

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

РАССМОТРЕНИЕ АДАПТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР

© 2025 г. Ю. В. Сеничев^{a, b, *}, А. Е. Аксентьев^{a, b}, С. Д. Колокольчиков^{a, b},
А. А. Мельников^{a, c}, В. П. Ладыгин^d, Е. М. Сыресин^d

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bМосковский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

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

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

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

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Рассмотрена возможная магнитооптическая структура Нуклотрона, создающая условия проведения эксперимента по измерению электрического дипольного момента дейтрона. Представлены основные проблемы, требующие решения при реконструкции Нуклотрона под заявленную задачу, и способы их решения.

Ключевые слова: нуклотрон, магнитооптика, спин-орбитальная динамика, квази-замороженный спин, электрический дипольный момент

DOI: 10.56304/S2079562924050440

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рассматривается возможность модернизации магнитооптической структуры Нуклотрона [1] в ОИЯИ в связи с ревизией всех функций отдельных частей сооружаемого ускорительного комплекса НИКА. В работе рассмотрена магнитооптическая структура Нуклотрона, адаптированная для поиска электрического дипольного момента (ЭДМ) дейтрона. При решении этой задачи необходимо обсудить четыре проблемы: (1) реализация концепции “квази-замороженного спина” [2] в предлагаемой оптике, что в свою очередь влечет необходимость (2) увеличения длин межарочных прямых промежутков, (3) обеспечение нулевой дисперсии на прямых участках и (4) сохранение длины кольца ускорителя с учетом размещения требуемого оборудования.

Первая проблема определена основополагающей частью задачи — идеей регистрации ЭДМ сигнала. С этой целью в структуру вводятся дополнительные электростатические дефлекторы с отрицательной кривизмой, что позволяет в интеграле сохранять направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции “квази-замороженного спина” в ускорителе. Одновременно они решают четвертую проблему, сохранение

достаточного количества места для существующего оборудования.

Вторая проблема, увеличение прямых участков до требуемой длины, решается за счет увеличения максимального магнитного поля в поворотных магнитах до величины 1.8 Тл. Третья проблема решается выбором набега фазы радиальных колебаний на арках.

В итоге мы можем потенциально рассматривать возможность исследования электрического дипольного момента дейтрона в Нуклотроне.

1. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НУКЛОТРОНА

На рис. 1 показан ускорительный комплекс НИКА, состоящий из двух колец: Бустер и Нуклотрон. Оба функционально выполняют роль бустера соответственно для тяжелых ионов, поляризованных протонов и дейтронов и последующего ускорения.

Магнитооптическая структура ускорителя Нуклотрон состоит из восьми суперпериодов, каждый из которых имеет три FODO ячейки с двумя поворотными магнитами между каждыми квадруполями и одну FODO ячейку с пустыми проме-

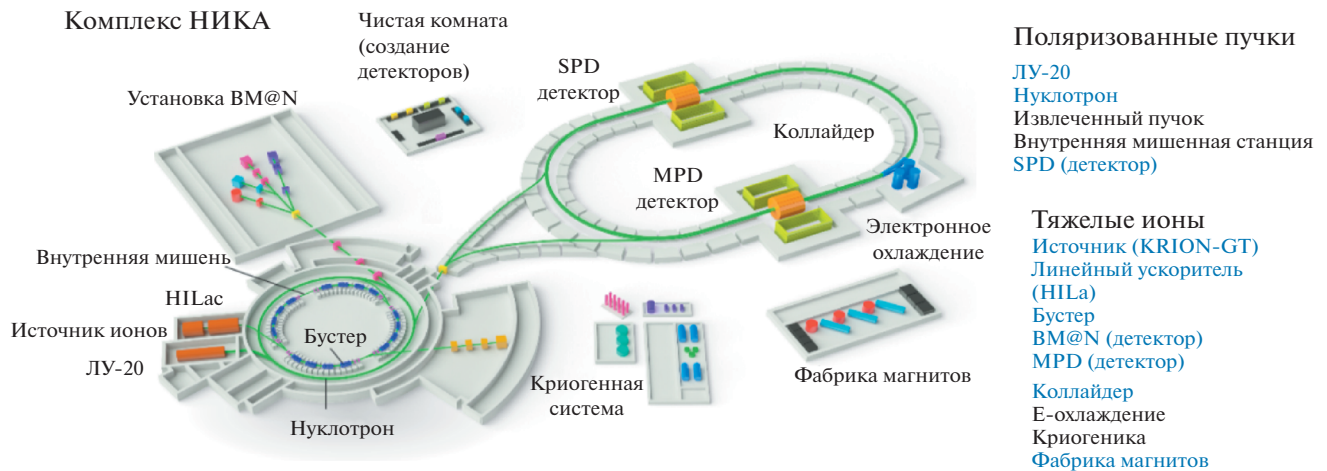


Рис. 1. Ускорительный комплекс NICA.

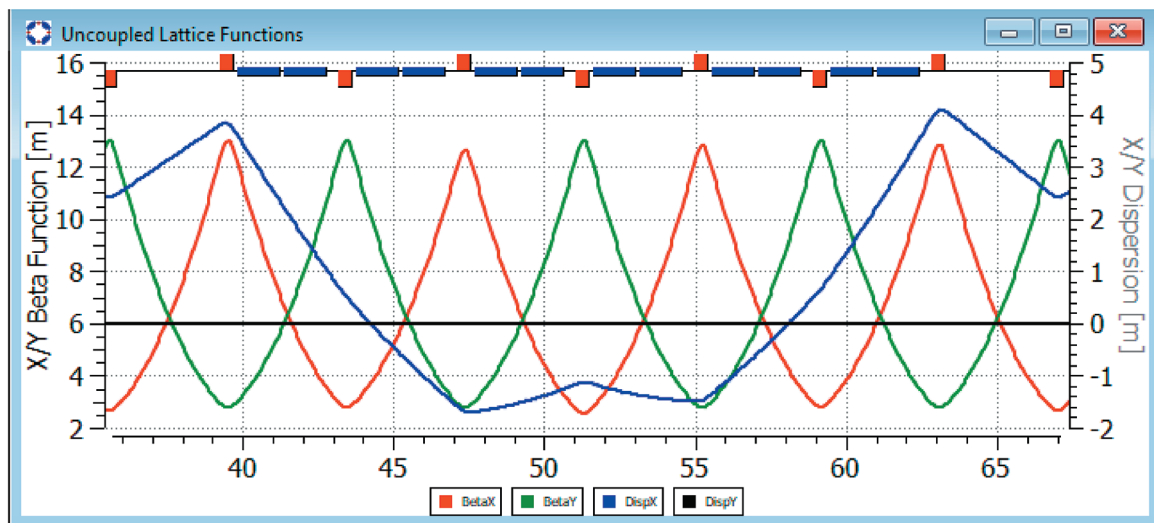


Рис. 2. TWISS функции одного суперпериода Нуклотрона.

жутками для размещения ВЧ станций, вакуумного оборудования и диагностики.

На рис. 2 показаны TWISS функции одного суперпериода Нуклотрона. Общая длина Нуклотрона составляет 251 м.

2. ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В УСКОРИТЕЛЕ

Основной принцип измерения ЭДМ в кольце исходит из уравнения “Thomas–Bargmann, Michel, Telegdy” (Т-ВМТ). В соответствии с теоремой Эренфеста Т-ВМТ уравнения описывают классическое поведение спина заряженной частицы с учетом предполагаемого ЭДМ [3]:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \mathbf{S} \times (\boldsymbol{\Omega}_{\text{MDM}} + \boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}}),$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{\text{MDM}} = \frac{e}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \mathbf{B}_{\perp} + (1 + G) \mathbf{B}_{\parallel} - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}}{c} \right\}, \quad \boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}} = \frac{e\eta}{2m} \left(\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E}}{c} \right);$$

$$G = \frac{g - 2}{2},$$

где γ – фактор Лоренца, β – относительная скорость, c – скорость света, e, m – заряд и масса частицы, G – аномалия магнитного момента, g – гиромангнитное отношение, $\boldsymbol{\Omega}_{\text{MDM}}$ – частота прецессии спина вследствие магнитного дипольного момента, $\boldsymbol{\Omega}_{\text{EDM}}$ – частота прецессии спина, обусловленная электрическим дипольным моментом,

η – безразмерный коэффициент, определяемый в (1) соотношением $d = \eta e\hbar/4mc$, $\mathbf{B} = \{B_\perp, B_\parallel\}$, $\mathbf{E} = \{E_\perp, E_\parallel\}$ – магнитное и электрическое поля. В дальнейшем, поскольку мы не будем использовать элементы с продольным магнитным полем, примем $B_\parallel = 0$. Продольное электрическое поле $E_\parallel = 0$ также не учитывается в виду малости его вклада.

Метод “замороженного спина” [2] основан на том, что при определенной, так называемой “магической”, энергии спин частицы во внешних полях начинает вращаться с частотой, равной частоте обращения импульса частицы по орбите $\Omega_{E,B}^p = \frac{e\mathbf{E}}{m\gamma\beta c} + \frac{e\mathbf{B}}{m\gamma}$. Вычитая из Ω_{MDM} частоту $\Omega_{E,B}^p$, мы получим частоту прецессии спина относительно направления импульса Ω_{MDM}^p :

$$\Omega_{MDM}^p = \omega_E^p + \omega_B^p, \quad (2)$$

где $\omega_E^p = \frac{e}{m} \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\mathbf{E} \times \boldsymbol{\beta}}{c}$ – частота прецессии спина относительно импульса в электрическом поле и $\omega_B^p = \frac{e}{m} G \mathbf{B}_\perp$ – соответственно в магнитном поле.

Условием “замороженного спина” в полностью электростатическом кольце $\mathbf{B} = 0$ является равенство нулю $\omega_E^p = 0$, что выполняется при “магической” энергии:

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

В кольце с магнитными и электрическими элементами условие “замороженного спина” выполняется при том же условии $\Omega_{MDM}^p = \omega_E^p + \omega_B^p = 0$, которое выполняется при балансе между радиальным электрическим полем E_r и ведущим вертикальным магнитным полем B_v в соотношении:

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

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

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

Таблица 1. Основные параметры модернизированной структуры Нуклотрона

Общая длина	25100 см
Тьюны	$Q_x = 9.78548$, $Q_y = 10.6839$
Сокращение момента	0.0134394
Фактор проскальзывания фазы	-0.0222388
Естественные цветности	-16.0394 (гор.), -17.8984 (верт.)

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

Аналогично мы находим “spin tune” $v_s^B = \omega_B^p / \Omega_B^p$ в магнитном поле относительно импульса:

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

Таким образом, и для протонов, и для дейтронов есть общее представление о том, как построить кольцо, но реализуется это с помощью разных типов дефлекторов.

3. КОНЦЕПЦИЯ КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА В НУКЛОТРОНЕ

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. Одновременно с первой проблемой решается проблема подавления дисперсии выбором набег фазы радиальных колебаний на арках. Предлагаемая модернизированная структура одного суперпериода Нуклотрона показана на рис. 3.

Благодаря увеличению магнитного поля до 1.8 Тл в поворотных магнитах длина прямого промежутка в каждом суперпериоде может быть увеличена с 7.3 до 10.5 м

Третья проблема сохранения направления спина относительно импульса, необходимого для диагностики ЭДМ сигнала, решается введением электростатических дефлекторов с отрицательной кривизной на каждом суперпериоде направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции “квази-замороженного спина” в ускорителе.

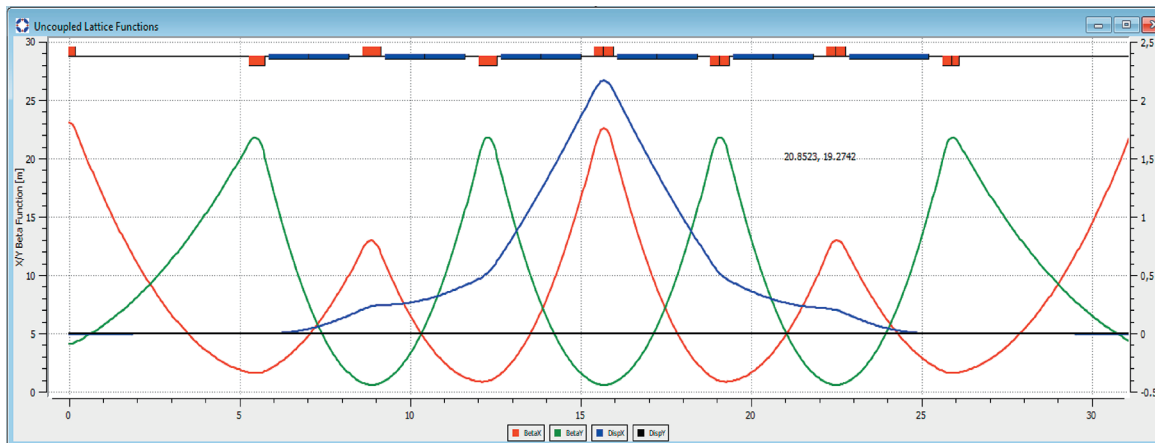


Рис. 3. TWISS функции одного суперпериода модернизированного Нуклотрона.

Рассмотрим третью проблему более детально, чтобы определить параметры электростатических deflectоров в режиме “квази-замороженного” спина для дейтронов. Условие (4) определяет соотношение между магнитным и электростатическим полями, предполагая, что оба поля существуют в одном элементе. Последний факт значительно усложняет конструкцию deflectора и тем самым предполагает создание специального кольца для ЭДМ исследований. Это исключает использование существующих ускорителей для исследования ЭДМ, что значительно усложняет проблему.

В концепции “квази-замороженного” спина магнитные и электрические поля разносятся в разные элементы, что очевидно приводит к осцилляции направления спина относительно направления импульса, при этом в магнитных и электростатических поворотных элементах спин вращается в противоположных направлениях. Примем во внимание малое значение аномальности магнитного момента дейтрона $G = -0.142$ и предположим, что спин совершает колебания относительно импульса на каждой магнитной арке в пределах половины величины набег фазы спина $\Phi_s = \pi \cdot \gamma G / 2N$, каждый раз возвращаясь в электростатическом deflectоре назад, где $2N$ – суперпериодичность арок. В случае Нуклотрона $2N = 8$. Благодаря малой величине Φ_s , эффективный вклад в ожидаемый ЭДМ сигнал уменьшается в фактор $J_0(\Phi_s) \approx 1 - \frac{(\Phi_s)^2}{4}$, что означает уменьшение ЭДМ сигнала лишь на несколько процентов.

Теперь рассмотрим спиновое уравнение в электрическом deflectоре и поворотном магните по отдельности. Из уравнения T-BMT в лабораторной системе координат следует, что прецессия спина МДМ в радиальном электрическом и в вертикальном магнитном полях определяются соотношениями (5) и (6) соответственно. Соотноше-

ние между ними определяют угол поворота спина в разделенных электрическом и магнитном полях

$$K = v_s^E / v_s^B. \quad (7)$$

Рисунок 4 показывает зависимость K от энергии частицы.

Таким образом, видно, что существует область энергий, где осцилляции спина МДМ в электрическом поле происходят в несколько раз быстрее, чем в магнитном поле. Благодаря этому идея “квази-замороженной” структуры может быть реализована на основе двух типов структур: магнито-статической и электростатической с обратной кривизной последней.

То есть структура должна состоять из двух различных частей: 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 $\Phi_s^B = v_s^B \cdot \Phi^B$, и электростатическими дугами с электрическими deflectорами 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 $\Phi_s^E = v_s^E \cdot \Phi^E$. Для реализации концепции “квази-замороженного” спина необходимо обеспечить $\Phi_s^E = -\Phi_s^B$. Поскольку в электростатическом deflectоре спин вращается относительно импульса с частотой, в разы большей, чем в магнито-статической структуре, мы имеем основное соотношение для двух разных структурных дуг:

$$v_s^B \cdot \left(\frac{2\pi}{N} + 2\alpha \right) = v_s^E \cdot 2\alpha \text{ и } \alpha = \frac{1}{v_s^E / v_s^B - 1} \frac{2\pi}{N}. \quad (8)$$

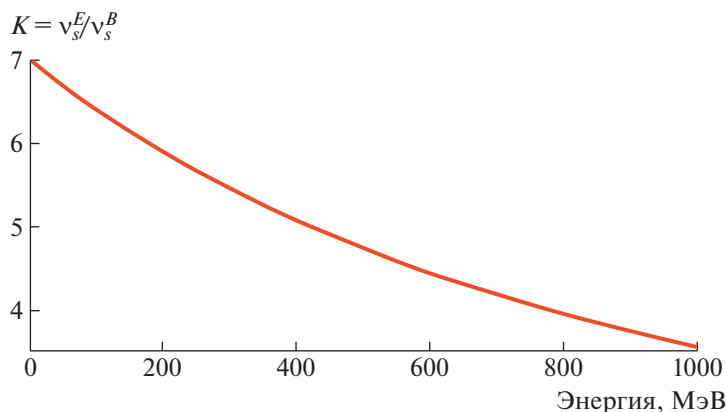


Рис. 4. Зависимость $K = v_s^E / v_s^B$ от энергии частицы.

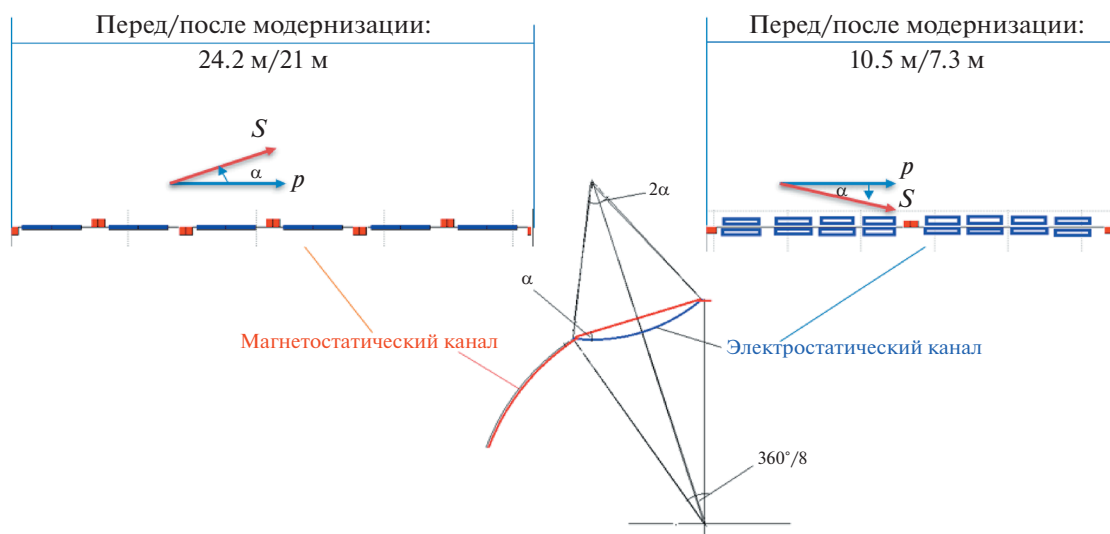


Рис. 5. Электростатическая вставка для компенсации поворота спина в магнитостатической арке.

На рис. 5 показано, как организуется вставка электростатических дефлекторов в структуру кольца Нуклотрона для реализации концепции “квази-замороженного” спина. При энергии $W = 270$ МэВ, $\alpha = 0.026 \pi$ требуемая длина электростатического канала составляет 7.3 м. При этом величина ЭДМ сигнала $S_{EDM} = 1 - \alpha^2/4 \approx 0.998$ уменьшается на величину 0.2%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная предполагаемая модернизация структуры Нуклотрона позволит адаптировать Нуклотрон для проведения исследований электрического дипольного момента дейтрона. Следующим шагом оптимизации структуры Нуклотрона для исследования ЭДМ дейтронного поляризованного пучка станет переход к удвоенной суперпериодичности ($N = 16$), что позволит при-

вести структуру по своим свойствам от концепции “квази-замороженного” спина к концепции “замороженного” спина за счет $\alpha = 0.5^\circ$. Одновременно при таких углах для дейтронов можно рассмотреть возможность исследования ЭДМ протона. Однако переход к суперпериодичности $N = 16$ потребует уменьшение длины ячейки в два раза за счет введения квадрупольных секций после каждой секции магнита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-42-04419.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Vasilishin B.V. et al. Preprint JINR 9-86-512. 1986. JINR: Dubna.

2. *Senichev et al.* Proc. 6th Int. Particle Accelerator Conference IPAC2015, Richmond, VA, USA.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA044>
3. *Anastassopoulos D. et al.* AGS Proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10^{-29} e · cm level. BNL Report. 2008.

Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei

Yu. V. Senichev^{1, 2, *}, A. E. Aksentev^{1, 2}, S. D. Kolokolchikov^{1, 2},
A. A. Melnikov^{1, 3}, V. P. Ladygin⁴, and E. M. Syresin⁴

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

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia*

³*Landau Institute for Theoretical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia*

⁴*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

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

Received June 19, 2023; revised June 22, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—A possible magneto-optical structure of the Nuclotron creating the conditions for conducting an experiment to measure the electric dipole moment of the deuteron is considered. The main problems that need to be solved when reconstructing the Nuclotron for the stated task and methods for solving them are presented.

Keywords: nuclotron, magneto-optics, spin–orbit dynamics, quasi-frozen spin, electric dipole moment