

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР С СОХРАНЕНИЕМ ФУНКЦИЙ БУСТЕРА ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПУЧКА В КОЛЛАЙДЕР NICA

© 2026 г. Ю. В. Сеничев^{a, b, *}, С. Д. Колокольчиков^{a, b}, А. Е. Аксентьев^{a, c}, А. А. Мельников^{a, b, d},
Н. Н. Николаев^{b, d}, В. П. Ладыгин^e, Е. М. Сыресин^e

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

^cНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^dИнститут теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

^eОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: y.senichev@inr.ru

Поступила в редакцию 27.04.2025 г.

После доработки 08.08.2025 г.

Принята к публикации 13.08.2025 г.

Целью предполагаемой работы является определение взаимосвязи между Нуклотроном и коллайдером НИКИ, включающей в себя модификацию магнитооптической структуры Нуклотрона для создания синхротрона с двумя функциями в одном ускорителе: бустера поляризованных пучков протонов и дейтронов для инъекции в коллайдер и независимого кольца синхротрона-накопителя для проведения прецизионных экспериментов по исследованию ЭДМ легких ядер и поиску аксиона.

Ключевые слова: спин, поляризованный пучок, электрический дипольный момент

DOI: 10.56304/S2079562926010410

ВВЕДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи предлагается рассмотреть два варианта модернизации магнитооптической структуры Нуклотрон 2.1 и Нуклотрон 2.2, которые вместе с основными функциями бустера для коллайдера должны иметь дополнительные функции, позволяющие управлять и сохранять поляризацию, а также проводить эксперименты по поиску электрического дипольного момента легких ядер дейтрона и протона. При этом все параметры магнитооптической структуры должны отвечать условиям сохранения и управления поляризацией.

Во всех рассматриваемых вариантах принципиальным вопросом является достижение проектной светимости поляризованных пучков, что заведомо требует исключение прохождения критической энергии после охлаждения пучка, что на сегодняшний день не заложено в проект и потому является основной проблемой взаимосвязи между Нуклотроном и коллайдером НИКИ. Для решения этой проблемы наиболее оптимальным

является вывод критической энергии коллайдера за пределы изменения энергии в цикле ускорения.

В соответствии с сегодняшним проектом поляризованные пучки из Нуклотрона инжектируются в коллайдер при энергии, не превышающей энергию, на которой происходит электронное охлаждение в коллайдере, то есть порядка 2–3 ГэВ. Последнее условие обусловлено требованием безусловного охлаждения поляризованных пучков после накопления в коллайдере для достижения максимальной светимости в коллайдере. Однако, при таком подходе последующее прохождение накопленного охлажденного поляризованного пучка протонов через критическую энергию в коллайдере НИКА при $\gamma_{tr} \approx 7$ может привести к увеличению фазового объема сталкивающегося протонного пучка с дейтронным и соответствующему понижению их совокупной светимости. Экспериментальные измерения параметров пучка, проведенные на ускорителе У-70, и математические оценки роста эмиттанса протонного пучка при прохождении критической энергии дают фактор

порядка двойки. Поэтому в данном варианте дополнительным требованием должно быть исключение прохождения протонов через критическую энергию после охлаждения. Соответственно требованиям на величину «коэффициента скольжения» с точки зрения коллективных неустойчивостей должно быть рассмотрено повышение критической энергии коллайдера до величины $\gamma_{cr} \approx 15-20$ ранее планируемым методом “резонансной модуляции дисперсии”, что потребует относительно несложного введения дополнительного семейства фокусирующих квадруполов с повышенным градиентом фокусирующего поля на относительную величину $\sim 10-20$ процентов.

Данный метод был разработан одним из авторов данной работы и использован в ускорителе Main Ring JPARC [1, 2] и зарекомендовал себя, как простой и надежный метод. Этот же метод поднятия критической энергии был заложен в проект ускорителя PS-2 в ЦЕРНе [3, 4] и кольца HESR в проекте FAIR в GSI Германии [5]. В связи с этим во обоих вариантах 2.1 и 2.2 магнитной оптики Нуклотрона рекомендуется использовать “резонансный” метод.

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В УСКОРИТЕЛЕ

Основной принцип измерения ЭДМ основан на создании условий, при которых сигнал ЭДМ постоянно накапливается при движении пучка по кольцу. Для этого ориентация векторов спина и продольного импульса должны быть постоянно сонаправлены $\mathbf{S} \rightarrow \uparrow \uparrow \mathbf{p}$ с точностью, определяющей максимально возможную чувствительность измерения ЭДМ. Условие выполнения сонаправленности продольного импульса и спина называется “замороженностью” или “квази-замороженностью” спина в зависимости от точности и способа его выполнения.

Основной принцип измерения накопленного сигнала ЭДМ в кольце исходит из уравнения Т-ВМТ [6, 7] для прецессии спина в накопителях. В соответствии с теоремой Эренфеста Т-ВМТ уравнения описывают классическое поведение спина $\mathbf{S}$ заряженной частицы с учетом предполагаемого ЭДМ:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{S}}{dt} &= \mathbf{S} \times (\boldsymbol{\Omega}_{MDM} + \boldsymbol{\Omega}_{EDM}), \\ \boldsymbol{\Omega}_{MDM} &= \frac{e}{m_0 \gamma} \cdot \left\{ (\gamma G + 1) \mathbf{B}_\perp + (1 + G) \mathbf{B}_\parallel - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}}{c} \right\}, \\ \boldsymbol{\Omega}_{EDM} &= \frac{e\eta}{2m_0} \left(\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g-2}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где γ — фактор Лоренца, $\boldsymbol{\beta}$ — относительная скорость, c — скорость света, e, m — заряд и масса частицы, G — аномалия магнитного момента, g — гиромагнитное отношение, $\boldsymbol{\Omega}_{MDM}$ — частота прецессии спина вследствие магнитного дипольного момента, $\boldsymbol{\Omega}_{EDM}$ — частота прецессии спина, обусловленная электрическим дипольным моментом, η — безразмерный коэффициент, определяемый в (1) соотношением $d = \eta e \hbar / 4mc$, $\mathbf{B} = \{\mathbf{B}_\perp, \mathbf{B}_\parallel\}$, $\mathbf{E} = \{\mathbf{E}_\perp, \mathbf{E}_\parallel\}$ — магнитное и электрическое поля. В дальнейшем поскольку мы не будем использовать элементы с продольным магнитным полем, примем $\mathbf{B}_\parallel = 0$. Продольное электрическое поле $\mathbf{E}_\parallel = 0$ также не учитывается в виду малости его вклада.

МЕТОД “ЗАМОРОЖЕННОГО” СПИНА

Метод “замороженного спина” [8] основан на том, что при определенной так называемой “магической” энергии, спин частицы во внешних полях начинается вращаться с частотой равной частоте обращения импульса частицы по орбите

$\boldsymbol{\Omega}_{E,B}^p = \frac{e\mathbf{E}}{m\gamma\beta c} + \frac{e\mathbf{B}}{m\gamma}$. Вычитая из $\boldsymbol{\Omega}_{MDM}$ частоту $\boldsymbol{\Omega}_{E,B}^p$, мы получим частоту прецессии спина относительно направления импульса $\boldsymbol{\Omega}_{MDM}^p$:

$$\boldsymbol{\Omega}_{MDM}^p = \boldsymbol{\omega}_E^p + \boldsymbol{\omega}_B^p, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{\omega}_E^p = \frac{e}{m_0} \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\mathbf{E} \times \boldsymbol{\beta}}{c}$ — частота прецессии спина относительно импульса в электрическом поле и $\boldsymbol{\omega}_B^p = \frac{e}{m_0} G \cdot \mathbf{B}_\perp$ — соответственно в магнитном поле. Очевидно, что условием “замороженного” спина является равенство нулю разность частот $\boldsymbol{\Omega}_{MDM} - \boldsymbol{\Omega}_{E,B}^p = 0$, то есть $\boldsymbol{\Omega}_{MDM}^p = 0$.

В частности, условием “замороженного спина” в полностью электростатическом кольце $\mathbf{B} = 0$ является равенство нулю $\boldsymbol{\omega}_E^p = 0$, что выполняется при “магической” энергии:

$$G - \frac{1}{\gamma_{mag}^2 - 1} = 0. \quad (3)$$

В кольце $\mathbf{E} + \mathbf{B}$ с магнитными и электрическими элементами условие “замороженного спина” выполняется при том же условии $\boldsymbol{\Omega}_{MDM}^p = \boldsymbol{\omega}_E^p + \boldsymbol{\omega}_B^p = 0$, которое выполняется при балансе между радиальным электрическим полем E_r и ведущим вертикальным магнитным полем B_v в соотношении:

$$E_r = \frac{GBc\beta\gamma^2}{1 - G\beta^2\gamma^2} \approx GB_v c \beta \gamma^2. \quad (4)$$

Кольцо E+V применяется для случая с дейтронами, поскольку для них G -фактор имеет отрицательное значение $G = -0.14$ и условие (3) не выполнимо.

Для дальнейшего обсуждения введем общепринятое определение “spin tune”, значение которого определяет количество осцилляций спина на одном обороте в ускорителе. Спин-тьюн в электростатическом кольце ν_s^E , определяемая, как нормализованная частота прецессии спина на орбитальную частоту частицы $\nu_s^E = \omega_E^p / \Omega_E^p$, определяется формулой

$$\nu_s^E = \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \gamma \beta^2. \quad (5)$$

Аналогично мы находим спин-тьюн $\nu_s^B = \omega_B^p / \Omega_B^p$ в магнитном поле относительно импульса:

$$\nu_s^B = \gamma G. \quad (6)$$

Таким образом, и для протонов, и для дейтронов есть общее представление о том, как построить кольцо для измерения ЭДМ, но реализуется это с помощью разных типов дефлекторов. Продольное электрическое поле $E_{||} = 0$ также не учитывается в виду малости его вклада.

ПЕРЕХОД К СТРУКТУРЕ С КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ

Итак, условие (4) определяет соотношение между магнитным и электростатическим полями, предполагая, что оба поля существуют в одном элементе. Последний факт значительно усложняет конструкцию E+V дефлектора и тем самым предполагает создание специального кольца для ЭДМ исследований. Это исключает использование существующих ускорителей для исследования ЭДМ, что значительно усложняет проблему и делает финансово затруднительным строительство ускорителя специально для этой задачи. Практически то же самое можно сказать и о чисто электростатическом кольце для протонов.

Поэтому мы разработали метод “квази-замороженного” спина, который не требует специально ориентированной структуры для исследования электрического дипольного момента [9]. Идея такой структуры состоит в разделении поворотных магнитов и электрических дефлекторов по месту их расположения. Для этого рассмотрим уравнение спина в электростатическом дефлекторе и поворотном магните по отдельности. В предыдущем параграфе мы определили спин-

тьюн в электрическом поле $\nu_s^E = \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \gamma \beta^2$ и магнитном $\nu_s^B = \gamma G$.

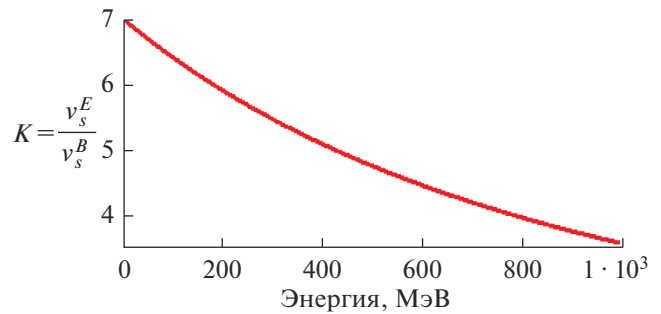


Рис. 1. Отношение ν_s^E / ν_s^B в зависимости от энергии пучка.

Определив соотношение между ними $K = \nu_s^E / \nu_s^B$, получим зависимость этого коэффициента от энергии. Рисунок 1 показывает отношение между спиновой нормированной частотой в электрическом и магнитном полях относительно импульса частицы в зависимости от энергии. Таким образом, мы видим, что существует область энергий, где частота осцилляции спина МДМ в электрическом поле в несколько раз выше, чем в магнитном поле.

В связи с этим нас интересует диапазон энергий пучка дейтронов ~250 МэВ еще и потому, что максимальная эффективность поляриметра с использованием углеродной мишени для дейтронов лежит как раз в диапазоне 240–260 МэВ. Благодаря этому факту, идея “квази-замороженной” структуры (QFS) может быть реализована на основе двух типов дуг: магнитостатической арки и электростатической с обратной кривизной последней.

ДЕЙСТВУЮЩАЯ СТРУКТУРА НУКЛОТРОНА

На рис. 2 показан ускорительный комплекс NICA, состоящий из Бустера, Нуклотрона и Коллайдера. Два из них Бустер и Нуклотрон функционально выполняют роль инжектора для тяжелых ионов и поляризованных протонов и дейтронов в коллайдер. Изначально магнитооптическая структура Nuclotron была сделана максимально приближенной по форме к кругу с восемью супер-периодами. На рис. 3 показаны TWISS функции одного суперпериода Нуклотрона, включающего в себя поворотную арку, состоящую из трех ФОДО ячеек, каждая из которых включает в себя четыре поворотных магнита с максимальным магнитным полем 1.8 Тл и прямой участок, состоящий из одной ФОДО ячейки. Общая длина Нуклотрона составляет 251 м.

Главным недостатком Нуклотрона, как инжектора в коллайдер и самостоятельного кольца, является малая длина дрейфовых промежутков,

Комплекс NICA

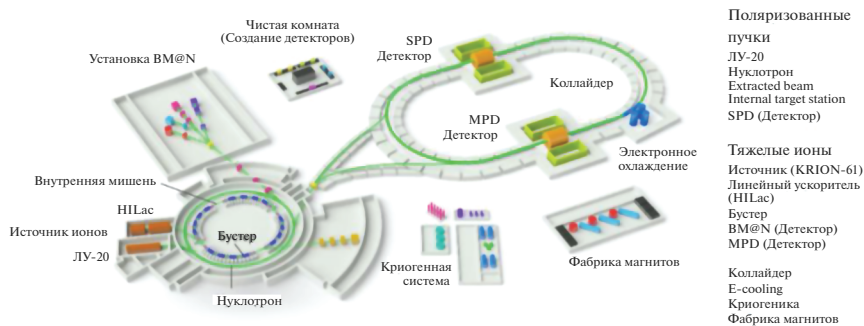


Рис. 2. Ускорительный комплекс NICA.

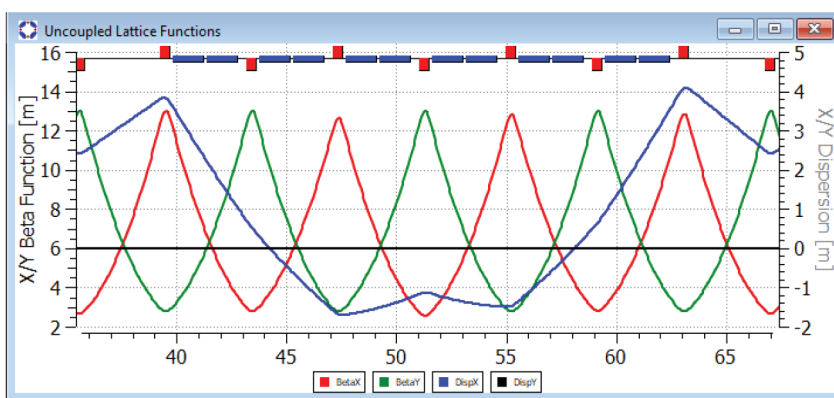


Рис. 3. TWISS функции одного суперпериода Нуклотрона.

на которых необходимо установить соответствующее оборудование для этих двух функций. Все последующие варианты модернизации Нуклотрона будут рассмотрены с точки зрения решения этой задачи.

ВАРИАНТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ НУКЛОТРОНА

Нами рассмотрены два варианта модернизации Нуклотрона. В первом варианте **Нуклотрона 2.1** будет рассмотрена возможная магнитооптическая структура с сохранением всех свойств существующего ускорителя и дополнительно к этому создающая условия проведения экспериментов по измерению электрического дипольного момента дейтрона за счет размещения на кольце электрических deflectоров или фильтров Вина. Каждый из этих устройств позволит сохранять направление вектора спина вдоль направления пучка поляризованных частиц по кольцу ускорителя.

При решении этой задачи необходимо будет решить четыре проблемы в рамках восьми суперпериодической структуры $N_{\text{super}} = 8$: реализовать

концепцию “квази-замороженного” спина в предлагаемой оптике за счет увеличения длины межарочных прямых промежутков, обеспечить нулевую дисперсию на прямых участках и по возможности сохранить длину кольца Нуклотрона с учетом размещения требуемого оборудования в существующем на сегодня туннеле. Задача поиска аксиона в рамках данной концепции может быть также включена, но к настоящему времени нет полного понимания, как быть с систематическими ошибками в предполагаемом эксперименте. В первом варианте Нуклотрона 2.1 все основные параметры Коллайдера, его критическая энергия, параметры электронного охладителя, остаются неизменными. Это создаст серьезные проблемы во взаимосвязи между Коллайдером и Нуклотроном, поскольку прохождение охлажденного пучка через критическую энергию приведет к безвозвратному ухудшению параметров пучка и соответственно уменьшению конечной светимости.

В варианте **Нуклотрона 2.2** предполагается сделать изменения в части согласования с Коллайдером. Неизменным остается энергия инжекции поляризованных протонов в Коллайдер на том же уровне 2–3 ГэВ. Но для исключения влия-

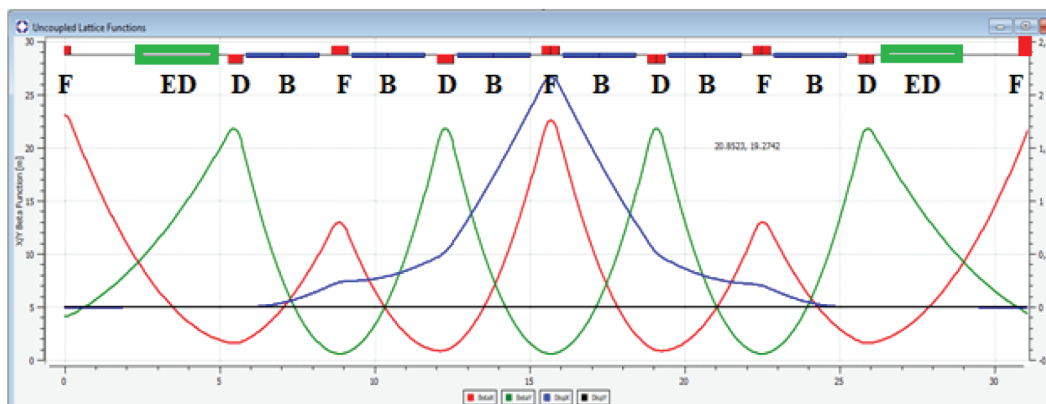


Рис. 4. TWISS функции одного суперпериода модернизированного Нуклотрона 2.1 с двумя электростатическими дефлекторами.

ния прохождения критической энергии после электронного охлаждения предполагается подъем критической энергии в Коллайдере выше максимальной его энергии. В части изменений, также рассматривается вопрос понижения максимальной энергии тяжелых ионов и поляризованных частиц в Нуклотроне 2.2. Это позволит расширить функциональные возможности Нуклотрона в использовании его в экспериментах по ЭДМ и аксиону за счет дополнительного места на кольце для размещения фильтров Вина. При этом понижение энергии в Нуклотроне очевидно никак не повлияет на свойства всего комплекса, поскольку Коллайдер может взять часть функций Нуклотрона и обеспечивать энергию протонов и тяжело-ионно-го пучка во всем диапазоне энергий Нуклотрона.

НУКЛОТРОН 2.1: КОНЦЕПЦИЯ “КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО” СПИНА ДЕЙТРОНА

Задача адаптации структуры Нуклотрона под требования к структуре для измерения электрического дипольного момента дейтрона может быть определена совокупностью проблем: увеличение прямых участков, подавление дисперсии на прямых участках и сохранение направления спина вдоль кольца.

Первая проблема, увеличение прямых участков до требуемой длины, решается за счет увеличения максимального магнитного поля в поворотных магнитах до величины 1.8 Тл и объединения двух соседних магнитов между квадрупольными линзами в один магнит. Одновременно с первой проблемой решается проблема подавления дисперсии выбором набег фазы радиальных колебаний на арках. Предлагаемая модернизированная структура одного суперпериода Нуклотрона 2.1 показана на рис. 4. Основные параметры модернизированной структуры Нуклотрона 2.1: общая длина 251 м, бетатронные частоты $Q_x = 9.78548$, $Q_y = 10.6839$, коэффициент уплотнения орбит 0.0134394; коэффициент скольжения -0.0222388 ; натуральная хроматичность -16.0394 (гор.) -17.8984 (верт.); D–дефокусирующий квадруполь; F–фокусирующий квадруполь; В–магнитный дипольный магнит; ED–электростатический дефлектор. В дальнейшем все параметры различных опций будут сведены в табл. 1.

Благодаря увеличению магнитного поля до 1.8 Тл в поворотных магнитах длина прямого промежутка в каждом суперпериоде увеличена с 7.3 до 10.5 м. Третья проблема сохранения направления спина относительно импульса, необходимого для диагностирования ЭДМ сигнала дейтронов, решается введением электростатиче-

Таблица 1. Основные параметры модификаций Нуклотрона

Структура	Длина магнита, м	Число магнитов	Общая длина магнитов, м	$B_{\max}$, Тл	$B_{\max} R$, Тл м	Макс. энергия дейтрон, ГэВ	Энергия на нуклон	Макс. энергия протон
Nuclotron	1.44	96	138.24	1.8	39.6	10.14	5.07	10.97
Nuclotron 2.1	2.35	48	112.77	1.8	32.2	8	4	8.79
Nuclotron 2.2.1	1.78	48	85.3	1.8	24.4	5.7	2.85	6.47
Nuclotron 2.2.2	1.78	48	85.44	1.8	24.5	5.7	2.85	6.47
Nuclotron 2.2.3	2.10	48	101	1.8	28.93	7.0	3.5	7.8

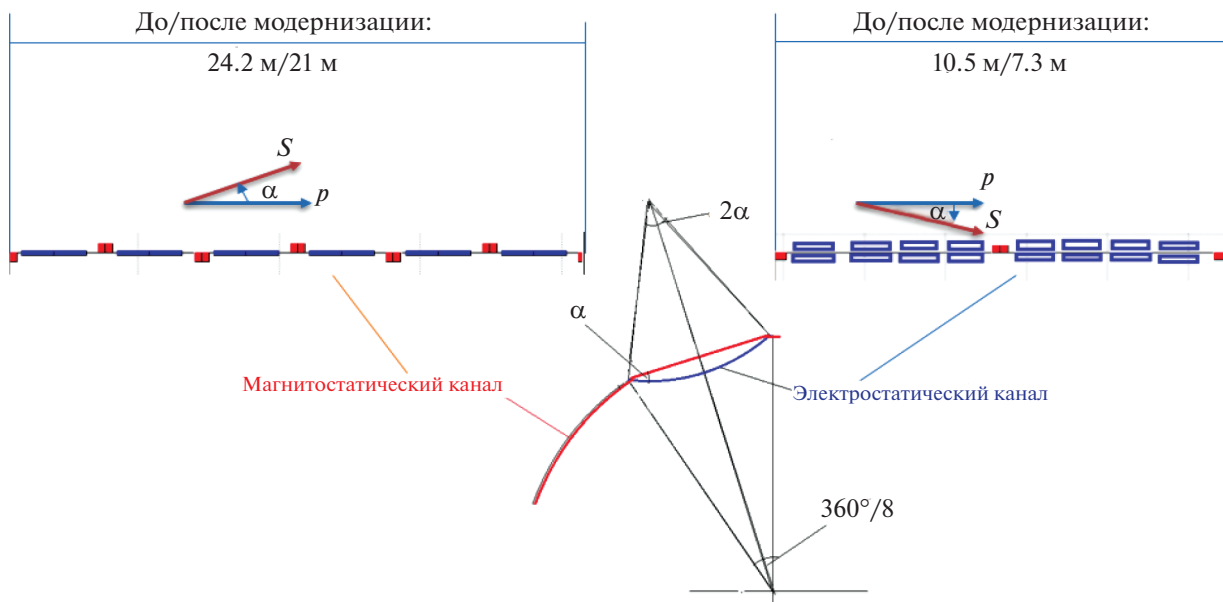


Рис. 5. Электростатическая вставка для компенсации поворота спина в магнитостатической арке.

ских дефлекторов с отрицательной кривизной на каждом суперпериоде структуры (рис. 5).

В концепции “квази-замороженного” спина магнитные и электрические поля разносятся в разные элементы, что очевидно приведет к осцилляции направления спина относительно направления движения, при этом в магнитных и электростатических поворотных элементах спин вращается в разные направления. Принимая во внимание малое значение аномальности магнитного момента дейтрона $G = -0.142$ и предполагая, что спин совершает колебания относительно импульса на каждой магнитной арке суперпериода в пределах половины величины набег фазы спина

$$\Phi_s = +\frac{1}{2N} 2\pi\gamma G, \text{ каждый раз возвращаясь в электростатическом дефлекторе назад на угол } -\Phi_s, \text{ где } N - \text{ супер периодичность арок. Это позволяет в среднем сохранять направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции “квази-замороженного” спина в ускорителе.}$$

В случае Нуклотрона $N = 8$. Благодаря малой величине Φ_s эффективный вклад в ожидаемый ЭДМ сигнал уменьшается в фактор

$$J_0(\Phi_s) \approx 1 - \frac{(\Phi_s)^2}{4}, \quad (7)$$

что означает уменьшение ЭДМ сигнала лишь на несколько процентов.

Давайте рассмотрим эту проблему более детально, чтобы определить параметры электростатических дефлекторов в режиме “квази-заморо-

женного” спина для дейтронов. То есть структура должна состоять из двух различных частей (см. рис. 5): магнитные арки с поворотными магнитами, изменяющими направление движения частицы на каждой арке на угол $\Phi^B = (\pi + 2\alpha)$ и обеспечивающими поворот спина в горизонтальной плоскости относительно импульса на угол $\Phi_s^B = v_s^B \Phi^B$, и электростатическими дугами с электрическими дефлекторами отрицательной кривизны, поворачивающей пучок на каждой дуге на угол $\Phi^E = -2\alpha$ и обеспечивающей поворот спина в горизонтальной плоскости относительно импульса в противоположную сторону на угол $\Phi_s^E = v_s^E \Phi^E$. Для реализации концепции “квази-замороженного” спина необходимо обеспечить $\Phi_s^E = -\Phi_s^B$. Поскольку в электростатическом дефлекторе спин вращается относительно импульса с частотой, в разы большей, чем в магнитостатической структуре, мы имеем основное соотношение для двух разных структурных дуг:

$$v_s^B \left(\frac{2\pi}{N} + 2\alpha \right) = v_s^E 2\alpha \quad (8)$$

$$\text{и } \alpha = \frac{1}{v_s^E/v_s^B - 1} \frac{\pi}{N} = -\gamma^2 \frac{G}{G + 1} \frac{\pi}{N},$$

Зная предполагаемые параметры поворотных магнитов и поля $E_{ED} = 130$ кВ/см в электростатическом дефлекторе, мы можем точно посчитать v_s^E/v_s^B , параметр α и радиус кривизны электро-

статического дефлектора $R_{ED} = \frac{\kappa}{E_{ED}}$, где $p_0 = \gamma m \beta c$,

$\kappa = p_0 \beta c / e$ — электрическая жесткость, тогда $R_{ED} = \frac{mc^2}{e} \frac{\gamma \beta^2}{E_{ED}}$. В этом случае длина дефлектора

определяется $L_{ED} = 2\alpha R_{ED} = -2 \frac{\gamma^2 G}{G+1} \frac{\pi}{N} R_{ED}$. На

рис. 5 показано, как организуется вставка электростатических дефлекторов для реализации “квази-замороженного” структуры кольца Нуклотрон. При энергии $W = 270$ МэВ, $\alpha = 0.026\pi$ и требуемая длина электростатического канала равна 7.3 м.

При этом величина ЕДМ сигнала $S_{EDM} = 1 - \alpha^2/4 \approx 0.998$ уменьшается на величину 0.2%.

Электростатическая арка с отрицательной кривизной предполагает размещение необходимого оборудования на прямом участке между двумя магнитными арками, через которое пучок проходит при отключенных электростатических дефлекторах.

КОНЦЕПЦИЯ “КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО” СПИНА НУКЛОТРОН 2.2 С ФИЛЬТРАМИ ВИНА ДЛЯ ДЕЙТРОНОВ

В модернизированном варианте магнитооптической структуры Нуклотрон 2.2 мы ввели небольшое вертикальное магнитное поле ~ 100 мТл, компенсирующее силу Лоренца электрического поля. Тем самым мы перешли к прямым электростатическим дефлекторам. В случае добавления магнитного поля в дефлектор вновь образованный Е+В элемент в полной мере можно отнести к устройствам, называемым фильтром Вина. В этом случае структура кольца состоит из дуг, соединенных прямолинейными участками, на которых установлены фильтры Вина со скрещенными электрическим и магнитным полями, обеспечивающие прямолинейное движение частиц за счет нулевой силы Лоренца с одновременной компенсацией вращения спина, произошедшего в магнитных дугах. Общая длина всех фильтров Вина определяется параметрами пучка и требованием скомпенсировать поворот спина на арках, а их количество определяется удобством их размещения по кольцу.

В магнитной дуге при совокупном количестве N магнитных дуг частицы поворачиваются на угол $\Phi_{arc}^B = 2\pi/N$, с одновременным МДМ поворотом спина благодаря магнитному дипольному моменту в горизонтальной плоскости относительно импульса на угол $\Phi_s^{arc} = \gamma G \Phi_{arc}^B$. Фильтры Вина с полями E и B обеспечивают МДМ вращение спина в горизонтальной плоскости в противоположном направлении относительно импульса по сравнению с поворотными магнитами на арках:

в электростатическом поле E_{WF} на угол

$$\Phi_{SWF}^E = -\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma+1}\right) \beta^2 \Phi_{WF}^E, \quad (9)$$

где $\Phi_{WF}^E = \frac{e E_{WF}}{m_0 c^2 \gamma \beta^2} L_{WF}$ — вращение импульса в электрическом поле фильтра Вина, и в магнитном поле B_{WF} на угол

$$\Phi_{SWF}^B = (\gamma G + 1) \Phi_{WF}^B, \quad (10)$$

где $\Phi_{WF}^B = \frac{e B_{WF}}{m_0 c \gamma \beta} L_{WF}$ — вращение импульса в магнитном поле фильтра Вина длиной L_{WF} .

Поскольку сила Лоренца в фильтре Вина равна нулю, то углы $\Phi_{WF}^E = \Phi_{WF}^B$ должны быть равны между собой. Поэтому их можно определить через один из них, например, через электрическое поле и длину фильтра E_{WF}, L_{WF} , которые размещены на всех N прямолинейных участках, соответственно. В отличие от опции с “замороженным” спином, где совокупная частота вращения спина относительно импульса в магнитном и электрическом полях поворотного устройства с Е+В полями равна нулю, опция “квази-замороженного” спина требует равенству нулю суммарного угла поворота спина за оборот в поле E и поле B . Таким образом, для реализации концепции “квази-замороженного” спина QFS необходимо выполнить условие $\Phi_{WF}^B - \Phi_{WF}^E = \Phi_{arc}^B$, т.е.

$$(\gamma G + 1) \Phi_{WF}^B - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma+1}\right) \beta^2 \Phi_{WF}^E = \gamma G 2\pi/N. \quad (11)$$

Выполняя преобразования, получаем основное соотношение для параметров одного фильтра Вина прямого элемента:

$$L_{WF} E_{WF} = \frac{2\pi}{N} \frac{G}{G+1} \frac{m_0 c^2}{e} \beta^2 \gamma^3 \text{ и } B_{WF} = -\frac{E_{WF}}{c\beta}, \quad (12)$$

где L_{WF} — длина одного фильтра Вина. В этом случае суммарная длина всех Вин фильтров

$L_{WF}^{\Sigma} E_{WF} = 2\pi \frac{G}{G+1} \frac{m_0 c^2}{e} \beta^2 \gamma^3$ является величиной, зависящей только от типа частиц и ее энергии

Уравнения 8 и 12 полученное сначала для электростатических дефлекторов, а затем для фильтров Вина показывают, что тип отклоняющего элемента не имеет значения. Таким образом, при неизменной магнитной арке, длина фильтра Вина окажется меньше на суммарную длину киккеров, так как в нем совмещены функции электростатического дефлектора и киккера в один элемент.

На рис. 6 показаны TWISS функции одного суперпериода первой версии модернизированного Нуклотрона 2.2.1. В центральных прямых участ-

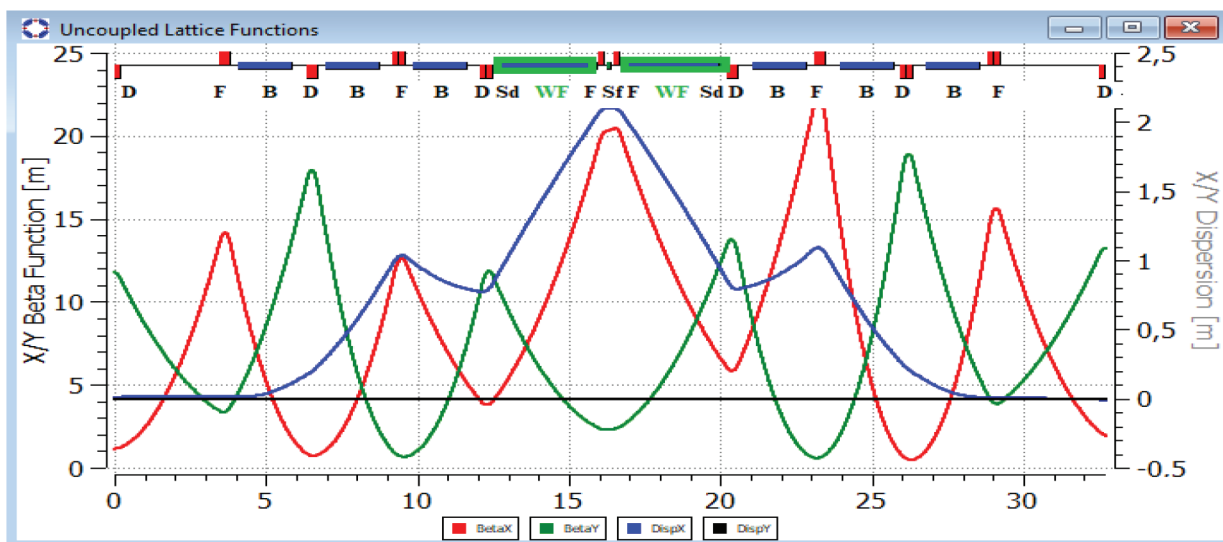


Рис. 6. TWISS функции одного суперпериода модернизированного Нуклотрона 2.2.1 с двумя фильтрами Вина.

ках суперпериода установлены два фильтра Вина, которые восстанавливают отклонение направления вектора спина после прохождения магнитной полуарки. Величина угла отклонения вектора спина от направления импульса $\alpha = \gamma G 2\pi / N$ характеризует степень отличия “квази-замороженной” магнитооптической структуры от “замороженной”. В данной структуре число арок, определяющих отклонение вектора спина, равно числу суперпериодов $N = 8$.

Если принять 130 кВ/см за максимальное электростатическое поле, то магнитное поле должно быть ниже 80 мТл. Такое малое магнитное поле открывает перспективы упрощения общей конструкции фильтра Вина. В частности, можно использовать постоянный магнит или электрическую катушку с воздушным сердечником. При таких значениях электрического и магнитного полей и энергии пучка дейтронов 270 МэВ общая длина фильтров Вина на всех прямолинейных участках составляет около 52 м. При этом длина одного фильтра Вина составляет 3.25 м. При энергии 270 МэВ для дейтронов (135 МэВ на нуклон) максимальный угол отклонения вектора спина составит $\alpha \sim \pm 3^\circ$ по длине одной дуги, что характеризует достаточно хорошее приближение к регулярной “замороженной” структуре.

Другой модификацией модернизированной структуры 2.2.2 является разнесение фильтров Вина на четыре прямых участка суперпериода, как показано на рис. 7.

В результате каждая арка суперпериода разделяется на две арки, и с точки зрения поворотных магнитов структура становится $N = 16$ суперпериодической при сохранении общей суперперио-

дичности 8 магнитооптической структуры с учетом всех элементов. Это позволяет решить две проблемы: во-первых, иметь форму кольца в виде 16-ти угольника, то есть более круглой и лучше вписаться в существующий туннель и во-вторых, при длинах поворотного магнита 1.77 м и фильтра Вина 1.65 м получить угол отклонения вектора спина $\alpha \sim \pm 1.5^\circ$ в два раза меньше по сравнению с вариантом 2.2.1. Это в значительной степени сблизит по своим свойствам структуры “квази-замороженного” и “замороженного” спина.

Для увеличения энергии была рассмотрена модификация Нуклотрона 2.2.3 с меньшим числом пустых промежутков и более длинными магнитами (см. рис. 8). В этой структуре максимальная энергия дейтронов составляет 3.5 ГэВ/нуклон и протонов 7.8 ГэВ, в значительной степени приближает к изначальной опции Нуклотрона.

КОНЦЕПЦИЯ “КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО” СПИНА НУКЛОТРОНА 2.2.2 с ФИЛЬТРАМИ ВИНА ДЛЯ ПРОТОНОВ

Очевидно предположить, что при магнитной суперпериодичности равной 16 можно использовать ее для протонов с пониженной энергией, при этом основным ограничением по энергии здесь является свободное место для фильтров Вина, в нашем случае равное 52 м. Максимальная возможная энергия протонов определяется выражением, полученным из (12):

$$\gamma(\gamma^2 - 1) = L_{WF} \frac{eE_{WF}}{mc^2} \frac{N G_p + 1}{2\pi G_p}, \quad (13)$$

где $L_{WF} N = 52$ м и $G_p = 1.798$ – аномальность магнитного момента протона. Решая уравнение от-

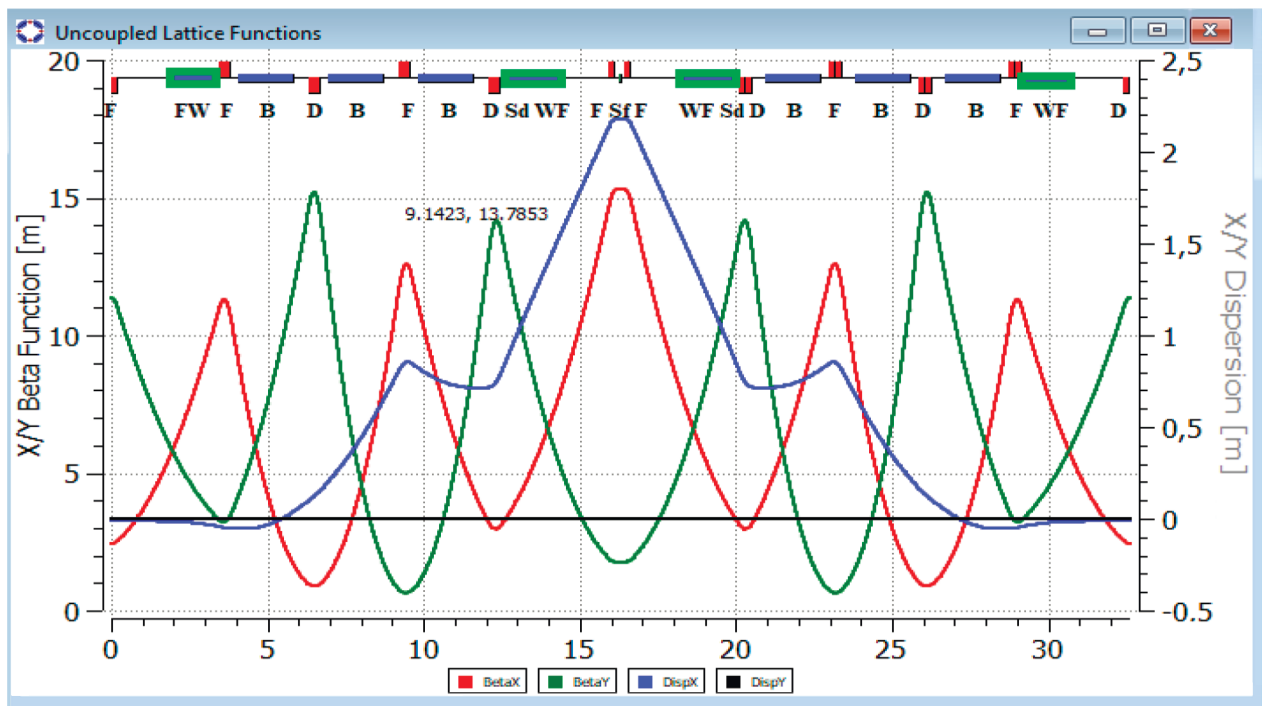


Рис. 7. TWISS функции одного суперпериода модернизированного Нуклотрона 2.2.2 с четырьмя фильтрами Вина.

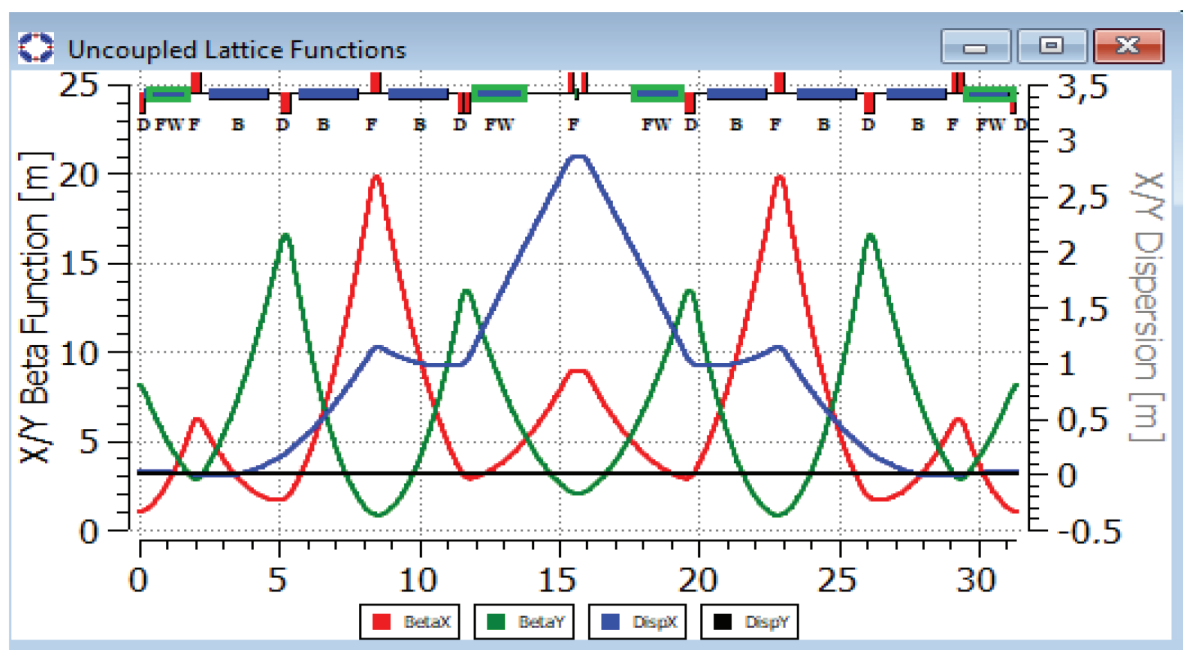


Рис. 8. TWISS функции одного суперпериода модернизированного Нуклотрона 2.2.3 с четырьмя фильтрами Вина.

носительно γ , получаем $\gamma = 1.08046724$, что соответствует энергии $W_p \sim 80$ МэВ. При такой энергии отклонение вектора спина в магнитной арке определяется фактором $\gamma G_p = 1.93711246$, и угол отклонения вектора спина $\alpha = \pm \frac{1}{2} \frac{\gamma G_p}{16}$, в числен-

ном выражении будет $\alpha = 3.5^\circ$. Для исследования протонов может быть использована та же структура, что и для дейтронов, однако при меньшей энергии и с повернутыми на 180° фильтрами Вина, в силу разного знака у аномальных магнитных моментов частиц. То есть при энергии протонного пучка 80 МэВ поведение структуры практиче-

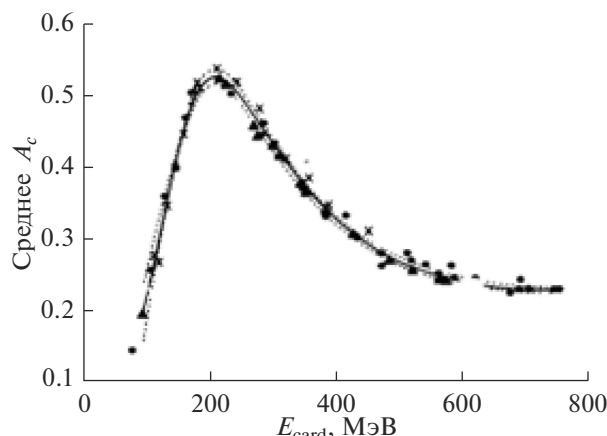


Рис. 9. Графики дискретной энергии (точки) и непрерывная зависимость энергии (сплошная линия) $\overline{A_c}$ при $\Theta_{lab} = 5^0 - 20^0$. Точки данных взяты из SIN (Δ), TRIUMF ($\times$) и LAMPF ($\bullet$)

ски совпадает с опцией “замороженного спина”. На рис. 9 показаны результаты расчетов анализирующей способности р-С¹⁴ в терминах “средней анализирующей способности”, заимствованные из статьи [10].

Из рис. 9 видно, что анализирующая способность в окрестности 100 МэВ близка к 0.2, что составляет 0.35 от максимального значения $A_c = 0.53$ при энергии 230 МэВ. Это дает определенную надежду для исследований ЭДМ протонов при этой энергии в модернизированном варианте Нуклотрона 2.2.2 вместе с полномасштабными измерениями дейтронов.

Поиск галактических аксионов возможен на той же аппаратуре, что и поиск ЕДМ. Вариация частоты прецессии спина при неизменной энергии частиц в кольце делает бустер с фильтрами Вина широкополосной антенной для поиска аксионов по резонансному полному или частично-спин-флипу в осциллирующем псевдоманнитном поле аксионного гало нашей Галактики [11]. Вызванный аксионами рост горизонтальной поляризации выделяется Фурье-анализом осциллирующей вертикальной асимметрии в внутреннем поляриметре [12].

МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ И ПРОТОНОВ В МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СТРУКТУРЕ “КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО” СПИНА НУКЛОТРОН 2.2.2

Итак, нами получены расчеты, указывающие на то, что для проведения экспериментов по поиску ЭДМ дейтронов и протонов в модернизированной структуре 2.2.2 необходимо освободить

место для размещения фильтров Вина с общей длиной 52 метра. Очевидно, что при сохранении общей длины туннеля 251 м такое возможно за счет либо увеличения поля в поворотных магнитах, что мы уже приняли на уровне 1.8 Тл, либо уменьшения их совокупной длин

Предполагая, что максимальное поле в поворотных магнитах не превысит 1.8 Тл, мы рассмотрели второй вариант, что несомненно приводит к уменьшению максимальной энергии частиц в Нуклотроне.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО НУКЛОТРОНА

С точки зрения построения магнитооптической структуры модернизированного Нуклотрона авторы следовали нескольким целям. Во-первых, как мы видим супер-период построен таким образом, чтобы в центральной ячейке было дрейфовое пространство без поворотных магнитов, в том месте, где дисперсионная функция имеет максимальное значение при бесконечном значении кривизны траектории, что позволит поднять критическую энергию:

$$\alpha = \frac{1}{C} \int \frac{D(s)}{\rho(s)} ds. \quad (14)$$

Во-вторых, число суперпериодов s равно восьми, незначительно превышает частоту бетатронных колебаний ν_x в горизонтальной плоскости, что облегчает регулировку коэффициент уплотнения орбит:

$$\alpha = \frac{\nu^3}{R} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k^2}{\nu_x^2 - s^2}. \quad (15)$$

В-третьих, введение центрального дрейфа упрощает размещение трех семейств секступолей, необходимых для регулирования бетатронной и спиновой хроматичностей, в то время, как боковые дрейфовые участки удобны для размещения фильтров Вина.

И наконец, максимальное значение дисперсии в центре суперпериода совпадает с минимальным значением горизонтальной β_x функции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании Нуклотрона в качестве бустера для коллайдера, конечная энергия Нуклотрона может быть понижена до 2–3 ГэВ без особого ухудшения всех свойств комплекса НИКА в виду переноса в коллайдер всех физических экспериментов с поляризованными пучками. Это решение является положительным и с другой стороны. Оно позволит сократить общую длину по-

воротных магнитов, например, за счет уменьшения до одной секции в каждом поворотном двойном магните Нуклотрона и сэкономить на орбите место с общей длиной ~ 70 м для дополнительного оборудования, в частности для соленоидов, сохраняющих поляризацию. Кроме того, данное решение дает очевидные возможности для дополнительного размещения оборудования для поиска ЭДМ и аксиона непосредственно в Нуклотроне.

В первую очередь коллайдерные эксперименты предъявляют требования к светимости. Которые дают ограничения, помимо прочего, и на продольный фазовый размер конечного сгустка. При ускорении, необходимо как преодолеть критическую энергию, так и разделить пучок на 22 сгустка при помощи ВЧ гимнастики, при этом не раздуть фазовый объем.

Рассмотрена возможная схема скачка критической энергии для NICA. Характерные величинами являются, величина скачка $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$ и темп изменения критической энергии $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ с}^{-1}$. Для гармонического ВЧ предложенный скачок оказывает малое влияние на продольную динамику в силу малости скачка и его низкого темпа по сравнению с темпом ускорения. Для барьерного ВЧ, ограничение на величину скачка дает пороговое значение количества частиц в равномерном сгустке, вследствие микроволновой неустойчивости. И не позволяет достигнуть количества частиц $1 \cdot 10^{12}$ в конечном сгустке для достижения максимальной светимости.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-72-30005, <https://rscf.ru/project/25-72-30005/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Senichev Yu. A* “Resonant” Lattice for a Synchrotron with a Low or Negative Momentum Compaction Factor. Preprint no. 97–40. 1997. Tsukuba: KEK.
2. *Ischi Y. et al.* Lattice Design of JHF Synchrotrons. Proc. APAC’98 Conf. Tsukuba, Japan. 1998. P. 378.
3. *Bartosik H. et al.* Comparison of PS2 Lattices with Different Geometry. Proc. IPAC’10 Conf. Kyoto, Japan. 2010. P. 4557.
4. *Senichev Y. et al.* The Lattice with Imaginary γ -Transition for the CERN Proton Synchrotron PS2. Proc. BEAM’07 Conf. Geneva, Switzerland. 2007. P. 171.
5. *Toelle R. et al.* HESR at FAIR: Status of Technical Planning. Proc. PAC’07 Conf. Albuquerque, USA. 2007. P. 1442. <https://doi.org/10.1109/pac.2007.4440783>
6. *Bargmann V., Michel L., Telegdi V.* // Phys. Rev. Lett. 1959. V. 2. P. 435.
7. *Fukuyama T., Silenko A.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2013. V. 28. P. 1350147.
8. *Farley F., Semertzidis Y.* // Prog. Part Nucl. Phys. 2004. V. 52 (1). P. 1.
9. *Senichev Y., Aksentyev A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012068.
10. *McNaughton M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1985. V. 241. P. 435.
11. *Eversmann D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 094801.
12. *Nikolaev N.* // JETP Lett. 2022. V. 115 (11). P. 639.

Modernization of the Magneto-Optical Structure of the Nuclotron to Study the Possibility of Measuring the Electric Dipole Moment of Light Nuclei with Preservation of Functions of the Booster of Polarized Beams for the NICA Collider

Yu. V. Senichev^{1, 2, *}, S. D. Kolokolchikov^{1, 2}, A. E. Aksentyev^{1, 3}, A. A. Melnikov^{1, 2, 4}, N. N. Nikolaev^{2, 4}, V. P. Ladygin⁵, and E. M. Syresin⁵

¹Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

⁴Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia

⁵Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

*e-mail: y.senichev@inr.ru

Received April 27, 2025; revised August 8, 2025; accepted August 13, 2025

Abstract—The aim of the proposed work is to determine the relationship between the Nuclotron and the NICA collider, including modification of the magneto-optical structure of the Nuclotron to create a synchrotron with two functions in one accelerator: a booster of polarized proton and deuteron beams for injection into the collider and an independent synchrotron-storage ring for conducting precision experiments on the study of the EDM of light nuclei and the search for an axion.

Keywords: spin, polarized beam, electric dipole moment