

Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента легких ядер

Специальность 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

Соискатель к.ф.-м.н.: Колокольчиков С. Д.

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Сеничев Ю.В.

Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия

Актуальность

- Исследование кварк-глюонной плазмы;
- Разрешение проблемы "спинового кризиса";
- Изучение Электрического Дипольного Момента;
- Поиск аксионоподобных частиц.



Цель и Задачи исследования

Целью данной диссертации является изучение особенностей поведения лёгких поляризованных пучков в предлагаемой дуальной структуре, а также исследования ЭДМ с использованием квази-замороженной концепции.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- Расчёт времени внутрипучкового рассеяния и стохастического охлаждения;
- Моделирование магнитооптики с модулированной дисперсионной функцией;
- Проведение численного моделирования продольной динамики частиц;
- Изучение «квази-замороженного» спина для измерения ЭДМ дейтрана и протона;



Научная новизна

- Впервые предложена дуальная структура для тяжелых ионов и легких частиц для коллайдера NICA;
- Впервые предложены методы подавления дисперсии поворотной аркой в резонансной магнитооптической структуре с отсутствующими магнитами;
- Впервые исследован метод скачка критической энергии с использованием барьерного ускоряющего потенциала с учётом ограничений по продольной микроволновой неустойчивости;



Научная новизна

- Были проведены исследования продольной динамики с учётом высших порядков разложения по импульсу, а также влиянием импеданса. На их базе сформулированы ограничения на величину и темп скачка критической энергии;
- Были разработаны 8- и 16-периодичная квази-замороженная структура Nuclotron для выделения ЭДМ сигнала лёгких ядер;
- Была разработана структура коллайдера NICA с обводными каналами, неориентированная изначально на эксперименты по поиску ЭДМ дейтрона методом квази-замороженного спина;



Практическая значимость

Исследования направлены на формирование полноценной физической программы в комплексе Nuclotron-NICA.

Применение изложенных в работе подходов возможно и на других похожих установках без потери общности.



Объект исследования



В работе отдается приоритет исследованиям свойств пучков частиц, где ускоритель выступает в роли детектирующего устройства.



Методы исследования

- ① Аналитические и численные;
- ② Экспериментальные;

Математическое и компьютерное моделирование. Были использованы программы для расчёта поперечной динамики: MAD-X, OPTIM, BMAD, продольной динамики: BLonD; спин-орбитальной динамики: COSY Infinity.

Экспериментальные методы исследования заключаются в изучении динамики пучка с применением скачка критической энергии и без него. Соискатель лично участвовал в сеансе на синхротроне У-70 в г. Протвино, Россия в 2023 году.



Основные положения, выносимые на защиту

- Предложена реализация дуальной структуры для комплекса NICA-Nuclotron, оптимальная для тяжелых ионов с точки зрения ВПР и лёгких частиц с поднятой критической энергией;
- Реализован метод вариации критической энергии для коллайдера NICA с отсутствующими магнитами при подавлении дисперсионной функции двумя семействами квадрупольей и двумя крайними ячейками;
- Представлены результаты моделирования продольной динамики с учётом высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов в окрестности критической энергии и сравнение с экспериментальными данными на У-70;



Основные положения, выносимые на защиту

- Проведен анализ использования гармонического ВЧ при процедуре скачка в коллайдере NICA. Для барьерного ВЧ представлены данные моделирования продольной динамики. Предложено сокращение длины между барьерами из-за продольной микроволновой неустойчивости;
- Предложены модернизированные 8/16-периодичные структуры Nuclotron с квази-замороженным спином для исследования ЭДМ лёгких ядер, с сохранением функции бустера;
- Применен метод фильтров Вина для сохранении направления поляризации на основе введения обводных каналов в структуре коллайдера NICA с квази-замороженным спином;



Содержание доклада

- ① Дуальная структура;
- ② Прохождение критической энергии;
- ③ Исследование ЭДМ.



Дуальная структура



Дуальная структура

При разработке структуры, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к частицам с различным зарядом, важно создать перестраиваемую структуру без внесения конструктивных изменений. Мы назвали такую структуру – *дуальной*.

Тяжёлые ионы

обладают более выраженным эффектом разогрева из-за внутрипучкового рассеяния.

Лёгкие частицы

влияние критической энергии на динамику сгустка.

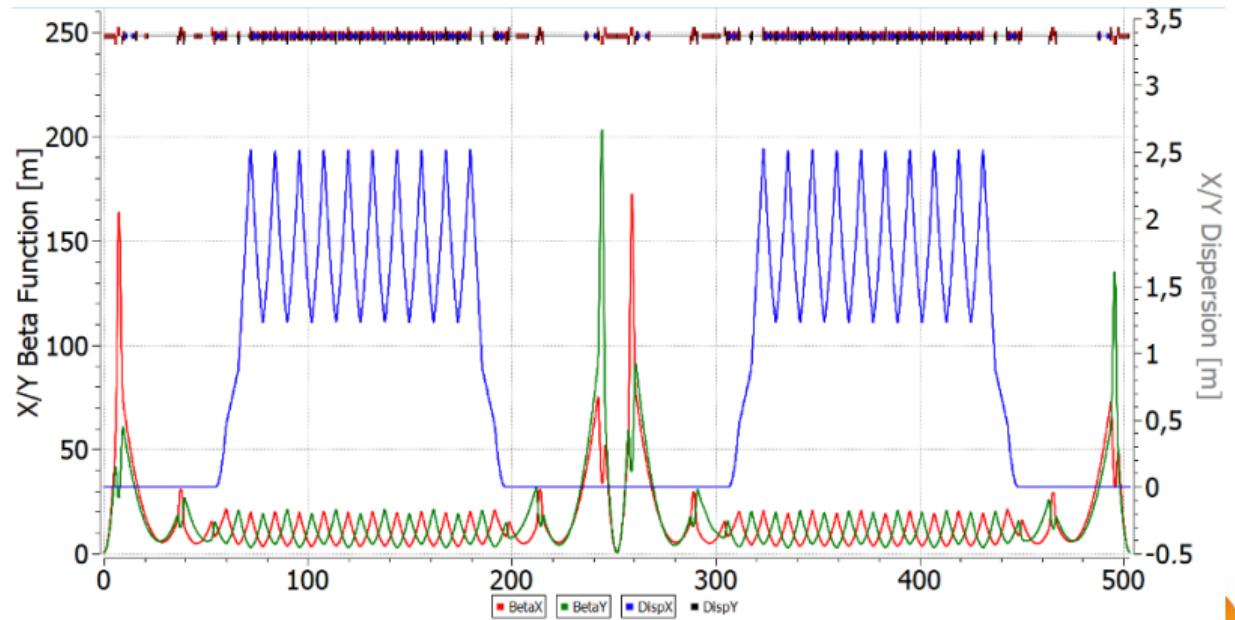
¹(to be published) Kolokolchikov S.D., et al. Features of dual-purpose structure for heavy ion and light particles, Nucl.Sci. and Tech.



Регулярная структура

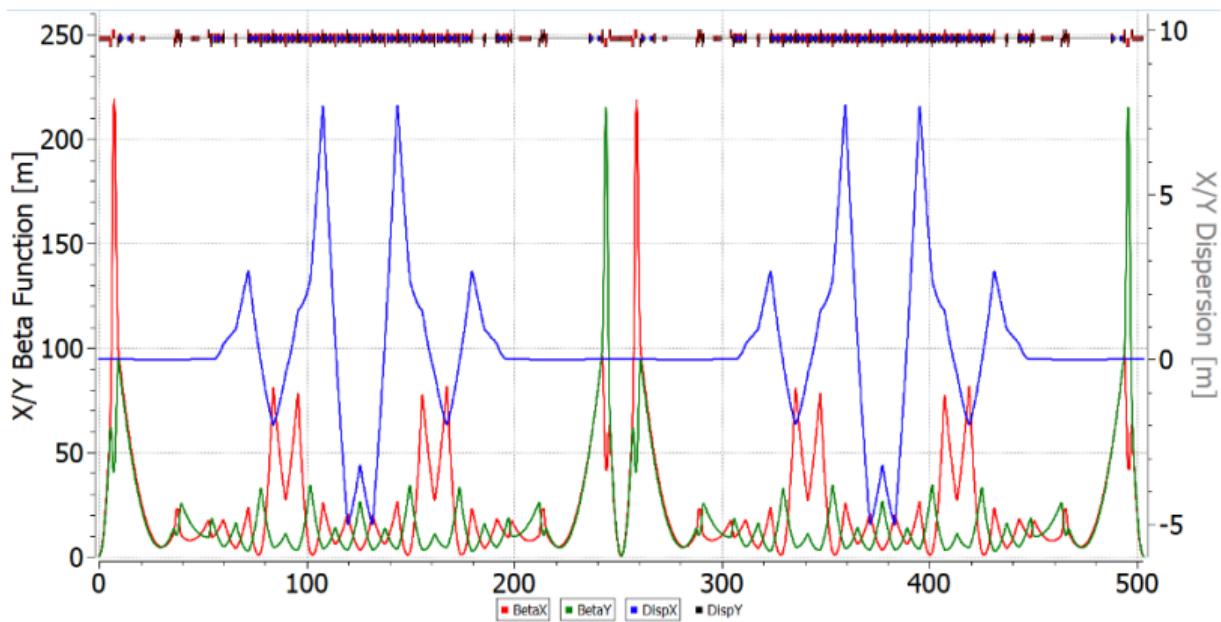
В классической регулярной структуре $\gamma_{tr} \simeq \nu_x$.

При одинаковой магнитной жесткости $B\rho$ максимальная энергия для легких частиц выше, чем для тяжелых ионов, из-за их соотношения заряд-масса.



Резонансная структура

Может быть получена из регулярной структуры путем разделения фокусирующих квадрупольей на 2 семейства с различными градиентами.



² Колокольчиков С.Д., Сеничев Ю.В. Магнито-оптическая Структура Коллайдера NICA с Высокой Критической Энергией. Яд. Физ. и Инж. том 13, номер 1, стр. 273-286 (2022). DOI: 10.56304/S2079562922010171

³ Колокольчиков С.Д., Сеничев Ю.В. Особенности Прохождения и Повышения Критической Энергии Синхротрона. Яд. Физ. и Инж. том 14, номер 6, стр. 587-592 (2023). DOI: 10.56304/S2079562923010153

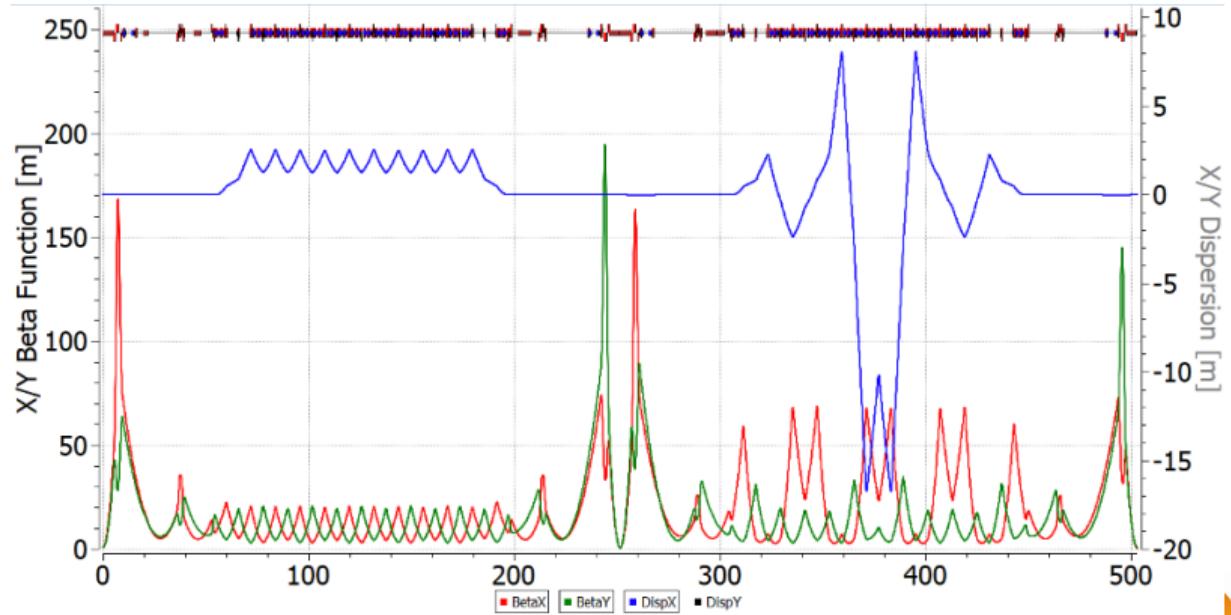
Комбинированная структура

Реальная арка

$$\eta_{pk} = \frac{1}{\gamma_{tr}^2} - \frac{1}{\gamma^2} \quad (1)$$

компенсируется аркой с комплексным значением критической энергии

$$\eta_{kp} = -\frac{1}{\gamma_{tr}^2} - \frac{1}{\gamma^2} \quad (2)$$

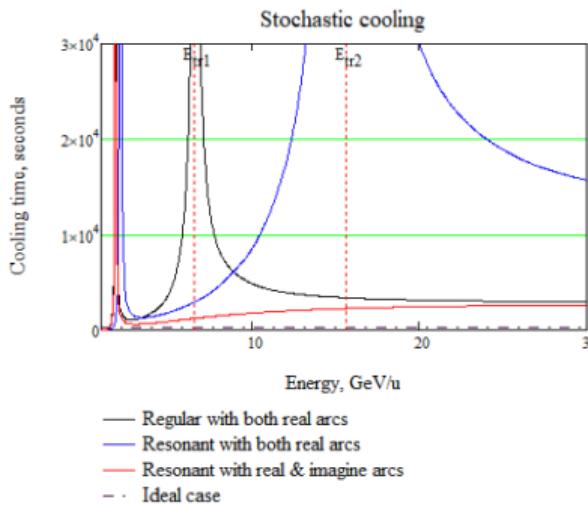


Стохастическое охлаждение

$$\frac{1}{\tau_{tr,I}} = A \cdot \frac{W}{N} \frac{\left(1 - 1/M_{pk}^2\right)^2}{M_{kp}}; \quad M_{pk} = \frac{1}{2(f_{max} + f_{min}) \eta_{pk} T_{pk} \delta}; \quad M_{kp} = \frac{1}{2(f_{max} - f_{min}) \eta_{kp} T_{kp} \delta}. \quad (3)$$

Асимптотический рост в двух случаях:

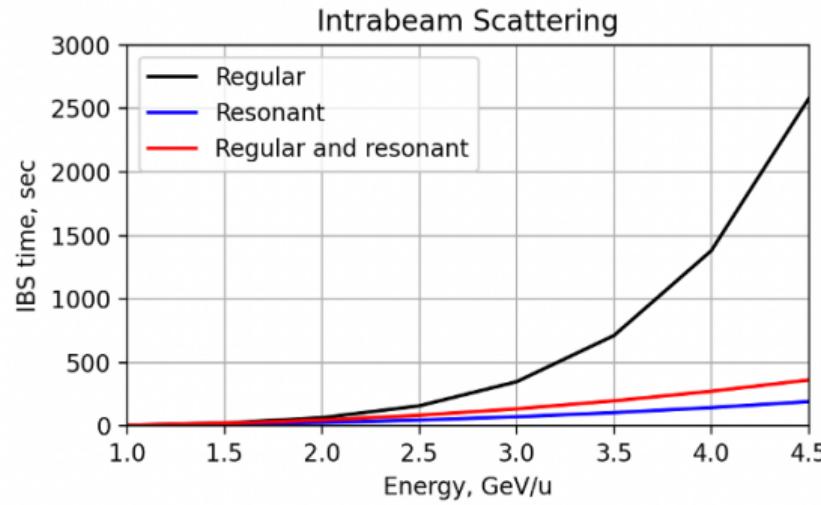
- ① $\eta \rightarrow \frac{1}{2(f_{max} + f_{min}) T_{pk} \delta}$, Schottky-спектр пучка становится сплошным и $M_{pk} \rightarrow 1$;
- ② $\eta \rightarrow 0$, перемешивание на пути от киккера к пикапу не происходит и $M_{kp} \rightarrow \infty$.



Внутрипучковое рассеяние

$$\frac{1}{\tau_x} = \frac{\pi^2 r_0^2 v_c m^3 N (\log)}{\gamma \Gamma} \left[\frac{\gamma^2 (D_x^2 + \beta_x^2 \phi_x^2)}{\epsilon_x \beta_x} \right] \int_0^\infty \frac{d\lambda \lambda^{\frac{1}{2}} [a_x \lambda + b_x]}{(\lambda^3 + a \lambda^2 + b \lambda + c)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

Из сравнения времени внутрипучкового рассеяния со временем охлаждения можно сделать заключение, что в регулярной структуре стохастическое охлаждение способно сбалансировать внутрипучковое рассеяние в диапазоне энергий $W \geq 4.5$ ГэВ/нуклон.

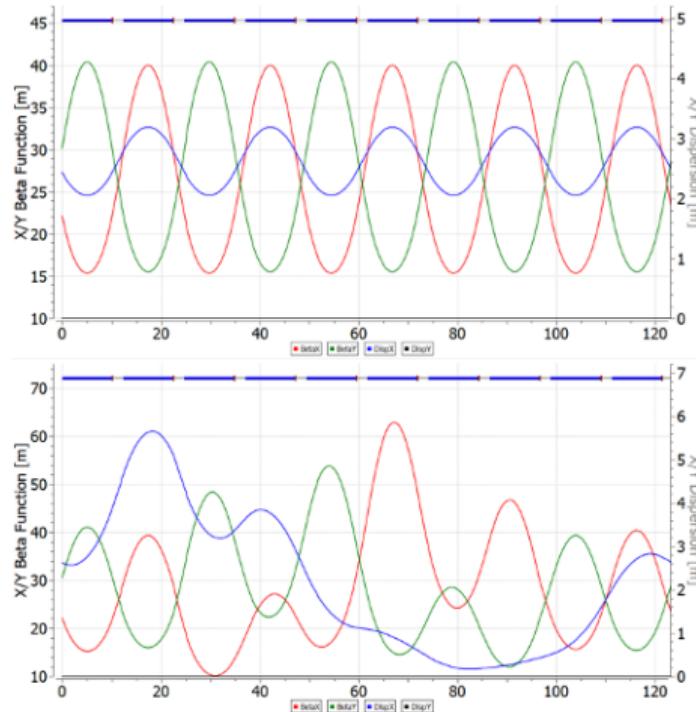
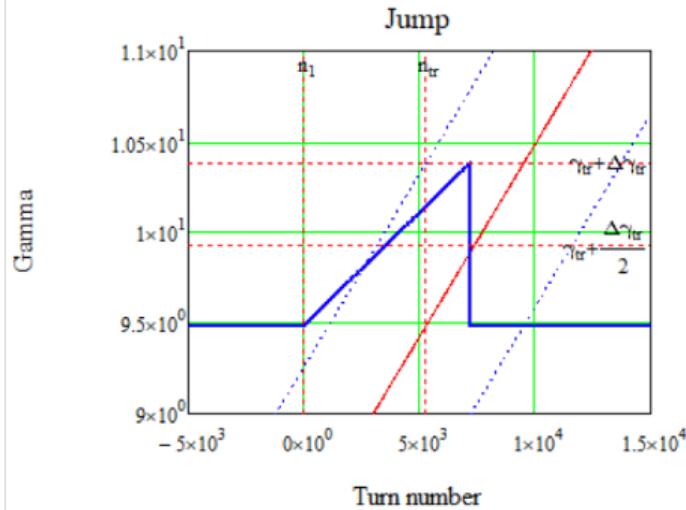


Прохождение критической энергии

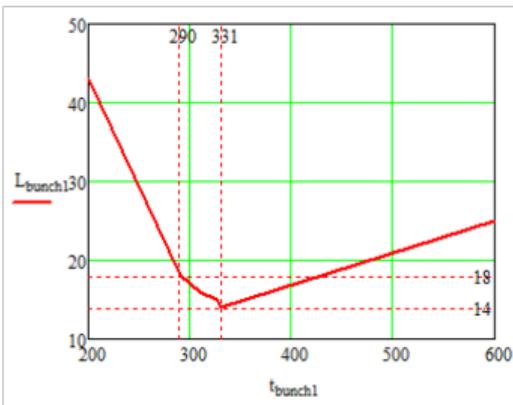
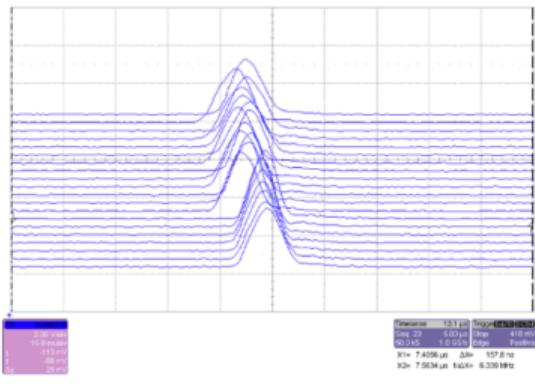
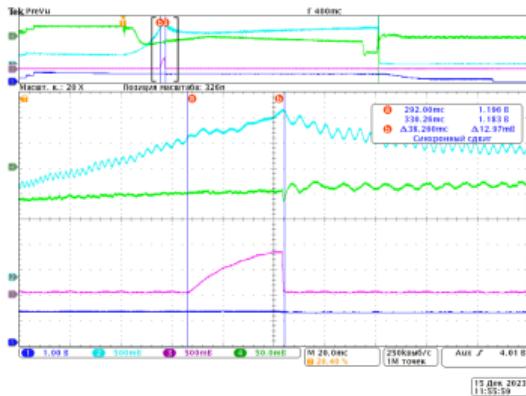


Скачок критической энергии в У-70

Вспомогательные квадруполи расположены через полпериода $\Delta\nu_{x,y} = 0.5 \times 0.5$ и имеют противоположные полярности.



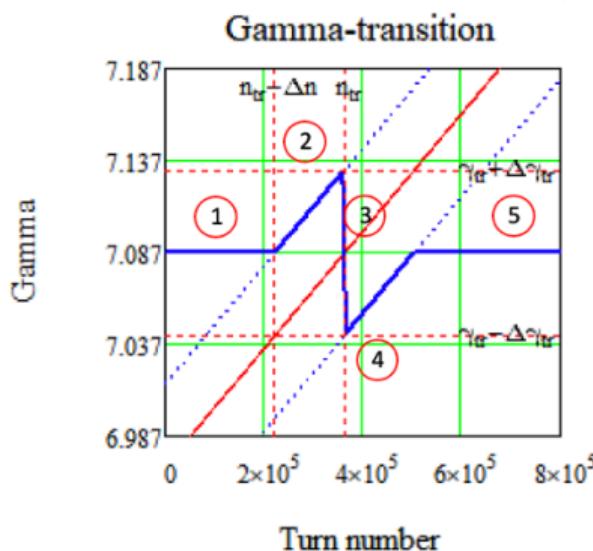
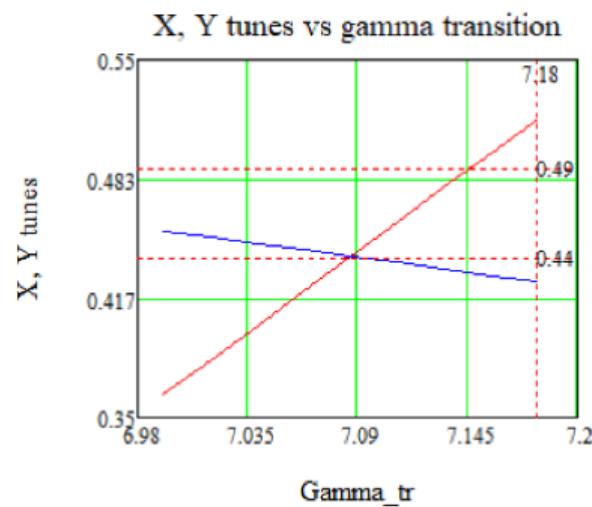
Данные с сеанса на У-70



⁴Kolokolchikov, S.D., Senichev, Y.V. & Kalinin, V.A. Transition Energy Crossing in Harmonic RF at Proton Synchrotron U-70. Phys. Atom. Nuclei 87, 1355–1362 (2024). <https://doi.org/10.1134/S106377882410020X>

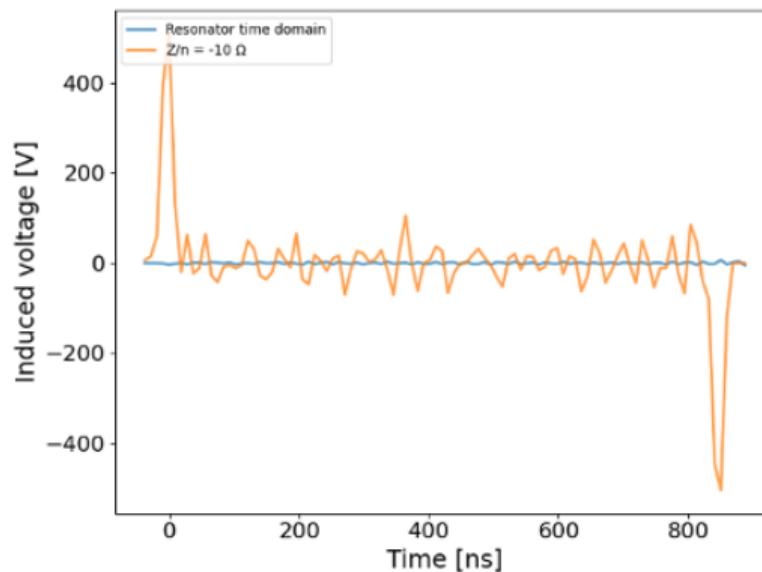
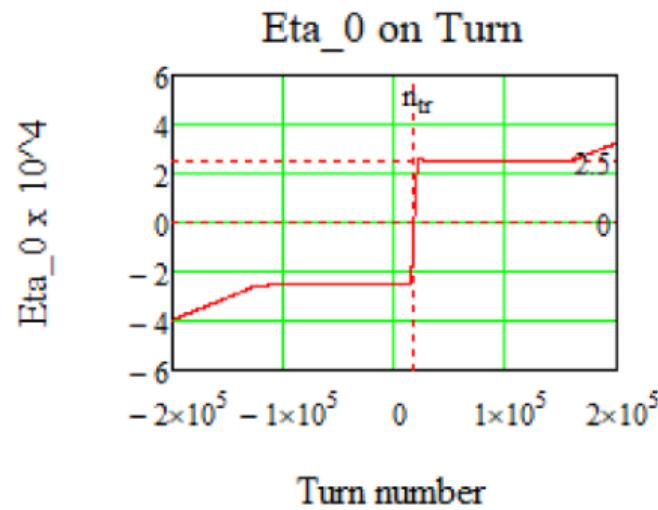
Скачок критической энергии в NICA

Для NICA $\Delta\gamma_{tr} = 1.1\Delta q$. Максимальная вариация частоты или рабочей точки составляет $\pm\Delta q = 0.05$, что соответствует измерению критической энергии порядка $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$



⁵Kolokolchikov S.D. et al. Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF. Phys. Atom. Nuclei 87, 1449–1454 (2024). DOI: 10.1134/S1063778824100211

Скачок критической энергии в барьерном ВЧ

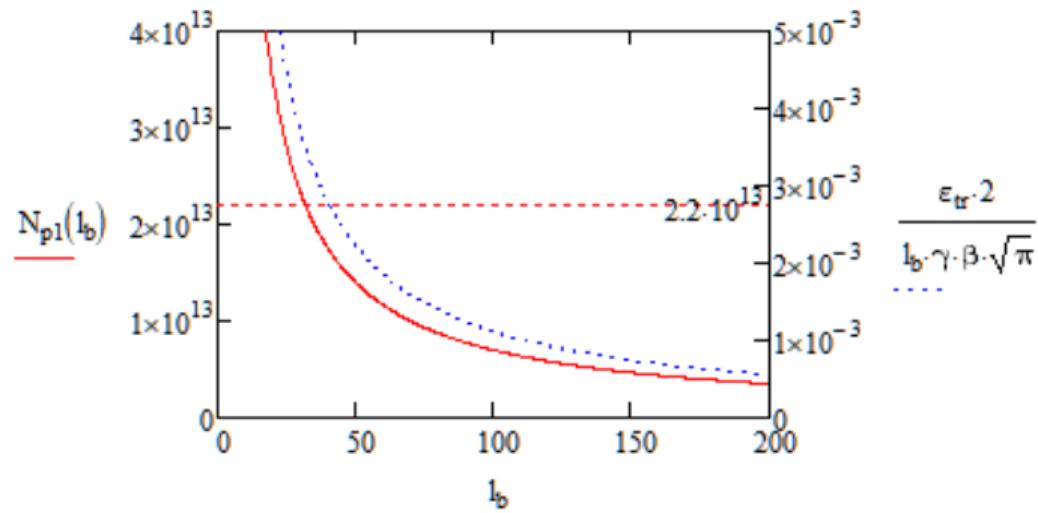


⁶Kolokolchikov S. et al. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD. Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 419–424 (2024). DOI: 10.1134/S1547477124700389

⁷Kolokolchikov S., Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex. J.Phys.Conf.Ser. Vol. 2420, 012001 (2023). DOI: 10.1088/1742-6596/2420/1/012001

Продольная микроволновая неустойчивость

$$N_p \leq K_1 K_2 \frac{E_0}{(|Z_{\parallel}| / n) ec} |\eta| \gamma \beta \sigma_p^2 L_B; \quad N_p \leq K_1 K_2 \frac{E_0}{(|Z_{\parallel}| / n) ec} |\eta| \frac{4\varepsilon_{tr}^2}{\pi \gamma \beta L_B} \quad (5)$$



Исследование ЭДМ



Т-БМТ уравнение эволюции спина

В случае измерения ЭДМ заряженных частиц необходимо использование ускорителя заряженных частиц

Т-БМТ уравнение описывает эволюцию поведения спина во внешних полях

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}) \times \vec{S},$$
$$\vec{\Omega}_{MDM} = -\frac{q}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_\perp + (G + 1) \vec{B}_\parallel - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\}, \quad (6)$$
$$\vec{\Omega}_{EDM} = -\frac{q\eta}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} - \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\vec{\beta}}{c} (\vec{\beta} \cdot \vec{E}) \right), \quad G = \frac{g - 2}{2}$$



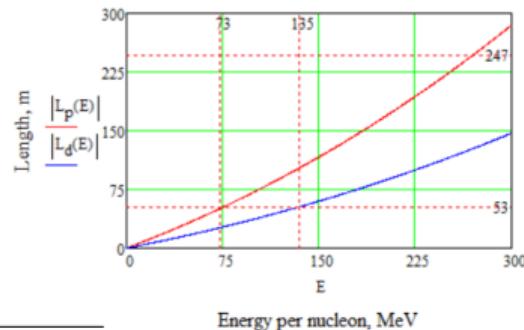
Квази-замороженный спин

Условия квази-замороженного спина

$$\Phi_p^{\text{arc}} + \Phi_p^{\text{comp}} = \frac{2\pi}{N}; \quad \Phi_s^{\text{arc}} + \Phi_s^{\text{comp}} = 0 \quad (7)$$

Длина компенсирующего элемента

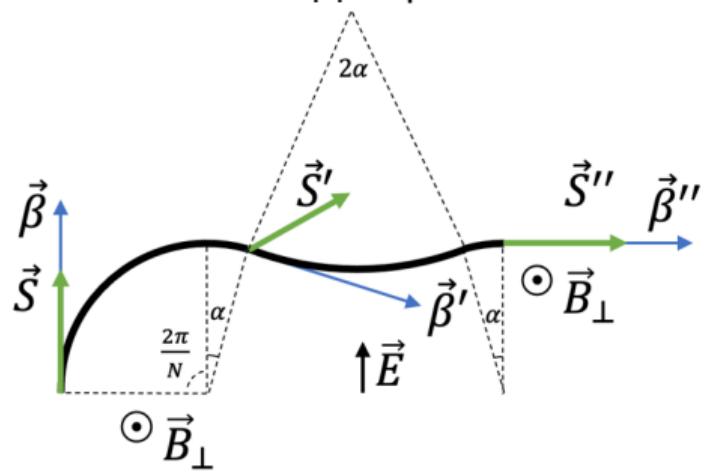
$$l_{\min} = \Phi_{pE}^{\text{comp}} R_E = \frac{2\pi}{N} \frac{\gamma^2 G}{G+1} \frac{\kappa}{E_{\max}} = \frac{2\pi}{N} \frac{G}{G+1} \frac{mc^2}{e} \frac{\gamma(\gamma^2 - 1)}{E_{\max}}. \quad (8)$$



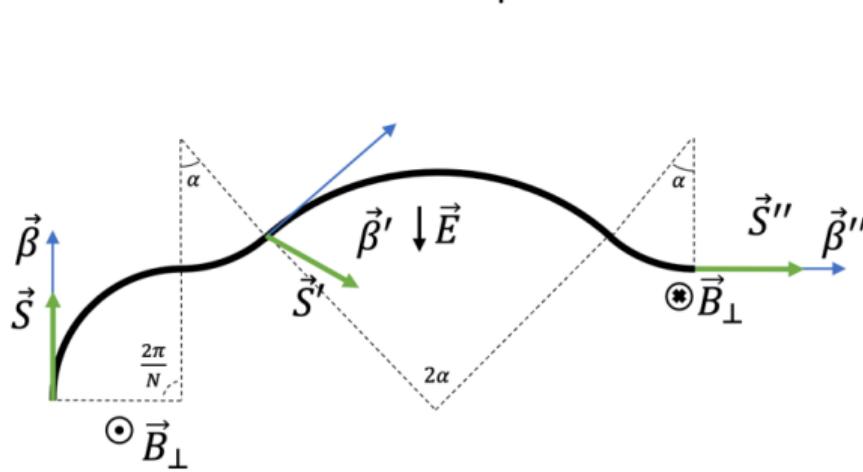
⁹(to be published) Kolokolchikov S.D., et al. Quasi-frozen spin for both deuteron and proton beam at periodic EDM storage ring lattice, Nucl.Sci. and Tech.

Электростатический дефлектор

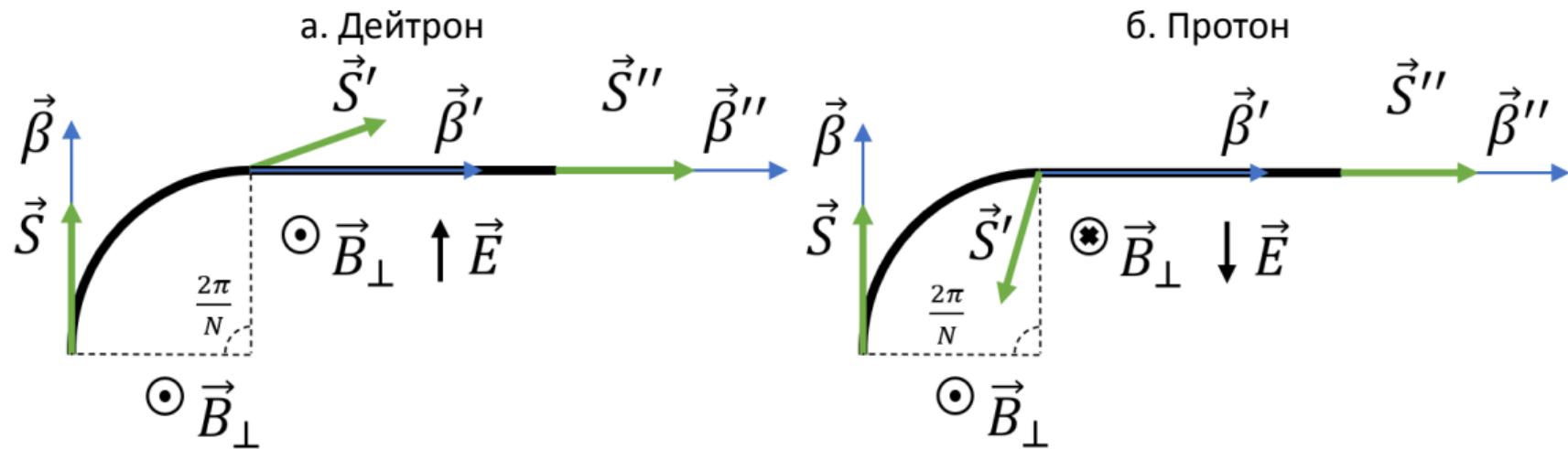
а. Дейtron



б. Протон



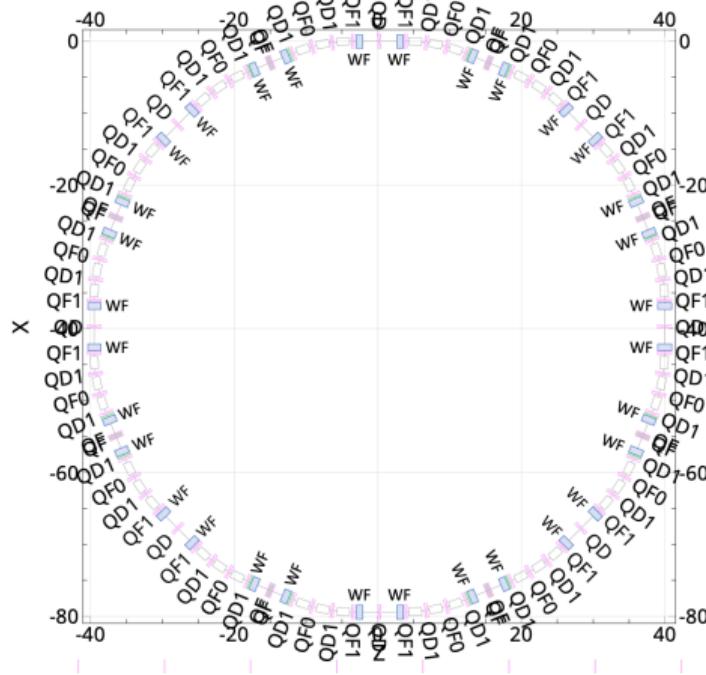
Фильтр Вина



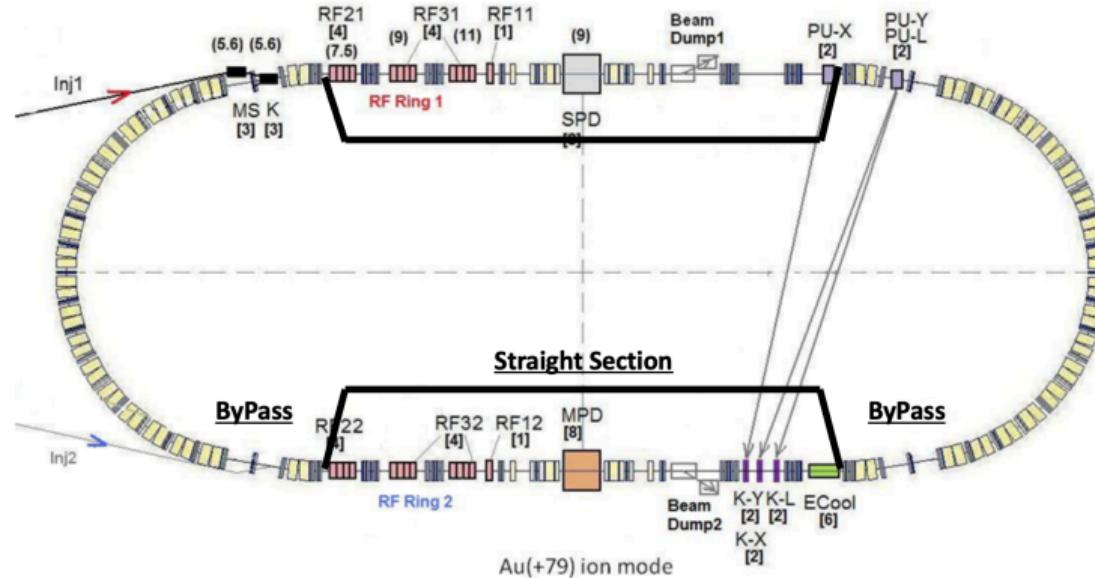
Модернизация Nuclotron 16-ти периодическая структура

Отличие измерения ЭДМ в квази-замороженной и замороженного структуре, в первом порядке

$$J_0(\Phi_s^{\text{arc}}) = 1 - \frac{\Phi_s^{\text{arc}}{}^2}{4}, \quad (9)$$



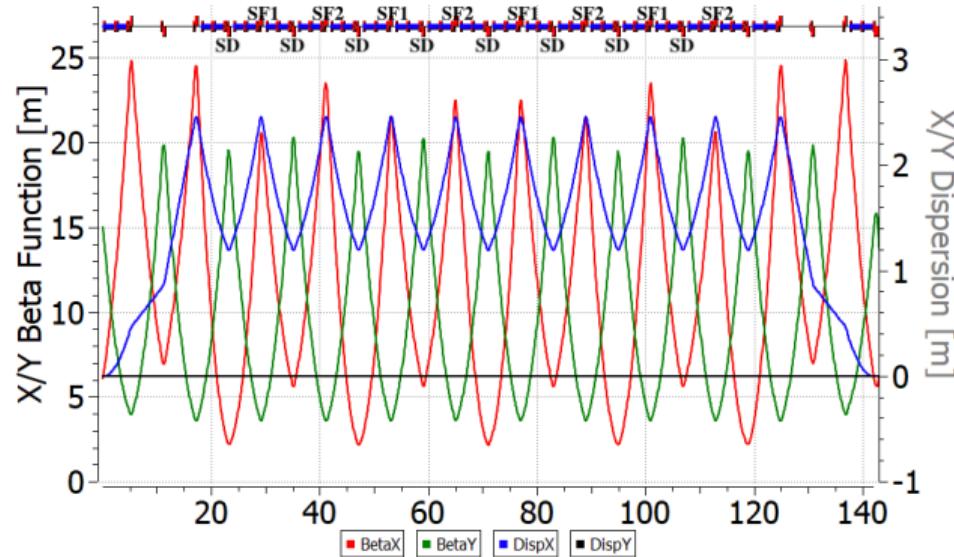
NICA bypass



¹⁰ Колокольчиков С.Д. и др. Проектирование Каналов Бypass в Ускорительном Комплексе NICA для Экспериментов с Поляризованными Пучками по Поиску ЭДМ. Физ. и Инж. том 15, номер 5, стр. 457-463 (2024). DOI: 10.56304/S2079562924050257

¹¹ S. Kolokolchikov et al. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search. J.Phys.Conf.Ser. Vol. 2687, 022026 (2024). DOI: 10.1088/1742-6596/2687/2/022026

Декогеренция спина



¹²Kolokolchikov S. et al. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen” Spin Regime. Phys. Atom. Nuclei 86, 2684–2688 (2023). DOI: 10.1134/S106377882311025X

¹³S. Kolokolchikov et al. Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring. J.Phys.Conf.Ser. Vol. 2687, 022027 (2024). DOI: 10.1088/1742-6596/2687/2/022027



Основные результаты работы

- Изменение коэффициента проскальзывания в резонансной структуре повышает эффективность стохастического охлаждения, но эффекты ВПР делают предпочтительной регулярную структуру для экспериментов с тяжелыми ионами;
- Для коллайдерных экспериментов с поляризованными протонами резонансная структура повышает критическую энергию, искажая дисперсионную функцию;
- Численные исследования выявили нестабильность продольного фазового движения при прохождении критической энергии. Процедура скачка критической энергии помогает решить эту проблему. Экспериментальные данные с синхротрона У-70 согласуются с численными оценками, учитывающими высшие порядки разложения коэффициента уплотнения орбиты и импедансы для различных интенсивностей сгустка;



Основные результаты работы

- С скачок критической энергии ограничен его величиной и темпом изменения. Различия применения гармонического и барьера ВЧ влияют на скачок. Оценки показывают ограничения на параметры сгустка из-за продольной микроволновой неустойчивости;
- Изучена спиновая динамика для измерения ЭДМ. Предложена концепция квази-замороженного спина с использованием метода фильтров Вина в кольце с обводными каналами;
- Модернизированный синхротрон Nuclotron сохраняет функцию бустера для коллайдера NICA. В 8/16-периодичных структурах возможны эксперименты по ЭДМ и поиск аксиона.



Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на:

- 63, 65, 66-ая Всероссийская научная конференция МФТИ в 2020, 2023, 2024 гг. г. Долгопрудный, Россия;
- XXVII и XXVIII Всероссийская конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC'21, RuPAC'23. Алушта; Новосибирск, Россия.
- VII, VIII, IX и X Международная конференция Лазерные и Плазменные технологии ЛаПлаз'21, ЛаПлаз'22, ЛаПлаз'23, ЛаПлаз'24, ЛаПлас'25. Москва, Россия;
- XIII, XIV, XVI международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC'22 IPAC'23, IPAC'25. Бангкок, Таиланд; Венеция, Италия; Тайпей, Тайвань;
- XIX Международная конференции по спиновой физике высоких энергий DSPIN'23. Дубна, Россия;
- XI-я Международная конференция по ядерной физике в накопительных кольцах STORI'24. Хуэйчжоу, провинция Гуандун, Китай;



Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях: 10 печатных работ изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 10 статей — в журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и Web of Science.

- 1. (to be published) Kolokolchikov S.D., et al. Features of dual-purpose structure for heavy ion and light particles, Nucl.Sci. and Tech.
- 2. Колокольчиков С.Д., Сеничев Ю.В. Магнито-оптическая Структура Коллайдера NICA с Высокой Критической Энергией. Яд. Физ. и Инж. том 13, номер 1, стр. 27-36 (2022). DOI: 10.56304/S2079562922010171
- 3. Колокольчиков С.Д., Сеничев Ю.В. Особенности Прохождения и Повышения Критической Энергии Синхротрона. Яд. Физ. и Инж. том 14, номер 6, стр. 587-592 (2023). DOI: 10.56304/S2079562923010153
- 4. Kolokolchikov S.D., Senichev. Y.V. & Kalinin. V.A. Transition Energy Crossing in Harmonic RF at Precess Synchrotron U-70. Phys. Atom. Nuclei 87, 1355–1362 (2024). DOI: 10.1134/S106377882410020X



Публикации

- 5. Kolokolchikov S.D. et al. Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF. Phys. Atom. Nuclei 87, 1449–1454 (2024). DOI: [10.1134/S1063778824100211](https://doi.org/10.1134/S1063778824100211)
- 6. Kolokolchikov S. et al. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD. Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 419–424 (2024). DOI: [10.1134/S1547477124700389](https://doi.org/10.1134/S1547477124700389)
- 7. Kolokolchikov S., Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex. J.Phys.Conf.Ser. Vol. 2420, 012001 (2023). DOI: [10.1088/1742-6596/2420/1/012001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012001)
- 8. Kolokolchikov S. et al. Transition Energy Crossing of Polarized Proton Beam at NICA. Phys. Atom. Nuclei 87, 212–215 (2024). DOI: [10.1134/S1063778824700054](https://doi.org/10.1134/S1063778824700054)



Публикации

- 9. (to be published) Kolokolchikov S.D., et al. Quasi-frozen spin for both deuteron and proton beam at periodic EDM storage ring lattice, Nucl.Sci. and Tech.
- 10. Колокольчиков С.Д. и др. Проектирование Каналов Bypass в Ускорительном Комплексе NICA для Экспериментов с Поляризованными Пучками по Поиску ЭДМ. Яд. Физ. и Инж. том 15, номер 5, стр. 457-463 (2024). DOI: 10.56304/S2079562924050257
- 11. S. Kolokolchikov et al. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search. J.Phys.Conf.Ser. Vol. 2687, 022026 (2024). DOI: 10.1088/1742-6596/2687/2/022026
- 12. Kolokolchikov S. et al. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen” Spin Regime. Phys. Atom. Nuclei 86, 2684–2688 (2023). DOI: 10.1134/S106377882311025X
- 13. S. Kolokolchikov et al. Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring. J.Phys.Conf.Ser. Vol. 2687, 022027 (2024). DOI: 10.1088/1742-6596/2687/2/022027



Благодарность

Спасибо за внимание!



Back up



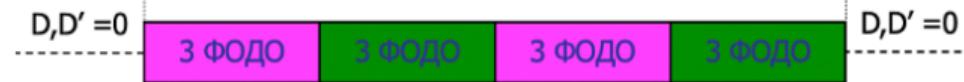
Подавление дисперсии

1) Подавление дисперсии крайними ячейками



Подавитель дисперсии
2 ФОДО ячейки с missing magnet

2) Подавление дисперсии
2 семействами квадрупольей



Критическая энергия

Уравнения продольного движения:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \eta(\delta) \cdot \frac{h \cdot \Delta E}{\beta^2 \cdot E_0} \\ \frac{d(\Delta E)}{dt} = \frac{V(\tau)}{T_0} \end{cases} \quad (10)$$

Коэффициент уплотнения орбиты (momentum compaction factor):

$$\alpha_c = \frac{1}{C_0} \frac{dc}{d\delta} = \alpha_0 + 2\alpha_1 \delta + 3\alpha_2 \delta^2 + \dots \equiv \frac{1}{\gamma_{tr}^2} = \frac{1}{C} \int_0^C \frac{D(s)}{\rho(s)} ds, \quad (11)$$

Коэффициент проскальзывания (slip-factor):

$$\eta = \eta_0 = \alpha_0 - \frac{1}{\gamma_0^2}.$$



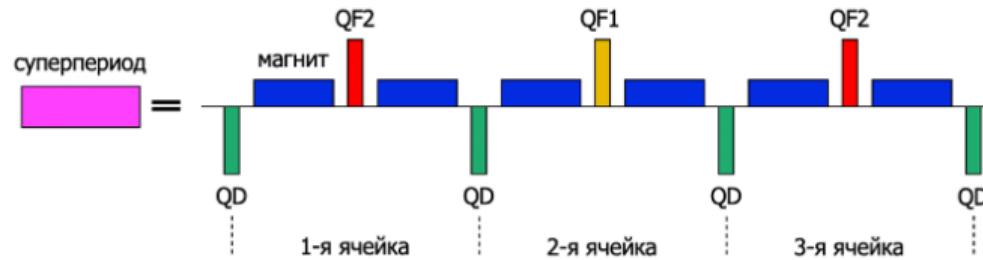
Суперпериодическая модуляция

Уравнение для дисперсионной функции с бипериодической переменной фокусировкой

$$\frac{d^2 D}{ds^2} + [K(s) + \varepsilon k(s)] D = \frac{1}{\rho(s)}, \quad (13)$$

MCF для одного суперпериода в первом приближении

$$\alpha_s = \frac{1}{\nu^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4(1 - ks/\nu)} \left(\frac{\bar{R}}{\nu} \right)^4 \frac{g_k^2}{[1 - (1 - ks/\nu)^2]^2} \right\}. \quad (14)$$



Оптимальное время жизни пучка

Временная эволюция эмиттанса и разброса импульса в присутствии процессов охлаждения

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \underbrace{-\frac{1}{\tau_{tr}} \cdot \varepsilon}_{\text{cooling}} + \underbrace{\left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{IBS}}_{\text{heating}}, \quad \frac{d\delta^2}{dt} = \underbrace{-\frac{1}{\tau_{long}} \cdot \delta^2}_{\text{cooling}} + \underbrace{\left(\frac{d\delta^2}{dt} \right)_{IBS}}_{\text{heating}}. \quad (15)$$

Для независимых от времени, стационарных значений, производные по времени становятся равными нулю

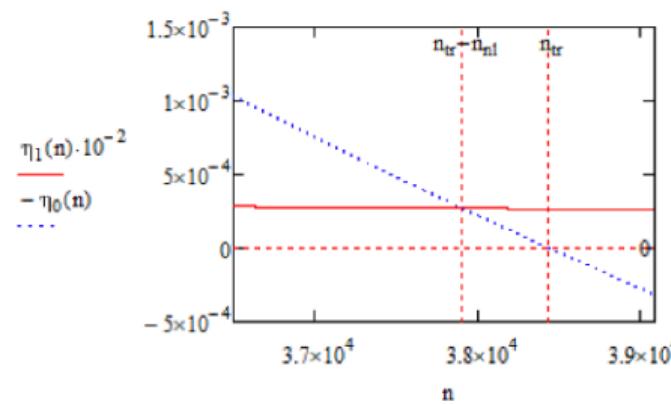
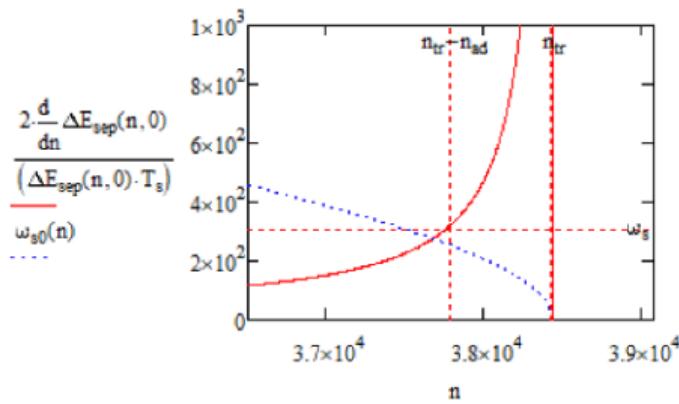
$$\varepsilon_{st} = \tau_{tr} \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{IBS} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_{st}}, \quad \delta_{st}^2 = \tau_{long} \cdot \left(\frac{d\delta^2}{dt} \right)_{IBS} \Big|_{\delta^2=\delta_{st}^2}. \quad (16)$$



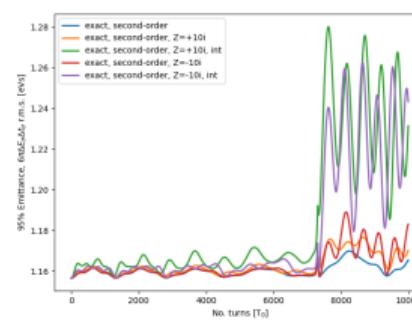
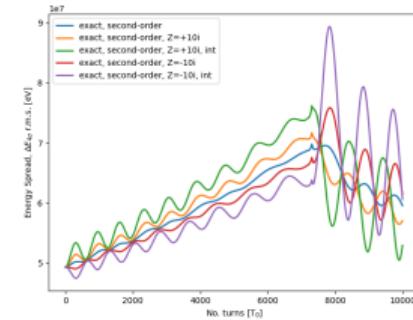
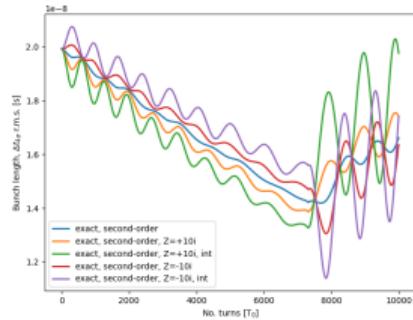
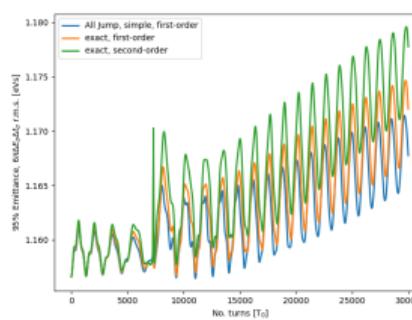
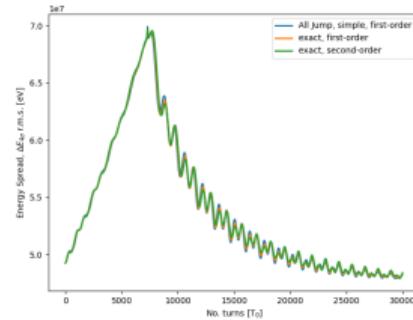
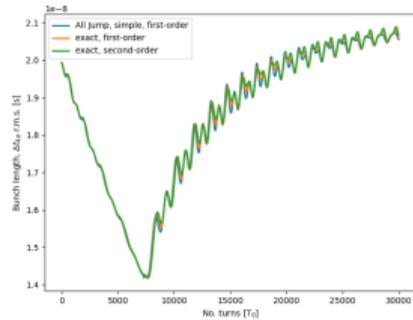
Прохождение критической энергии

Характерное время адиабатичности и нелинейность продольного движения

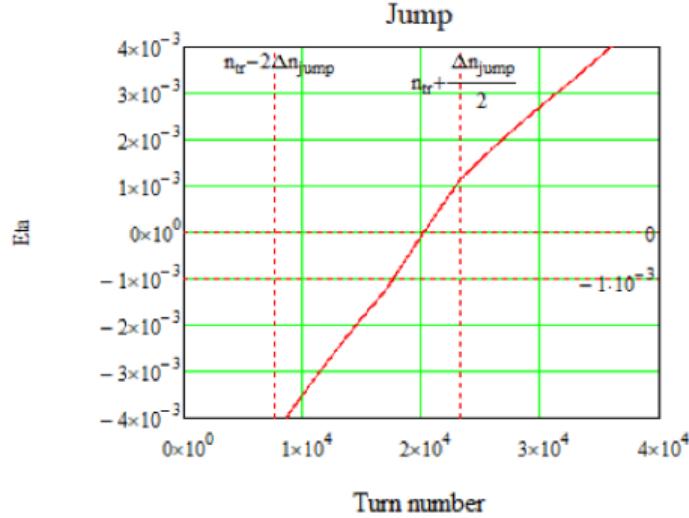
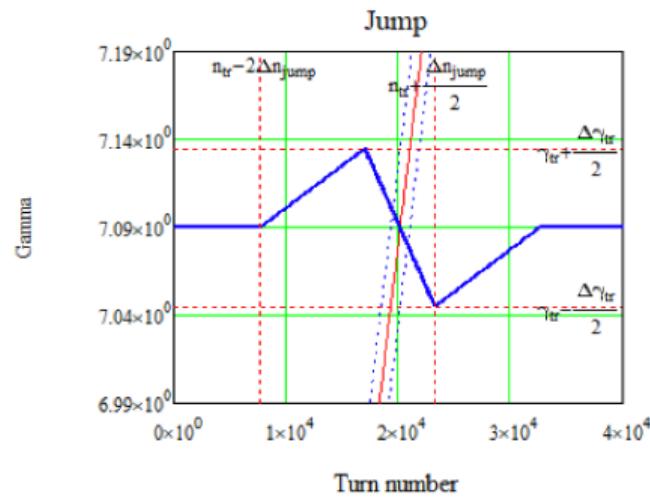
$$\tau_{ad} = \left(\frac{\pi \beta^2 m c^2 \gamma_{tr}^4}{\dot{\gamma} \omega_0^2 h e V |\cos \phi_s|} \right)^{1/3}; \quad \tau_{nl} = \frac{\eta_1 \hat{\delta}}{\frac{2\dot{\gamma}}{\gamma_{tr}^3}} = \gamma_{tr} \frac{\frac{3}{2} \beta^2 + \gamma_{tr}^2 \alpha_1}{2\dot{\gamma}} \quad (17)$$



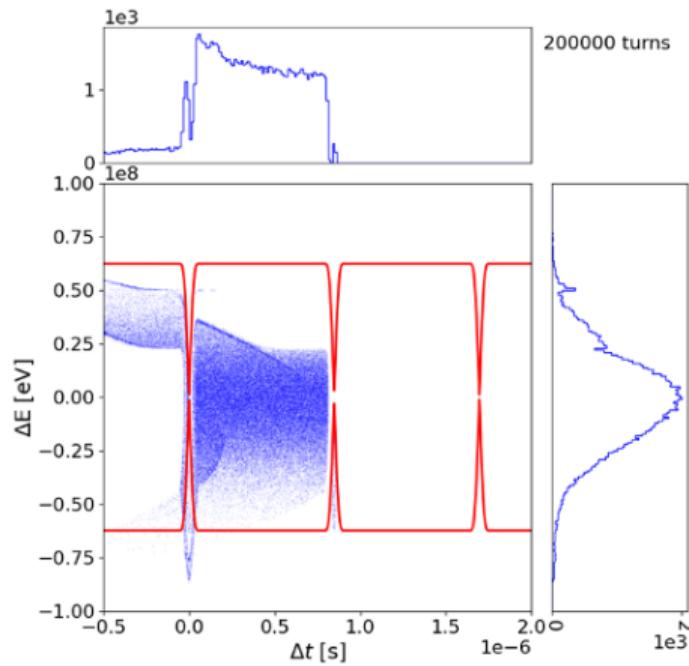
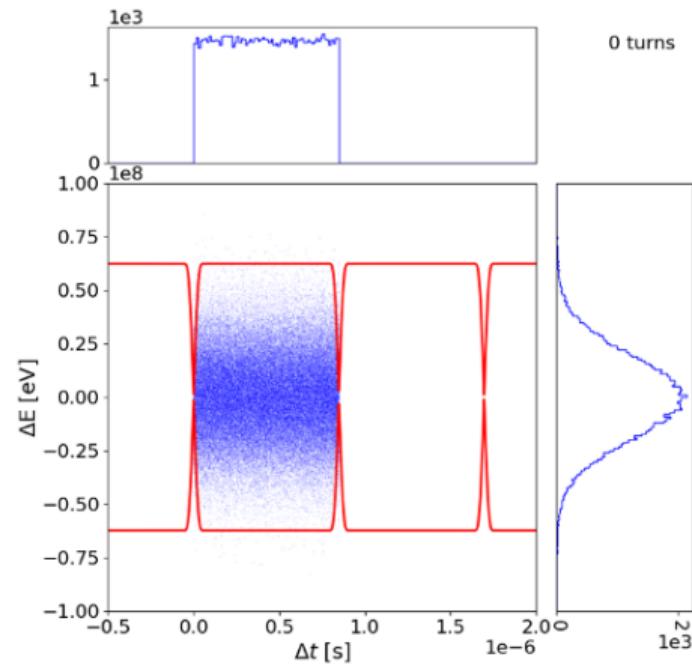
Моделирование динамики



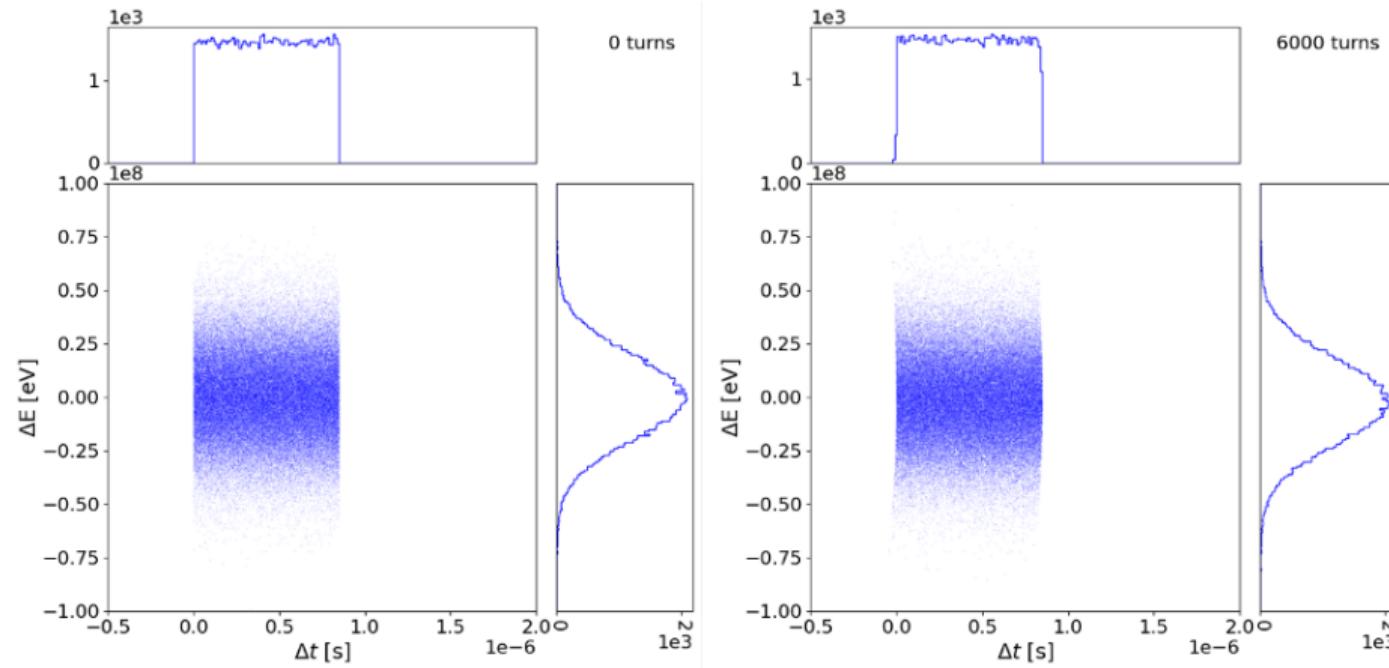
Скачок критической энергии в гармоническом ВЧ



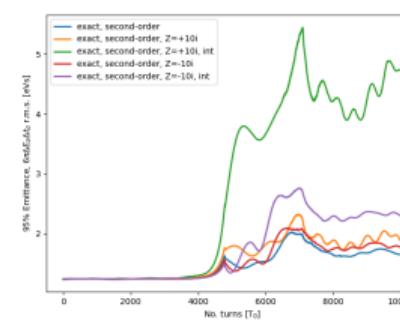
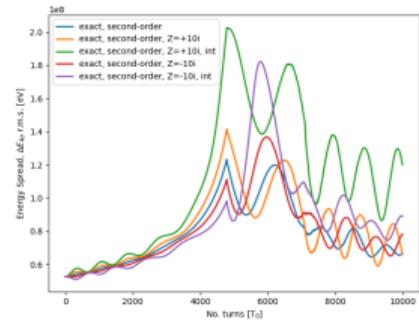
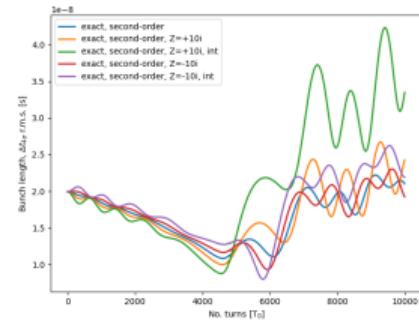
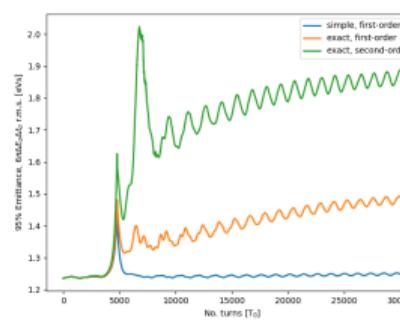
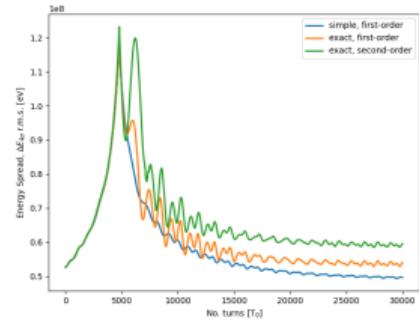
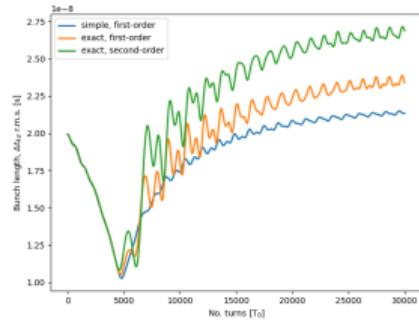
Скачок критической энергии в барьерном ВЧ I



Скачок критической энергии в барьерном ВЧ II



Влияние импеданса



Модернизация Nuclotron 8-ми периодическая структура

