

На правах рукописи

ВЕЖЛЕВ Егор Олегович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ ПРИ УГЛАХ
БРЭГГА, БЛИЗКИХ К $\pi/2$**

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Федоров Валерий Васильевич

Официальные оппоненты: **Франк Александр Ильич**
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник "Объединенного
института ядерных исследований"

Черненков Юрий Петрович
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, заведующий лабораторией ФГБУ
"Петербургский институт ядерной физики"

Ведущая организация: ФГБУ "Государственный Научный Центр
Российской Федерации Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики"

Защита состоится 18 декабря 2013 г. в 13 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, ауд. 118 главного учебного корпуса.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан "___" ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

Ермакова Наталья Юрьевна

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Актуальность данной работы заключается в формировании и развитии нового направления исследований дифракционных явлений и их применения к изучению свойств ядерной материи и симметрий фундаментальных взаимодействий. Исследованные в работе дифракционные явления лежат в основе нового метода исследования малых воздействий на нейtron [1], который будет применен для изучения гравитационных свойств нейтрона и, в частности, проверки слабого принципа эквивалентности для нейтрона [2]. Стоит отметить, что природа гравитационного взаимодействия, несмотря на его широкую распространенность и присутствие во всех процессах связанных с жизнедеятельностью человека, остается одной из наименее изученных. Кроме этого, представляет определенную проблему формулировка слабого принципа эквивалентности Эйнштейна для квантовомеханических объектов, которым и является нейтрон. Поэтому, несмотря на то, что эквивалентность инертной и гравитационной масс для макроскопических объектов проверена экспериментально с колossalной точностью, проверка слабого принципа эквивалентности в квантовомеханическом пределе представляет собой отдельную и весьма важную задачу.

Работа поддержана в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009 – 2013 годы.

Основной целью данной работы является развитие принципиально нового метода изучения фундаментальных свойств нейтрона, основанными на дифракции в совершенном кристалле. В частности, проведено исследование дифракции нейтронов по Лауз при углах Брэгга, близких к $\pi/2$, целью которого является улучшение точности предложенного недавно эксперимента по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона дифракционным методом, и превышение лучшего достигнутого к настоящему времени значения для точности в определении отношения инертной и гравитационной масс нейтрона как минимум в десять раз.

Научная новизна. Впервые была исследована дифракция нейтронов в высоко совершенном монокристалле кремния с характерным размером 220 мм при углах Брэгга, близких к $\pi/2$. Показано, что теоретические предсказания динамической дифракции хорошо согласуются с экспериментальными данными и для нейтронов, в частности, наблюдается аномальное прохождение (эффект Бормана) даже при таких больших эффективных толщинах рабочего кристалла. Эти данные позволили развить принципиально новый дифракционный метод исследования малых (по порядку величины много меньших силы гравитационного

взаимодействия нейтрона с Землей) сил на дифрагирующий нейtron, обладающий беспрецедентной чувствительностью.

Достоверность результатов контролировалась путем сравнения с имеющимися экспериментальными данными в данной области исследований.

Научно-практическая ценность. Результаты, полученные в работе, будут использованы для предлагаемого эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона кристалл-дифракционным методом. В эксперименте предполагается достичь точности в определении эквивалентности инертной и гравитационной масс $\sigma(m_i/m_g) \sim 10^{-5}$, которая приблизительно на порядок выше достигнутой к настоящему времени. Эквивалентность инертной и гравитационных масс является основой общей теории относительности. И если для макроскопических объектов эквивалентность инертной и гравитационной масс проверена с очень высокой точностью на уровне $\sim 10^{-12}$ [3, 4], то для элементарных частиц эта величина лучше всего измерена для нейтрона и точность в ее определении составляет всего $\approx 1,7 \cdot 10^{-4}$ [5].

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые проведены исследования динамической дифракции нейтронов по Лауэ в однокристальной и двухкристальной геометриях эксперимента в большом ($L = 220$ мм) высоко совершенном монокристалле кремния на плоскости отражения (220) при углах Брэгга, близких к $\pi/2$. Показано, что для дифрагирующих нейтронов наблюдается сильный ядерный эффект аномального прохождения (эффект Бормана).
2. Создана кристалл-дифракционная установка, обладающая высокой чувствительностью к внешнему воздействию на дифрагирующий по Лауэ нейtron. Экспериментальное значение разрешения такой установки составило $\approx 4 \cdot 10^{-11}$ эВ/см при угле дифракции 78^0 . При этом для имеющихся в мире высокоинтенсивных пучков холодных нейтронов разрешение такой установки может достичь $\cong 10^{-13}$ эВ/см.
3. Сверхвысокое разрешение двухкристальной установки позволит провести принципиально новый эксперимент по проверке слабого принципа эквивалентности Эйнштейна для нейтрона. При этом точность в определении эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона достигнет величины $\sigma(m_i/m_G) \sim 10^{-5}$, что более чем на порядок превосходит современное значение для данной физической величины.
4. Проведен анализ возможных систематических эффектов, возникающих в предлагаемой схеме эксперимента. В частности, расчетаны неинерци-

альные силы, действующие на нейtron в лабораторной системе координат. Были проанализированы все возможные внешние факторы, влияющие на ее чувствительность к изменению искомой внешней силы. Показано, что имеющееся в наличии экспериментальное оборудование позволит контролировать воздействия внешних факторов на необходимом уровне и чувствительность экспериментальной установки составит $\sigma(F_{ext}) \approx 5 \cdot 10^{-18}$ эВ/см за сто дней накопления статистики на существующем современном источнике холодных нейтронов.

Личное участие автора. При участии автора диссертационной работы были поставлены и сформулированы цели и задачи исследования. Автор является непосредственным исполнителем экспериментальных исследований динамической дифракции нейтронов по Лауз в монокристаллах кремния, автор также лично осуществлял физический анализ полученных экспериментальных данных и их интерпретацию в рамках теории динамической дифракции. При участии автора был проведен анализ систематических эффектов, возникающих в предлагаемом эксперименте по проверке слабого принципа эквивалентности. Вклад автора в научные работы, которые были опубликованы по теме диссертации, является определяющим.

Апробация работы. Результаты были представлены на различных международных конференциях: XXI и XXII совещания по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния РНИКС 2010, 2012; 2nd International workshop on the Physics fundamental symmetries and interactions PSI, Switzerland, 2010; Международная научно-практическая конференция XXXIX НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ, 2010; Конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика СПб» 2010, 2011; Сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН, Москва, ИТЭФ, 2011; Конференция «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях», Димитровоград, 2011; XIX, XX, XXI Международный семинар по взаимодействию нейтронов с ядрами – Дубна, ОИЯИ, 2011, 2012, 2013; International Conference on Neutron Scattering, Edinburgh, UK, 2013.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех основных глав, заключения и списка литературы (страниц - 101, рисунков - 33).

Во введении обоснована актуальность темы проведенного исследования, сформулированы цели диссертации. Показана научная новизна и практическая ценность результатов диссертационной работы. Сформулированы основные по-

ложении, выносимые на защиту. Дано краткое изложение содержания её разделов.

В первой главе приведен краткий обзор кристалл-дифракционных методов исследования фундаментальных свойств нейтрона, кратко изложена история развития таких методов в Петербургском институте ядерной физики. Отмечено, что целью работы является исследование особенностей дифракции нейtronов в больших высоко совершенных монокристаллах и изучение возникающих специфических нейтронооптических эффектов, таких как дифракционное усиление малых воздействий на дифрагирующий нейtron, эффект „замедления“ нейтрона в кристалле, при близких к прямому углах дифракции, и эффект аномального прохождения нейtronов (эффект Бормана). Приведен обзор основополагающих работ, в которых наблюдались подобные эффекты при дифракции нейtronов ранее. Также рассмотрена история исследований гравитационных свойств нейтрона и, в частности, эксперименты по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона.

Вторая глава посвящена новому кристалл-дифракционному методу исследования малых воздействий на дифрагирующий нейtron. Метод основан на эффектах, возникающих при динамической дифракции нейtronов по Лауэ, при близких к прямому углах Брэгга. Описание теории динамической дифракции нейtronов можно найти, например в [6]. Рассмотрим процесс дифракции по Лауэ в совершенном кристалле на системе кристаллографических плоскостей, определяемых вектором обратной решетки \mathbf{g} . В силу периодичности потенциала взаимодействия можно провести его разложение по векторам обратной решетки, т.е. представить в виде фурье – гармоник [7]

$$V(\mathbf{r}) = \sum_g V_g \exp(i\mathbf{gr}) = V_0 + \sum_g 2v_g \cos(\mathbf{gr}), \quad (1)$$

где учтено, что в силу вещественности ядерного потенциала $V_g = V_{-g}^*$, а начало координат совпадает с максимумом потенциала. При решении дифракционной задачи при точном выполнении условия Брэгга решение волнового уравнения Шредингера внутри кристалла (с потенциалом данной системы кристаллографических плоскостей \mathbf{g}) ищется в виде суперпозиции двух собственных состояний для прямого пучка, распространяющегося в направлении вектора $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k}$, и для отраженного, распространяющегося в направлении вектора $\mathbf{k}_g = \mathbf{k} + \mathbf{g}$ (см. Рис. 1):

$$\psi = a_0 |\mathbf{k}\rangle + a_g |\mathbf{k} + \mathbf{g}\rangle \quad (2)$$

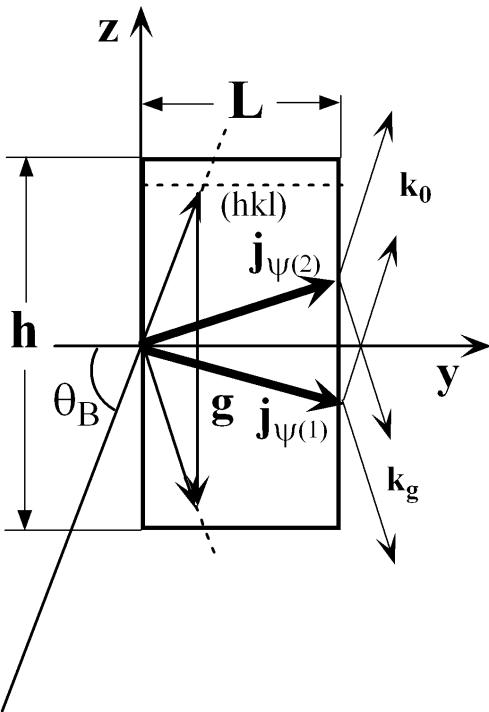


Рис. 1. Симметричный случай дифракции по Лауэ в ограниченном кристалле. $\mathbf{j}_{\psi(1)}$ и $\mathbf{j}_{\psi(2)}$ – направления распространения плотности потока нейтронов („траектории Като“) для двух типов блоховских волн [1]

Обычно при дифракции в совершенных кристаллах достаточно рассматривать процесс в таком двухволновом приближении динамической дифракции. Вкладом других волн, отраженных отличными от выбранной кристаллографическими плоскостями можно пренебречь в силу малости угловых Брэгговских ширин. В этом приближении волновая функция (2) представляет собой суперпозицию двух волн $\psi^{(1)}$ и $\psi^{(2)}$ с разными значениями волновых векторов $\mathbf{k}^{(1)}$ и $\mathbf{k}^{(2)}$, отвечающих разным ветвям дисперсионной поверхности.

При точном выполнении условия Брэгга нейтроны в состоянии $\psi^{(1)}$ сконцентрированы преимущественно на максимумах ядерного потенциала [7]:

$$|\psi^{(1)}|^2 = 1 + \cos(\mathbf{gr}), \quad (3)$$

а в состоянии $\psi^{(2)}$ между ними (см. рис. 2):

$$|\psi^{(2)}|^2 = 1 - \cos(\mathbf{gr}). \quad (4)$$

Это обстоятельство приводит к тому, что нейтроны в состоянии $\psi^{(2)}$ будут поглощаться слабее нейтронов, находящихся в состоянии $\psi^{(1)}$. Учет поглощения осуществляется введением мнимой части в потенциал взаимодействия нейтрона с кристаллом $V(\mathbf{r}) + iV'(\mathbf{r})$. Следует отметить, что мы рассматриваем случай когда $V(\mathbf{r}) \gg V'(\mathbf{r})$, т.е. пренебрегаем сдвигом фазы нейtronной волны за счет

наличия поглощения. Тогда минимую часть также можно представить в виде фурье-разложения по векторам обратной решетки с соответствующими гармониками разложения v_0' и v_g' . Волновые функции нейтрона в кристалле с учетом поглощения можно записать в следующем виде:

$$\phi^{(1,2)} = \psi^{(1,2)} \cdot \exp\left[-\frac{v_o' L}{\hbar v_{\parallel}}\left(1 \pm \frac{v_g'}{v_0'}\right)\right], \quad (5)$$

где v_0' – средняя величина поглощающей части потенциала, а v_g' – амплитуда g-гармоники этой части потенциала; L – толщина кристалла, $v_{\parallel} = v \cos \theta_B$ – компонента скорости нейтрона параллельная кристаллографическим плоскостям, а знак \pm – отвечает разным типам блоховских волн. Удобно ввести величину коэффициента поглощения $\mu_0 = 2v'/\hbar v$ и определить безразмерный параметр $\varepsilon_g = v_g'/v_0'$, с помощью которого можно характеризовать величину эффекта Бормана для данной системы кристаллографических плоскостей.

При точном выполнении условия Брэгга амплитуды блоховских волн с учетом поглощения будут иметь следующий вид

$$|a_0^{(1,2)}| = |a_g^{(1,2)}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{\mu_0 L_{eff}}{2}(1 \pm \varepsilon_g)\right). \quad (6)$$

где $L_{eff} = L / \cos \theta_B$ – эффективная толщина кристалла.

Из приведенного рассмотрения следует, что различие в поглощении двух волн определяется величиной ε_g , которая лежит в пределах $0 < \varepsilon_g < 1$. В частности, существуют кристаллографические плоскости для которых структурный фактор отражения тождественно равен единице и тогда возникает ситуация, когда $\varepsilon_g \rightarrow 1$ и отличие ε_g от единицы обусловлено исключительно тепловыми колебаниями атомов (фактором Дебая). В этом случае одна из волн, возбуждаемых в кристалле, имеет практически нулевое поглощение, что позволяет исследовать дифракцию в очень больших монокристаллах при углах дифракции близких к $\pi/2$, т.е. $\cos \theta_B \rightarrow 0$ и $L_{eff} \rightarrow \infty$.

Дифракцию нейтронов по Лауз в деформированном монокристалле можно описать с помощью эйкональной теории Като [8]. В рамках этой теории вводится так называемая "сила Като" f_k , под действием которой изменяется направление плотности потока нейтронов в кристалле, т.е. происходит некоторое искривление первоначальной траектории. Для плотности потока нейтронов внутри кристалла тогда можно записать следующее уравнение

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \pm \frac{c}{m_0} f_k(y, z), \quad (7)$$

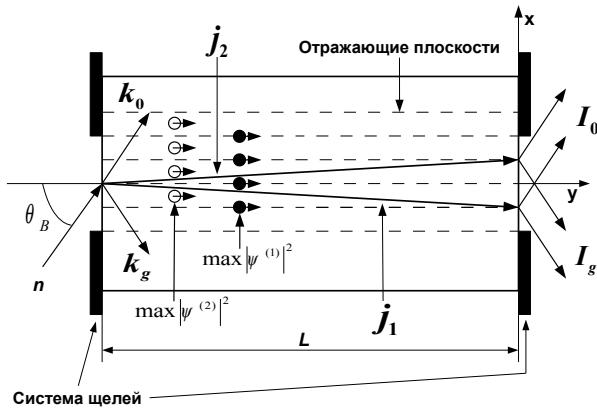


Рис. 2. Однокристальная схема дифракции по Лауэ. На входной и выходной гранях кристалла расположены коллимирующие щели. \mathbf{j}_1 и \mathbf{j}_2 – направления распространения плотности потока нейтронов для разных типов блоховских волн [9]

где $m_0 \equiv 2F_g d/V$ – так называемая „масса Като“, V – объем элементарной ячейки кристалла, F_g – структурный фактор отражения нейтронов. Знак \pm в уравнении (7) соответствует двум различным типам блоховских волн $\psi^{(1)}$ и $\psi^{(2)}$.

В уравнении (7) „сила Като“ зависит от пространственных координат Z и Y (см. рис. 1). Можно показать, что при помещении недеформированного кристалла в некоторое потенциальное поле, действующее на нейtron в направлении вектора обратной решетки \mathbf{g} , мы получим ненулевое значение эффективной „силы Като“, то есть для дифрагирующего нейтрана также появится небольшое искривление траектории как и при дифракции в деформированном кристалле [10].

Можно показать, что при действии внешней силы \mathbf{F}_{ext} вдоль вектора обратной решетки \mathbf{g} (оси Z , см. рис. 1) уравнение траектории нейтрана в кристалле будет иметь вид

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \pm \frac{c^2 g}{2m_0} \frac{F_{\text{ext}}}{2E_n}, \quad (8)$$

а уравнение траектории нейтрана в пустом пространстве под действием той же силы запишется как

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{F_{\text{ext}}}{2E_n}. \quad (9)$$

Сравнив эти уравнения, нетрудно заметить, что они отличаются фактором усиления:

$$K_e = \pm \frac{c^2 g}{2m_0}, \quad (10)$$

который зависит от угла дифракции как $\operatorname{tg}^2 \theta_B$.

Как было отмечено в работе [1] величина этого фактора достигает 10^9 при близких к $\pi/2$ углах Брэгга. Такая величина есть совокупность хорошо известного фактора дифракционного усиления и эффекта „замедления“ дифрагирующего по Лауэ нейтрана при углах Брэгга, близких к $\pi/2$. Эффект дифракционного усиления заключается в том, что при малом изменении направления движения падающей частицы (или гамма-кванта) в пределах брэгговской ширины направление движения частицы внутри кристалла изменяется на угол Брэгга. Этот эффект детально исследовался Като, который построил теорию дифракции рентгеновских лучей в слабодеформированных кристаллах [8]. Для нейтронов данный эффект был экспериментально обнаружен в работе [11]. Также недавно было экспериментально доказано существование дополнительного усиления эффектов воздействия на нейtron в кристалле. Оно связано с предсказанным [12] и экспериментально обнаруженным [13] эффектом „замедления“ нейтрана в кристалле при дифракции по Лауэ при углах Брэгга, близких к $\pi/2$. Суть эффекта заключается в том, что скорость распространения дифрагирующего по Лауэ нейтрана (или электрона) в кристалле определяется проекцией вектора скорости на кристаллографическую плоскость отражения и, поэтому, очевидно, что при увеличении угла Брэгга, эта проекция будет уменьшаться по абсолютной величине. На это явление было обращено внимание впервые именно при дифракции электронов, см., например, [14].

Идея нового кристалл-дифракционного метода исследования малых воздействий на нейtron заключается в следующем. При дифракции в двухкристальной схеме (см. рис. 3) действие внешней возмущающей силы вдоль вектора обратной решетки \mathbf{g} приводит к смещению нейтронного пучка на выходной грани второго кристалла на величину [2, 15]

$$\Delta_F^1(1, 2) = \pm \frac{\pi c^2 L^2}{m_0 d E_n} F_n \equiv \pm \Delta_F^1, \quad (11)$$

где знак \pm отвечает двум различным типам блоховских волн.

Разрешение такой системы к внешней силе, т.е. величина силы, при которой смещение пучка равно размеру щели на выходной поверхности равна

$$W_F = \frac{m_0 d E_n}{\pi c^2 L^2} \delta_s, \quad (12)$$

где δ_s – ширина коллимирующей щели. Предварительные оценки [1, 15] показывают, что для имеющегося в наличии монокристалла кремния разрешение установки к внешней силе может достигать $W_f \cong 10^{-13}$ эВ/см.

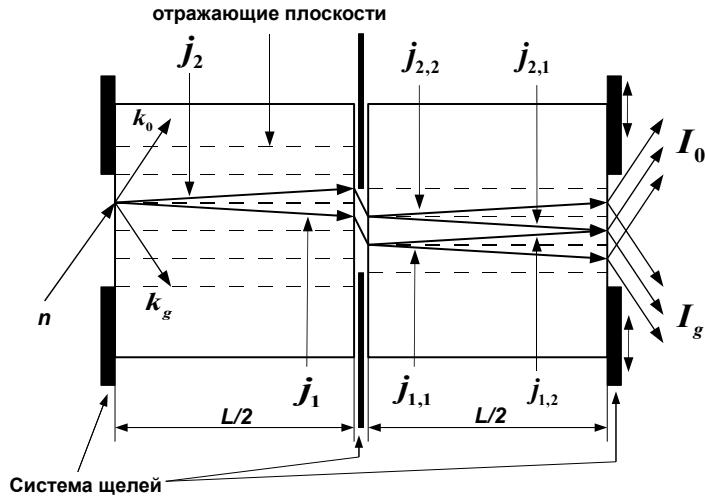


Рис. 3. Двухкристальная схема дифракции по Лауэ. На входных и выходных гранях кристаллов расположены коллимирующие щели. j_1 и j_2 – направления распространения плотности потока нейтронов для разных типов блоховских волн в первом кристалле; $j_{i \rightarrow j}$ ($i, j = 1, 2$) – направления распространения плотности потока нейтронов для разных типов блоховских волн во втором кристалле [9]

Из (12) видно, что разрешение установки зависит от толщины рабочего кристалла L и величины $c^2 = \operatorname{tg}^2(\theta_B)$, т.е. от параметров, определяющих так называемую „эффективную“ толщину кристалла. В то же время, прохождение нейтронов через большую „эффективную“ толщину возможно только благодаря описанному выше ядерному эффекту аномального прохождения (эффекту Бормана). Экспериментальное исследование данного эффекта являлось одной из главных задач данной работы.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию особенностей динамической дифракции нейтронов по Лауэ при углах Брэгга, близких к $\pi/2$ в большом ($L = 220\text{мм}$) монокристалле кремния [9, 16]. Также рассмотрены результаты экспериментальной оценки разрешения кристалл-дифракционной установки во внешней силе с имеющимся монокристаллом кремния [17].

Эксперимент проводился на втором горизонтальном пучке реактора ВВР-М (ПИЯФ, Гатчина). Исследовалась дифракция нейтронов по Лауэ при углах Брэгга, близких к $\pi/2$, на системе кристаллографических плоскостей (220) (межплоскостное расстояние $d = 1,92 \cdot 10^{-8} \text{ см}$) монокристалла кремния размерами $\varnothing 150 \times 220 \text{ мм}^3$. Монокристалл имеет поперечный разрез на половине толщины для возможности проведения исследований в двухкристальной схеме (рис.4).

Коллимация нейтронного пучка осуществляется двумя щелями на входной поверхности и в разрезе кристалла, а подвижная щель, расположенная на выходной грани, дает возможность сканировать пространственное смещение пуч-



Рис. 4. Рабочий кристалл кремния. Размеры $\varnothing 150 \times 220$ мм³. На половине толщины сделан поперечный разрез для возможности исследования дифракции в двухкристальной схеме.

ка (рис.3), что планируется использовать для эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона [2]. Из рис.3 видно, что волны $\psi^{(1\rightarrow 2)}$ и $\psi^{(2\rightarrow 1)}$ фокусируются на выходной грани кристалла. Другими словами, половина интенсивности продифрагировавшего пучка, фокусируясь, дает изображение щели, поставленной на входной грани кристалла. Такое явление называют эффектом дифракционной фокусировки [18, 19]. Рабочий кристалл был заключен в термостат для минимизации эффекта деформации кристалла, вызванного возможным появлением температурных градиентов.

В эксперименте снимались зависимости интенсивности дифрагированных нейтронов для однокристальной и двухкристальной схем дифракции по Лауэ от угла Брэгга (рис.5). В данной геометрии эксперимента регистрировались нейтроны дифрагированные в кристалле и вылетающие в направлении прямого пучка.

Теоретическая зависимость рассчитана для длины поглощения в кремнии $L_{abs} = 40$ см с учетом разного поглощения двух блоховских волн (5). Коэффициент поглощения для блоховской волны $\phi^{(1)}$, полученный из эксперимента, составляет

$$\mu_1 = \mu_0(1 + \varepsilon_g^{220}) = 0,05 \text{ см}^{-1}.$$

К сожалению, из-за относительно малой толщины используемого кристалла (220 мм) в сравнении с длиной поглощения волны второго типа и из-за сложности полного учета утечки нейтронов в данной геометрии эксперимента была получена лишь верхняя граница на значение коэффициента поглощения для этой волны

$$\mu_2 = \mu_0(1 - \varepsilon_g^{220}) < 0,003 \text{ см}^{-1}.$$

Тем не менее, даже такое ограничение говорит о том, что для волны $\phi^{(2)}$ длина поглощения нейтрона, дифрагирующего на плоскости (220) кристалла кремния, как минимум на порядок превосходит среднюю длину поглощения нейтрона

в кремнии ($L_{abs} = 40$ см, $\mu_0 = 0.025$ см $^{-1}$) и составляет $L_{abs}^{(2)} > 300$ см. Величина параметра $\varepsilon_{220} > 0,9$ свидетельствует об очень сильном эффекте Бормана для этой системы плоскостей. Что не противоречит теоретическому предсказанию $\varepsilon_{220} \simeq 0,97$ для данных условий проведения эксперимента.

Также на рис.5 на верхней оси приведена эффективная толщина кристалла $L_{eff} = L / \cos \theta_B$, которая достигает 6 метров при угле Брэгга равном 88 0 .

Зависимость отношения интенсивностей для однокристальной и двухкристальной схем дифракции показана на рис.6. Важно отметить, что с учетом эффекта двухкристальной фокусировки [18] и эффекта аномального прохождения теория предсказывает выход кривой на плато равное 1/2 при больших углах дифракции, что соответствует ситуации, когда выживает только слабопоглощающая волна $\phi^{(2)}$, а вклад других волн пренебрежимо мал.

Далее было проведено исследование возможного разрешения двухкристальной установки. Измерения были произведены при фиксированном угле Брэгга в 78 0 и с размером коллимирующей щели в 15 мм. На рис. 7 показано распределение интенсивности дифрагированного пучка в зависимости от положения коллимирующей щели на выходной грани кристалла. Из рис. 7 видно, что в отсутствии какой бы то ни было внешней возмущающей силы, дифрагированный в прямом направлении пучок локализован относительно центра кристалла по оси Z (см. рис. 3). Величина разрешения была рассчитана исходя из экспериментальных данных и составила

$$W_F^{exp} \approx 4 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/см.}$$

Основной проблемой при измерениях была низкая светосила, которая связана с низкой интенсивностью холодных нейтронов необходимой длины волны на втором горизонтальном пучке реактора ВВР-М. Однако, для имеющихся в мире высокоинтенсивных источников холодных нейтронов, можно существенно повысить величину разрешения, за счет работы при больших углах Брэгга (до 88 0) и за счет уменьшения размера коллимирующих щелей (до $\delta_S = 2$ мм). В таком случае разрешение будет увеличено до величины:

$$W_F \approx 5 \cdot 10^{-13} \text{ eV/cm} = 5 \cdot 10^{-4} m_n g,$$

где m_n – масса нейтрона, а g – ускорение свободного падения. Чувствительность к изменению внешней силы для существующих потоков холодных нейтронов может достигать

$$\sigma(F_{ext}) \approx 5 \cdot 10^{-18} \text{ эВ/см} = 5 \cdot 10^{-9} m_n g \quad (13)$$

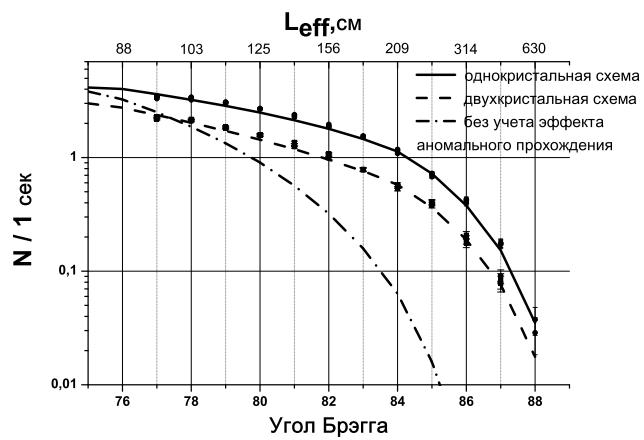


Рис. 5. Зависимость интенсивности от угла Брэгга для однокристальной и двухкристальной схем дифракции по Лауэ в кристалле кремния. Плоскость отражения (220). Размер кристалла $L = 220 \text{ мм}$ [9]

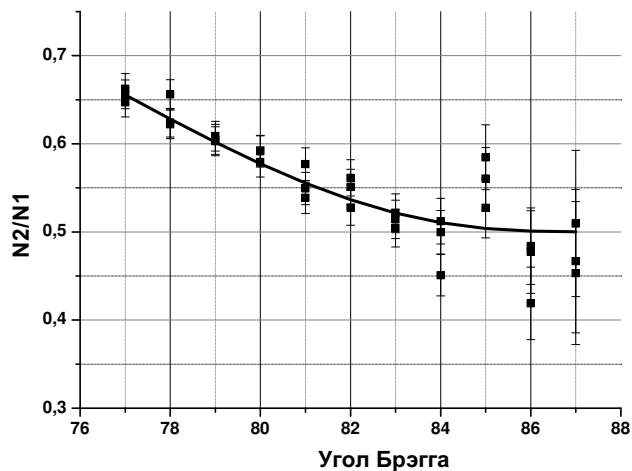


Рис. 6. Зависимость отношения значений интенсивностей для однокристальной и двухкристальной схем дифракции по Лауэ в кристалле кремния от угла Брэгга. Сплошной линией показана теоретическая кривая зависимости [9]

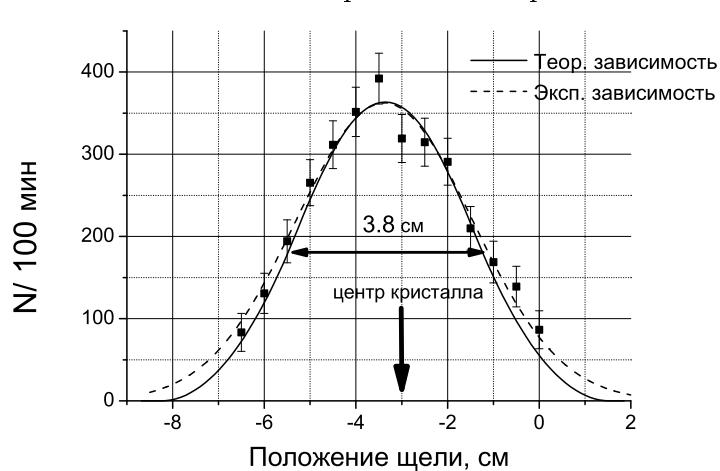


Рис. 7. Распределение интенсивности дифрагированного пучка по выходной поверхности кристалла. Кривая снималась с помощью подвижной щели на выходной поверхности кристалла [17]

за 100 дней накопления статистики.

Далее рассмотрены требования к качеству кристаллов. Для создания экспериментальной кристалл-дифракционной установки необходимы особо чистые монокристаллы кремния с высокой степенью структурного совершенства, т.к. наличие любых градиентов межплоскостного расстояния по объему монокристалла приводят к снижению чувствительности установки. Необходимо отметить, что первичная оценка степени совершенства и отбор монокристаллов кремния проводилась с использованием оригинальной методики [20], суть которой подробно изложена в [21].

Четвертая глава посвящена эксперименту по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона кристалл-дифракционным методом [2]. Идея эксперимента заключается в следующем. Земля находится на стационарной орбите вокруг Солнца, т.е. для нее гравитационное притяжение Солнца, которое пропорционально гравитационной массе Земли, уравновешено центробежной силой, пропорциональной инертной массе Земли. Если для нейтрона мы будем иметь другое, чем для Земли, отношение инертной и гравитационной масс, то в системе отсчета Земли на нейtron будет действовать ненулевая сила, равная разнице центробежной и гравитационных сил:

$$F_n = \frac{(m_i - m_G) \cdot GM_S}{R_S^2} \approx \Delta_{Gi} \cdot 6 \cdot 10^{-4} m_{Gg}, \quad (14)$$

где m_G и m_i – гравитационная и инертная масса нейтрона соответственно, G – гравитационная постоянная, M_S – масса Солнца, R_S – расстояние от Земли до Солнца, g – ускорение свободного падения, $\Delta_{Gi} \equiv (m_i - m_G) / m_G$ – параметр, характеризующий возможное нарушение эквивалентности инертной и гравитационной масс. Воздействие такой силы приведет к искривлению траектории дифрагирующего нейтрона в кристалле, и как раз к такому искривлению чувствительна экспериментальная установка. Более того должны наблюдаться суточные осцилляции проекция этой нескомпенсированной силы на вектор обратной решетки \mathbf{g} в связи с вращением Земли вокруг своей оси. Данные осцилляции соответственно приведут к суточным осцилляциям интенсивности детектируемых нейтронов на выходной поверхности кристалла, что и предлагается измерять в эксперименте. На рис. (8) приведена схема установки для проведения предлагаемого эксперимента.

Нетрудно подсчитать, что сила гравитационного притяжения Солнца составляет $F_G = m_n \cdot 6 \cdot 10^{-4} g \approx 6 \cdot 10^{-13} \text{ эВ/см}$, где $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение сво-

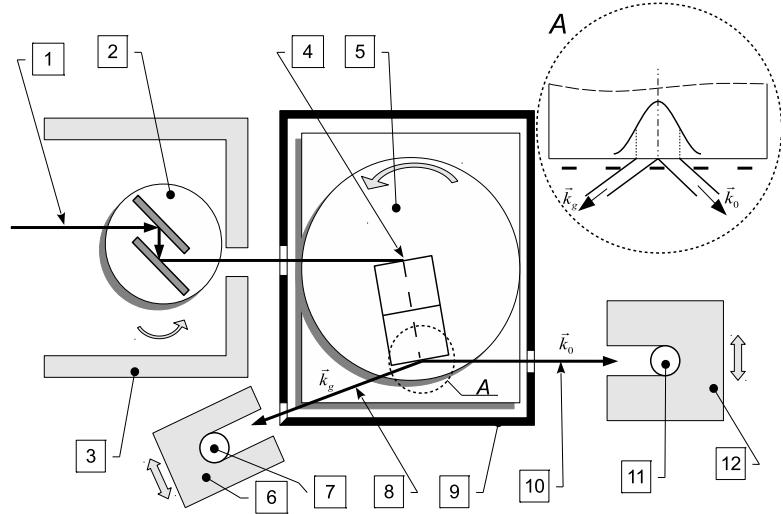


Рис. 8. Схема установки для проведения эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона: 1 – направление нейтронного пучка на выходе из горизонтального канала реактора; 2 – двухкристальная система монохроматизации нейтронного пучка; 3 – защита, выполненная из борированного полиэтилена; 4 – рабочий кристалл кремния, помещенный на поворотное устройство; 5 – поворотное устройство; 6, 12 – столик для перемещения детектора; 7, 11 – детектор нейтронов, помещенный в защитный кожух; 8 – дифрагированный в направлении \vec{k}_g нейтронный пучок; 9 – двухслойный термостат с активной и пассивной термостабилизацией; 10 – дифрагированный в направлении \vec{k}_0 нейтронный пучок. На выноске А показана выходная грань кристалла с подвижными коллимирующими щелями

бодного падения. Таким образом, если чувствительность прибора составляет $\approx 10^{-17} \text{ эВ/см}$, то это будет соответствовать точности для отношения масс

$$\sigma((F_G - F_i)/F_G) = \sigma((m_G - m_i)/m_G) \approx 2 \cdot 10^{-5}. \quad (15)$$

Здесь приведена статистическая точность, достижимая в данной постановке эксперименте. Далее приведен анализ возможных систематических эффектов [22] и необходимые условия для проведения эксперимента [15].

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что имеющееся на данный момент экспериментальное оборудование и имеющийся в наличии монокристалл кремния позволяют определить отношение инертной и гравитационной масс нейтрона с точностью $\sigma(m_i/m_G) \sim 10^{-5}$.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты работы:

1. Впервые исследована динамическая дифракция нейтронов по Лауэ в большом ($L = 220$ мм) монокристалле кремния при углах дифракции, близких к $\pi/2$.

2. Разработан кристалл-дифракционный метод исследования малых воздействий на дифрагирующий нейtron, основанный на особенностях дифракции нейтронов по Лауз при близких к прямому углах дифракции. Метод обладает сверхвысокой чувствительностью к внешнему воздействию $\sigma(F_{ext}) \approx 10^{-18}$ эВ/см. Метод будет использован для исследования фундаментальных свойств нейтрона и, в частности, для исследования его гравитационных свойств.
3. Создана экспериментальная установка, в основе которой лежит большой высоко совершенный кристалл кремния размерами $\varnothing 150 \times 220$ мм³. Экспериментально измеренное разрешение такой установки в единицах внешней силы составило $W(F_{ext}) \approx 10^{-11}$ эВ/см при угле дифракции в 78°. При работе на современных источниках холодных нейтронов разрешение может быть увеличено примерно на порядок величины.

Основные выводы работы:

1. Показано, что для большого кристалла кремния ($L = 220$ мм) для плоскости отражения (220) наблюдается сильный ядерный эффект аномального прохождения нейтронов в однокристальной и двухкристальной схемах дифракции. Данный эффект динамической дифракции необходимо учитывать при создании кристалл-дифракционных установок высокого разрешения разрешения и при проведении кристалл-дифракционных экспериментов по исследованию фундаментальных свойств нейтрона с использованием больших монокристаллов, особенно при работе с близкими к прямому углами Брэгга;
2. Разработанный кристалл-дифракционный метод и имеющееся экспериментальное оборудование позволит провести эксперимент по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона с достижением лучшей на данный момент точности. Определение отношения эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона достигнет точности $\sigma(m_i/m_G) \approx 10^{-5}$, что более чем на порядок улучшает современной значение для данной физической величины.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Вежлев, Е.О. Эффект аномального поглощения нейтронов, дифрагирующих по Лауз, при углах Брэгга, близких к $\pi/2$ [Текст] / Е.О. Вежлев, В.В. Воронин, И.А. Кузнецов и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2012.-Т. 96, вып. 1. – стр. 3-7. / JETP Letters.–2012.–V. 96, No. 1.–P. 1-5.

2. Вежлев, Е.О. Прямое наблюдение эффекта Бормана при дифракции нейтронов по Лауэ в кристалле кремния[Текст]/ Е.О. Вежлев, В.В. Воронин, И.А. Кузнецов и др. // Препринт ПИЯФ.–2011.–№ 2884.– 17 стр.
3. Voronin, V.V. Eotvos-type experiment with cold neutron [Text]/ V.V. Voronin, V.V. Fedorov, E.O. Vezhlev et.al. // Physics Procedia. –2011. –V. 17.– P. 232–238.
4. Vezhlev, E.O. Verification of the Weak Equivalence Principle with Laue Diffracting Neutrons: Test Experiment [Text]/ E.O. Vezhlev, V.V. Voronin, I.A. Kuznetsov et.al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2013.– V. 10, No. 4. – P. 357–360. / Письма в ЭЧАЯ. – 2013. – Т. 10, № 4(181). – С. 572-578.
5. Voronin, V.V. Eotvos-type experiment with cold neutrons (in Th. Bourdel, M. Doser, A.D. Ernest, A.Yu. Voronin, V.V. Voronin, Quantum phenomena in gravitational field) [Text]/ V. V. Voronin, V.V. Fedorov, E.O. Vezhlev et.al. // Comptes Rendus Physique. – 2011. – V. 12. – P. 779.
6. Воронин, В.В. Анализ дифракционного эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона [Текст] / В.В. Воронин, Ю.П. Брагинец, Е.О. Вежлев и др. // Препринт ПИЯФ. – 2010. –№ 2849. – 28 стр.
7. Семенихин, С.Ю. Исследование структурного совершенства монокристаллического кварца для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом [Текст] / С.Ю. Семенихин, Ю.П. Брагинец, Е.О. Вежлев и др. // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 3. – С. 71-79. / Technical Physics. – 2011. – V. 56, No. 3.– P. 386–394.

Литература

1. Воронин, В.В. Эффект дифракционного усиления и новые возможности измерения заряда нейтрона и отношения его инертной массы к гравитационной [Текст] / В. В. Воронин, И.А. Кузнецов, Е.Г. Лапин и др.[Текст] // Ядерная физика. – 2009. – Т. 72, вып. 3. – С. 505-511.
2. Voronin, V.V. Eotvos-type experiment with cold neutron [Text]/ V.V. Voronin, V.V. Fedorov, E.O. Vezhlev et.al. // Physics Procedia. –2011. –V. 17.– P. 232–238.

3. Adelberger, E. G. Testing the equivalence principle in the field of the Earth: Particle physics at masses below 1 μ eV [Text] / E.G. Adelberger et.al.// Phys. Rev. D. –1990. – V. 42. – P. 3267.
4. Baeßler, S. Improved Test of the Equivalence Principle for Gravitational Self-Energy [Text]/ S. Baeßler et.al.// Phys.Rev. Lett. – 1999. – V. 83, No. 18. – P. 3585.
5. Schmiedmayer, J. The equivalence of the gravitational and inertiomal mass of the neutron [Text] / J. Schmiedmayer // Nucl. Instr. Meth. – 1989. – Vol. A 284. – P. 59-62.
6. Rauch, H. Dynamical neutron diffraction and its application [Text]: In Neutron diffraction, ed. by H. Duchs / H. Rauch, D. Petrachek – Berlin : Springer. – 1978. – P. 303-351.
7. Хирш, П. Электронная микроскопия тонких кристаллов [Текст] / П. Чирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – Москва : МИР. – 1968. – 574 с.
8. Kato, N. The flow of X-rays and materials waves in ideally perfect single crystals [Text] / N. Kato // Acta Crystallography. – 1958. – Vol. 11. – P. 885-887.; Ewald, P.P. Group velocity and phase velocity in X-ray crystal optics [Text] / P.P. Ewald // Acta Crystallography. – 1958. – Vol. 11. – P. 888-891.
9. Вежлев, Е.О. Эффект аномального поглощения нейтронов, дифрагирующих по Лауэ, при углах Брэгга, близких к $\pi/2$ [Текст] / Е.О. Вежлев, В.В. Воронин, И.А. Кузнецов и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 96, вып. 1.– С. 3-7. /JETP Letters.–2012.–V. 96, No. 1.–P. 1-5.
10. Алексеев, В.Л. Гравитационный эффект при дифракции нейтронов на изогнутом кварцевом монокристалле [Текст] / В.Л. Алексеев, Е.Г. Лапин, Е.К. Леушкин и др. // ЖЭТФ. – 1988. – Т. 94. – С. 371-383.
11. Zeilinger, A. Effective Mass of Neutrons Diffracting in Crystals [Text] / A. Zeilinger, C. G. Shull, M. A. Horne and K. D. Finkelstein // Phys. Rev. Lett. – 1986. – V. 57. – P. 3089.
12. Fedorov, V.V. On the search for neutron EDM using Laue diffraction by a crystal without a centre of symmetry [Text] / V.V. Fedorov, V.V. Voronin, E.G. Lapin // J. Phys. G. – 1992. – V. 18. – P. 1133-1148.
13. Воронин, В. В. Прямое измерение времени задержки нейтрона в кристалле при дифракции по Лауэ [Текст] / В. В. Воронин, Е. Г. Лапин, С. Ю. Семенюхин и др. // Письма В ЖЭТФ. – 2000. –Т. 71, вып. 2. – С. 110.

14. Федоров, В.В. Особенности электромагнитного излучения электрона, дифрагирующего в монокристалле [Текст] / В.В. Федоров, А.И. Смирнов // ЖЭТФ. – 1974. – Т. 66. – С. 566.
15. Воронин, В.В. Анализ дифракционного эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона [Текст] / В.В. Воронин, Ю.П. Брагинец, Е.О. Вежлев и др. // Препринт ПИЯФ. – 2010. – № 2849. – 28 стр
16. Вежлев, Е.О. Прямое наблюдение эффекта Бормана при дифракции нейtronов по Лауэ в кристалле кремния[Текст]/ Е.О. Вежлев, В.В. Воронин, И.А. Кузнецов и др. // Препринт ПИЯФ.–2011.–№ 2884.– 17 стр.
17. Vezhlev, E.O. Verification of the Weak Equivalence Principle with Laue Diffracting Neutrons: Test Experiment [Text]/ E.O. Vezhlev, V.V. Voronin, I.A. Kuznetsov et.al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2013.– V. 10, No. 4. – P. 357–360. / Письма в ЭЧАЯ. – 2013. – Т. 10, вып. 4(181). – С. 572-578.
18. Инденбом, В. И. Рентгеновский интерферометр с узким пучком [Текст] / В. И. Инденбом, И. Ш. Слободецкий, К. Г. Труни // ЖЭТФ. – 1974. – Т. 66, вып. 3. – С. 1110.
19. Arthur, J. Dynamical neutron diffraction in a thick-crystal interferometer [Text] / J. Arthur, C. G. Shull, A. Zeilinger, // Phys. Rev. B. – 1985. – V. 32, No. 9. – P. 5753.
20. Пат. 2394228 Российская Федерация, МПК G 10 N 23/20. Способ определения относительного изменения межплоскостных расстояний совершенных кристаллов [Текст] / В.В. Федоров, И.А. Кузнецов, Е.Г. Лапин [и др.]; заявитель и патентообладатель УРАН ПИЯФ РАН. - № 2009104107/28 ; заявл. 03. 02. 09 ; опубл. 10. 07. 10, Бюл. № 19. – 8 с. : ил.
21. Семенихин, С.Ю. Исследование структурного совершенства монокристаллического кварца для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом [Текст] / С.Ю. Семенихин, Ю.П. Брагинец, Е.О. Вежлев и др. // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 3. – С. 71-79. / Technical Physics. – 2011. – V. 56, No. 3.– P. 386–394.
22. Воронин, В.В. Анализ систематики дифракционного эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона [Текст] / В.В. Воронин, Ю.П. Брагинец, И.А. Кузнецов // Препринт ПИЯФ. – 2009.–№ 2827. – 24 стр.