

К ИСТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ ГАММА-ЛУЧЕЙ

М. МЛАДЖЕНОВИЧ [СФРЮ]

Историю изучения внутренней конверсии можно начать с 1910 г., когда Л. Мейтнер начала свою работу в Берлине. В это же время в Берлин вернулся из Монреаля О. Ган, где он работал с Резерфордом и специализировался по радиохимии, бывшей тогда еще в младенческом состоянии. Мейтнер была принята в Химический институт и начала работать вместе с Ганом. Так началось их сотрудничество, продолжавшееся три десятилетия¹.

Мейтнер и Ган пытались разложить бета-излучение источника, содержащего несколько членов радиоактивного семейства, на моноэнергетические компоненты, каждая из которых соответствовала бы бета-переходу от одного члена семейства к другому. Но метод поглощения, который они вначале использовали, не сулил успеха. Тогда Ган решил применить магнитный анализ, как это сделал Резерфорд для альфа-лучей. По просьбе Гана фон Байер изготовил аппарат, в котором электроны отклонялись магнитным полем, сходный с прибором Резерфорда.

Байер и Ган² утверждали, что бета-лучи, как и альфа-лучи, покидают атом с характерной для каждого данного вещества скоростью. Так, для радиоактивного осадка тория они получили две сильные линии, принадлежащие, по их мнению, двум известным бета-излучателям данного семейства. Но в свете этого заключения трудно было объяснить наличие ряда слабых бета-линий.

К работе подключилась Л. Мейтнер, которая использовала более совершенные источники излучения. По мере распада первоначального препарата и накопления дочерних продуктов было произведено несколько измерений бета-спектра³. Было установлено, что одному и тому же радиоактивному веществу принадлежит по нескольку бета-линий, в частности спектр мезотория-II состоит из семи линий, а спектр радия-В имеет пять линий.

Таким образом, были впервые получены линейчатые спектры радиоактивных излучений, принадлежащие конкретному ядру, и было положено начало ядерной спектроскопии.

Теперь рассмотрим, как было установлено, что наблюдаемые линии были не чем иным, как линиями электронов внутренней конверсии. Это оказалось возможным благодаря переходу от простого отклоняющего устройства к спектрометру с фокусировкой электронов, изобретенному Данишем. Резерфорд оценил потенциальные возможности нового инструмента и совместно с Робинсоном построил спектрометр, на котором были перемерены спектры RaB, RaC и найдено много новых линий⁴.

Следующий эксперимент Резерфорда и его сотрудников был особенно важен⁵. Запаянная стеклянная трубка с радоном и продуктами его распада заворачивалась в фольгу из разных металлов и помещалась в спектрометр. Стекло и фольга задерживали бета-лучи, но пропускали гамма-лучи. Гамма-кванты выбирали из фольги фотоэлектроны, которые анализировались спектрометром по энергии. Оказалось, что спектр электронов имеет такую же структуру, как линейчатый бета-спектр, а в случае платиновой фольги фотоэлектронные линии оказывались практически на тех же местах по энергии, что и линии спектра RaB. Резер-

¹ Краткая история исследований внутренней конверсии написана Дж. Гамильтоном (Hamilton J. Internal Conversion Processes. N. Y., Acad. Press, 1966, p. 1).

² Baeyer O. v., Hahn O. «Phys. Z.», 1910, v. 11, p. 488.

³ Baeyer O. v., Hahn O., Meitner L. «Phys. Z.», 1911, v. 12, p. 273, 378.

⁴ Rutherford E., Robinson H. «Philos. Mag.», 1913, v. 26, p. 717.

⁵ Rutherford E., Robinson H., Rawlinson W. «Philos. Mag.», 1914, v. 28, p. 281.

фордом был сделан вывод⁶, что наблюдаемые Ганом и Мейтнер линии — это конверсия гамма-лучей в электронной оболочке радиоактивного атома. К такому же заключению пришла на основании своих аналогичных опытов и сама Лизе Мейтнер⁷. Что же касается электронов бета-распада, которые искал Отто Ган, то сотрудником Резерфорда Чэдвиком в 1914 г. было доказано, что они дают не линейчатый, а непрерывный спектр.

Исследования, прерванные первой мировой войной, были завершены в начале 20-х годов, когда сотрудник Резерфорда Эллис⁸, а также Мейтнер произвели классификацию наблюдаемых линий по атомным оболочкам, из которых выбиваются электроны⁹. Они установили, что, зная энергию связи электрона на оболочке и измерив энергию конверсионного электрона, можно по закону сохранения энергии найти точно энергию гамма-перехода.

В этих же работах Эллисом были найдены простые аддитивные соотношения между частотами (т. е. энергиями) гамма-лучей. На этой основе был построен первый в истории физики спектр ядерных уровней, т. е. было положено начало трактовки ядерной спектроскопии как науки о спектрах уровней ядер. Хотя впоследствии расположение уровней в этой первой схеме уровней ядра RaВ пришлось изменить, утверждения о том, что ядро как квантовая система должно иметь дискретный набор энергетических уровней, что их изучение дает важнейшую информацию о структуре ядра, что их возбуждение происходит в результате радиоактивных превращений, а гамма-излучение возникает при переходах между разными квантовыми состояниями ядра и, таким образом, конверсионный спектр и спектр ядерных уровней тесно связаны друг с другом, оказались верными.

Однако Эллис ошибочно полагал, что гамма-распад предшествует другим видам распада, т. е. что конверсия происходит в материнском ядре. Мейтнер первая поняла, что конверсия идет в дочернем ядре при переходах между уровнями, возбужденными в предшествующем альфа-или бета-распаде. Экспериментальным доказательством этого важного факта Лизе Мейтнер был завершен период открытия внутренней конверсии¹⁰.

Коэффициент внутренней конверсии

Термин «коэффициент внутренней конверсии» (ниже — КВК) был введен Эллисом и Скиннером¹¹. Они же впервые экспериментальным путем получили его приближенное значение («независимо от каких-либо гипотез для трех сильных линий RaВ число конверсионных электронов порядка 0,1 от числа распадов»). Эллис и Вустер также пришли к выводу, что конверсия происходит в дочернем ядре, и ввели принятое ныне обозначение α для КВК¹².

Герни получил среднее значение коэффициента конверсии на К-оболочке $\alpha_K \approx 0,12$ для Ra(B+C) и $\alpha_K \approx 0,25$ для F-линии ThВ, имевшей меньшую энергию, и сделал вывод, что КВК меняется с длиной волны λ (несколько медленнее, чем λ_3)¹³. Аналогичная зависимость ($\alpha_K \sim \lambda^{2,65}$) была найдена Эллисом и Вустером¹⁴.

⁶ Rutherford E. «Philos. Mag.», 1914, v. 28, p. 305; 1917, v. 34, p. 153.

⁷ Meitner L. «Z. Phys. B», 1922, v. 9, p. 131, 145.

⁸ Ellis C. D. «Proc. Roy. Soc. A», 1921, v. 99, p. 261.

⁹ Ellis C. D. «Proc. Roy. Soc. A», 1922, v. 101, p. 1.

¹⁰ Meitner L. «Z. Phys.», 1925, v. 34, p. 807.

¹¹ Ellis C. D., Skinner H. W. «Proc. Roy. Soc. A», 1924, v. 105, p. 185.

¹² Ellis C. D., Wooster W. A. «Philos. Mag.», 1925, v. 50, p. 521.

¹³ Guernsey R. W. «Proc. Roy. Soc. A», 1925, v. 109, p. 540; 1926, v. 112, p. 380.

¹⁴ Ellis C. D., Wooster W. A. «Proc. Cambr. Philos. Soc.», 1927, v. 23, p. 717.

Эллис и Астон впервые выполнили тщательные измерения КВК на К-, L-, M- (и даже иногда N-) оболочках для ряда переходов в радиоактивных ядрах, используя метод сравнения числа конверсионных электронов и фотоэлектронов для одной и той же гамма-линии¹⁵. Их работа послужила образцом для дальнейших измерений КВК. Ими также была отмечена сильная зависимость КВК от энергии, но не было найдено единой формулы для такой зависимости, пригодной для КВК всех ядер и всех энергий от 100 кэВ до 2 МэВ. Отмечена была сильная разница в отношениях КВК на оболочках для разных переходов.

Эллис и Астон, а до них Тибо (тезисы, 1925 г.) обратили внимание на сильную конверсионную линию перехода 1,43 МэВ, для которой не оказалось соответствующей линии в гамма-спектре. Фаулер объяснил это тем, что между уровнями со спином нуль идет только конверсионный переход, а гамма-излучение невозможно¹⁶. Это было первое указание на то, что спин основного состояния четно-четного ядра есть нуль, полученное методами ядерной спектроскопии.

В следующее десятилетие было лишь 10 сообщений о новых измерениях КВК. В двух из них впервые измерены КВК в искусственно-радиоактивных изотопах. 12 измерений появились в печати во время второй мировой войны. После войны число измерений КВК стало быстро расти, удваиваясь ежегодно, и к 1950 году общее число сообщений об измерениях КВК достигло 50.

Отметим также открытие в 30-х гг. в СССР конверсии с образованием электронно-позитронных пар Алихановыми и его сотрудниками, открытие Курчатовым и его сотрудниками изомерии в искусственно-радиоактивных ядрах¹⁷.

Теоретические расчеты КВК

Впервые КВК были вычислены Бертой Суирлз, которая, используя нерелятивистские волновые функции Шредингера, рассчитала конверсию на К- и L-оболочках излучения классического осциллирующего диполя, помещенного в центре ядра¹⁸. Она получила правильную зависимость КВК от энергии, разумное отношение К/L, но по абсолютной величине ее КВК оказались на порядок меньше экспериментальных. Как выяснилось впоследствии, нерелятивистское приближение неприменимо при расчетах КВК для атомных номеров $Z \sim 80$, для которых только и была известна конверсия в то время.

Первые приближенные релятивистские КВК были подсчитаны Казимиром, использовавшим выражение для волновых функций в пределе очень больших энергий¹⁹. Однако и эти КВК оказались на порядок меньше экспериментальных.

Впервые теоретические КВК, согласующиеся с экспериментальными, получил Хэлм²⁰ с помощью релятивистских электронных волновых функций уравнения Дирака. КВК были вычислены для электрического дипольного излучения (E1). Тем не менее некоторые экспериментальные КВК все же раз в 6 превышали КВК Хэлма. Тейлор и Мотт вычислили релятивистские КВК для электрического квадрупольного излучения (E2) и получили КВК, совпадавшие с некоторыми из экспериментальных

¹⁵ Ellis C. D., Aston G. H. «Proc. Roy. Soc. A», 1928, v. 119, p. 625; 1930, v. 129, p. 180.

¹⁶ Fowler R. H. «Proc. Roy. Soc. A», 1930, v. 129, p. 1.

¹⁷ Alihanov A. I., Kosodaev M. S. «Z. Phys.», 1934, v. 90, p. 249; Алиханов А. И., Козодаев М. С. ЖЭТФ, 1934, т. 4, с. 531; Kourtchatov B., Kourtchatov I., Moussowski L., Roussinow L. «C. R.», 1935, v. 200, p. 1201.

¹⁸ Swirles B. «Proc. Roy. Soc. A», 1927, v. 116, p. 491; 1928, v. 121, p. 447.

¹⁹ Casimir H. «Phys. Z.», 1931, v. 32, p. 665.

²⁰ Hulme H. R. «Proc. Roy. Soc. A», 1932, v. 138, p. 643.

значений²¹, не объясненных в работе Хэлма. Таким образом, была открыта фундаментальная зависимость КВК от мультипольности перехода, что в дальнейшем сыграло громадную роль в исследовании ядерных спектров. Фиск и Тейлор вычислили КВК для магнитных дипольных переходов (M1)²².

В этих основополагающих теоретических работах Кембриджской группы было показано, что теория КВК на верном пути. Далее была, наконец, окончательно внесена ясность в понимание физики процесса внутренней конверсии²³. Было доказано, что конверсия — это не фотоэффект гамма-лучей на электронах оболочки, а дополнительный, помимо гамма-излучения, путь электромагнитной разрядки возбужденного ядра. В связи с этим было введено общепринятое ныне определение КВК как отношения числа конверсионных электронов к числу гамма-квантов в ядерном переходе. Отметим, что предположение о том, что конверсия может не быть связанной с предварительным излучением гамма-кванта ядром, было высказано еще в 1922 г.²⁴ Доказательство, данное Тейлором и Моттом, Давыдов обобщил на переходы любой мультипольности²⁵. Эллис и Мотт в своей работе показали, что измерение КВК позволяет установить угловые моменты возбужденных уровней ядра ThC²⁶.

После открытия искусственной радиоактивности и первых измерений КВК в области средних и легких ядер можно было предположить, что и нерелятивистские расчеты КВК тоже полезны. Серия таких расчетов была начата Хеббом и Уленбеком. Они также обратили внимание физиков на то, что как КВК, так и отношения КВК на оболочках зависят от мультипольности перехода, что измерения этих величин могут служить для определения спина ядерных уровней, в частности изомерных. Опираясь на результаты Тейлора и Мотта, они показали, как уменьшается время жизни изомеров, если велик КВК²⁷.

Данков и Моррисон обобщили формулы Эллиса и Мотта для электрических переходов на случай любой мультипольности²⁸ и дали упрощенные релятивистские выражения для электрических и магнитных КВК в так называемом борновском приближении. Нерелятивистские КВК электрических мультипольностей для К- и L-оболочки были представлены в виде удобной небольшой таблицы в работе Хебба и Нельсона²⁹; схожие расчеты велись советским физиком Завелевичем³⁰. Нерелятивистские КВК магнитной мультипольности вычислялись Берестецким³¹ и Дреллом³² для К-оболочки, Ловеном и Тралли³³, а также Мамасахлисовым³⁴ для L-оболочки. Отметим еще работу Берестецкого³⁵, в которой впервые рассмотрены угловые корреляции конверсионных электронов.

²¹ Taylor H. M., Mott N. F. «Proc. Roy. Soc. A», 1932, v. 138, p. 665.

²² Fisk J. A., Taylor H. M. «Proc. Roy. Soc. A», 1934, v. 146, p. 178.

²³ Taylor H. M., Mott N. F. «Proc. Roy. Soc. A», 1933, v. 142, p. 215.

²⁴ Smekal A. «Zeitsehr. Phys. B», 1922, v. 10, p. 275.

²⁵ Давыдов А. С. ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 865.

²⁶ Ellis C. D., Mott N. F. «Proc. Roy. Soc. A», 1933, v. 139, p. 369.

²⁷ Hebb M. H., Uhlenbeck G. E. «Physica», 1938, v. 5, p. 605.

²⁸ Dankoff S. M., Morrison P. «Phys. Rev.», 1939, v. 55, p. 122.

²⁹ Hebb M. H., Nelson E. «Phys. Rev.», 1940, v. 58, p. 486.

³⁰ Завелевич Г. С. ЖЭТФ, 1941, т. 11, с. 213; «Изв. АН СССР», 1941, т. 5, с. 601.

³¹ Берестецкий В. Б. ЖЭТФ, 1946, т. 16, с. 676; т. 17, с. 672; 1948, т. 18, с. 1057.

³² Drell S. D. «Phys. Rev.», 1949, v. 75, p. 132.

³³ Lowen I. S., Tralli N. «Phys. Rev.», 1949, v. 75, p. 529.

³⁴ Мамасахлисов В. И. «Сообщ. АН ГССР», 1941, т. 2, с. 617.

³⁵ Берестецкий В. Б. ЖЭТФ, 1948, т. 18, с. 1070.

Обширные вычисления релятивистских КВК для широкой области атомных номеров Z , энергий и мультипольностей перехода были начаты Роузом и его сотрудниками в 1947 г.³⁶ Подобные грандиозные расчеты стали возможными благодаря появлению ЭВМ.

Первые таблицы Роуза содержали КВК на K -оболочки и начали распространяться по лабораториям мира в 1949 г. Сравнение КВК с нерелятивистскими и другими приближенными КВК показало, что последние верны в значительно более узкой области, чем думали раньше, и КВК могут отличаться от точных до 3 раз даже для $Z < 50$. Вскоре таблицы Роуза (с дополнениями, см. ниже) были опубликованы³⁷. Таблицы Роуза были одними из самых популярных таблиц, когда-либо созданных в ядерной физике, и трудно переоценить их влияние на развитие ядерной спектроскопии 50-х годов.

Стенли с сотрудниками вычислили КВК для трех L -подслоев, для трех энергий, трех значений Z и трех мультиполей ($E1$, $M1$, $E1$). Измерение отношения КВК в L -подслоях оказалось одним из самых чувствительных методов определения мультипольности³⁸.

Рейц показал, что применение ЭВМ позволяет учесть влияние электрического поля электронной оболочки атома (экранирование) при расчете КВК и что учет экранирования во многих случаях очень важен³⁹. В первых таблицах Роуза и расчетах Стенли экранирование не учтено, но позже КВК как на K -оболочке при малых энергиях, так и на L -оболочке были вычислены Роузом с учетом экранирования на основе статистической модели атома.

Убедительную демонстрацию использования КВК для классификации изомеров можно найти в статье Гольдгабера и Саньяра⁴⁰, явившейся одной из вех в развитии ядерной спектроскопии.

Спектрометры

Когда теоретические значения КВК стали общедоступны, важность измерения интенсивностей конверсионных линий сильно возросла. До конца 40-х годов электронные линейчатые спектры измерялись во многих случаях на спектрометрах с полукруговой фокусировкой и фотографической регистрацией. Их малая светосила и в особенности насыщение на кривой зависимости почернения от интенсивности облучения часто приводили к неудовлетворительным результатам при определении интенсивности линий. К этому времени в качестве детекторов стали использоваться счетчики Гейгера. Хотя ряд усовершенствований и улучшений поля в спектрометре позволил в отдельных случаях добиться довольно точных измерений⁴¹, но только после разработки Зигбаном, Свартхольмом и Хедграном в Стокгольме первого бета-спектрометра с двойной фокусировкой⁴² появилось новое поколение бета-спектрометров, имевших значительно лучшие характеристики по разрешающей способности и светимости. Для многих ядер теперь удалось измерить отношения КВК на L -подоболочках. Качество спектрометра с двойной фокусировкой было улучшено настолько, что в некоторых случаях предел

³⁶ Rose M. E., Goertzel G. H., Spinard B. I., Haar J., Strong P. «Phys. Rev.», 1949, v. 70, p. 184, 1883; 1951, v. 83, p. 79; Preprint ORNL-1023, 1951, Oak Ridge, USA.

³⁷ Rose M. E. In: Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy. Ed. K. Siegbahn. North-Holland, Amsterdam, 1955, p. 905. См. пер.: Роуз М. Э. В кн.: Бета- и гамма-спектроскопия. М., Атомиздат, 1959, с. 867.

³⁸ Gellman H., Griffith B., Stanley J. «Phys. Rev.», 1952, v. 85, p. 944.

³⁹ Reitz J. «Phys. Rev.», 1950, v. 77, p. 10.

⁴⁰ Goldhaber M., Sunyar A. «Phys. Rev.», 1951, v. 83, p. 906.

⁴¹ Джелепов Б. С., Башилов А. А., Золотавин А. В., Антоньева Н. М. «Докл. АН СССР», 1949, т. 64, с. 803.

⁴² Hedgran A., Siegbahn H., Swartholm N. «Proc. Phys. Soc. A», 1950, v. 63, p. 960.

разрешающей способности ставила лишь естественная ширина К-уровня⁴³. Спектрометр с двойной фокусировкой, особенно безжелезный, конструкция которого также была разработана Зигбаном через несколько лет после спектрометра с железным ярмом, стал основным инструментом ядерных спектроскопистов, который использовался во многих лабораториях мира для изучения схем распада ядер и ядерных моделей.

Конечные размеры ядра в теории КВК

Первая послевоенная конференция, посвященная изучению взаимодействия ядра с электронной оболочкой, состоялась в 1954 г. в Париже. На конференции обсуждалось использование внутренней конверсии для изучения изомеров, определения смеси мультипольностей и угловые корреляции. Кульминационным моментом конференции было выступление советского физика Слива после доклада Роуза о его расчетах КВК для L-подслоев. Эта конференция была первой послевоенной встречей физиков-ядерщиков, на которой присутствовала советская делегация. В ее состав входил Слив⁴⁴. До этого он опубликовал две статьи (одна из них совместно с Листенгартеном)⁴⁵, в которых было показано, что приближение точечного ядра, которое до этого использовалось во всех без исключения расчетах КВК, является плохим, особенно для M1-переходов. Случилось так, что статьи не были замечены, и когда Роуз в ответ на замечание заявил, что приближение точечного ядра справедливо и что этот вопрос не нуждается в обсуждении⁴⁶, Слив убедительно показал, что поправка на конечные размеры ядра превышает 50% от величины КВК на К-оболочке для M1-переходов в тяжелых ядрах. Оживленная дискуссия продолжалась еще долго после окончания заседания.

Таблицы Слива и Банд⁴⁷, вычисленные с учетом конечных размеров ядра и экранирования для всех $Z > 40$, были опубликованы в 1956—1958 гг. Разница между КВК из таблиц Роуза и из таблиц Слива и Банд быстро растет с атомным номером Z : от $\sim 10\%$ для $Z=60$ до 100% для $Z=96$ (К-оболочка, переход 256 кэВ, M1). Эта разница в несколько раз меньше для электрических переходов (E1, E2), но растет с увеличением порядка мультипольности (для магнитных переходов — наоборот).

Различия КВК из вышеуказанных таблиц слабо растут с энергией. Влияние конечных размеров ядра на КВК L-оболочки почти такое, как для К-оболочки, оно меньше для L_{II} и совсем мало для L_{III}-слоя.

Таким образом, было подтверждено наличие этого эффекта в M1-переходах тяжелых элементов. Это открыло новую эру критического сопоставления теории и эксперимента. Поэтому появление таблиц Слива и Банд можно рассматривать как естественный предел для обзора, имеющего исторический характер.

Итак, подведем итоги. В течение нескольких десятилетий важнейшим (а часто и единственным) источником наших сведений о спектрах гамма-лучей и о спектрах ядерных уровней, о свойствах этих уровней (энергии возбуждения, моменте количества движения — спине и четности волновой функции в различных состояниях ядра) был метод исследования явления внутренней конверсии. Трудно переоценить вклад, который в свое время был внесен в изучение структуры ядер этим методом. Становление и развитие метода явилось результатом коллективной деятель-

⁴³ Slätilis A., Lindström G. «Phys. Rev.», 1952, v. 88, p. 1429; Mladjenović M. «Ark. Fys.», 1954, v. 8, p. 27.

⁴⁴ Слив Л. А. ЖЭТФ, 1951, т. 21, с. 770.

⁴⁵ Слив Л. А., Листенгартен М. А. ЖЭТФ, 1952, т. 22, с. 29.

⁴⁶ Rose M. E. «J. Phys. et Radium», 1955, v. 16, p. 520.

⁴⁷ Слив Л. А., Банд И. М. Таблицы коэффициентов внутренней конверсии гамма-лучей. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1956, ч. I, К-оболочка; 1958, ч. II, L-оболочка.