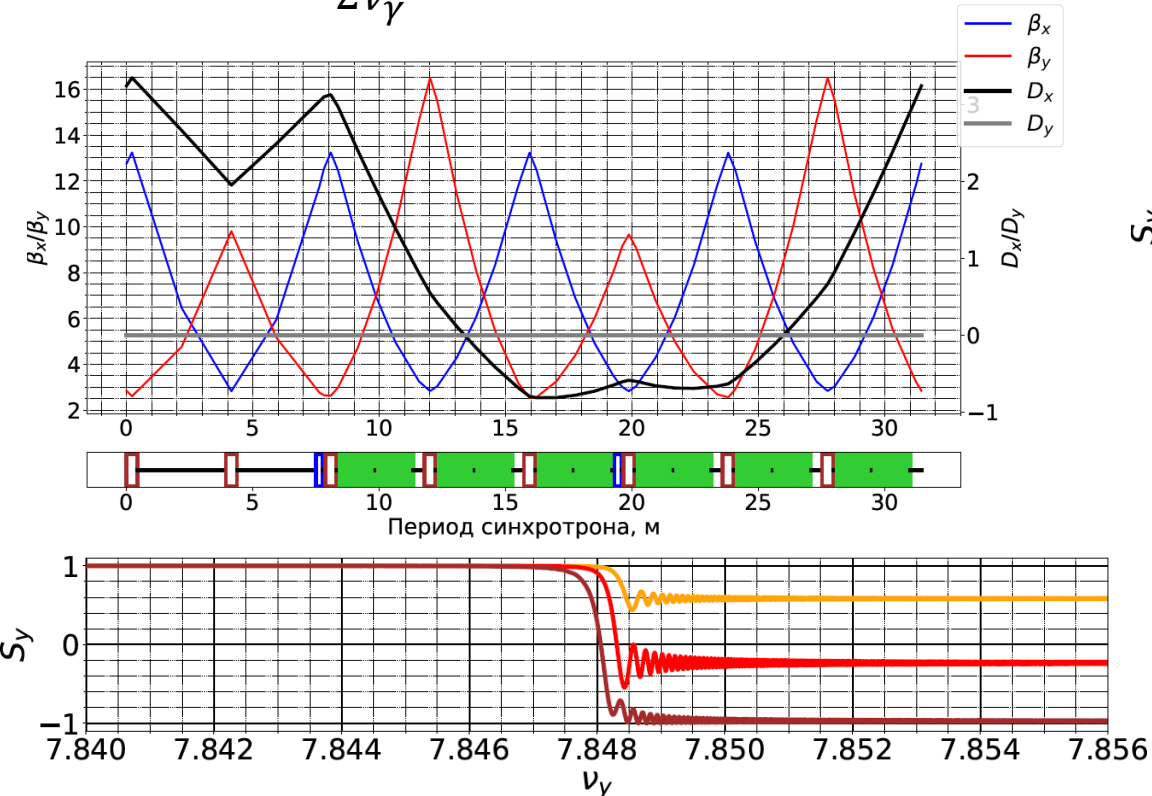
Случай уединенных спутников

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

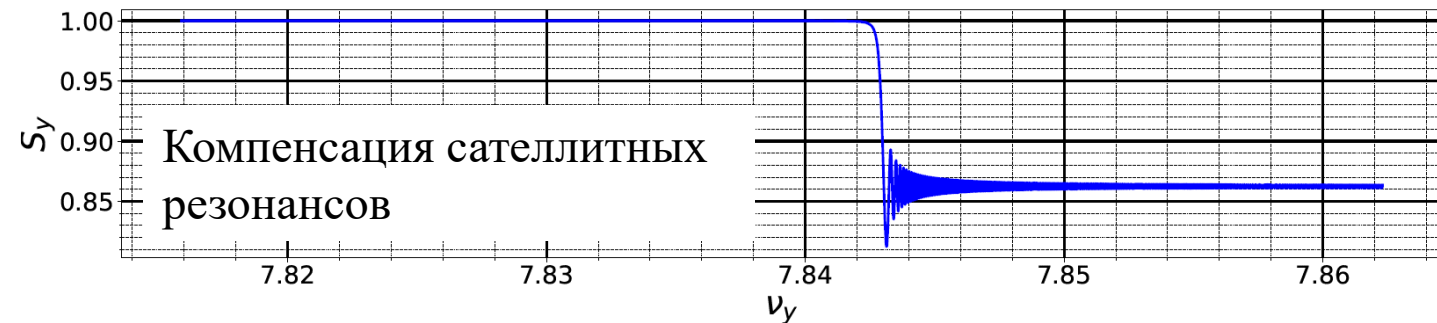
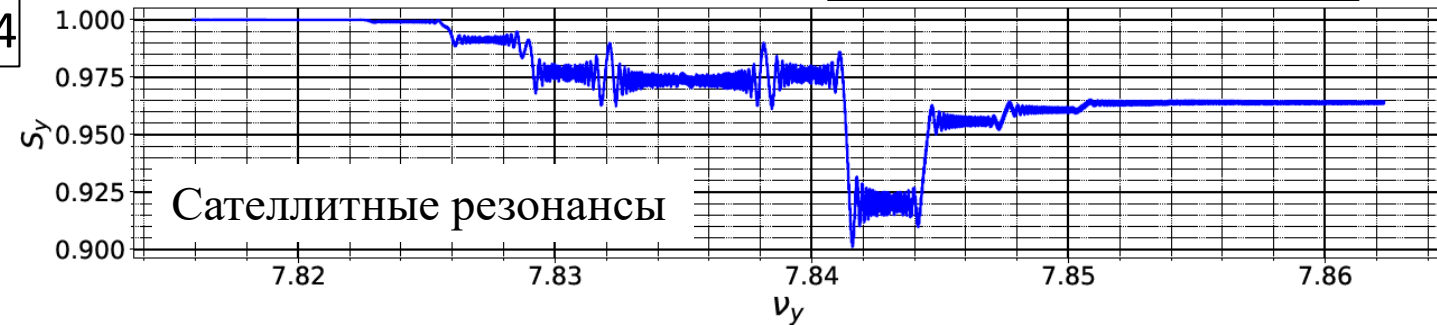
$$k_\gamma = \frac{\sigma_p}{2\nu_\gamma} (\xi_y \pm \gamma G \beta^2)$$

$$\nu_x = 7.10$$

$$\nu_y = 7.84$$



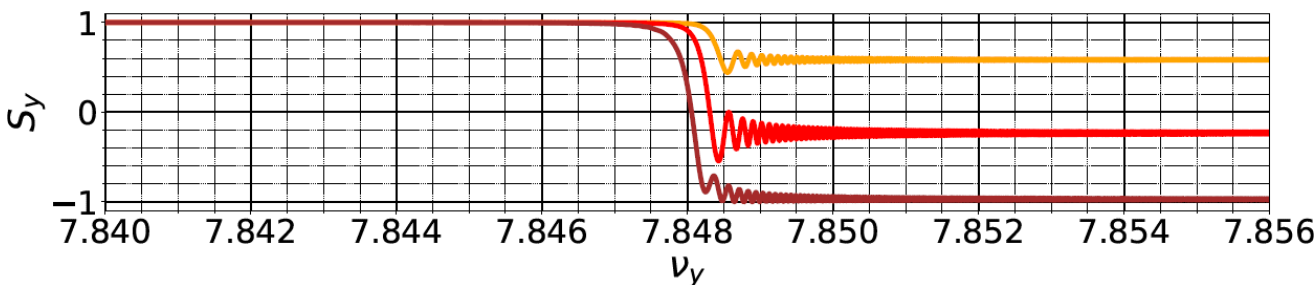
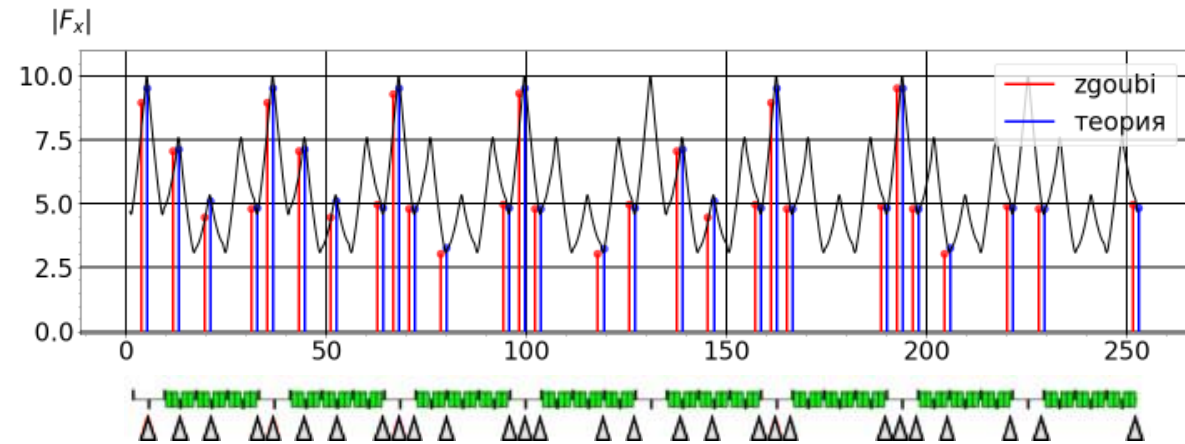
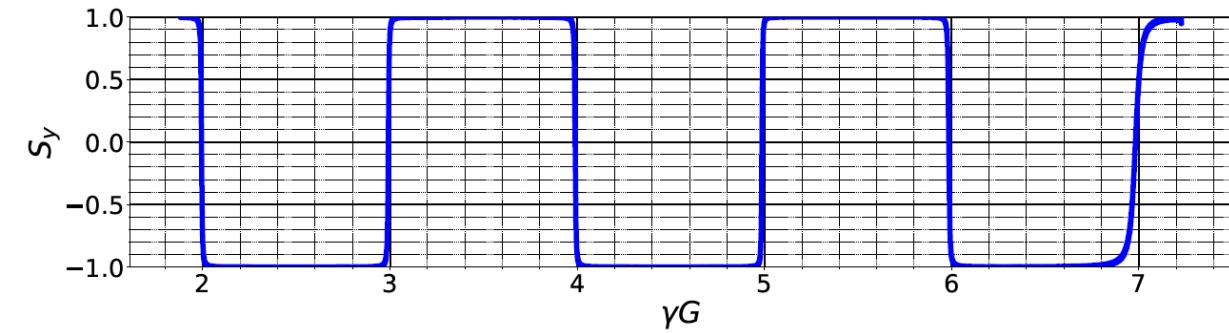
Ближняя перспектива



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

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 дейтронов на внутреннем спиновом резонансе

Концепция нового инжекционного кольца Нуклотрона

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 дейтронов как:

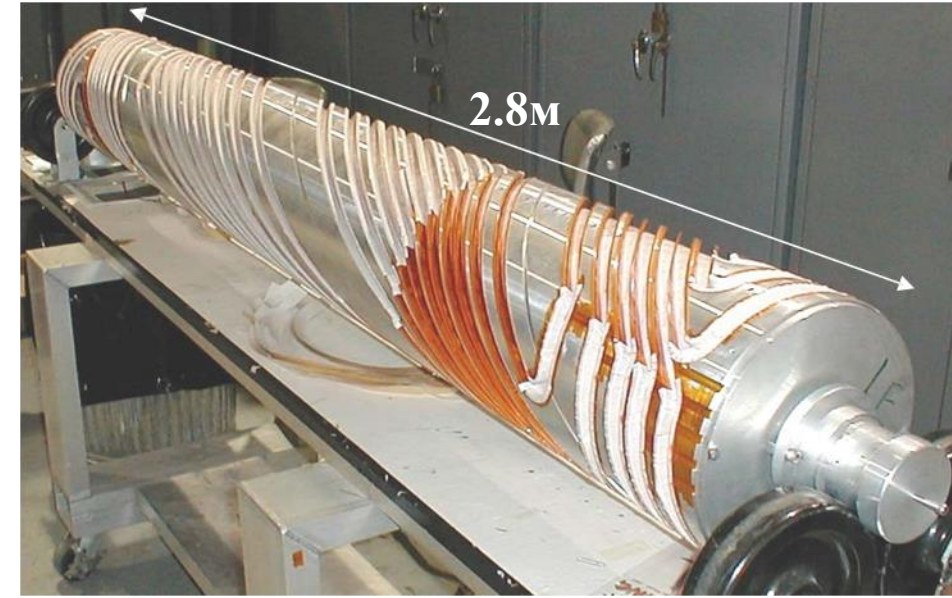
$$(B_{\parallel}L)_{proton}[\text{Тл} \cdot \text{м}] = 3.75p[\text{ГэВ/с}]$$

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

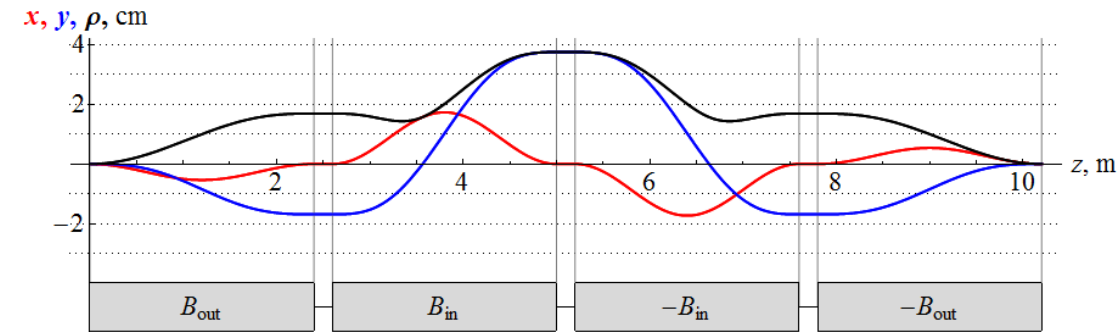
Для поворота спина протонов и дейтронов на 180° диполем в релятивистском пределе требуется интеграл поля равный:

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

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

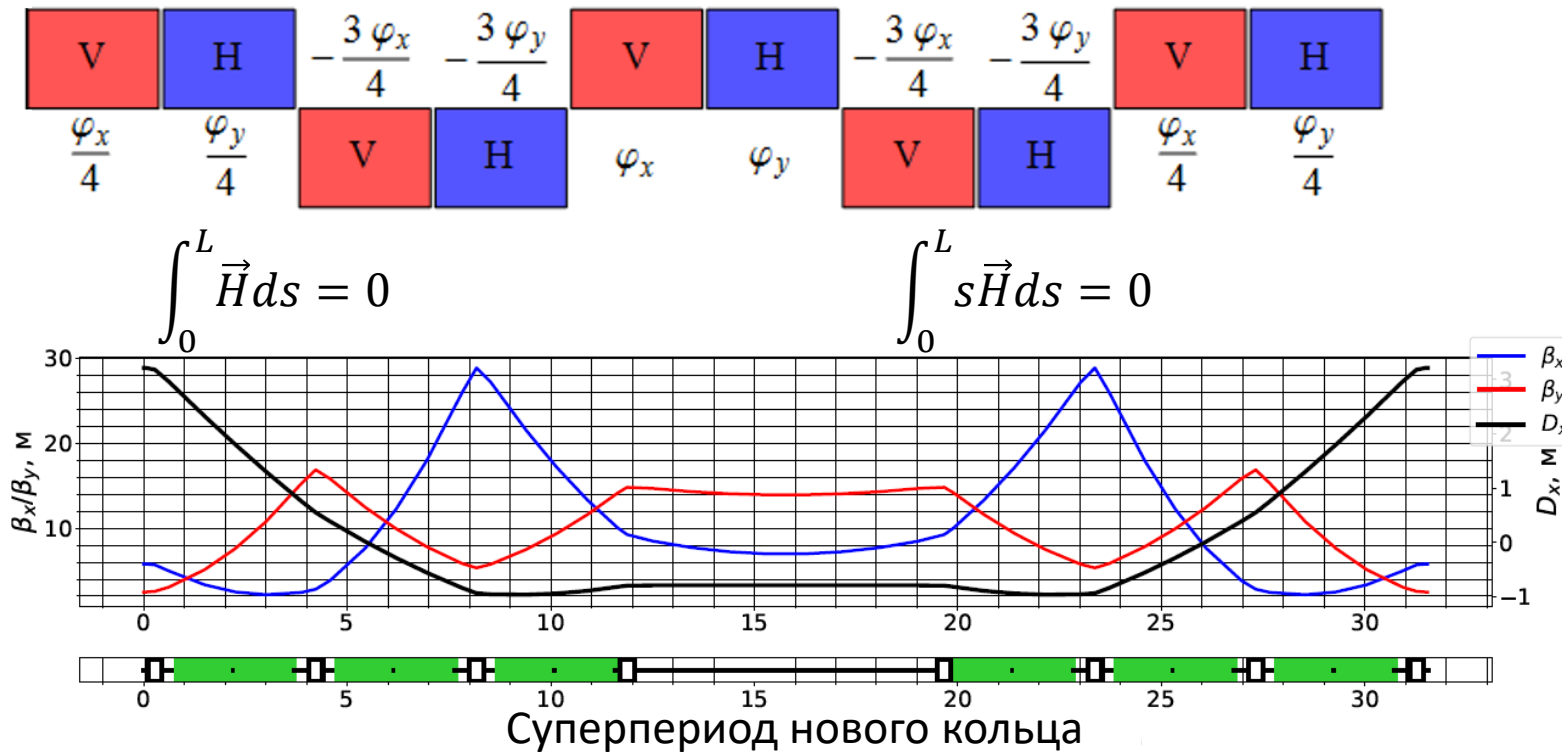


100%-snake: $\gamma = 21.3$, $B_{out} = 1.23 \text{ T}$, $B_{in} = 4. \text{ T}$, $L_{tot} = 10.2 \text{ m}$

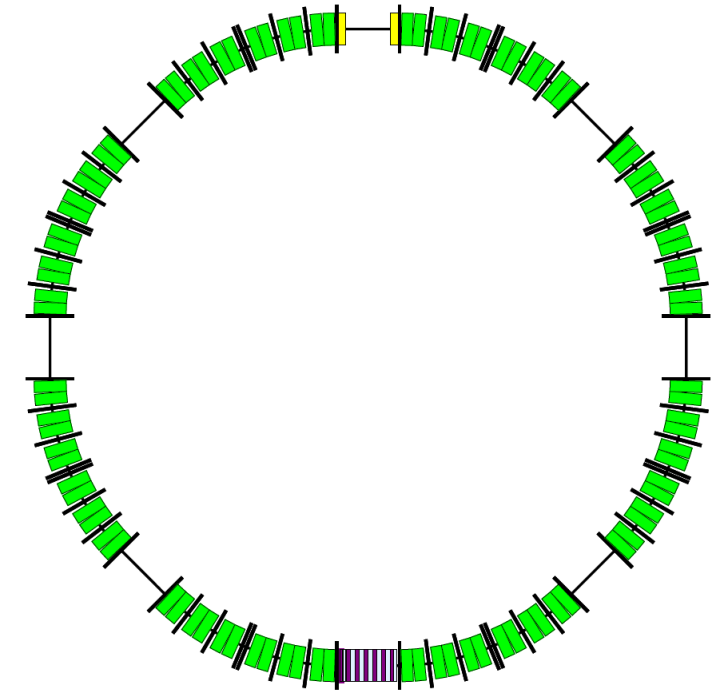


В диапазоне энергий Нуклотрона на энергии 3.5 ГэВ/с отклонение замкнутой орбиты составит более 20 см. Выбор этой энергии в качестве нижней границы рабочего диапазона змейки в Нуклотроне обусловлен тем, что в диапазоне до 3.5 ГэВ/с отсутствуют внутренние спиновые резонансы.

Концепция нового инжекционного кольца Нуклотрона



Дальняя перспектива



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

Бетатронные частоты, ν_x/ν_y

6.7/4.8

Натуральная хроматичность, ξ_x/ξ_y

-10.7/-6.3

Максимальные значения бета-функций, $\beta_x^{max}/\beta_y^{max}$, м

28.9/16.9

Максимальное значение дисперсионной функции, D_x , м

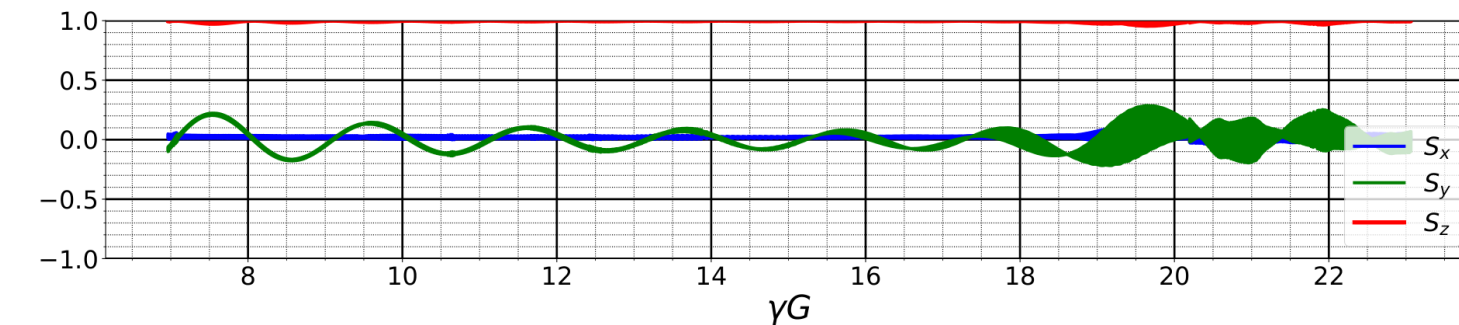
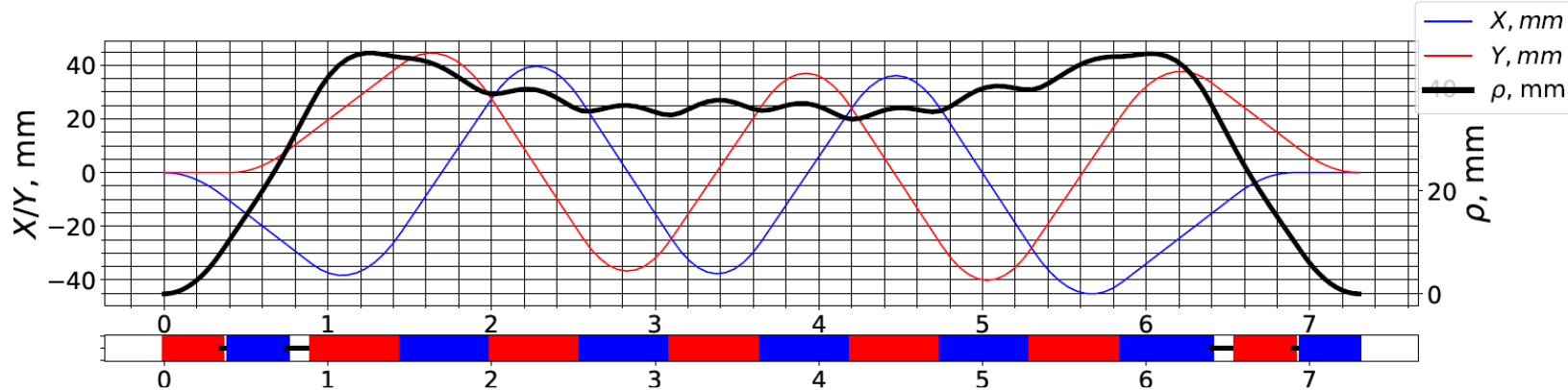
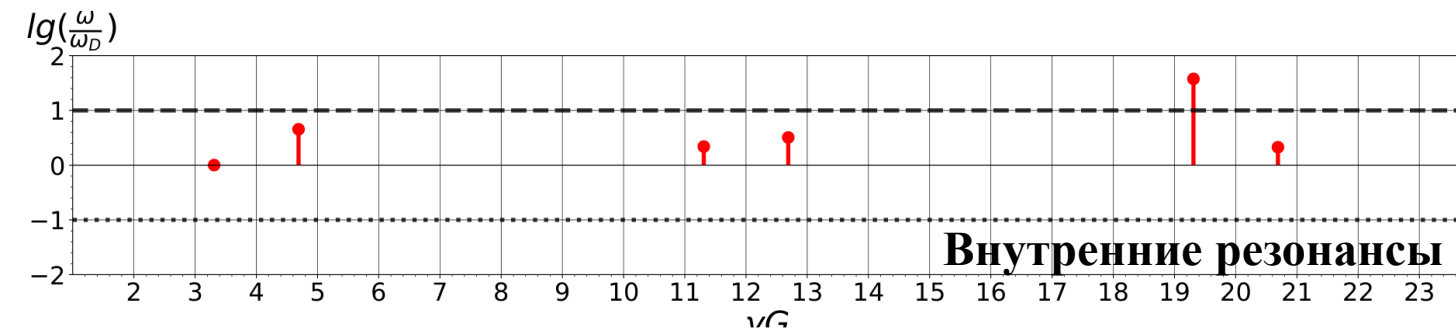
3.2

Критическая энергия, γ_{tr}

14.0

Концепция нового инжекционного кольца Нуклотрона

Дальняя перспектива

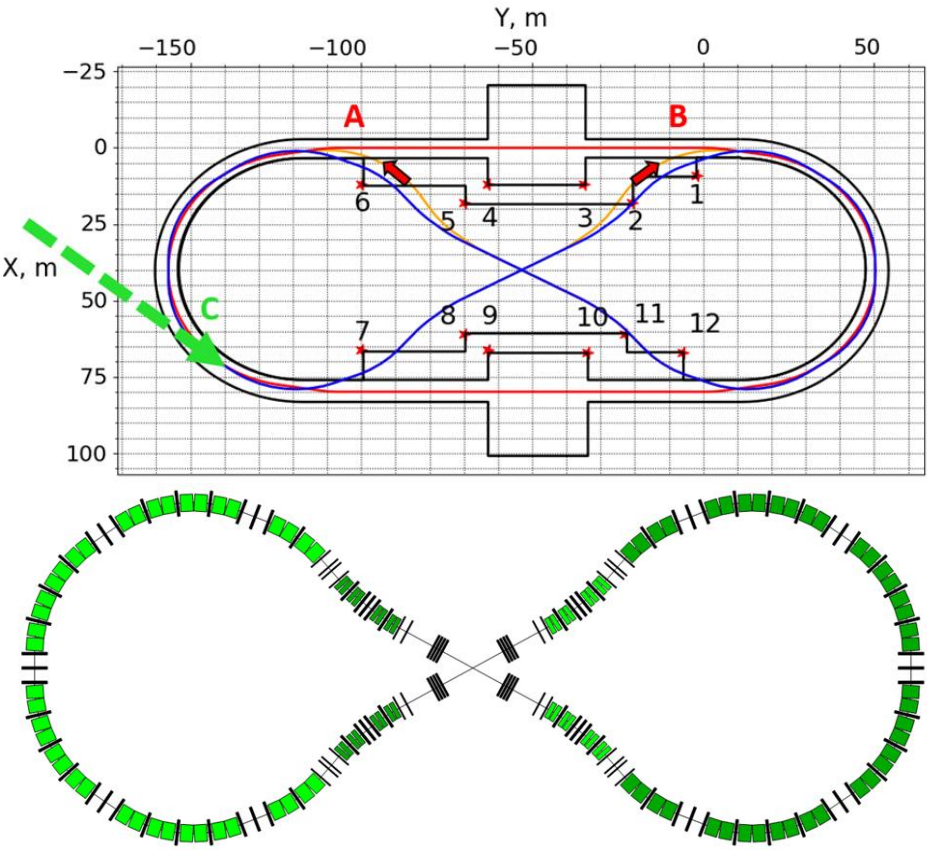


Особенности змейки:

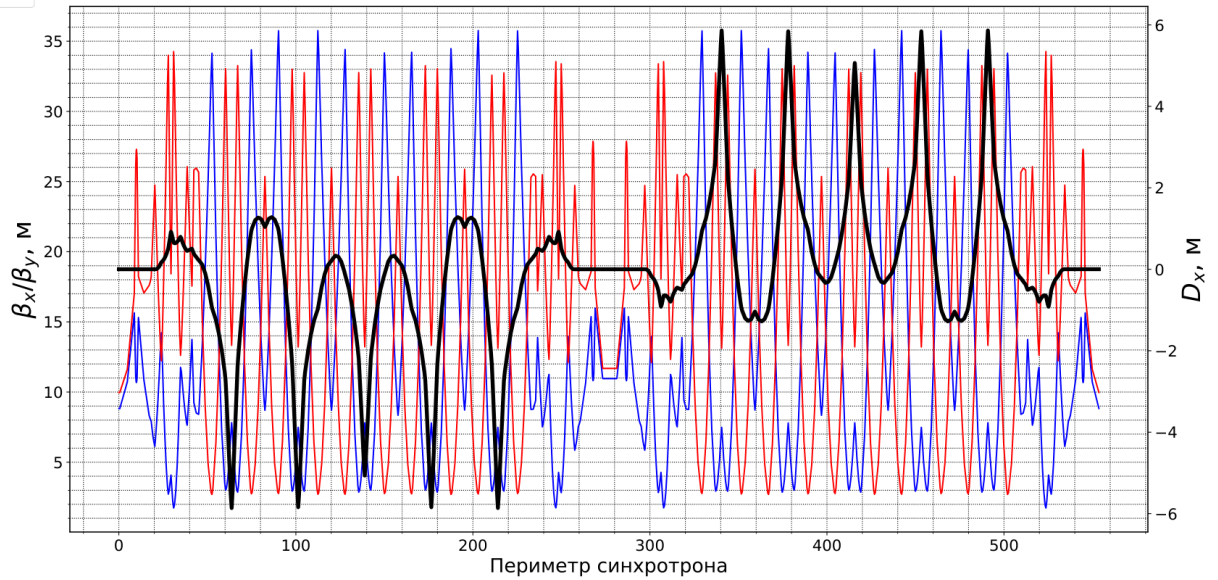
- компактность;
- интеграл поперечных полей змейки практически не зависит от энергии (пропорционален скорости пучка);
- отклонение орбиты спадает как $1/\gamma$ (на энергии 2.6 ГэВ для протонов сдвиг орбиты достигает 40 мм).

Дипольные змейки являются альтернативой соленоидальным 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"



β_x
 β_y
 D_x



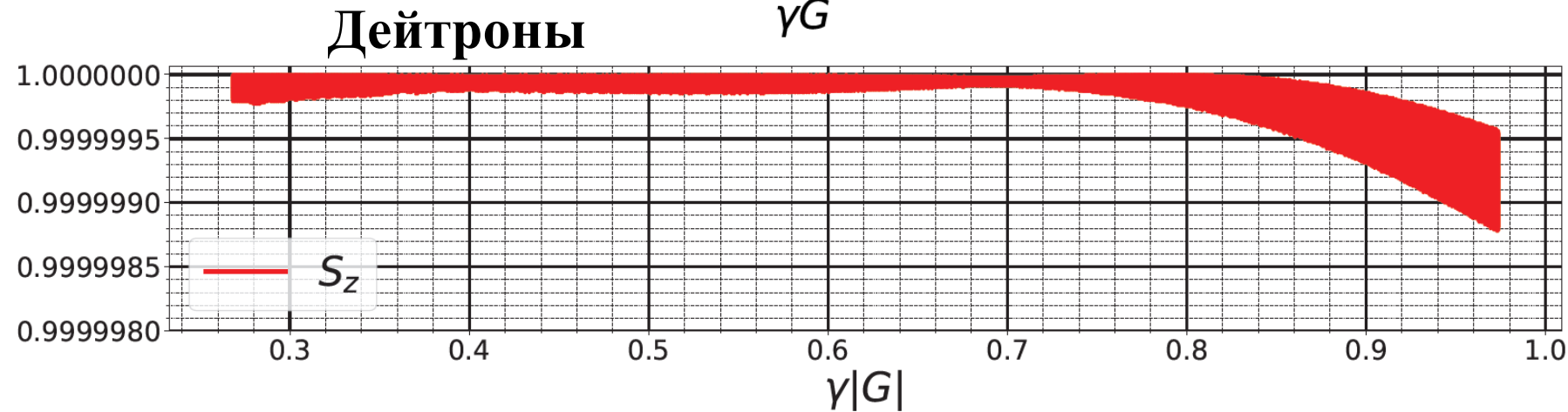
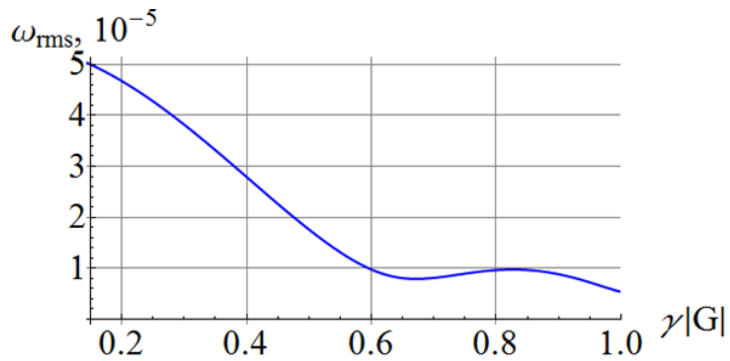
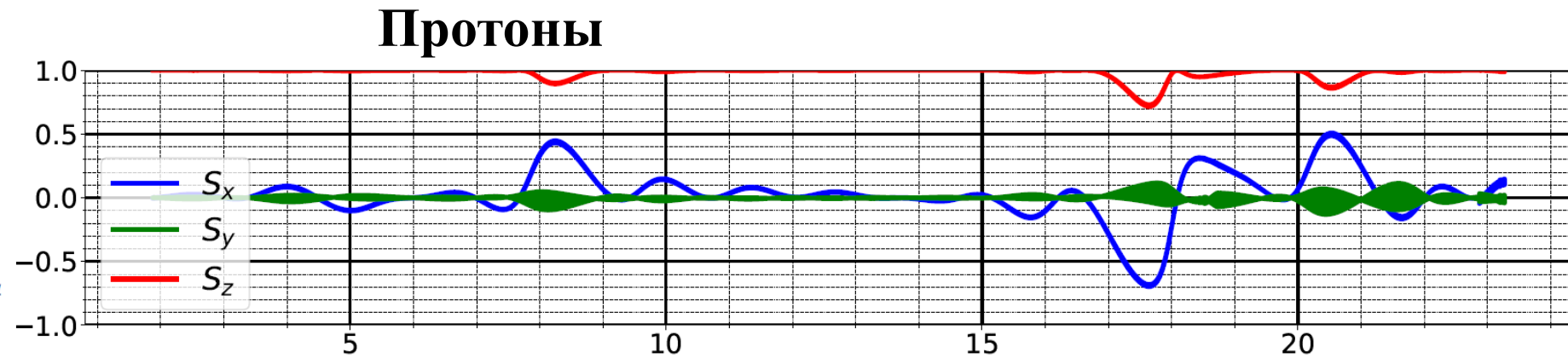
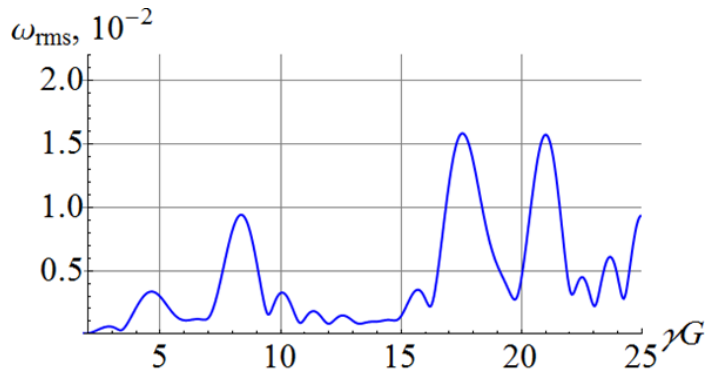
Дальняя перспектива

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

Бетатронные частоты, ν_x/ν_y	10.6/8.8
Натуральная хроматичность, ξ_x/ξ_y	-13.7/-17.5
Максимальные значения бета-функций, $\beta_x^{max}/\beta_y^{max}$, м	35.7/34.4
Критическая энергия, γ_{tr}	13.0

Концепция нового инжекционного кольца в виде "восьмёрки"

Дальняя перспектива



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

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 дейтронов в Нуклотроне;
 - Методика расчета спиновых характеристик пучка с применением численного интегрирования уравнений движения спина и пучка в Нуклотроне;
 - Валидация методики расчета динамики спина на данных эксперимента по ускорению поляризованных протонов в Нуклотроне и сравнение с независимой методикой;
2. Комплекс мер по сохранению и управлению поляризацией протонов и дейтронов в Нуклотроне:
 - 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 дейтронов 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 дейтронов 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 Нуклотрона (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) (БАК);
- Спиновый навигатор на базе корректирующих диполей Нуклотрона/ОИЯИ / Ю.Н. Филатов (и др.) // Письма в ЖЭТФ – 2022 – т. 116 (7) (БАК);
- Система спин-флипа дейтронов на базе корректирующих квадрупольных нуклотрона ОИЯИ / Е.Д. Цыплаков (и др.) // Письма в ЭЧАЯ – 2024 – т. 55 (4) - Р. 736-740 (БАК);
- Сохранение поляризации протонов в нуклотроне 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 (БАК);
- Сохранение и контроль направления поляризации протонов для спиновых экспериментов на Нуклотроне/ОИЯИ / Е.Д. Цыплаков (и др.) // JETP – 2025 – т. 123 (БАК).
- Figure-8 Synchrotron for Polarized Protons and Deuterons at the NICA Acceleration Complex / Yu. N. Filatov [et al.] // Natural Science Review – 2025 – Vol. 2.

- Разработка методики эксперимента по тестированию системы спин-флипа в диапазоне импульсов протонов до 3 ГэВ/с в режиме спиновой прозрачности Нуклотрона (ОИЯИ) – РФФИ 2020г.
- Спиновая прозрачность как новый подход к прецизионным поляризационным экспериментам для проверки фундаментальных симметрий на коллайдерах и накопителях: теория и эксперимент – РФФИ 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 – РФФИ 2025г.

A yellow rectangular scroll with rounded corners and a black outline. It has a vertical strip on the right side that looks like a scroll binding, with a small circular detail at the bottom. The text "Thank you for your attention!" is written in red on the scroll.

Thank you for your attention!