

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОЛЬЦА В ФОРМЕ 8

*С. Д. Колокольчиков^{а,б,1}, А. Е. Аксентьев^{а,б,в},
А. А. Мельников^{а,б,г}, Ю. В. Сеничев^{а,б}*

^а Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

^б Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

^г Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, Черноголовка, Россия

В данной работе показаны принципиальные особенности структуры кольца в форме цифры 8 для выполнения нескольких физических программ. Во-первых, уникальная форма кольца позволяет решить проблему с пересечением спиновых резонансов при ускорении поляризованного пучка. Во-вторых, данная структура может быть использована для экспериментов по измерению ЭДМ и поиску аксиона. В-третьих, структура может быть адаптирована для ускорения тяжелоионного пучка.

The paper presents a fundamental approach to figure-8 ring structure for multiple physical programs. Firstly, the unique shape of the ring resolves the issue of spin resonance crossings during the acceleration of a polarized beam. Secondly, this structure can be used for Electric Dipole Moment (EDM) measuring experiments and axion search. Thirdly, the structure can be adapted for heavy-ion beam acceleration.

PACS: 13.40.Em; 29.27.Hj; 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Кольцо в форме цифры 8 представляет интерес в отношении нескольких отраслей ускорительной физики. Во-первых, в контексте коллайдерных экспериментов с поляризованными пучками возникает проблема пересечения различного рода спиновых резонансов, приводящих к деполяризации пучка. Кольцо в форме 8 устраняет эту проблему путем взаимной компенсации арками прецессии спина, вызванной магнитным дипольным моментом (МДМ). Вследствие компенсации частота вращения спина (spin tune) оказывается равной нулю и кольцо становится спин-прозрачным (Spin Transparency Method – ST) [1], т. е. исключаящим резонансы.

Применительно к коллайдерной моде рассмотрен случай поляризованного протонного пучка. Здесь возникает задача по преодолению критической энергии. Для

¹E-mail: sergey.bell13@gmail.com

решения этой проблемы используется резонансная структура с варьированным коэффициентом уплотнения импульса (momentum compaction factor) [2]. При ее использовании критическая энергия поднимается выше рабочей энергии эксперимента, а может и вовсе принимать комплексные значения. Предложена схема с модуляцией градиента в квадрупольных линзах в восьмиобразном кольце.

Вторая отрасль возможного применения восьмиобразной структуры — измерение электрического дипольного момента (ЭДМ) и поиск аксионов. Восьмиобразное кольцо обладает преимуществом при использовании в качестве широкополосной аксионной антенны в области низких частот $g-2$ прецессии [3]; однако в отношении ЭДМ-измерений имеются трудности: чистая восьмерка не накапливает ЭДМ-сигнал. Эта проблема решается путем установки в ее прямых секциях попарно соленоидов и фильтров Вина. Тогда ЭДМ дейтрона можно измерить методом квазизамороженного спина (QFS) [4].

Поскольку установленные соленоиды превращают кольцо формы 8 в аналог рейстрека по спин-динамике, требуется решение обыденной для таких колец проблемы спиновой декогеренции. Предложена конструкция арок, включающая 3 независимых семейства секступолей для подавления декогеренции поляризованного пучка.

Третье возможное применение структуры — работа с тяжелоионными пучками. При этом ключевым требованием является достижение высокого времени жизни пучка. Для этого влияние внутривпучкового рассеяния (ВПР) должно быть скомпенсировано электронным и стохастическим охлаждением, что может быть эффективно получено в структуре минимальной модуляцией твисс-функций.

ПРОТОННАЯ ОПЦИЯ

Согласно уравнению Т-БМТ [5], поляризация пучка совершает прецессию в поперечном магнитном поле относительно направления импульса с относительной частотой (spin-tune) $\nu_s = \gamma G$, где γ — лоренц-фактор, G — аномальный магнитный момент. Поскольку в кольце в форме 8 ведущее вертикальное магнитное поле имеет различное направление в двух поворотных арках, то для частиц любой энергии спиновая прецессия в одной арке полностью компенсируется другой. Таким образом, частота прецессии спина равна нулю, а само кольцо обладает свойством спиновой прозрачности. С учетом этой особенности отсутствует необходимость пересечения спиновых резонансов при ускорении протонного поляризованного пучка, что является ключевым преимуществом для сохранения поляризации конечного эксперимента.

При ускорении протонного пучка также должна быть решена проблема прохождения критической энергии, которая приводит к нарушению фазовой стабильности. В общем случае, критическая энергия связана с коэффициентом уплотнения орбиты (momentum compaction factor) и пропорциональна интегралу по длине кольца:

$$\alpha = \frac{1}{\gamma_{tr}^2} = \frac{1}{C} \int_0^C \frac{D(s)}{\rho(s)} ds, \quad (1)$$

где C — длина ускорителя; $D(s)$ — горизонтальная дисперсия; $\rho(s)$ — кривизна орбиты; s — продольная координата. Стоит отметить, что для кольца в форме 8 разна-

правленность ведущего поля математически выражается в виде смены знака как для кривизны, так и для дисперсии. При этом их отношение сохраняет знак, а значит, поведение коэффициента уплотнения орбиты такое же, как в классическом кольце. Поднятие критической энергии возможно при вариации дисперсии и кривизны. Коэффициент уплотнения орбиты для суперпериода при суперпериодической модуляции градиента квадрупольных линз в первом порядке дается уравнением [6]

$$\alpha_s = \frac{1}{\nu_x^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4(1 - S/\nu_x)} \left(\frac{\bar{R}}{\nu_x} \right)^4 \frac{g_k^2}{[1 - (1 - S/\nu_x)^2]^2} \right\}, \quad (2)$$

где ν_x — частота горизонтальных колебаний; \bar{R} — средняя кривизна орбиты; $k = 1$ — порядок разложения; S — количество суперпериодов; g_k — k -я гармоника фурье-разложения модуляции градиента. Контроль коэффициента уплотнения орбиты определяется отношением S/ν_x . Оптимальным является выбор 4 суперпериодов и набега частоты, равного 3. Тогда реализуются условия ахромата как первого, так и второго порядка. Подавление дисперсии осуществляется в силу выбора целого числа колебаний. Нелинейные эффекты первого/второго суперпериода подавляются третьим/четвертым в силу набега фазы π .

Поворотные арки кольца в форме 8 дополнительно поворачивают импульс на угол α , соответствующим образом увеличивается длина поворотной арки. Длина прямых секций в зависимости от угла отклонения составляет $L_{ss} = D_{ring} \operatorname{ctg} \alpha$, а расстояние между поворотными арками $L_{rt} = D_{ring} / \sin \alpha$, как если бы это было кольцо формы рейстрек, что показано наглядно на рис. 1. Для удобства рассмотрения в данной работе принят угол, равный 45° . План расстановки элементарных ячеек ФОДО в структуре представлен на рис. 2, две крайние ячейки осуществляют дополнительный поворот. Выбранное количество суперпериодов определяет количество ячеек, а значит, и эффективную длину магнитов для заданного магнитного поля, в работе примем максимальное значение равным $B_{dip} = 1,8$ Тл. Магнитная жесткость определяется исходя из энергии конечного пучка и отношения заряда к массе

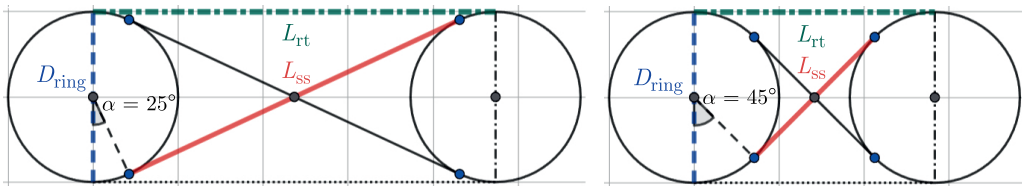


Рис. 1. Принципиальная схема кольца в форме 8 для различных углов отклонения

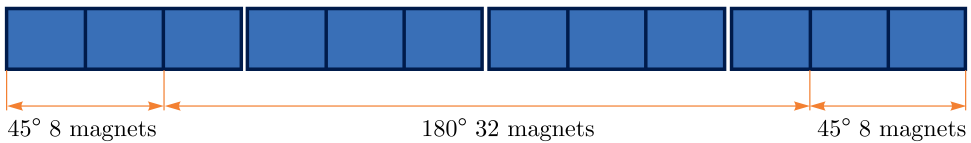


Рис. 2. Принципиальная схема поворотной арки, состоящей из 12 ячеек, сформированных в 4 суперпериода

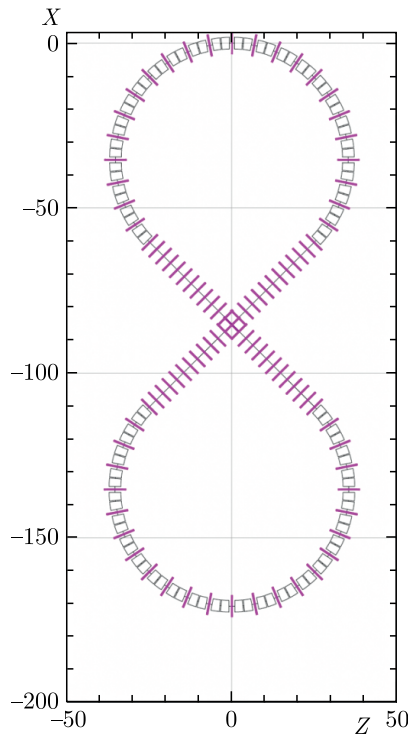


Рис. 3. План расстановки элементов кольца в форме 8

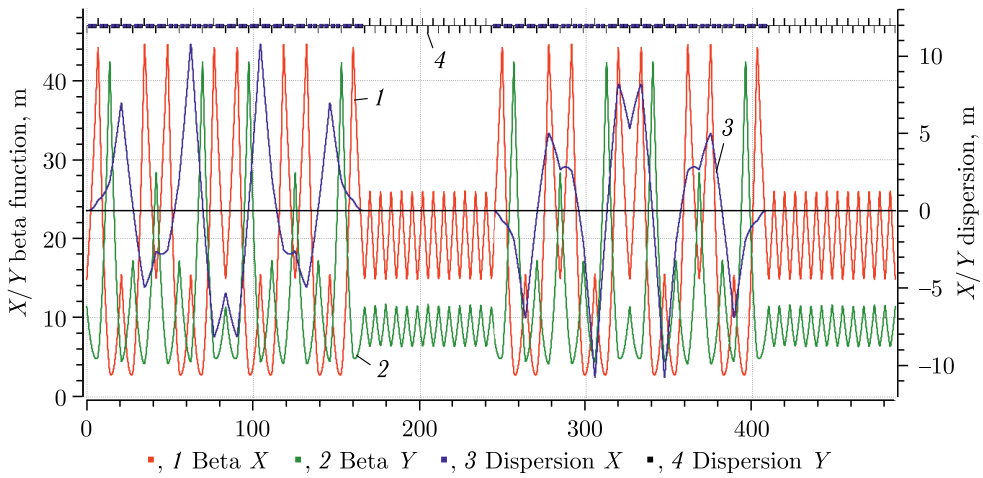


Рис. 4. Твисс-функции резонансной структуры, состоящей из двух арк с различной кривизной и двух прямых секций

$B\rho = (A/Z)(p_0/c)$, где A — массовое число, Z — зарядовое число, c — скорость света, $p_0 = \beta\gamma M_u$ — импульс, $M_u = 931,494$ МэВ/нуклон — унифицированная атомная единица массы. Для протонов ($A/Z = 1$) при энергии 12,4 МэВ ($\gamma = 14,36$), маг-

нитная жесткость составляет $B\rho = 44,5$. Таким образом, средняя кривизна орбиты $\rho = 24,7$ м, а длина поворотной арки $L_B = 116,4$ м. С учетом технических зазоров и квадрупольных магнитов длина арки составляет $L_{\text{arc}} = 167$ м. Длина одного магнита $L_{\text{mag}} = 242,8$ см. На рис. 3 показан план расстановки элементов с оптимизированной длиной прямых секций.

Параметры Твисса показаны на рис. 4 для резонансной структуры с поднятой критической энергией. В рассмотренном случае используются глубина модуляции $H = (G_{\text{QF1}} - G_{\text{QF2}})/G_{\text{QF1}} = 36\%$ и критическая энергия $\gamma_{\text{tr}} = 54,7$, в каждом конкретном случае эти значения подбираются для потребностей эксперимента.

КВАЗИЗАМОРОЖЕННАЯ ОПЦИЯ

Для измерения ЭДМ необходимо накопление ЭДМ-компоненты, а также компенсация МДМ-компоненты. В магнитном кольце для подавления МДМ может быть использована структура с квазизамороженным спином. В этом случае необходимо использование элементов с электрическим полем, для сохранения прямолинейной орбиты применяются прямые фильтры Вина со скрещенными магнитным и электрическим полями. Для кольца в форме 8 подавление МДМ-компоненты выполняется автоматически, однако накопление ЭДМ-компоненты не происходит. Для накопления сигнала необходимо использование как фильтра Вина, так и соленоида на каждом прямолинейном участке.

Другой особенностью, необходимой для измерения ЭДМ-сигнала, является подавление декогеренции [7]. Для этого минимизируется отклонение равновесного уровня от эффективной энергии

$$\Delta\delta_{\text{eq}} = \frac{\gamma_s^2}{\gamma_s^2\alpha_0 - 1} \left[\frac{\delta_0^2}{2} \left(\alpha_1 + \frac{3}{2} \frac{\beta_s^2}{\gamma_s^2} - \frac{\alpha_0}{\gamma_s^2} + \frac{1}{\gamma_s^4} \right) + \frac{\pi}{2L} (\epsilon_x\nu_x + \epsilon_y\nu_y) \right], \quad (3)$$

где γ_s — лоренц-фактор референсной частицы; α_0, α_1 — первый и второй порядок разложения коэффициента уплотнения орбиты; δ_0 — разброс по импульсу; L — длина ускорителя; ν_x, ν_y — частоты бетатронных колебаний. Приведенное уравнение показывает необходимость использования трех независимых семейств секступолей для коррекции удлинения орбиты вследствие продольного и бетатронного движения. Для этого одно семейство должно быть установлено в места максимума дисперсионной функции для коррекции второго порядка коэффициента уплотнения орбиты. Другие два семейства располагаются в места максимумов β -функции для коррекции хроматичности. В случае магнитного кольца в форме 8 существуют предположения, указывающее на высокое время когерентности априори, без введения секступолей [8]. Использование сложной конфигурации полей для накопления ЭДМ-сигнала с применением как фильтров Вина, так и соленоидов, потребует соответствующей секступольной коррекции [9]. В приведенной реализации на рис. 5 представлена регулярная арка с возможностью расстановки трех линейно независимых семейств секступолей, подавление дисперсии на краях арки обеспечивается набегом фазы, равным $3 \times 2\pi$.

Кроме того, кольцо в форме 8 имеет ряд преимуществ для проведения экспериментов по поиску аксиона. Поскольку spin-tune в первом приближении имеет нулевое

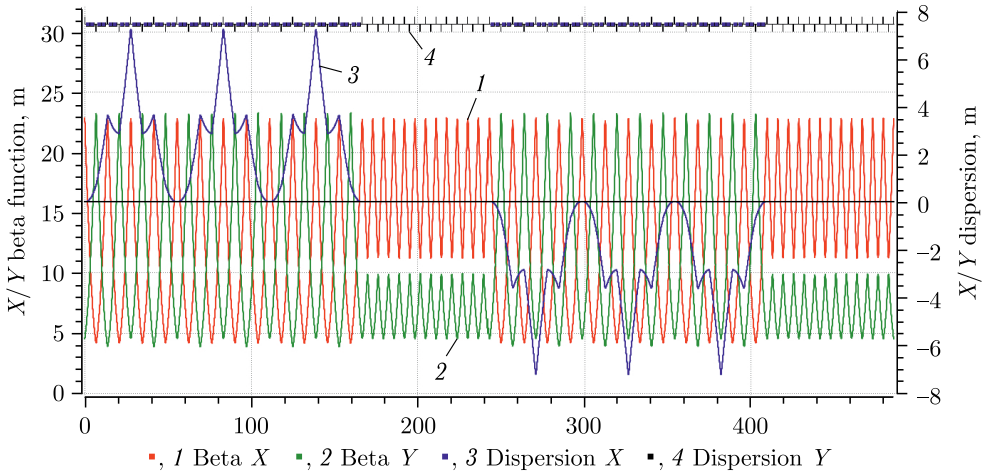


Рис. 5. Твисс-функции регулярной структуры, оптимизированной для проведения ЭДМ-эксперимента

значение для любого сорта частиц и любой энергии, это открывает значительную перспективу использования протонного пучка в структуре кольца в форме 8 с фильтром Вина, задающим частоту прецессии спина. Таким образом, кольцо будет использовано в качестве аксионной антенны и могут быть исследованы аксиоподобные частицы низких масс.

ТЯЖЕЛОИОННАЯ ОПЦИЯ

Важной задачей для кольца, ориентированного на ускорение высокоинтенсивного пучка тяжелых ионов, является обеспечение достаточного времени жизни. Ввиду высокой зарядности частиц критически важным является влияние внутривидового рассеяния, приводящего к увеличению эмиттанса сгустка и снижению светимости коллайдерного эксперимента. Характерное время ВПР в горизонтальной плоскости зависит от различных параметров пучка и магнитооптики [10]:

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

где r_0 — классический радиус; β , γ — относительная скорость и лоренц-фактор; $v_c = \beta c$; ϵ_x — эмиттанс в горизонтальной плоскости; N — количество частиц; $(\log) = \ln(r_{\max}/r_{\min})$ — кулоновский логарифм; $\Gamma = (2\pi)^3 (\beta\gamma)^3 m^3 \epsilon_x \epsilon_y \sigma_\delta \sigma_z$ — 6-мерный фазовый объем; $\phi_x \equiv D'_x - \frac{\beta'_x D_x}{2\beta_x}$, $\beta_x D_x \beta'_x D'_x$ — бета-функция, дисперсия и их производные соответственно, коэффициенты a , b , c , $a_x b_x$ определяются в различных моделях по-разному. Такие вычисления применяются в программах моделирования, таких как MADX [11].

Общим подходом в этом случае являются минимизация бета-функции и дисперсии, а также их регуляризация, что приводит к увеличению времени ВПР в струк-

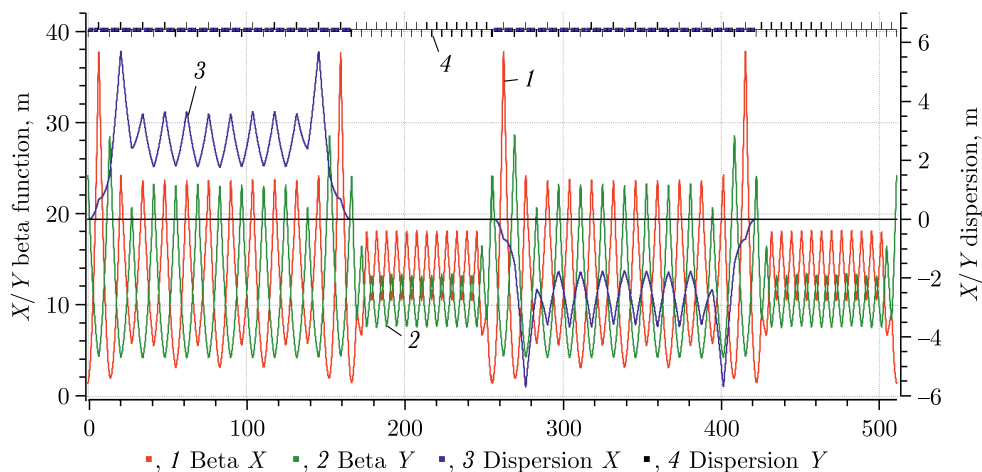


Рис. 6. Твисс-функции регулярной структуры, оптимизированной для тяжелых ионов с точки зрения увеличения времени внутривпучкового рассеяния

туре. Подобный эффект достигается при использовании полностью регулярных поворотных арок. Однако для согласования с прямым бездисперсионным участком требуется подавление дисперсии на краях, что нарушает регулярность в этой области. Для наиболее эффективного подавления применяется методика отсутствующих магнитов (*missing magnets*) [12]. Менее эффективно подавление дисперсии может быть осуществлено вариацией градиента в квадрупольных линзах двух или трех крайних ячеек.

Поскольку в рассматриваемой работе исследуется многофункциональность структуры, то расстановка элементов предполагается неизменной и будет рассмотрен второй указанный вариант подавления дисперсии. Подобный подход исследован при создании дуальной структуры [13]. На рис. 6 показан принципиальный вид твисс-параметров для тяжелоионной структуры. Ввиду неоптимальности выбранного способа подавления дисперсии на краях арки возникают характерные максимумы, что в конечном счете уменьшает время ВПР. Наиболее значимо влияет величина среднего значения дисперсии, зависящая от интеграла магнитного поля в диполях. Для каждого конкретного исследования должна быть решена задача по оптимизации магнитооптики структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности магнитооптической структуры кольца в форме 8. Показана возможность использования кольца для решения различных физических программ. Для протонного поляризованного пучка предложен метод поднятия критической энергии в резонансной структуре. Для накопления ЭДМ-сигнала в структуре с квазизамороженным спином реализована возможность расстановки трех независимых семейств секступолей для коррекции равновесного уровня энергии. Для тяжелоионного пучка проведена оптимизация времени внутривпучкового рассеяния.

Приведенные возможности применения кольца, а также особые свойства для поляризованных пучков делают такую установку уникальной.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-72-30005.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Derbenev Ya. S. et al.* Polarization Preservation and Control in a Figure-8 Ring // Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 40, No. 01. P. 166009.
2. *Senichev Y. V., Chechenin A. N.* Theory of “Resonant” Lattices for Synchrotrons with Negative Momentum Compaction Factor // JETP. 2007. V. 105. P. 988–997.
3. *Nikolaev N. N.* Spin of Protons in NICA and PTR Storage Rings as an Axion Antenna // JETP Lett. 2022. V. 115. P. 639–643.
4. *Senichev Yu. et al.* Investigation of Lattice for Deuteron EDM Ring // Proc. ICAP2015, Shanghai, 2016. doi: 10.18429/JACoW-ICAP2015-MODBC4.
5. *Bargmann V., Michel L., Telegdi V. L.* Precession of the Polarization of Particles Moving in a Homogeneous Electromagnetic Field // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 435.
6. *Senichev Y. V., Chechenin A. N.* Construction of “Resonant” Magneto-Optical Lattices with Controlled Momentum Compaction Factor // JETP. 2007. V. 105. P. 1141–1156.
7. *Мельников А. А., Сеничев Ю. В., Аксентьев А. Е., Колокольчиков С. Д.* Природа спиновой декогеренции поляризованного пучка легких ядер в накопительном кольце для поиска ЭДМ // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118, № 9–10(11). С. 713–720.
8. *Suleiman R., Derbenev Ya., Grau M., Morozov V.* Particle Accelerator Spin-Transparent Storage Rings for Beyond State-of-the-Art Science // Proc. 15th Intern. Part. Accel. Conf., Nashville, TN, USA, May 19–24, 2024; J. Accel. Conf. Website. 2024. P. 1897–1900.
9. *Melnikov A., Kolokolchikov S., Aksentyev A. et al.* Investigation of Spin-Decoherence in a Figure-8 Ring to Search for CP-Violation Sources // Phys. Part. Nucl. Lett. 2026. V. 23, No. 3.
10. *Bjorken J. D., Mtingwa S. K.* Intrabeam Scattering // Part. Accel. 1983. V. 13. P. 115–143.
11. *Antoniou F., Zimmermann F.* Revision of Intrabeam Scattering with Non-Ultrarelativistic Corrections and Vertical Dispersion for MAD-X. CERN-ATS-2012-066. Geneva: CERN, 2006. P. 1–14.
12. *Autin B.* Dispersion Suppression with Missing Magnets in a FODO Structure Application to the CERN Antiproton Accumulator // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. V. 26. P. 3493–3495.
13. *Kolokolchikov S., Senichev Yu., Aksentev A., Melnikov A.* Features of Dual-Purpose Structure for Heavy Ion and Light Particles // Nucl. Sci. Tech. 2025. V. 36, Iss. 11. ID 210.

Получено 3 ноября 2025 г.