

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР

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

^а Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

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

^в Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

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

Рассматривается общая концепция устройства структуры накопительного кольца для исследования электрического дипольного момента (ЭДМ) протона и дейтрона. Показаны основные особенности структур с замороженным и квазизамороженным спином, предназначенных для подавления вращения спина под действием магнитного дипольного момента (МДМ). Для реализации приведенных методик определена зависимость полей в спин-компенсирующих элементах.

This work presents the general concept of a storage ring structure for the investigation of the electric dipole moment (EDM) of the proton and deuteron. The main features of frozen-spin and quasi-frozen-spin structures, designed to suppress spin rotation due to the magnetic dipole moment (MDM), are described. For the implementation of the proposed methods, the dependence of the fields in spin-compensating elements is determined.

PACS: 32.10.Dk

ВВЕДЕНИЕ

Одним из критериев Сахарова генерации преобладания вещества над антивеществом в пределах обозримой Вселенной является нарушение CP, и в силу CPT-теоремы, T-симметрии [1]. Стандартная электрослабая модель удовлетворяет этому критерию, но ее предсказание для барионной асимметрии на многие порядки ниже наблюдаемого, и требуется CP-несохранение вне Стандартной модели. Самой чувствительной к CP-несохранению вне Стандартной модели наблюдаемой характеристикой считается электрический дипольный момент элементарных частиц [2]. В качестве инструмента для измерения ЭДМ заряженных частиц выступает циклический ускоритель в режиме накопительного кольца.

¹E-mail: patri3@inbox.lv

Наблюдаемым сигналом ЭДМ является его воздействие на спиновую динамику частиц. Для компенсации фоновой к ЭДМ прецессии, возникающей вследствие наличия магнитного дипольного момента, применяются методы «замороженного» либо «квази-замороженного» спина. Оптимальность применения приведенных методик отличается для различных частиц. С целью определения принципиального вида структуры, совмещающей функцию измерения ЭДМ протона и дейтрона, было проведено сравнение существующих методик исследования с точки зрения их эффективности.

СПИНОВАЯ ДИНАМИКА

Согласно теореме Эренфеста, в квантовой механике средние значения координат и импульсов частицы, а также силы, действующей на нее, связаны между собой уравнениями, аналогичными соответствующим уравнениям классической механики. Для спина уравнение эволюции во внешних полях описывается уравнением Томаса–Баргмана–Мишеля–Телегди (Т-БМТ) [3]:

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

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

$$\mathbf{\Omega}_{\text{edm}} = -\frac{q\eta}{2m} \left(\boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} + \frac{\mathbf{E}}{c} - \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\boldsymbol{\beta}}{c} (\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{E}) \right), \quad G = \frac{g-2}{2},$$

где $\mathbf{\Omega}_{\text{mdm}}$, $\mathbf{\Omega}_{\text{edm}}$ — угловые скорости прецессии спин-вектора, вызванные МДМ и ЭДМ соответственно; q , m , G — заряд, масса и аномальный магнитный момент; $\boldsymbol{\beta}$ — нормализованная скорость; γ — лоренц-фактор; $d = \eta(q/2mc)s$ — ЭДМ-фактор; s — спин; $\eta \sim 10^{-15}$ — коэффициент пропорциональности между ЭДМ и спином.

При рассмотрении динамики спин-вектора относительно импульса различие между скоростью спиновой прецессии и скоростью орбитального вращения характеризуется спин-тюном, принимающим значения ν_s^B и ν_s^E для магнитного и электрического полей соответственно:

$$\nu_s^B = \gamma G, \quad (2)$$

$$\nu_s^E = \gamma\beta^2 \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) = \gamma G - \frac{G + 1}{\gamma}. \quad (3)$$

УСТРОЙСТВО СТРУКТУРЫ С «ЗАМОРОЖЕННЫМ» СПИНОМ

Метод «замороженного» спина (Frozen Spin — FS) предполагает создание условий непрерывной сонаправленности вектора импульса и горизонтальной проекции спин-вектора при обращении частицы по кольцу [4]. Измерение ЭДМ протона и дейтрона в режиме FS может быть осуществлено в пределах одной структуры.

Структура с замороженным спином для протона. Для реализации условия замороженного спина в случае протона необходимо применение чисто электростатической структуры при «магической» энергии эксперимента $E = 233$ МэВ, что меньше энергии $E = 270$ МэВ, соответствующей максимальной анализирующей способности

карбонового поляриметра для протона [5]. В качестве поворотных элементов рассматриваются цилиндрические электростатические дефлекторы, обладающие радиальным градиентом электрического поля $E(\rho) \sim 1/\rho$, где ρ — расстояние до центральной оси электродов. Суммарная длина поворотных элементов:

$$L_E = \frac{2\pi mc^2}{q} \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma E}, \quad (4)$$

где E — значение напряженности электрического поля в элементе для осевой частицы.

В качестве оценки величины технически реализуемого верхнего предела напряженности электрического поля цилиндрических дефлекторов принято значение $E = 7,0$ МВ/м [6]. В таком случае их эффективная суммарная длина для протона составит $L = 375$ м, что отображено на рис. 1.

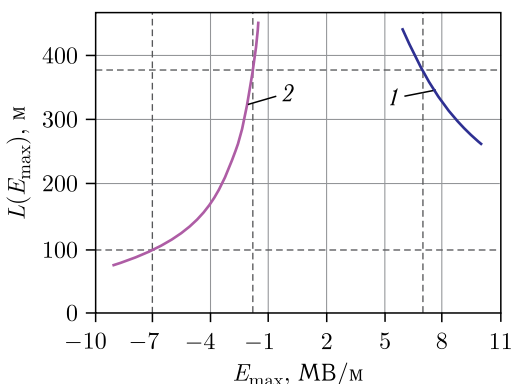


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Зависимость длины цилиндрических дефлекторов для структуры с замороженным спином от напряженности электрического поля при максимальной энергии эксперимента (синяя линия, 1 — электростатическое кольцо; малиновая линия, 2 — электромагнитное кольцо)

Преимущество чисто электростатической структуры кольца также заключается в совпадении полярности дефлекторов для встречных пучков.

Структура с замороженным спином для дейтрона. В силу отсутствия «магической» энергии для дейтрона его исследование в режиме FS, в отличие от протона, требует применения совмещенного электрического и магнитного полей, связанных соотношением [7]:

$$B_y = \frac{E_x(1 - (\gamma^2 - 1)G)}{Gc\gamma\sqrt{\gamma^2 - 1}}. \quad (5)$$

Для длины цилиндрических элементов с комбинированными полями (или $E + B$ элементов) выполняется выражение

$$L_{E+B} = \frac{2\pi mc^2}{q} \frac{G\beta^2\gamma^3}{E(G+1)} = L_E \frac{G\gamma^2}{G+1}. \quad (6)$$

Переход к измерению ЭДМ дейтрона при максимальной энергии $E = 135$ МэВ/нуклон [8] в рассмотренном ранее электростатическом кольце требует

уменьшения модуля напряженности электрического поля и добавления однородного магнитного поля.

Структура с замороженным спином для протона и дейтрона. Для измерения ЭДМ обеих частиц в пределах одного кольца необходимы цилиндрические элементы с комбинированными полями, обладающие свойством независимой настройки напряженностей электрического и магнитного полей.

На рис. 1 изображена зависимость суммарной длины цилиндрических элементов от максимальной напряженности поля для двух различных случаев: чисто электростатического кольца для протона и электромагнитного для дейтрона. Различие знаков напряженности электрического поля означает необходимость в смене полярности для частиц разного типа. Согласно рис. 1 наименьшая длина цилиндрических дефлекторов с максимальным полем = 7,0 МВ/м, достаточная для измерения ЭДМ дейтрона при максимальной энергии $E = 135$ МэВ/нуклон, составляет $L = 96$ м, что соответствует относительно компактному устройству кольца. Согласно (6) измерение ЭДМ протона в компактной структуре требует снижения энергии эксперимента до $E = 75$ МэВ. Данное значение отличается от «магического», приводит к падению эффективности поляриметра и необходимости применения совмещенных полей. Основные параметры структур с замороженным спином приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры структур с замороженным спином

Параметр	FS		FS _{смп}	
	p	d	p	d
E , МэВ	233	270	75	270
γ	1,250	1,144	1,08	1,144
E_{E+B} , МВ/м	7	-1,78	7	-7
B_{E+B} , Тл	0	0,069	0,020	0,274
Длина $E + B$, м	375		95	

В структурах с совмещенными полями в каналах движения необходимо применение магнитных полей противоположной полярности, что требует их независимой настройки в прямом и обратном направлении.

Определение направляющих полей в замороженной структуре. Действие электрического и магнитного поля $E + B$ элементов на спиновую и орбитальную динамику исследуемых частиц различно. При соблюдении ортогональности направлений вектора импульса и внешних полей для отношения угловых скоростей вращения импульса в магнитном Ω_p^B и электрическом Ω_p^E поле справедливо выражение

$$\lambda = \frac{|\Omega_p^B|}{|\Omega_p^E|} = \frac{G + 1}{G\gamma^2} - 1. \quad (7)$$

Отношение угловых скоростей прецессии под действием МДМ в магнитном Ω_{mdm}^B и электрическом Ω_{mdm}^E поле:

$$\Lambda_{E+B} = \frac{|\Omega_{\text{mdm}}^B|}{|\Omega_{\text{mdm}}^E|} = \lambda \frac{\gamma G + 1}{\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1}\right) \beta^2} = \frac{G + 1}{\gamma G(\gamma - 1)(G(\gamma + 1) + 1)} - 1. \quad (8)$$

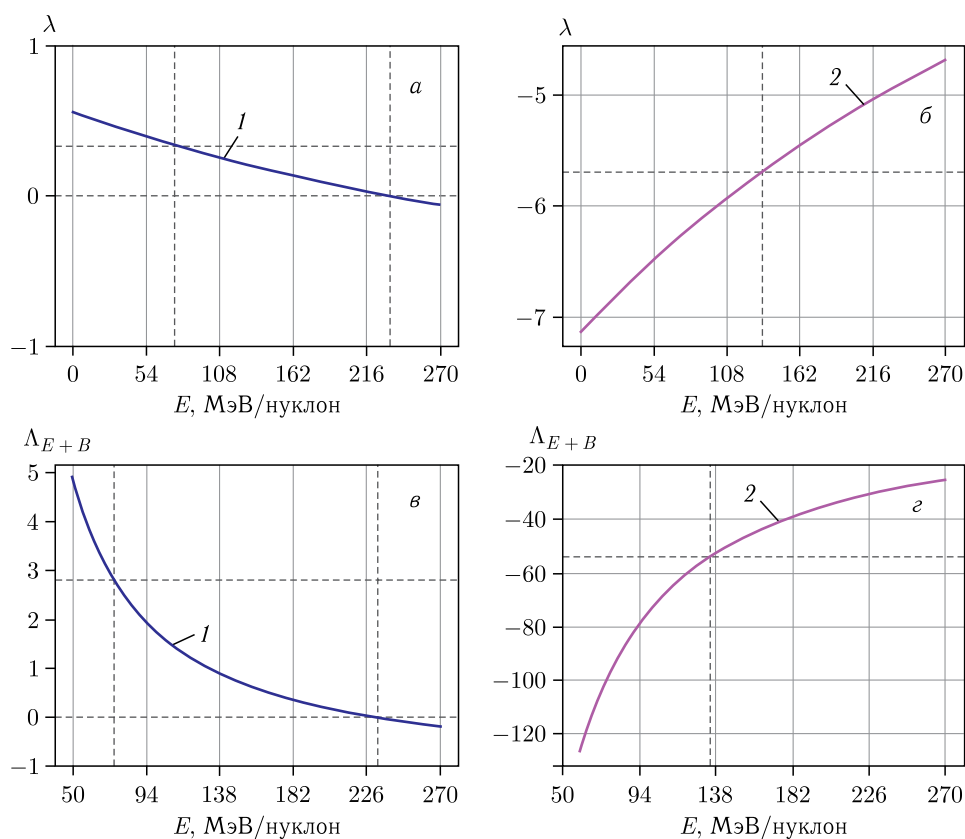


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Сравнение угловых скоростей в магнитном и электрическом поле $E + B$ элемента орбитального вращения (а, б), спиновой прецессии (в, г) (синяя линия, 1 — протон; малиновая линия, 2 — дейтрон)

Из рис. 2, а следует, что $0 < |\lambda| < 1$: электрическое поле является направляющим для импульса протона в рассматриваемом диапазоне энергий. Из рис. 2, б следует, что в случае дейтрона $|\lambda| > 1$ и $\lambda < 0$ импульс подается магнитным полем противонаправленно повороту в электрическом поле в рассматриваемом диапазоне энергий.

Из рис. 2, в следует, что при энергии, равной 75 МэВ, $|\Lambda_{E+B}| > 1$, $\Lambda_{E+B} > 0$, магнитное поле является направляющим для спин-вектора протона. Из рис. 2, г следует, что в случае дейтрона $|\Lambda_{E+B}| \gg 1$, $\Lambda_{E+B} < 0$ вращение спин-вектора осуществляется главным образом за счет магнитного поля противонаправленно вращению в электрическом.

На рис. 2, а, в показана смена знака λ и Λ_{E+B} при пересечении магической энергии $E_{\text{mag}} = 233$ МэВ. Таким образом, при $E > E_{\text{mag}}$ вращение как вектора импульса, так и спин-вектора протона в магнитном поле становится противоположным по направлению вращению в электрическом.

Влияние нелинейности поля дефлекторов. Вследствие бетатронных колебаний частицы осциллируют относительно референсной орбиты, что приводит к возникно-

вению нелинейного воздействия поля электростатических deflectоров [9]:

$$E(x) = \frac{\kappa}{\rho + x} = \frac{E_0}{1 + \frac{x}{\rho}} = E_0 \left(1 - \frac{x}{\rho} + \left(\frac{x}{\rho}\right)^2 - \left(\frac{x}{\rho}\right)^3 + \dots \right), \quad (9)$$

где κ — электрическая жесткость; ρ — радиус кривизны референсной орбиты; E_0 — референсное значение напряженности поля; x — радиальное смещение относительно референсной орбиты, $x \ll \rho$. Поле электростатического deflectора с меньшим радиусом кривизны обладает большей восприимчивостью к радиальным отклонениям частиц в силу возрастания вклада ненулевых порядков в напряженность. Влияние нелинейности поля электростатических deflectоров является наиболее существенным как для спиновой, так и орбитальной динамики частиц в случае компактного кольца.

УСТРОЙСТВО СТРУКТУРЫ С «КВАЗИЗАМОРОЖЕННЫМ» СПИНОМ

Метод «квализамороженного» спина (Quasi-Frozen Spin — QFS) предполагает периодическое восстановление сонаправленности спин-вектора и вектора импульса с помощью компенсирующих элементов, позволяя адаптировать чисто магнитные установки для экспериментов по измерению ЭДМ заряженных частиц [10]. Прямые фильтры Вина (ВФ) являются наиболее оптимальными компенсирующими элементами для применения в структуре с квазизамороженным спином.

Свойства прямого фильтра Вина. Устройство прямого фильтра Вина предполагает создание скрещенных магнитного и электрического полей. Настройка напряженностей позволяет устранить действие силы Лоренца, исключая искажение орбиты. Изготовление прямых электродов значительно проще в сравнении с цилиндрическими deflectорами и позволяет достичь большего значения напряжения $E = 13$ МВ/м. Кроме того, позволяет избежать нелинейности орбитального движения, возникающего в элементах $E + B$ с ненулевой кривизной в FS. Различие влияния полей ВФ

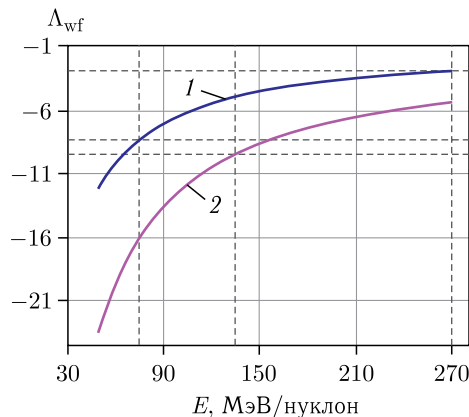


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Сравнение угловой скорости спиновой прецессии в магнитном и электрическом поле фильтра Вина для частиц разного сорта (синяя линия, 1 — протон; малиновая линия, 2 — дейтрон)

на динамику спин-вектора определяется отношением угловых скоростей МДМ прецессии:

$$\Lambda_{wf} = \frac{|\Omega_{mdm}^B|}{|\Omega_{mdm}^E|} = \frac{\gamma G + 1}{-\left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1}\right) \beta^2} = \frac{\gamma(\gamma G + 1)}{(1 - \gamma)(G(\gamma + 1) + 1)}. \quad (10)$$

Из рис. 3 следует, что в случае ВФ $|\Lambda_{wf}| > 1$, $\Lambda_{wf} < 0$ в рассматриваемом диапазоне энергий: магнитное поле является направляющим при компенсации набега фазы спин-вектора как для протона, так и для дейтрона; направление вращения спин-вектора магнитным и электрическим полем противоположно.

Влияние периодичности установки на сигнал ЭДМ. Превышение угла поворота спин-вектора Φ_s с продольной поляризацией относительно угла поворота импульса Φ_p во внешнем поле более чем на $\pi/2$ приводит к потере накопленного ЭДМ-сигнала:

$$\Phi_s = \nu_s \Phi_p \leq \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

Минимальное число периодов структуры QFS зависит от сорта частицы и энергии эксперимента:

$$N_{\min} \geq \frac{2\pi}{p} \geq 4\gamma|G|. \quad (12)$$

Таким образом, наименьшая периодичность структуры для исследования ЭДМ протона без потери сигнала составляет $N_{\min} = 8$, что соответствует энергии $E_{\min} = 114$ МэВ, в то время как для дейтрона сохранение накопленного сигнала ЭДМ происходит при любом числе периодов установки.

Наличие колебаний спин-вектора вокруг продольной оси в QFS приводит к замедлению роста ЭДМ-сигнала относительно структуры с замороженным спином, что определяется выражением

$$J_0 = 1 - \frac{\Phi_s^2}{4} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi\gamma G}{N} \right)^2, \quad (13)$$

где J_0 — фактор, на который уменьшается максимальная амплитуда ЭДМ-сигнала; Φ_s — максимальный угол отклонения спин-вектора от продольного направления.

Из рис. 4 следует, что периодичность структуры QFS оказывает значительное влияние на фактор J_0 для протона. Уменьшение энергии эксперимента приближает структуру QFS к FS, но приводит к значительному снижению анализирующей способности

Таблица 2. Основные параметры структур с квазизамороженным спином

Параметр	QFS		QFS _{cmp}	
	p	d	p	d
E , МэВ	270		73	270
γ	1,289	1,144	1,078	1,143
E_{WF} , МВ/м	13	-2.68	13	-13
B_{WF} , Тл	-0,068	0,014	-0,068	0,068
Длина ВФ, м	250		52	
J_0 ($N = 8$)	0,179	0,996	0,433	0,996
J_0 ($N = 16$)	0,795	0,999	0,858	0,999

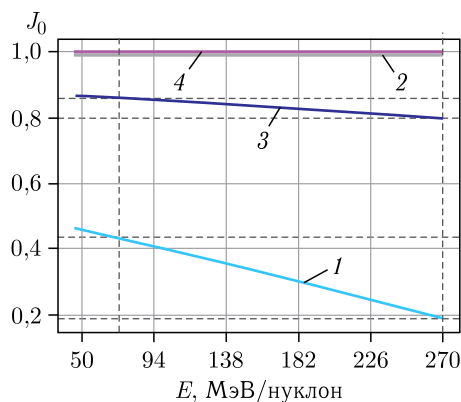


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Зависимость фактора роста ЭДМ-сигнала частиц от энергии эксперимента при различной периодичности структуры ($N = 8$: бирюзовая линия, 1 — протон, серая линия, 2 — дейтрон; $N = 16$: синяя линия, 3 — протон, малиновая линия, 4 — дейтрон)

поляриметра. Увеличение числа периодов до $N_{\max} = 16$ повышает значения фактора J_0 , но не позволяет в достаточной степени приблизить структуру к идеальной. В случае дейтрона $J_0 \approx 1$ при $\forall N$ и структура QFS обладает минимальным отличием от структуры FS по параметру скорости приращения сигнала ЭДМ. Основные параметры структур с квазизамороженным спином приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе структуры как с замороженным, так и квазизамороженным спином позволяют изучать ЭДМ и протона, и дейтрона.

Для изучения ЭДМ протона наиболее интересна замороженная структура на магической энергии. Однако длина такой установки становится значительной, а кроме того, требует использования цилиндрических элементов. Для исследования ЭДМ дейтрона в замороженной структуре необходимо применение и магнитного поля, а также возможность смены полярности электрического поля. Изучение ЭДМ протона при меньшей энергии возможно в компактной структуре, оптимизированной для измерения ЭДМ дейтрона на энергии 270 МэВ.

Метод квазизамороженного спина может быть применен в уже существующих установках. Компенсация спина осуществляется последовательно с использованием прямого фильтра Вина. В отличие от цилиндрических дефлекторов ВФ характеризуется относительной технологической простотой, а также отсутствием нелинейности электростатического поля. Эффективность накопления ЭДМ-сигнала зависит от периодичности структуры, что наиболее значимо в случае протона. Тем не менее метод квазизамороженного спина позволяет отработать методику измерения ЭДМ и для протона.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sakharov A. D.* Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe // JETP Lett. 1967. V. 5, No. 1. P. 24–27; doi: 10.1070/PU1991v034n05ABEH002497.
2. *Khriplovich I. B., Lamoreaux S. K.* CP Violation without Strangeness: Electric Dipole Moments of Particles, Atoms, and Molecules. Berlin: Springer, 1997; doi: 10.1007/978-3-642-60838-4.
3. *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; doi: 10.1103/PhysRevLett.2.435.
4. *Anastassopoulos V., Babusci D., Bachtis D. et al.* A Storage Ring Experiment to Detect a Proton Electric Dipole Moment // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 115116; doi: 10.1063/1.4967465.
5. *McNaughton M. W. et al.* The p -C Analyzing Power between 100 MeV and 750 MeV // Nucl. Instr. Meth. A. 1985. V. 241. P. 435–440; doi: 10.1016/0168-9002(85)90595-9.
6. *Abusaiif F. et al. (CPEDM Collab.).* Storage Ring to Search for Electric Dipole Moments of Charged Particles: Feasibility Study // CERN Yellow Reports: Monogr. 2021. V. 3. P. 246; CERN-2021-003; doi: 10.23731/CYRM-2021-003.
7. *Anastassopoulos D., Anastassopoulos V., Babusci D. et al.* AGS Proposal: Search for a Permanent Electric Dipole Moment of the Deuteron Nucleus at the 10^{-29} e · cm Level. Tech. Rep. BNL, 2008.
8. *Müller F. et al.* Measurement of Deuteron–Carbon Vector Analyzing Powers in the Kinetic Energy Range 170–380 MeV // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 58. P. 211; doi: 10.1140/epja/s10050-020-00215.
9. *Valetov E., Berz M.* Derivation of Analytic Formulas for Electrostatic Deflector Aberrations, and Comparison with the Code COSY INFINITY. MSU Rep. MSUHEP 180212. Michigan State Univ., East Lansing, MI. Feb. 12, 2018.
10. *Senichev Y., Lehrach A., Lorentz B., Maier R., Andrianov S., Ivanov A., Chekmenev S., Berz M., Valetov E.* Quasi-Frozen Spin Method for EDM Deuteron Search // Proc. IPAC 2015, Richmond, VA, USA, 2015. P. 213; doi: 10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA044.

Получено 5 ноября 2025 г.