

СТАТЬИ

УДК 539.1.539.2:535.37

ИЗОТОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ — МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ СИЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ

Плеханов В.Г. (Научная лаборатория «Фоноритон», ООО «Гарон», г. Таллин, Эстонская Республика)

e-mail: vgplekhanov@gmail.com

Современная физика выделяет три фундаментальных свойства атомного ядра, посредством которых проявляется суть изотопического эффекта: массу, спин и связанный с ним магнитный момент, объем, т. е. силу взаимодействия с окружением. Настоящая статья посвящена изучению сильного ядерного дальнего действия в массовом изотопическом эффекте современными методами низкотемпературной оптической спектроскопии конденсированного состояния. Измерены низкотемпературные спектры отражения и люминесценции кристаллов гидрида лития LiH без сильного взаимодействия в ядре водорода, а также кристаллов дейтерида лития LiD с сильным ядерным взаимодействием в ядре дейтерия.

Принято считать, что в физике только четыре качественно различных фундаментальных взаимодействия элементарных частиц: гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное [1, 2]. В 1930-х гг. эти взаимодействия делили на дальнедействующие (гравитационное и электромагнитное) и короткодействующие (слабое и сильное). Затем в попытке понять их общую природу было показано объединение слабого и электромагнитного и получено электрослабое взаимодействие, имеющее электромагнитную природу [3]. Спустя некоторое время было продемонстрировано

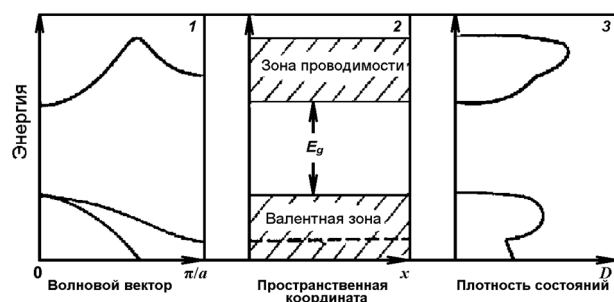
объединение гравитационного и электромагнитного взаимодействий, тем самым была доказана электромагнитная основа гравитационного взаимодействия [4]. Детальный анализ свойств сильного взаимодействия показал, что оно также имеет электромагнитное происхождение (магнитное дальнее действие) [5]. Таким образом, все четыре фундаментальных взаимодействия имеют единую электромагнитную природу. Открытие Чедвиком нейтрона в 1932 г. считается началом выделения отдельного сильного ядерного взаимодействия в противовес более слабому электромагнитному отталкиванию положительно заряженных протонов. Именно это открытие позволило Иваненко и Гейзенбергу сформулировать модель атомного ядра, состоящую из нуклонов: протонов и нейтронов [6]. В 1930-х гг. Кондон [7] пытался рассчитать нейтрон-электронное взаимодействие в изотопическом эффекте, был предсказан сдвиг электронных уровней. В 1950-х гг. подробный анализ этого взаимодействия провел Фолди [8]. Большой распространенностью в субатомной физике пользуется потенциал Юкавы [9], которым описывается взаимодействие протона и нейтрона в ядре. Так появился в ядерной физике термин сильного взаимодействия. Отметим, что важной особенностью потенциала Юкавы является его

короткодействующий характер (около 10^{-15} м). Центральной догмой в субатомной физике после работы Юкавы явилось заключение о классическом электростатическом взаимодействии протона и электрона. Природа сильного протон-нейтронного взаимодействия осталась необъясненной. Статический характер потенциала Юкавы не позволяет описать распространение в пространстве сильного ядерного взаимодействия, потенциал Юкавы пригоден для описания нуклонов в ядре, но не кварков внутри нуклонов, до настоящего времени нет его прямой экспериментальной проверки. Следует отметить, что в субатомной физике сильное взаимодействие отделено от электромагнитного. Заметим также, что безмассовый характер глюонов — переносчиков сильного взаимодействия между кварками — обуславливает далекодействующий характер между кварками внутри нуклонов, согласно потенциалу Юкавы взаимодействие между нуклонами (адронами) остается короткодействующим. Следовательно, граница ядра трансформирует дальноедействие межкваркового взаимодействия в короткодействующее между нуклонами. Этот вопрос в квантовой хромодинамике до сих пор не имеет теоретического объяснения.

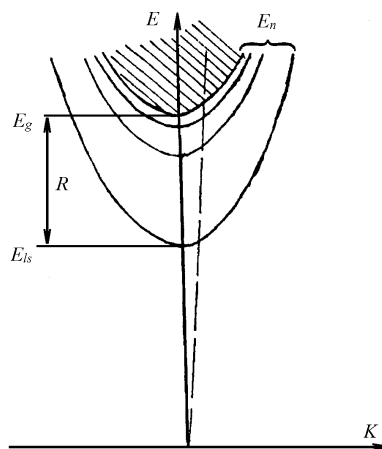
Результаты эксперимента. Современный взгляд на физику твердого тела основан на представлении элементарных возбуждений, имеющих массу, квазиимпульс, электрический заряд, спин и др. [10]. Согласно этому представлению элементарными возбуждениями в неметаллических соединениях, например, диэлектриках являются электроны (дырки), экситоны (поляритоны) и фононы. Современная теория электронов в твердом теле учитывает периодичность кристаллической структуры. Эта периодичность приводит к образованию зонной энергетической структуры (рис. 1). При переводе электрона из валентной зоны в зону проводимости в первой зоне остается свободное состояние (дырка), имеющее положительный электрический заряд.

Кулоновское взаимодействие между положительно и отрицательно заряженными частицами (дыркой и электроном) приводит к созданию

новой квазичастицы — экситона, понятие о котором в науку ввел Френкель [10]. В противоположность модели Френкеля экситон Ванье — Мотта имеет водородоподобный спектр с бесконечно большим числом связанных состояний (рис. 2). Благодаря энергии связи E_n энергия возбуждения экситона всегда меньше энергии возбуждения свободной электронно-дырочной пары.



Р и с . 1. Схематическое представление зонной структуры однородных чистых изоляторов (полупроводников): 1 — дисперсионное соотношение (зависимость энергии электрона от его квазиимпульса); 2 — валентная зона проводимости как функция пространственной координаты x ; 3 — плотность состояний D (E_g — энергия межзонных переходов)

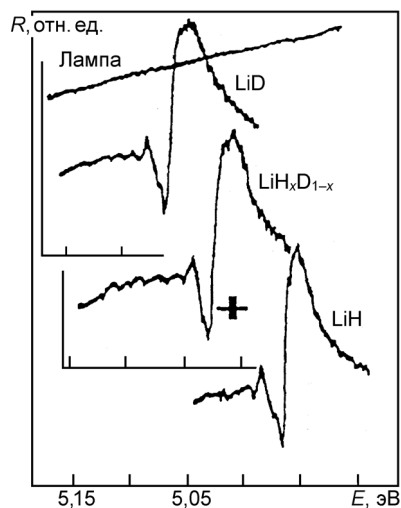


Р и с . 2. Энергетическая схема с дискретным и непрерывным значением (заштрихованный участок) экситонов Ванье — Мотта с учетом их кинетической энергии: — — — дисперсия света в среде (E_{ls} — энергия основного состояния экситона, R — постоянная Ридберга — энергия связи основного состояния экситона, K — квазиимпульс экситона)

Простейшие методы изучения динамики возбуждения элементарных частиц в твердом теле — это спектроскопические методы отражения и люминесценции. Оба этих метода были использованы для изучения сильного внутриядерного взаимодействия. Учитывая высокую гигроскопичность изучаемых кристаллов, их скол осу-

ществляли в сверхтекучем жидком гелии ванны гелиевого криостата. Такая чистая поверхность позволила увеличить продолжительность экспериментов до 15 ч. При этом использовали экспериментальную установку, состоящую из гелиевого криостата домашнего производства, стандартных монохроматоров и источников света, и регистрирующую систему, обеспечивающую метод счета фотонов с накоплением сигнала в памяти персональной вычислительной машины.

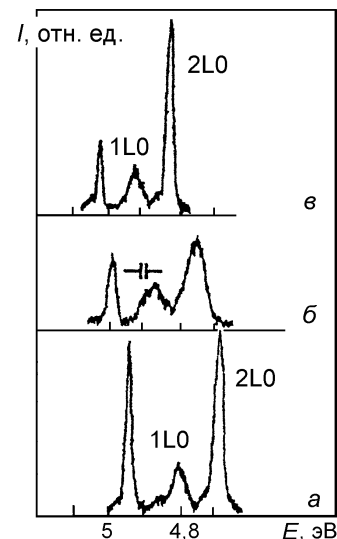
Спектры зеркального отражения чистых кристаллов гидрида лития LiH, дейтерида лития LiD и смешанных кристаллов, сколотых в сверхтекучем гелии при температуре 2 К, представлены на рис. 3, на котором бесструктурная линия — это свет от лампы через экспериментальную установку. Приведенные спектры отражения измерены на одной аппаратуре, в одинаковых условиях и обладают одинаковой длинноволновой структурой, обусловленной возбуждением основного и первого возбужденного состояния экситона Ванье — Мотта. С ростом концентрации дейтерия длинноволновой пик расширяется и сдвигается в коротковолновую сторону. В чистых кристаллах LiD этот изотопический сдвиг равен 103 мэВ.



Р и с. 3. Спектры зеркального отражения чистых и смешанных кристаллов с указанием разрешения спектрального прибора

Было показано, что низкоэнергетическими электронными возбуждениями в кристаллах LiH, LiD являются экситоны большого радиуса

Ванье — Мотта [11]. Люминесценция свободных экситонов наблюдается при возбуждении кристалла фотонами в середине спектра собственного поглощения. Спектр люминесценции свободных экситонов кристаллов LiH, сколотых в сверхтекучем гелии, состоит из узкой бесфононной линии энергией 4,95 эВ и ее более широких фононных повторений с излучением от одного до пяти продольных оптических (LO) фононов [11]. На рис. 4 представлены спектры с двумя LO-повторениями при фотовозбуждении кристаллов при температуре 2 К. Определенная энергия фононов из спектра люминесценции равна 140 мэВ, что совпадает с энергией, найденной в динамике кристаллической решетки [11].



Р и с. 4. Спектры излучения свободных экситонов при фотовозбуждении кристаллов LiH (а), LiH_{0,45}D_{0,55} (б) и LiD (в) с указанием разрешения спектрального прибора

Спектр фотолюминесценции кристаллов LiD похож по развитой структуре на приведенный спектр собственной фотолюминесценции кристаллов LiH. Изотопический коротковолновой сдвиг бесфононной линии излучения кристалла LiD, как и в случае спектров отражения, равен 103 мэВ. Второе изменение связано с энергией фононов, которая у кристаллов LiD уменьшилась до 104 мэВ. Спектр излучения смешанных кристаллов во многом похож на спектр излучения свободных экситонов в чистых кристаллах LiH и LiD. Изменяя концентрацию дейтерия, получили множество смешанных кристаллов. Измеряя их

спектры отражения и люминесценции, построили зависимость энергии сильного ядерного взаимодействия E от расстояния между нуклонами, представленную на рис. 5, где r_D , r_H — ядерный радиус ядра дейтерия и водорода согласно данным CODATA [12].

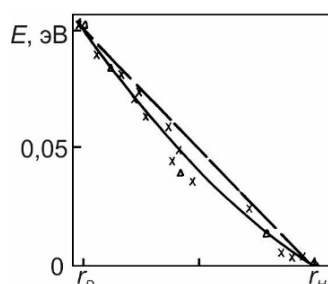


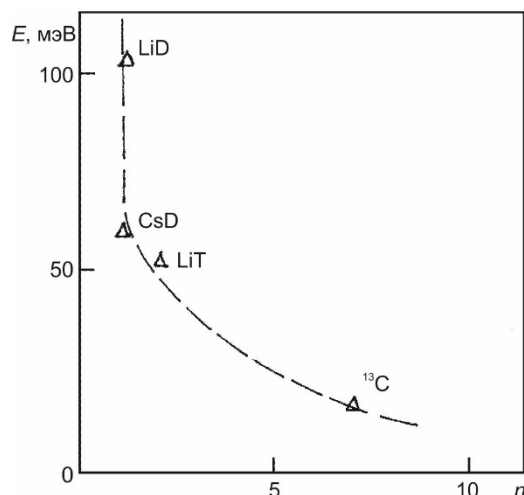
Рис. 5. Зависимость энергии сильного ядерного взаимодействия от расстояния между нуклонами в ядре дейтерия, полученная на основе спектров отражения (x) и люминесценции (Δ)

Анализ результатов экспериментов. Традиционно электрон-ядерное взаимодействие, в данном случае нейтрон-электронное, учитывается решением уравнения Шредингера, для чего используют адиабатическое приближение Борна — Оппенгеймера [13], позволяющее разделить ядерные и электронные степени свободы и тем самым разбить уравнение Шредингера на два уравнения: для электронов и ядер. Так находят соответствующие значения энергии. Существенно, что благодаря указанному приближению решение уравнения не зависит от массы ядра, следовательно, для разных изотопов будет одним и тем же. Последнее стимулирует поиск нового механизма нейтрон-электронного взаимодействия, включая субатомную физику, т. е. адрон-лептонное взаимодействие. В современной квантовой хромодинамике считается, что сильное взаимодействие не действует на лептоны. Это дискуссионное утверждение, поскольку экспериментально наблюдали изотопический сдвиг 103 мэВ, который обусловлен именно сильным взаимодействием. Кристаллы LiH и LiD действительно имеют одинаковые гравитационное, электромагнитное и слабое взаимодействия, добавление одного нейтрона в ядро водорода стимулирует сильное взаимодействие, которого нет в ядре водорода, что

и приводит к экспериментально наблюдаемому изотопическому сдвигу.

Эксперимент, проведенный автором настоящей статьи, показывает макроскопическое проявление влияния сильного взаимодействия адронов (нуклонов) на лептоны (электроны). В соответствии с критериями современной ядерной физики протоны и нейтроны, из которых состоят атомные ядра, не являются элементарными частицами, поскольку состоят из u - и d -кварков [1, 2]. Связь кварков между собой осуществляется не только электромагнитными, но и дальнедействующими силами цветных глюонных полей. Согласно стандартной модели [1, 2] сильное взаимодействие между нуклонами рассматривается как остаточное от сильного взаимодействия между кварками и безмассовыми глюонами, аналогично тому, как взаимодействие между электрически нейтральными атомами есть только остаток от взаимодействия электрически заряженных электронов и ядер атомов (силы Ван-дер-Ваальса). Поэтому одной из главных задач современной квантовой хромодинамики является задача сведения дальнедействующего электромагнитного взаимодействия электрически заряженных кварков к цветному короткодействующему между нуклонами. Несмотря на остаточный характер, взаимодействие этих сил между нуклонами вызывает энергию связи нуклонов около 8 МэВ, что значительно превосходит энергию связи электрона в атоме водорода, равную 13,6 эВ. Слабое электромагнитное взаимодействие кварков вносит существенный вклад в разницу масс протонов и нейтронов и имеет нелинейную зависимость энергии сильного ядерного дальнего действия от числа нейтронов в разных веществах (рис. 6). Различие между исследуемыми кристаллами заключается в одном нейтроне, добавленном в ядро водорода: кристаллы LiH и LiD отличаются одним нейтроном. Ядро дейтерия является первым ядром, где появляется зарядово-независимое сильное короткодействующее взаимодействие, радиус которого меньше диаметра атома приблизительно на пять порядков. Известно, что нейтрон не имеет

электрического и магнитного зарядов, однако точно так же, как протон и электрон, обладает спином [6]. Благодаря конфайнменту электрическое взаимодействие кварков не выходит за границы ядра нейтрона. Однако магнитное взаимодействие, которое слабее электрического [2], выходит за границы ядра нейтрона и таким образом оказывается дальнедействующим. Учет магнитного взаимодействия ядра дейтерия с магнитным полем электрона (сверхтонкое взаимодействие) составляет для дейтерия $3,16 \cdot 10^{-7}$ эВ, что на семь порядков меньше экспериментально наблюдаемого изотопического сдвига, равного 0,103 эВ. Приведенная оценка не учитывает аномально большой магнитный момент нейтрона, что также носит дальнедействующий характер взаимодействия [14]. Последнее особенно актуально в модели неточечной элементарной частицы, на что указывал Ландау [15—17]. Заслуживают отдельного внимания экспериментальные результаты, представленные на рис. 6. Следует отметить, что в настоящее время остается непонятным, как учитывать дальнедействующий характер взаимодействия девятого глюона, который согласно теоретическим представлениям является почти свободным фотоном.



Р и с. 6. Зависимость энергии сильного ядерного взаимодействия от числа нейтронов n в разных соединениях

Заключение. Экспериментально изученное макроскопическое проявление сильного внутриядерного взаимодействия в твердом теле открывает новые перспективы в ядерной физике и физике элементарных частиц, однако противоречит

строгому утверждению теоретиков, что сильное взаимодействие не влияет на лептоны. В настоящей работе измерена зависимость энергии сильного ядерного взаимодействия от расстояния между нуклонами в ядре дейтерия.

Автор благодарит Дж. Буитраго (Испания), В.Ф. Мышкина за обсуждения, У. Джентуру (США) и С. Робертса (Китай) за полезную переписку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cottingham W., Greenwood D.** An Introduction to the Standard Model of Particle Physics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 294 p.
2. **Perkins D.** Introduction to High Energy Physics. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 442 p.
3. **Weinberg S.** The Discovery of Subatomic Particles (Nuclear Physics). New York: Penguin Books, 1990. 222 p.
4. **Wang L.** Unification of Gravitational and Electromagnetic Forces. Marietta, GA (USA): Scholar's Press, 2019. 104 p.
5. **Barut F.** Unification based on electromagnetism. — *Ann. Phys.*, 1986, v. 43, is. 1—2, p. 83—92.
6. **Henley E., Garcia A.** Subatomic Physics. 3rd ed. World Scientific (USA): Singapore, 2007. 620 p.
7. **Condon E.** Note on electron-neutron interaction. — *Phys. Rev.*, 1936, v. 49, p. 459—461.
8. **Foldy L.** Neutron-electron interaction. — *Rev. Mod. Phys.*, 1958, v. 30, p. 471—481.
9. **Yukawa H.** On the interaction of elementary particles. — In: *Proc. of the Physico-Mathematical Society of Japan*, 1935, v. 17, p. 48—57.
10. **Plekhanov V.G.** Introduction to Isotopic Materials Science. Springer Ser. in Mater. Sci., v. 248. 1st ed. Heidelberg: Springer, 2018. 301 p.
11. **Плеханов В.Г.** Изотопические эффекты и эффекты разупорядочения в спектроскопии экситонов большого радиуса. — *Успехи физ. наук*, 1997, т. 167, вып. 6, с. 577—604.
12. **Mohr P., Newell D., Taylor B.** CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. — *Rev. Mod. Phys.*, 2016, v. 88, is. 3, p. 035009 (11 p.).
13. **Plekhanov V.G.** Measurements of the wide value range of strong interaction coupling constant. — *SSRG Int. J. Appl. Phys.*, 2019, v. 6, is. 3, p. 332—337.
14. **Плеханов В.Г.** Необходимые дополнения к статье Ю.М. Ципенюка [УФН 182 855 (2012)] и обзору Б.А. Князева и В.Г. Сербо [УФН 188 508 (2018)]. — *Успехи физ. наук*, 2019, т. 189, вып. 9, с. 1015—1016.
15. **Ландау Л.Д.** О фундаментальных проблемах. Теоретическая физика в XX веке. Сб. статей памяти В. Паули. Под ред. Я.А. Смородинского. М: Изд-во иностранной лит-ры, 1962. 442 с. // **Ландау Л.Д.** Собрание трудов. Под ред. Е.М. Лифшица: в 2 т. М: Наука, 1969, т. 2, с. 421—424.

16. **Leutwyler H.** Insights and Puzzles in Particle Physics. In Fifty Years of Quarks. Eds. H. Fritzsch, M. Gell-Mann. World Scientific: Singapore, 2015. 506 p.

17. **Roberts C.D.** Empirical consequences of emergent mass. — Symmetry, 2020, v. 12, is. 9, p. 1468 (36 p.).

Поступила в Редакцию 18.12.20

УДК 621.039.5

ПРИМЕНЕНИЕ ТРИФТОРИДА БОРА В КАЧЕСТВЕ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ В РЕАКТОРЕ ВТГР

Кнышев В.В., Шаманин И.В., Каренгин А.Г. (НИ ТПУ, г. Томск)

e-mail: vvk28@tpu.ru

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) являются новым типом экологически чистых универсальных атомных энергоисточников. Их уникальные свойства: способность вырабатывать тепло до температуры 1000 °С и высокий уровень безопасности — дают широкие возможности для использования этого реактора [1—3]. Применение в качестве теплоносителя гелия исключает химические реакции с топливом и конструкционными материалами, поскольку он не активируется, значит, при его использовании отсутствуют проблемы, связанные с фазовыми превращениями [3, 4].

В ФГАОУ ВО «НИ ТПУ» разрабатываются модель реактора ВТГР с модифицированными топливными элементами и методология их изготовления [5]. Совместно с сотрудниками ФГБУН «ИЯФ СО РАН» создается гибридный подкритический стенд с нестандартным принципом работы, рассматриваются механизмы и материалы для компенсации и управления критичностью установки [6].

Для реакторных установок типа ВТГР в качестве поглощающих материалов используют различные соединения: B_4C — SiC , $Dy_2O_3TiO_2$, $CrB_2 + Al$, Gd_2O_3 , ZrB_2 , $AgInCd$, $Mo + Eu_2O_3$, Hf — Zr и др. В качестве дополнительного метода управления в теплоноситель реакторных установок вводят поглощающий материал. Данный метод хорошо себя зарекомендовал в ВВЭР-1000: в теплоноситель добавляют борную кислоту, что позволяет компенсировать избыточную реактивность и упрощает управление установкой. Для ВТГР рассмат-

ривают возможность применения газообразных поглощающих соединений в теплоносителе. Такой подход позволит более плавно управлять критичностью реакторной установки и уменьшить количество применяемого твердого компенсирующего материала в активной зоне. Немаловажным фактором является и эффективность компенсирующей системы, которая зависит от температуры, изменения нуклидного состава активной зоны, концентрации поглощающего материала. Изменение температурного поля и нуклидного состава данной установки будет существенным относительно начала кампании, так как предполагаемая кампания [5] для одной загрузки топлива составляет около 3000 эф. сут. При кампании более 1000 эф. сут достигается высокая глубина выгорания более 100 МВт·сут/кг как первичного, так и вторичного топлива. При столь длительной теплофизической и ионизационной нагрузке существенно меняются теплофизические свойства материалов. Данные факторы учитывали при расчете влияния поглощающих материалов на нейтронно-физические параметры реактора.

Выбор поглощающего материала. На основе ранее проведенных расчетов спектра потока нейтронов активной зоны реакторной установки [5, 6] подбирается наиболее эффективный материал в качестве основного поглощающего элемента. В спектре рассматриваемой установки преобладают эпитепловые и быстрые нейтроны. Вследствие особенностей спектра наиболее эффективными по захвату нейтронов и распространенности поглощающими материалами будут бор, гадолиний