

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации

(29 января 2003 г.)

29 января 2003 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Огороков В.В.** (Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва). *Использование когерентного возбуждения релятивистских ядер в кристалле в фундаментальных исследованиях по СТО и ОТО.*

2. **Фомин И.А.** (Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва). *Спиновые токи в чистом и "грязном" сверхтекучем ³He.*

3. **Дмитриев В.В., Завьялов В.В., Змеев Д.Е., Косарев И.В.** (Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва), **Малдерс Н. (Mulders N.)** (University of Delaware, Newark, Delaware, USA). *Сверхтекучие фазы ³He в азрогеле.*

Краткие содержания докладов 1 и 3 публикуются ниже.

PACS numbers: 04.80.Cc, 23.20-g, 61.85.+p

Использование когерентного возбуждения релятивистских ядер в кристалле в фундаментальных исследованиях по СТО и ОТО

В.В. Огороков

1. Физика явления

При пролете частицы (ядро, атом), обладающей уровнем $\Delta E = E_{\text{возб}} - E_{\text{осн}}$, через кристалл можно подобрать условия, при которых частота "соударений" частицы с атомами кристалла $\nu_{\text{уд}} = v_0/a_0$ (v_0 — скорость частицы, a_0 — расстояние между атомами кристалла) равна частоте перехода (или в целое число раз больше нее):

$$\nu_{\text{пер}} = \frac{E_{\text{возб}} - E_{\text{осн}}}{h} = \nu_{\text{уд}} m. \tag{1}$$

Ясно, что при этом зависимость вероятности кулоновского возбуждения пролетающей частицы от скорости должна носить резонансный характер.

Происходит это вследствие того, что зависимость энергии взаимодействия $U(t)$ между пролетающей частицей и атомами кристалла имеет вид периодической последовательности одиночных всплесков (рис. 1а), каждый из которых обусловлен взаимодействием частицы с одним из атомов кристалла.

Частотный спектр Фурье *одиночного* взаимодействия $S_0(\omega)$ для двух различных скоростей пролетающей через кристалл частицы приведен на рис. 1б.

Спектр Фурье возмущения, испытываемого этой частицей при взаимодействии с n атомами, связан со спектром одиночного взаимодействия $S_0(\omega)$ соотношением

$$|S_0^n(\omega)|^2 = |S_0(\omega)|^2 \frac{\sin^2(\omega T n/2)}{\sin^2(\omega T/2)}, \tag{2}$$

где $T = a_0/v_0$. Результирующий спектр $|S_0^n(\omega)|^2$ при большом n для двух скоростей пролетающей частицы приведен на рис. 1в. Из соотношения (1) и рис. 1б, в

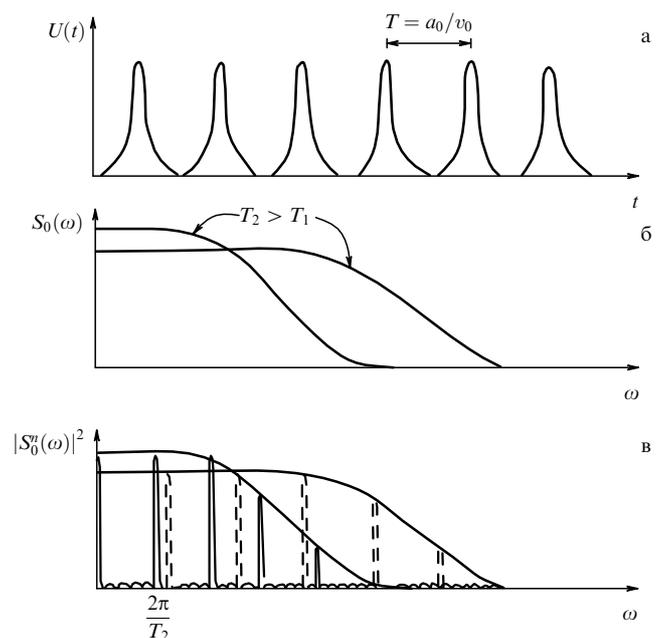


Рис. 1. Формирование фурье-спектра многократного взаимодействия пролетающей частицы с атомами кристалла.

видно, что с увеличением числа взаимодействий n увеличивается пропорционально этой величине спектральная плотность $S_0^n(\omega)$ на частотах $\omega_m = (2\pi/T)m$ ($m = 0, 1, 2$ и т.д.) и одновременно в такой же степени ($\sim 1/n$) сужается занимаемая полоса частот около каждого ω_n ($\Delta\omega_n \sim \pi/nT$).

Такое изменение спектра $S_0^n(\omega)$ в ряд узких и интенсивных линий на частотах $\omega_m = (2\pi/T)m$ при возрастании числа взаимодействий n связано с когерентностью (отсюда название — когерентное возбуждение (КВ)) спектральных составляющих одиночных взаимодействий $S_0(\omega)$ (рис.1а), периодически следующих друг за другом (см. [1–4]).

Таким образом, КВ связано с трансформацией пространственно-периодического поля кристалла (вообще говоря, необязательно кристалла!) в периодическое во времени электромагнитное возмущение, испытываемое пролетающей через кристалл частицей, и одновременным использованием этого периодического возмущения для возбуждения внутренних степеней свободы пролетающей частицы¹.

В том случае, если спектр одиночного взаимодействия $S_0(\omega)$ простирается вплоть до частот $\omega_{\text{возб}} = \Delta E/\hbar$, всегда можно подобрать условия (подбором кристалла с соответствующей постоянной решетки a_0 или изменением скорости пролетающей через кристалл частицы), при которых одна из гармоник $\omega_m = (2\pi/T)m$ совпадает с $\omega_{\text{возб}} = \Delta E/h$. В этом случае резко возрастает вероятность перехода пролетающей частицы в возбужденное состояние:

$$W \sim |S_0^n(\omega_{\text{возб}})|^2 = |S_0(\omega_{\text{возб}})|^2 n^2. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность возбуждения резко возрастает не только при "резонансной" скорости $v_0 = a_0/T = a_0 v_{\text{пер}}$, но и при скоростях $v_0/2, v_0/3, v_0/4$ и т.д., когда пролетающая частица возбуждается на второй, третьей и т.д. гармониках спектра Фурье возмущения, испытываемого частицей при взаимодействии с атомами кристалла.

Такое возбуждение практически аналогично возбуждению частицы периодическим полем монохроматической электромагнитной волны, частота которой совпадает с частотой перехода между уровнями частицы.

2. Об использовании КВ в фундаментальных исследованиях

Исследования по когерентному возбуждению получили широкое развитие в экспериментальном и теоретическом плане [3–51]. Тем не менее автор считает, что направление этих работ явно увело исследователей в сторону, совершенно не отвечающую полному использованию возможностей КВ в фундаментальных научных исследованиях. Например, получение экспериментальных доказательств существования КВ релятивистских ядер в кристалле фактически будет означать *открытие ядерной реакции нового типа*, протекающей не при одиночных столкновениях двух частиц, а за счет коллективного

взаимодействия пролетающего через кристалл ядра с атомами кристалла.

Эта реакция должна протекать со значительно большей вероятностью (в $10^4 - 10^5$ раз), чем обычное кулоновское возбуждение ядер, пролетающих через изотропную мишень [2], а также иметь характерную резонансную зависимость от энергии ядра (полуширина резонанса $\Delta E/E$ может быть доведена до 10^{-5}), что обуславливает многочисленные и перспективные возможности использования этого явления в фундаментальных исследованиях по специальной и общей теории относительности (СТО и ОТО), а также в ядерной физике релятивистских энергий.

Эксперимент по КВ ядерных уровней дает возможность провести довольно прецизионную проверку замедления хода движущихся часов в релятивистском

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 150 - 200$$

и ультрарелятивистском случаях. При релятивистских энергиях, пролетающего через кристалл ядра, формулу (1) следует записать как

$$\frac{\Delta E}{h} = m \frac{v_0}{a_0} \gamma. \quad (4)$$

Появление множителя γ связано с релятивистским сокращением размеров атомов кристалла и расстояний между ними в системе координат, связанных с пролетающим ядром. В системе координат кристалла появление множителя γ связано с релятивистским увеличением в γ раз интервалов времени в системе координат ядра (т.е. с уменьшением в γ раз частоты перехода между уровнями пролетающего ядра).

Таким образом, экспериментальная проверка соотношения (4) дает информацию об изменении хода времени в системе координат, двигающейся с релятивистской скоростью, которая неизбежно необходима для когерентного возбуждения уровней ядер.

В таком эксперименте ядро, пролетающее через кристалл и обладающее уровнем $h\nu_{\text{возб}} = E_{\text{возб}} - E_{\text{осн}}$, является движущимися часами, ход времени которых сверяется с помощью ряда последовательных взаимодействий ядра с электрическим полем атомов, расположенных в узлах пространственно-периодической структуры, которой является кристалл.

Вероятность когерентного кулоновского возбуждения имеет заметную величину в очень узких, хорошо отделенных друг от друга интервалах скоростей (энергий) ядра [2]. Положение этих интервалов определяется энергией возбуждения ядра и может быть легко вычислено.

Количественное отличие расчетного значения энергии $E_{\text{кин}}$ от экспериментального значения, которое может и должно наблюдаться в ядерном КВ, решает проблему точной экспериментальной проверки замедления хода времени движущихся часов при значениях лоренц-фактора пучка ядер, используемых в эксперименте.

Такой проверкой можно считать экспериментальные результаты, опубликованные в интересной работе Ю. Такабаяши (Y. Takabayashi) — его докторской диссертации [51], в которой сведены воедино, со всеми ссылками, превосходные результаты, полученные группами японских исследователей под руководством К. Комаки (K. Komaki), Ю. Ямазаки (Y. Yamazaki) и

¹ Следует отметить, что после публикации работы [5] получил распространение термин "резонансное когерентное возбуждение". Называя в свое время эффект "когерентным возбуждением", автор имел совершенно ясные и четкие физические аргументы для использования такого термина. "Резонансное когерентное возбуждение" — явно избыточный термин, так же, как "масло масляное".

Т. Азума (Т. Azuma). Несколько подробнее об этих работах см. ниже. Точность определения расчетного и экспериментально полученного положения резонансных пиков, отвечающих КВ в релятивистских ($\gamma \sim 1,4-1,6$) водородоподобных ионах Ar^{17+} и Fe^{25+} , порядка $10^{-4}-10^{-5}$.

Таким образом, в пределах этой точности замедление времени в системе координат, двигающейся со скоростью, соответствующей лоренц-фактору $\gamma \sim 1,4-1,6$, можно считать экспериментально подтвержденным.

Выводы ОТО, касающиеся изменения времени в системе координат, двигающейся с ускорением, также могут быть проведены в экспериментах по КВ ядерных уровней. Такая возможность связана с тем фактом, что быстрые ядра, двигающиеся через кристалл, подвергаются колоссальным ускорениям $\sim 10^{22}$ см с^{-2} (за счет ионизационных потерь). В соответствии с принципом эквивалентности такие ускорения изменяют ход времени в системе координат, связанной с пролетающим ядром (ядро как бы движется в "эффективном" гравитационном поле, вызывающем такие ускорения), и, как следствие, сдвигают энергетические уровни в пролетающем через кристалл ядре. Эти изменения энергетических уровней могут быть зафиксированы с помощью КВ, которое в данном случае является быстрым способом точного измерения положения ядерных уровней "на лету", внутри кристалла.

3. Ключевые экспериментальные результаты по КВ

Первые результаты, свидетельствующие об открытии явления КВ, были получены в экспериментах, проведен-

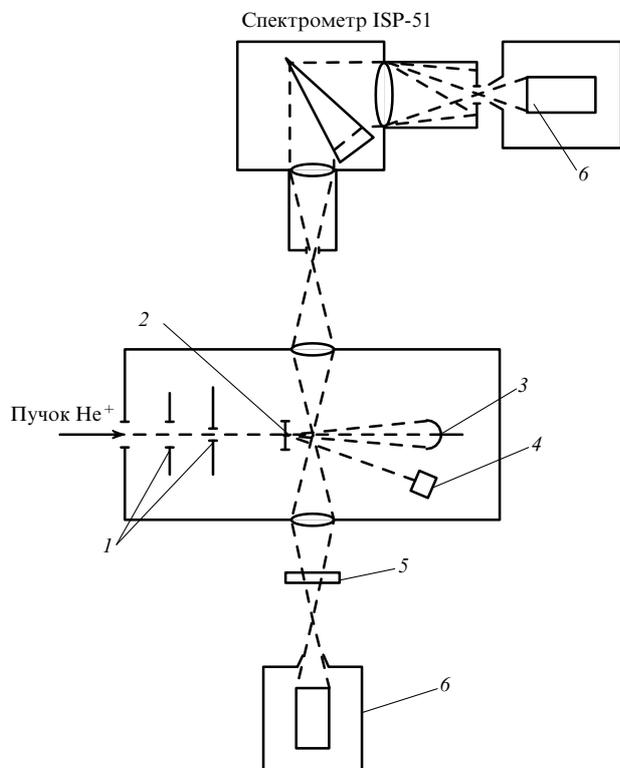


Рис. 2. Блок-диаграмма эксперимента [3]. 1 — диафрагма; 2 — монокристаллическая мишень; 3 — интегратор тока; 4 — полупроводниковый счетчик; 5 — интерференционный фильтр; 6 — фотомножитель.

ных в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) [3, 4]. В этих экспериментах было получено КВ уровней ионов He^+ , пролетающих через монокристаллическую пленку серебра (рис. 2). Был получен всплеск интенсивности фотонов (переход $n = 4 \rightarrow n = 3$; $\lambda = 4685$ Å), излучаемых водородоподобными ионами He^+ , пролетевшими через монокристаллическую пленку серебра со скоростью, близкой к "резонансной", при которой выполняется условие совпадения частоты взаимодействия иона He^+ с атомами монокристаллической пленки серебра с частотой перехода ($n = 1 \rightarrow n = 4$) (рис. 3). Это увеличение интенсивности фотонов является однозначным свидетельством существования явления КВ.

Дополнительные экспериментальные доказательства существования явления КВ были получены вскоре после работ, выполненных в ИТЭФ, во Франции (Лион) [5] (рис. 4) и США (Ок-Ридж) [6] (рис. 5). Если французский эксперимент был упрощенным вариантом экспериментов ИТЭФ, то в экспериментах, выполненных в США, КВ было обнаружено в быстрых тяжелых ионах бора, углерода, азота, кислорода и фтора по изменению заряда водородоподобных ионов, происходящему в результате двухступенчатого процесса внутри монокристаллической пленки: КВ из состояния $n = 1$ в состояние $n = 2$ и последующая ионизация возбужденного состояния из-за увеличения размера ионов в возбужденном состоянии $n = 2$.

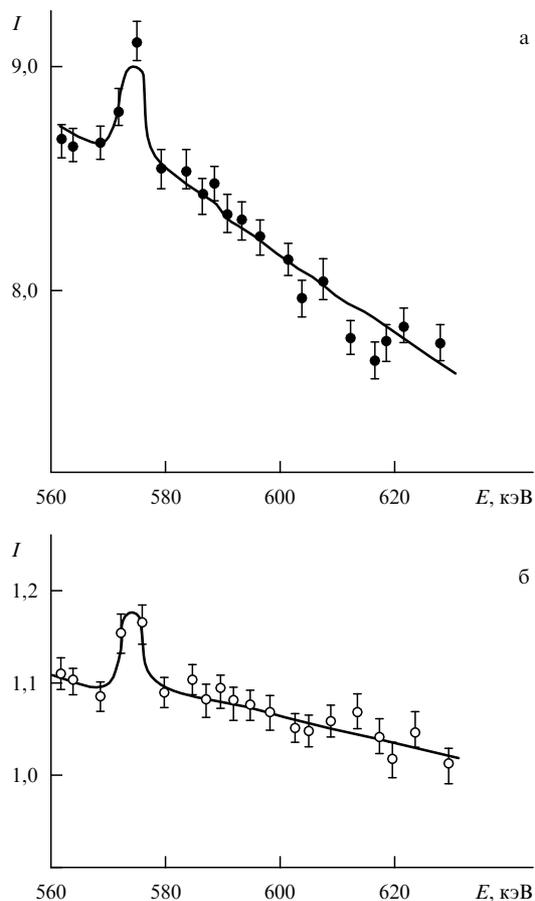


Рис. 3. Интенсивность линии 4685 Å, излучаемой пучком ионов He^+ , пролетевшим через серебряную мишень, как функция энергии пучка.

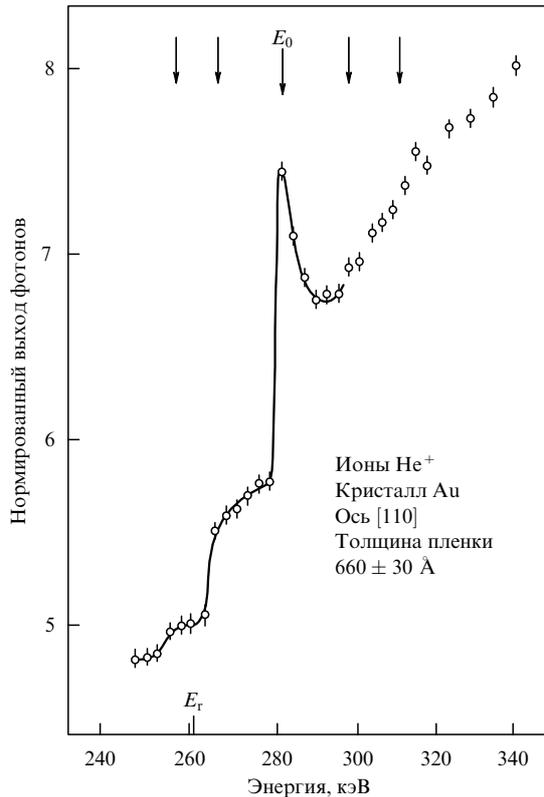


Рис. 4. Экспериментальные результаты лионской группы [5].

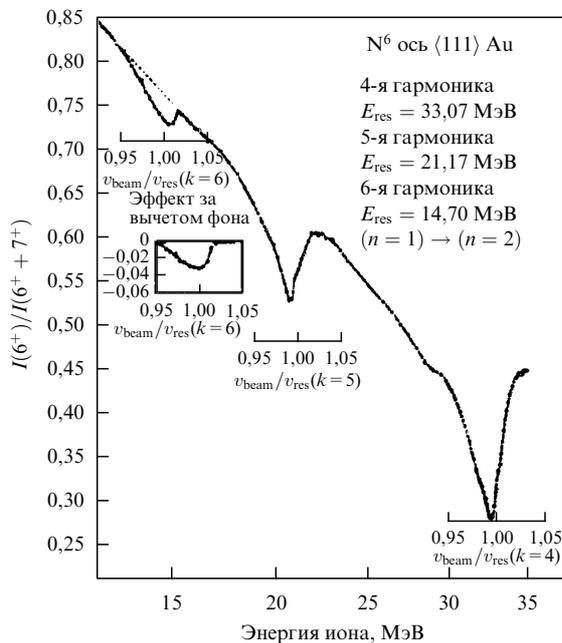


Рис. 5. Экспериментальные результаты ок-риджской группы [6].

Когерентное возбуждение водородоподобных ионов Si^{13+} на седьмой и восьмой гармониках было получено интернациональной группой исследователей в Канаде [45] (рис. 6).

В настоящее время лидирующее положение в экспериментальных исследованиях КВ, несомненно, занимает Япония. В этой стране тематикой КВ тяжелых ионов занимаются в двух крупных ускорительных центрах, расположенных около Токио, — RIKEN и CHIBA.

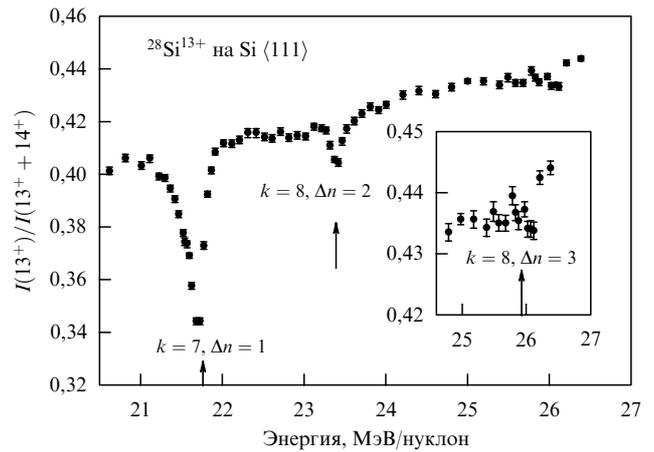


Рис. 6. Экспериментальные результаты канадской группы [45].

Организована целевая лаборатория, в плане которой записаны исследования по КВ тяжелых ионов.

Как результат таких координированных усилий, в Японии за последние годы получены наиболее обширные экспериментальные результаты по КВ тяжелых ионов. К. Комаки, Ю. Ямазаки, Т. Азума и их соавторы [19, 31, 33, 34, 36] исследовали КВ водородоподобных и гелийподобных ионов Ar^{17+} , Ar^{16+} , Fe^{25+} , Fe^{24+} , используя измерения зарядовых распределений ионов, пролетевших через тонкий кремниевый кристалл, а также измеряя интенсивность рентгеновских лучей, испускаемых тяжелыми ионами при высвечивании возбужденного состояния, возникающего внутри кристаллической мишени.

В этих экспериментах положение резонансного пика КВ может быть определено с высокой точностью (10^{-4} – 10^{-5}). Это означает, что с помощью эффекта КВ реализована спектроскопия высокой точности возбужденных состояний тяжелых ионов, что, в свою очередь, позволяет использовать эти результаты, в частности, для довольно точной проверки одного из главных выводов СТО — изменения хода времени в системе координат,

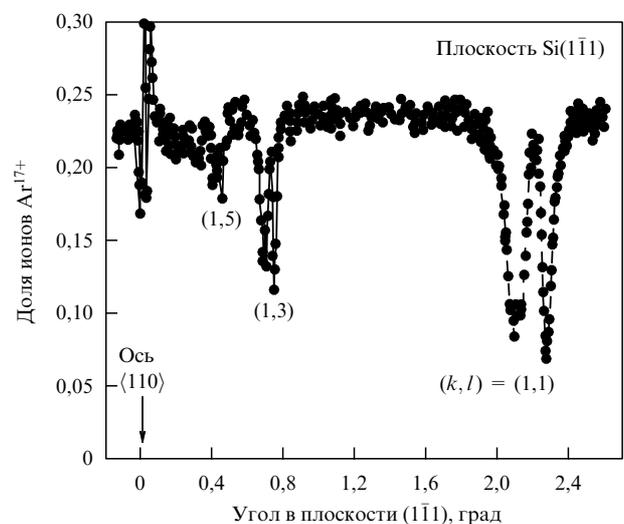


Рис. 7. Экспериментальные данные токийской группы по КВ ионов Ar , пролетевших через плоскость $\langle 111 \rangle$ Si .

двигающейся с околосветовой скоростью, о чем уже было упомянуто выше.

Один из многих превосходных экспериментальных результатов, полученных в Японии, приведен на рис. 7.

4. Какая часть научной программы будущего γ -лазера может быть реализована в настоящее время?

Некоторые основные проблемы, которые могут быть решены в будущем с помощью γ -лазера (пока не созданного):

1. Технологические и другие приложения γ -лазера.
2. Рентгенограмма отдельных молекул.
3. Спектроскопия возбужденных состояний ядер и других частиц.

Вообще говоря, γ -лазер трудно приспособить для спектроскопии из-за практически *полной неперестраиваемости* его частоты, в отличие, например от генераторов оптического и радиодиапазонов. Тем не менее спектроскопия возбужденных состояний ядер и других частиц может быть реализована в настоящее время, т.е. именно в этой части возможна некая замена γ -лазера.

В системе координат пролетающей через кристалл частицы электростатическое поле кристаллической решетки формируется в виде ряда узких монохроматических линий электромагнитных волн на основной частоте $\nu_1 = (\nu_0/a_0)\gamma$ и ее гармониках. Эти спектры "виртуальных" фотонов в виде узких линий практически не отличаются от спектров плоских монохроматических линий *реальных* электромагнитных волн в релятивистском случае $\gamma \gg 1$.

Физика КВ пролетающих через кристалл частиц полностью эквивалентна взаимодействию частицы, двигающейся в кристалле, с эквивалентным монохроматическим излучением высокой спектральной плотности, частоту которого можно *плавно* регулировать, изменяя скорость частицы. Поэтому процессы, происходящие с этой частицей, эквивалентны процессам, происходящим с ней под воздействием когерентного монохроматического излучения высокой спектральной плотности, т.е. под воздействием пучка γ -лазера. Перспективность такого типа спектроскопии определяется: 1) возможностью плавной перестройки частоты (подстройка под резонанс!); 2) широким диапазоном частот (от 10 эВ до 100 МэВ); 3) вероятностью возбуждения $\sim n^2$ (n — число слоев монокристаллической мишени).

С этой точки зрения толщина монокристаллической мишени в 1 мм иногда может быть эквивалентна толщине изотропной мишени в 1 км.

Таким образом, КВ может послужить фундаментом развития своеобразной "радиоспектроскопии", перекрывающей динамический диапазон частот в 7 порядков величины от 10 эВ до 100 МэВ. Это утверждение было сделано автором в 1981 г. на пленарном заседании X Международной конференции по атомным столкновениям в твердом теле (Лион, 1981 г.) [52]. К сожалению, впоследствии оно так и не было опубликовано. На рисунке 8 воспроизведен подлинник того рисунка, который был продемонстрирован автором настоящего доклада на этой конференции. И сейчас можно с удовлетворением констатировать, что такая высокоточная спектроскопия возбужденных состояний тяжелых ионов успешно создана и продолжает развиваться в Японии. Такая спектроскопия, основанная на использовании явления КВ, имеет свои достоинства и недостатки, но

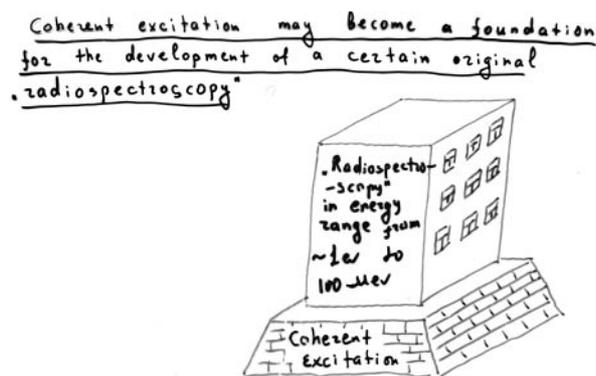


Рис. 8. Воспроизведение оригинального рисунка из доклада автора на конференции 1981 г. в Лионе, Франция [52]. В верхней части — утверждение о возможности развития "радиоспектроскопии" на основе КВ, впервые высказанное автором.

другого пути исследования взаимодействий частиц с монохроматическим электромагнитным излучением высокой спектральной плотности и перестраиваемой частоты в динамическом диапазоне, перекрывающем 7 порядков величины, пока нет.

5. Международный статус эффекта КВ

В течение последних десятилетий исследования по КВ продолжали развиваться как в теоретическом, так и экспериментальном плане [18–51] в научных центрах США, Канады, России, Германии и Японии. В программах многих международных конференций по атомным столкновениям в твердом теле, начиная с конца 70-х годов, исследования по КВ атомов и ядер, пролетающих через кристалл, выделены как новое направление в исследовании взаимодействия быстрых частиц с веществом, наряду с такими широко известными явлениями, как каналирование и излучение при каналировании.

В подавляющем большинстве отечественных и зарубежных работ, исследовавших КВ теоретически и экспериментально, содержатся ссылки на публикации ИТЭФ, как на работы, в которых это явление впервые предсказано и впервые обнаружено. Дополнительным подтверждением определяющего творческого вклада ИТЭФ в предсказание и открытие этого явления служит то, что оно в зарубежной литературе носит имя автора настоящего доклада [11, 12, 14, 15].

Международный статус исследований по КВ возрос после 2000 г., когда американский ученый Ш. Датц (S. Datz) из Ок-Риджа за свои научные достижения, включающие обширные экспериментальные исследования по КВ, был награжден самой престижной в США правительственной премией — золотой медалью им. Э. Ферми. Награждение Ш. Датца этой премией выводит его на уровень таких выдающихся физиков, как Дж. фон Нейман, Эрнст Лоуренс, Ганс Бете и Эдвард Теллер, которые были первыми лауреатами этой самой престижной премии США в 1956 г., когда эта награда была только введена.

Как написано в номинации, "Ш. Датц получает золотую медаль им. Э. Ферми за свои исследования в атомной физике и ионном каналировании...". И хотя утверждение, опубликованное в пресс-релизе: "Его исследования в этой области имели результатом первую

демонстрацию когерентного возбуждения ионов периодическим потенциалом кристаллической решетки...», является неверным, причем грубо неверным (что, кстати, позднее письменно подтверждено исполнительным секретарем комитета по присуждению премии им. Э. Ферми после получения соответствующей информации), сам факт присуждения высшей Президентской премии страны за исследования, включающие эксперименты по КВ, является несомненным признанием значимости эффекта КВ научным сообществом США.

Список литературы

1. Огороков В В *ЯФ* **2** 1009 (1965)
2. Огороков В В *Письма в ЖЭТФ* **2** 175 (1965)
3. Огороков В В и др. *Письма в ЖЭТФ* **16** 588 (1972); Okorokov V V et al. *Phys. Lett. A* **43** 485 (1973)
4. Огороков В В и др., Препринт № 19 (М.: ИТЭФ, 1973)
5. Gaillard M J et al. *Phys. Lett. A* **45** 306 (1973)
6. Datz S et al. *Phys. Rev. Lett.* **40** 843 (1978); Moak C D et al. *Phys. Rev. A* **19** 977 (1979)
7. Калашников Н П, Панкратов С Г, в сб. *Труды V Всесоюз. совещ. по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами, Москва, 1973* (Изд-во МГУ, 1974) с. 137
8. Калашников Н П, Панкратов С Г *ФТТ* **16** 843 (1974)
9. Базылев В А, Жеваго Н К *ЖЭТФ* **77** 312 (1979)
10. Kondo J J. *Phys. Soc. Jpn.* **36** 1406 (1974)
11. Shindo S, Ohtsuki Y H *Phys. Rev. B* **14** 3929 (1976)
12. Yamashita Y, Ohtsuki Y H *Phys. Rev. B* **22** 1183 (1980)
13. Crawford O H, Ritchie R H *Phys. Rev. A* **20** 1848 (1979)
14. Jackson S A, Platzman P M *Phys. Rev. B* **22** 88 (1980)
15. Kupfer E, Gabriel H, Burgdörfer J Z. *Phys. A: Atom. Nucl.* **300** 35 (1981)
16. Огороков В В *Письма в ЖЭТФ* **62** 895 (1995); Pivovarov Yu L *Nucl. Instrum. Meth. B* **145** 96 (1998)
17. Огороков В В *Письма в ЖЭТФ* **74** 445 (2001)
18. Fujimoto F *Nucl. Instrum. Meth. B* **40/41** 165 (1989)
19. Iwata Y et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **48** 163 (1990)
20. Andersen J U et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **119** 292 (1996)
21. Datz S et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **100** 272 (1995)
22. Пивоваров Ю Л, Широков А А, Воробьев С А *ДАН СССР* **272** 86 (1983)
23. Пивоваров Ю Л, Широков А А *ЯФ* **44** 882 (1986)
24. Дубин А Ю *ЯФ* **52** 1243 (1990)
25. Fusina R, Kimball J C *Nucl. Instrum. Meth. B* **27** 368 (1987)
26. Pivovarov Yu L *Nucl. Instrum. Meth. B* **145** 96 (1998)
27. Miller P D et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **13** 56 (1986)
28. Okorokov V V, Proshin S V, Preprint ИТЭФ № 13 (1980)
29. Okorokov V V et al., Preprint ИТЭФ № 49 (1990)
30. Auth C, Winter H *Phys. Rev. A* **62** 012903 (2000)
31. Ito T et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **164** 68 (2000)
32. Winter H et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **157** 32 (1999)
33. Azuma T et al. *Phys. Rev. Lett.* **83** 528 (1999)
34. Komaki K et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **146** 19 (1998)
35. Pivovarov Yu L *Nucl. Instrum. Meth. B* **145** 96 (1998)
36. Azuma T et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **135** 61 (1998)
37. Hatke N et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **135** 307 (1998)
38. Kimura K et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **135** 419 (1998)
39. Hecht T, Winter H *Phys. Lett. A* **243** 306 (1998)
40. Salin A, Arnau A, Echenique P M *Phys. Rev. A* **57** 2772 (1998)
41. Kimura K, Mannami M *Phys. Rev. A* **57** 1121 (1998)
42. Auth C et al. *Phys. Rev. Lett.* **79** 4477 (1997)
43. Hatke N et al. *Phys. Rev. Lett.* **79** 3395 (1997)
44. Pivovarov Yu L et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **119** 283 (1996)
45. Andersen J U et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **119** 292 (1996)
46. Степанов А В *ЖЭТФ* **109** 1489 (1996)
47. de Abajo F J G, Echenique P M *Nucl. Instrum. Meth. B* **115** 299 (1996)
48. Kimura K et al. *Phys. Rev. Lett.* **76** 3850 (1996)
49. Geissel H et al. *Izv. Akad. Nauk Fiz.* **59** 185 (1995)
50. Степанов А В *ЯФ* **58** 2166 (1995)

51. Takabayashi Y "High precision spectroscopy of helium-like heavy ions with resonant coherent excitation", Doctor thesis (Tokyo: Tokyo Metropolitan Univ., 2001)
52. *X Intern. Conf. on Atomic Collisions in Solids, 1981, Lion, France, Abstract*

PACS numbers: 67.57 – z, 76.60. – k

Сверхтекучие фазы ^3He в аэрогеле

В.В. Дмитриев, В.В. Завьялов, Д.Е. Змеев,
И.В. Косарев, Н. Малдерс

1. Введение

Сверхтекучесть чистого ^3He , в котором происходит куперовское спаривание в состояние с полным спином 1, хорошо изучена, и во многих случаях имеется количественное согласие между теорией и экспериментом [1]. Исследования влияния примесей на сверхтекучий ^3He , несомненно, представляют большой интерес для теории систем с нетривиальным куперовским спариванием. Единственным веществом, которое растворяется в жидком ^3He при низких температурах, является ^4He . Однако растворимость ^4He в ^3He экспоненциально падает при понижении температуры и при $T \sim 1$ мК (т.е. при таких температурах, когда ^3He является сверхтекучим) практически равна нулю. Недавно появилась другая возможность внесения примесей в сверхтекучий ^3He , связанная с развитием технологии по получению аэрогелей малой плотности. Аэрогель представляет собой "мочалку", состоящую из нитей SiO_2 диаметром порядка 30 Å, причем характерное расстояние между нитями составляет 500–1000 Å (речь идет о так называемом 98 %-ном аэрогеле плотностью 38 мг см $^{-3}$, в котором 98 % объема свободно и с которым проводится большинство экспериментов). Длина когерентности сверхтекучего ^3He составляет несколько сот ангстрем, т.е. намного превышает диаметр нитей, которые, таким образом, играют роль примесей.

Интенсивные исследования ^3He в аэрогеле начались после того, как в работах [2, 3] было обнаружено, что аэрогель малой плотности не подавляет сверхтекучесть полностью, а приводит лишь к понижению температуры сверхтекучего перехода (на 20–30 % при давлениях 20–30 бар). В результате была определена фазовая диаграмма сверхтекучего ^3He в аэрогеле (см., например, [3–7]), внешне похожая на фазовую диаграмму объемного ^3He (рис. 1). Выяснилось, что в зависимости от условий реализуются две сверхтекучие фазы, названные по аналогии с объемным ^3He фазами А-типа и В-типа. Следует, однако, отметить, что между фазовыми диаграммами "обычного" объемного ^3He и ^3He в аэрогеле имеется качественное отличие. В слабом магнитном поле переход в фазу А-типа заметен только при охлаждении из нормальной фазы, причем эта фаза является метастабильной (штриховой линией на рис. 1 показана примерная линия перехода из переохлажденной фазы А-типа в фазу В-типа). При отогреве из фазы В-типа переход в фазу А-типа наблюдать не удается, и он происходит, видимо, только в непосредственной близости к температуре сверхтекучего перехода ^3He в аэрогеле (T_{ca}). В объемном ^3He А-фаза также может находиться в переохлажденном метастабильном состоянии, но, в отличие