

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НУКЛОТРОНА ДЛЯ ПОИСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР

Ю. В. Сеничев^{а, б, 1}, А. Е. Аксентьев^{а, б}, С. Д. Колокольчиков^а,
А. А. Мельников^{а, з}, В. П. Ладыгин^д, Е. М. Сыресин^д

^а Институт ядерных исследований РАН, Москва

^б Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

^з Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

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

^д Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрена возможная магнитооптическая структура нуклотрона, создающая условия проведения эксперимента по измерению электрического дипольного момента дейтрона. При решении этой задачи необходимо было решить четыре проблемы в рамках восьми суперпериодических структур $N = 8$: реализовать концепцию «квазизамороженного» спина в предлагаемой оптике, увеличить длины прямых промежутков между арками, обеспечить нулевую дисперсию на прямых участках и по возможности сохранить длину кольца ускорителя с учетом размещения требуемого оборудования. Помимо этого рассмотрен переход к магнитооптической структуре с суперпериодичностью $N = 16$, что позволит «квази-фrozen» (квазизамороженную) структуру приблизить по своим свойствам к «фrozen» (замороженной) структуре за счет уменьшения угла поворота пучка на каждой арке. Одновременно при таких углах для дейтронов можно рассматривать возможность исследования ЭДМ протона.

A possible magneto-optical structure of the Nuclotron is considered, which could provide the conditions for an experiment to measure the electric dipole moment of the deuteron. For that it was necessary to solve four problems within the framework of eight superperiodic structures: to implement the concept of “quasi-frozen spin” in the proposed optics, to increase the lengths of the inter-arcs straight section, to ensure zero dispersion in the straight sections, and to preserve the length of the accelerator ring, taking into account the placement of required equipment. In addition, the transition to superperiodicity $N = 16$ has been done, which will allow the “quasi-frozen” structure to bring its properties to the “frozen” structure by reducing the beam rotation angle on each arc. At such angles for deuterons, one can consider the possibility of searching for the electric dipole moment of the proton as well.

PACS: 07.85.-m; 26.30.+k; 95.85.Pw; 98.58.M

¹E-mail: y.senichev@inr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучается возможность модернизации магнитооптической структуры нуклотрона [1] в ОИЯИ в связи с ревизией всех функций отдельных частей сооружаемого ускорительного комплекса NICA. В этой работе мы рассмотрели магнитооптическую структуру нуклотрона, адаптированную для поиска электрического дипольного момента дейтрона (dEDM). При этом необходимо было разрешить четыре проблемы: 1) реализовать концепцию «квазизамороженного» спина [2] в предлагаемой оптике, что, в свою очередь, влечет необходимость 2) увеличить длины межарочных прямых промежутков, 3) обеспечить нулевую дисперсию на прямых участках и сохранить длину кольца ускорителя с учетом размещения требуемого оборудования.

Первая проблема определена основополагающей частью задачи — идеей регистрации сигнала dEDM. С этой целью в структуру вводятся дополнительные электростатические deflectоры с отрицательной кривизной, что позволяет в интеграле сохранять направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции «квазизамороженного» 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 с сохранением общей длины.

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НУКЛОТРОНА

На рис. 1 показан ускорительный комплекс NICA, состоящий из двух колец: бустера и нуклотрона. Оба функционально выполняют роль бустера соответственно для тяжелых ионов и поляризованных протонов и дейтронов и последующее ускорение.



Рис. 1. Ускорительный комплекс NICA

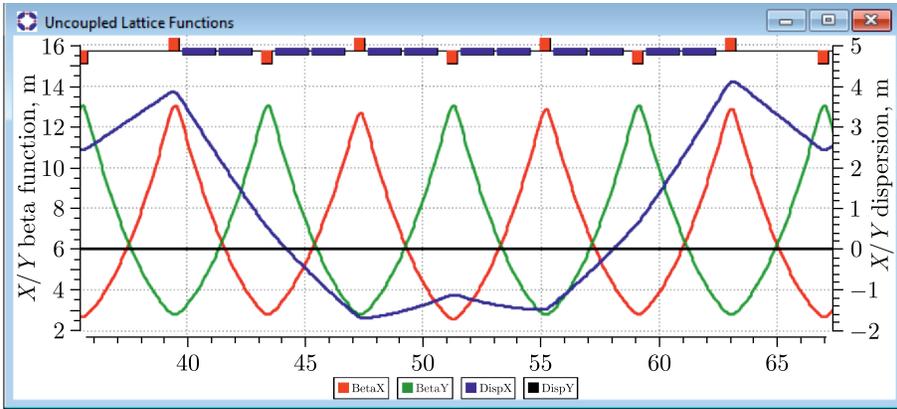


Рис. 2. TWISS-функции одного суперпериода нуклотрона

Магнитооптическая структура нуклотрона имеет суперпериодичность с восемью суперпериодами, каждый из которых имеет 3 ФODO-ячейки с двумя поворотными магнитами между каждыми квадрупольями и одну ФODO-ячейку с пустыми промежутками для размещения ВЧ-станций, вакуумного оборудования и диагностики.

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

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В УСКОРИТЕЛЕ

Основной принцип измерения ЭДМ (EDM) в кольце исходит из уравнения Thomas-Bargmann, Michel, Telegdy (Т-БМТ). В соответствии с теоремой Эренфеста уравнения Т-БМТ описывают классическое поведение спина заряженной частицы с учетом предполагаемого dEDM (ЭДМ):

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

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

$$\boldsymbol{\Omega}_{\text{edm}} = \frac{e\eta}{2m} \left(\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E}}{c} \right), \quad G = \frac{g - 2}{2},$$

где γ — фактор Лоренца; $\boldsymbol{\beta}$ — 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 $d = \eta \hbar / 4mc$; $\mathbf{B} = \{B_{\perp}, B_{\parallel}\}$, $\mathbf{E} = \{E_{\perp}, E_{\parallel}\}$ — 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 ввиду 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 $\Omega_{E,B}^p = (eE)/(m\gamma\beta c) + (eB)/(m\gamma)$. Вычитая из Ω_{mdm} частоту $\Omega_{E,B}^p$, мы получим частоту прецессии спина относительно направления импульса Ω_{mdm}^p :

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

где $\omega_E^p = e/m (G - (1/(\gamma^2 - 1))) (\mathbf{E} \times \boldsymbol{\beta})/c$ — частота прецессии спина относительно импульса в электрическом поле и $\omega_B^p = (e/m)GB_{\perp}$ — 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 $\Omega_{\text{mdm}}^p = \omega_E^p + \omega_B^p = 0$, которое выполняется при балансе между радиальным электрическим полем E_r и ведущим вертикальным магнитным полем B_v в соотношении

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

Гибридное кольцо с электрическим и магнитным полями применяется для случая с дейтронами, поскольку для них G -фактор имеет отрицательное значение $G = -0,14$ и условие (3) невыполнимо.

Для дальнейшего рассмотрения введем определение «spin tune», значение которого определяет количество осцилляций спина на одном обороте в ускорителе. Величина 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, но реализуется это с помощью разных типов дефлекторов.

КОНЦЕПЦИЯ «КВАЗИЗАМОРОЖЕННОГО» СПИНА В НУКЛОТРОНЕ

Задача адаптации структуры нуклотрона под требования структуры для измерения электрического дипольного момента дейтрона может быть определена совокупностью проблем: увеличения прямых участков, подавления дисперсии на прямых участках и сохранения направления спина вдоль кольца.

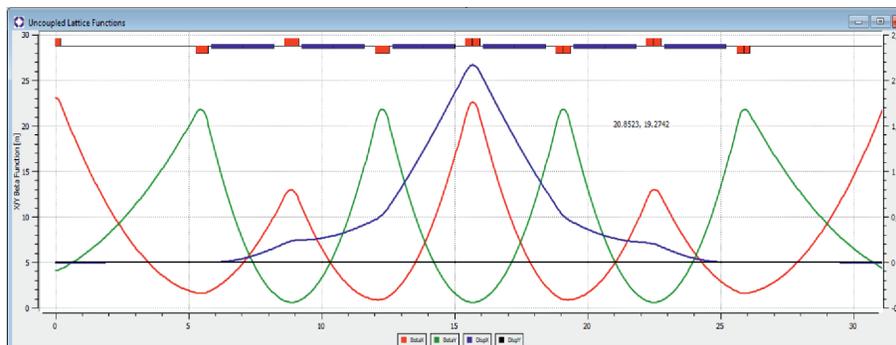


Рис. 3. TWISS-функции одного суперпериода модернизированного нуклотрона

Увеличение прямых участков до требуемой длины достигается за счет увеличения максимального магнитного поля в поворотных магнитах до величины 1,8 Тл.

Одновременно решается проблема подавления дисперсии выбором набега фазы радиальных колебаний на арках. Предлагаемая модернизированная структура одного суперпериода нуклотрона показана на рис. 3.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОТРОНА

Общая длина: 25 100 см; бетатронные частоты: $Q_x = 9,78548$, $Q_y = 10,6839$; коэффициент уплотнения орбиты: 0,0134394; фактор фазового скольжения: $-0,0222388$; натуральная хроматичность: горизонтальная $\xi_x = -16,0394$ и вертикальная $\xi_y = -17,8984$.

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.

Проблема сохранения направления спина относительно импульса, необходимого для диагностирования сигнала ЭДМ, решается введением электростатических дефлекторов с отрицательной кривизной на каждом суперпериоде структуры. Это позволяет сохранять среднее направление спина вдоль импульса во всем кольце в рамках концепции «квасизамороженного» спина в ускорителе.

Рассмотрим эту проблему более детально, чтобы определить параметры электростатических дефлекторов в режиме «квасизамороженного» спина для дейтронов. Итак, условие (4) определяет соотношение между магнитным и электростатическим полями, в предположении, что оба поля существуют в одном элементе. Последний факт значительно усложняет конструкцию дефлектора и тем самым предполагает создание специального кольца для исследований ЭДМ. Это исключает использование существующих ускорителей для исследования ЭДМ, что значительно усложняет задачу.

В концепции «квасизамороженного» спина магнитные и электрические поля разносятся, что, очевидно, приведет к осцилляции направления спина относительно направления движения, при этом в магнитных и электростатических поворотных элементах

спин вращается в разных направлениях, если принять во внимание малое значение аномальности магнитного момента дейтрона $G = -0,142$ и предположить, что спин совершает колебания относительно импульса на каждой магнитной арке в пределах половины величины набега фазы спина $\Phi_s = \pi\gamma G/2N$, каждый раз возвращаясь в электростатическом дефлекторе назад, где $2N$ — суперпериодичность арок. В случае нуклотрона суперпериодичность равна $2N = 8$. Благодаря малой величине Φ_s эффективный вклад в ожидаемый сигнал ЭДМ уменьшается в фактор $J_0(\Phi_s) \approx 1 - (\Phi_s)^2/4$, что означает уменьшение сигнала ЭДМ лишь на несколько процентов.

Теперь рассмотрим спиновое уравнение в электрическом дефлекторе и поворотном магните по отдельности. Из уравнения Т-БМТ в лабораторной системе координат следует, что прецессия спина магнитного дипольного момента (МДМ) в радиальном электрическом поле и в вертикальном магнитном поле определяются соотношениями (5) и (6) соответственно. Соотношение между ними определяет угол поворота спина в разделенных электрическом и магнитном полях

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

Рис. 4 показывает зависимость K от энергии частицы. Таким образом, мы видим, что существует область энергий, где осцилляции спина МДМ в электрическом поле происходят в несколько раз быстрее, чем в магнитном. Благодаря этому идея «квазизамороженной» структуры может быть реализована на основе двух типов структур: магнитостатической и электростатической с обратной кривизной последней.

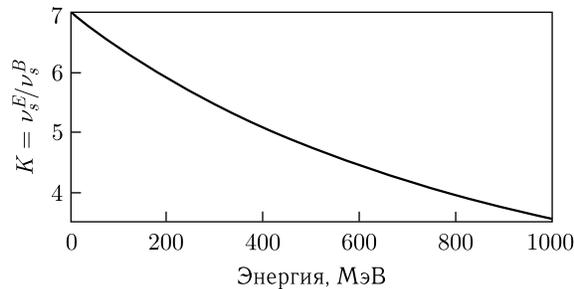


Рис. 4. Зависимость $K = \nu_s^E / \nu_s^B$ от энергии частицы

То есть структура должна состоять из двух различных частей: магнитных арок с поворотными магнитами, изменяющими направление движения частицы на каждой арке на угол $\Phi^B = (\pi/N + 2\alpha)$ и обеспечивающими поворот спина в горизонтальной плоскости относительно импульса на угол $\Phi_s^B = \nu_s^B \Phi^B$, и электростатических дуг 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 $\Phi_s^E = \nu_s^E \Phi^E$. Для реализации концепции «квазизамороженного» 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:

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

На рис.5 показано, как организуется вставка электростатических дефлекторов для реализации «квазизамороженной» структуры кольца нуклотрона. При энергии $W = 270$ МэВ $\alpha = 0,026\pi$ и требуемая длина электростатического канала = 7,3 м.

При этом величина сигнала ЭДМ в «квазизамороженной» структуре по сравнению с «замороженной» $S_{edm}^{QFS} / S_{edm}^{FS} = 1 - \alpha^2/4 \approx 0,998$ уменьшается на величину 0,2%.

Мы рассмотрели вариант с удвоенным количеством суперпериодов 16. За счет разнесения сдвоенных поворотных магнитов количество ФОДО-периодов на каждом суперпериоде было удвоено, что позволило получить подавление дисперсии на каждом втором прямом участке за счет набегу фазы 60° на каждой ФОДО-ячейке. В этом варианте структуры угол поворота становится $\alpha = 0,013\pi$. При этом величина

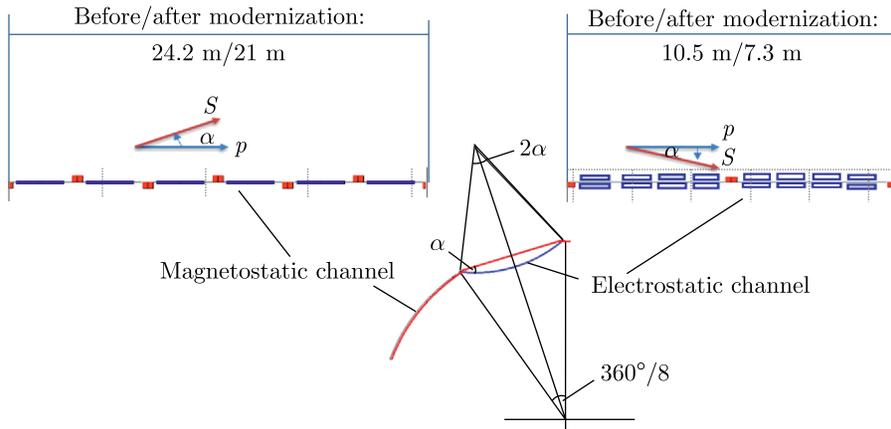


Рис. 5. Электростатическая вставка для компенсации поворота спина в магнитостатической арке

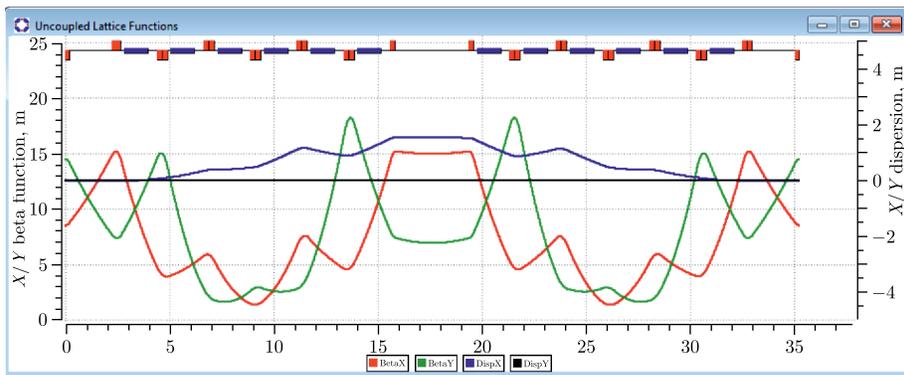


Рис. 6. TWISS-функции одного суперпериода модернизированного нуклотрона с 16 суперпериодами

сигнала ЭДМ для «квазизамороженной» структуры по сравнению с «замороженной» уменьшается $S_{\text{edm}}^{\text{QFS}}/S_{\text{edm}}^{\text{FS}} = 1 - \alpha^2/4 \approx 0,9996$ на величину 0,04 %, что делает ее практическим подобием последнего. Этот факт позволяет использовать данную структуру для исследования ЭДМ протона, поскольку угол поворота спина на магнитных арках становится лишь 30° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная предполагаемая модернизация структуры нуклотрона позволит адаптировать ее для проведения исследований электрического дипольного момента дейтрона. Следующим шагом оптимизации структуры нуклотрона для исследования ЭДМ дейтронного поляризованного пучка является переход к суперпериодичности в два раза больше: $N = 16$, что позволит «квазизамороженную» структуру приблизить по своим свойствам к «замороженной» за счет уменьшения угла α в два раза. Одновременно при таких углах для дейтронов можно рассматривать возможность исследования ЭДМ протона при более глубокой модернизации нуклотрона.

Мы благодарны Российскому научному фонду за поддержку данного исследования грантом 22-42-04419 (<https://rscf.ru/en/project/22-42-04419/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vasilishin B. V. et al.* JINR Preprint 9-86-512. Dubna, 1986.
2. *Senichev Yu. et al.* Quasi-Frozen Spin Method for EDM Deuteron Search // Proc. of Conf. "IPAC 2015", Richmond, VA, USA, 2015. P.213–215.
3. *Anastassopoulos D. et al.* AGS Proposal: Search for a Permanent Electric Dipole Moment of the Deuteron Nucleus at the $10^{-29} e \cdot \text{cm}$ Level. BNL Rep. 2008.

Получено 15 сентября 2023 г.