

ИОНИЗАЦИЯ К-ОБОЛОЧКИ АТОМОВ ОТДАЧИ ПРИ α -РАСПАДЕ ПОЛОНИЯ

Ядерные переходы в той или иной степени связаны с «возмущением» электронных оболочек атомов, внутри которых эти переходы происходят. Можно указать следующие причины «возмущения» электронных оболочек при ядерных переходах:

1. Прямое взаимодействие ядерного излучения с электронами оболочки.
2. Отдача, испытываемая ядром при ядерных превращениях или столкновениях.
3. Изменение заряда ядра, происходящее в том случае, когда ядро испускает заряженную частицу.

В зависимости от того, насколько велико возмущение и какие причины его вызвали, оно может иметь либо характер адиабатического изменения состояния оболочки, заключающегося, грубо говоря, в медленном (по сравнению с электронными периодами) изменении формы распределения заряда, либо характер неадиабатического «встряхивания» — резкой перестройки оболочки, сопровождаемой возбуждением или ионизацией дочернего атома (атома отдачи).

Вероятность ионизации атомов отдачи при альфа- и бета-распаде была предметом вычислений ряда авторов¹⁻³. Расчёт показывает, что вероятность ионизации внешних электронных оболочек атомов отдачи как при α -распаде, так и при β -распаде порядка единицы. Это значит, что все (или почти все) атомы отдачи возникают в виде ионов. Такое заключение согласуется с опытными фактами, касающимися поведения атомов отдачи при α -распаде⁴ и β -распаде⁵ в электрических и магнитных полях. К сожалению, до сих пор нет никаких сведений, касающихся детальной картины ионизации внешних оболочек атомов отдачи, т. е. сведений о вероятности атому отдачи, возникшему в результате α - или β -распада, иметь тот или иной начальный заряд. Такие сведения особенно необходимы для опытов по изучению атомов отдачи при β -превращениях⁶ или для опытов по изучению взаимодействия атомов отдачи с веществом⁷.

Что касается ионизации внутренних электронных оболочек атомов отдачи при α - или β -превращениях, то до последнего времени не было сколько-нибудь убедительных экспериментальных доказательств этого явления, хотя теоретические расчёты^{1,2} проведены сравнительно давно. Это объясняется, с одной стороны, малой вероятностью таких процессов и, с

другой стороны, необходимостью применения для их обнаружения совершенной экспериментальной методики и техники. В этой связи представляют интерес появившиеся в 1951—1952 гг. работы 8, 9, 14—16, результаты которых с той или иной степенью точности позволяют утверждать об экспериментальном доказательстве ионизации внутренних электронных оболочек атомов отдачи, возникших при α -распаде.

Поскольку ионизация внутренней оболочки атомов отдачи сопровождается испусканием характеристических рентгеновских лучей или соответствующих им конверсионных (оже-) электронов, то принципиально обнаружение её сводится к обнаружению и идентификации этого излучения, т. е. к доказательству того, что излучение подходящей энергии действительно существует и что оно атомное по происхождению. Что касается механизма возбуждения рентгеновского излучения, сопровождающего ядерный переход, то сведения о нём могут быть получены путём дополнительного изучения относительных интенсивностей атомных и ядерных переходов.

Авторы реферируемых работ изучали α -распад Po^{210} . Схема распада Po^{210} была достаточно хорошо изучена¹⁰. Вопрос сводился к изучению относительной интенсивности 800-кэв гамма-излучения, испускаемого при распаде полония¹¹, и интенсивности «мягкого» излучения со средней энергией ~ 80 кэв, существование которого при распаде Po^{210} обнаружено Физером и его сотрудниками¹². Физер идентифицировал последнее как ядерное, идущее в каскаде с более жёстким 800-кэв излучением. При этом он считал, что при испускании ядром Po^{210} короткопробежной α -частицы происходит переход на возбуждённый уровень ядра Pb^{206} с энергией возбуждения ~ 880 кэв. Переход в основное состояние, по схеме Физера, состоит в последовательном испускании квантов энергии ~ 80 кэв и 800 кэв^{*)}. Это заключение основывалось на том факте, что интенсивность «мягкого» (80 кэв) и «жёсткого» (800 кэв) излучения сравнимы и на результатах опытов по критическому поглощению мягкого излучения в различных материалах.

Заключение Физера нельзя было считать окончательным. Так как средняя энергия характеристического K -излучения свинца (дочерний атом при распаде Po^{210}) ~ 75 кэв, то естественно было также предположить, что обнаруженное при распаде Po^{210} мягкое излучение есть рентгеновское излучение, принадлежащее свинцу. Программа исследований, посвящённых выяснению природы мягкого излучения и механизма его возбуждения, необходимо должна включать следующие разделы:

1. Измерение абсолютной интенсивности источника полония (путём счёта α -частиц); контроль чистоты, толщины и однородности распределения активного осадка полония в источнике;

2. Измерение относительной интенсивности «жёстких» γ -квантов при распаде полония $\left(\frac{N_{800}}{N_{\alpha}} \right)$;

3. Определение абсолютной величины энергии «мягкого» излучения, испускаемого при распаде Po^{210} ;

4. Измерение относительной интенсивности «мягкого» излучения: по отношению к интенсивности α -частиц $\left(\frac{N_{80}}{N_{\alpha}} \right)$ и к интенсивности «жёсткого» γ -излучения $\left(\frac{N_{80}}{N_{800}} \right)$;

*) Схема распада, в которой последовательность испускания γ -квантов иная, исключалась, так как в последнем случае переход с уровня 80 кэв на основное состояние либо должен сопровождаться очень большим изменением момента количества движения, либо интенсивность 80-кэв излучения должна быть сравнимой с интенсивностью α -частиц основной группы.

5. Измерение совпадений между «жестким» и «мягким» излучением Po^{210} .

6. Измерение относительной интенсивности электронов, возникающих при конверсии «жесткого» или «мягкого» излучений $\left(\frac{N_e}{N_\alpha}\right)$.

Выполнение этой программы, составляющей содержание реферируемых работ^{8,9}, должно дать однозначный ответ на вопрос об уровнях энергии ядра Pb^{206} , получающегося при распаде Po^{210} , и о механизме возникновения «мягкого» излучения, сопровождающего этот ядерный переход. Кроме того, количественные результаты указанных измерений должны служить проверкой теоретических расчетов¹, касающихся вероятности ионизации внутренних оболочек атомов отдачи при α -распаде.

Относительная интенсивность «жесткого» γ -излучения, определенная в одной из реферируемых работ⁸, оказалась равной $\frac{N_{800}}{N_\alpha} = (1,8 \pm 0,14) \times 10^{-5}$ квант на α -частицу. Измерения проводились на тонкостенном алюминевом счётчике. Результат сравнивался с измерением числа γ -квантов от калиброванного по 1,2-Мэв линии источника Co^{60} , используемого при той же «геометрии», что и источник Po^{210} . Естественно, что при этом производился учёт зависимости эффективности счётчика от энергии излучения.

В другой работе⁹ величина $\frac{N_{800}}{N_\alpha}$ вычислялась из определенных на опыте относительных интенсивностей $\frac{N_{80}}{N_{800}}$ и $\frac{N_{80}}{N_\alpha}$ и найдена равной $(1,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-5}$. Как видно, согласие по верхнему пределу вполне удовлетворительное.

Определение абсолютной величины энергии мягкого излучения полония имело важное значение для выяснения его природы. Физер¹² нашёл энергию мягкого излучения равной (84 ± 4) кэв. В работе⁹ энергия мягкого излучения найдена равной (76 ± 4) кэв. Эта величина гораздо лучше согласуется со средней энергией рентгеновского K -излучения свинца. В последней работе⁹ сравнивалось интегральное распределение величин импульсов, произведённых в сцинтилляционном счётчике (кристалл $\text{NaI} \cdot \text{Tl}$) «мягким» излучением Po^{210} , с одной стороны, и характеристическим K -излучением свинца, с другой. Производилась также дополнительная проверка: снимались дифференциальные кривые распределения величин импульсов, произведённых при одинаковых условиях «мягким» излучением Po^{210} и рентгеновским K -излучением свинца. Обе эти проверки убедительно показали подобие «мягкого» излучения полония и характеристического рентгеновского K -излучения свинца. Однако они ещё недостаточны для того, чтобы окончательно идентифицировать «мягкое» излучение как атомное излучение свинца. Необходимо показать, что не существует ядерного излучения такой же энергии и что «мягкое» излучение при распаде Po^{210} не является рентгеновским излучением ни одного из соседних со свинцом элементов.

Первая задача выполняется изучением счёта совпадений «жестких» и «мягких» лучей, испускаемых при распаде полония. Опыты такого рода проводились в обеих реферируемых работах и показали, что счёт совпадений мал. Это даёт основание заключить⁹, что «мягкое» излучение при распаде полония, по крайней мере на 90%, есть атомное излучение с энергией 76 кэв; если же имеет место каскадный процесс испускания γ -лучей¹², то время жизни промежуточного состояния должно быть больше, чем $12 \cdot 10^{-8}$ сек. (разрешающее время применённой в работе⁹ схемы совпадений).

Вторая задача лучше всего может быть решена использованием пропорционального счётчика. Методика изучения мягкого излучения (с энергией до ~ 100 кэв) с помощью пропорциональных счётчиков, наполненных тяжёлыми благородными газами (криптон, ксенон) с примесью двуокиси углерода или метана, получила в последние годы широкое распространение¹³. Так как излучение малой энергии поглощается в газе таких счётчиков преимущественно из-за фотоэффекта, то величина импульса пропорциональна полной энергии поглощённого луча. Эффективность пропорциональных счётчиков для «мягкого» излучения велика (достигает при соответствующем выборе наполнителя 100%). Авторы⁸, используя калиброванный по энергии пропорциональный счётчик, помещённый в сильное магнитное поле (~ 7000 гаусс)*, изучали распределение величин импульсов, произведённых в счётчике «мягким» излучением полония. Разрешение по энергии было вполне достаточным, чтобы ясно разделить «пики», соответствующие K_α - и K_β -линиям рентгеновского излучения свинца.

Поскольку точность калибровки пропорционального счётчика по энергии была недостаточно велика, была проведена серия дополнительных опытов по критическому поглощению «мягкого» излучения в вольфраме, иридии, платине, золоте и осмии. Эти опыты доказали, что мягкое рентгеновское излучение, сопутствующее α -распаду Po^{210} , принадлежит свинцу, но не атомам соседних элементов.

Дальнейшей задачей исследования явилось выяснение механизма возникновения рентгеновского K -излучения свинца при распаде полония. Рентгеновские лучи свинца могут возникать либо в результате внутренней конверсии «жёсткого» (800 кэв) излучения полония, либо из-за ионизации внутренних оболочек атома отдачи, происходящей вследствие α -распада. Может иметь место и тот и другой процесс одновременно. Наличие первого механизма ионизации K -оболочки атома отдачи при распаде Po^{210} было доказано в работе⁸ путём обнаружения электронов внутренней конверсии. Энергия электронов не измерялась, но была измерена их относительная интенсивность:

$$\frac{N_e}{N_\alpha} = (1,2 \pm 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ электронов на } \alpha\text{-распад.}$$

Эта величина определялась сравнением кривых поглощения электронов от калиброванного источника Po^{201} и от стандартного источника $\text{Ra}(D+E)$ в алюминии. С другой стороны, в той же работе⁸ на измеренных пропорциональным счётчиком дифференциальных кривых распределения «мягкого» излучения по энергии была определена относительная интенсивность «мягкого» излучения:

$$\frac{N_{80}}{N_\alpha} = (1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-6}.$$

Если предположить, что все обнаруженные в опыте электроны суть электроны, возникающие при внутренней конверсии 800-кэв γ -излучения, то из сравнения $\frac{N_e}{N_\alpha}$ и $\frac{N_{80}}{N_\alpha}$ следует вывод, что основной механизм ионизации K -оболочки атомов отдачи при распаде Po^{210} — внутренняя конверсия 800-кэв излучения. Из этих же измерений коэффициент внутренней конверсии определён равным $\alpha = 0,067 \pm 0,017$.

*) Магнитное поле уменьшает до минимума «утекание» фотоэлектронов, произведённых в газе счётчика, наружу и тем самым увеличивает эффективность счётчика. Благодаря этому эффективность счётчика может быть вычислена прямо из «геометрии» и известных абсорбционных коэффициентов газа-наполнителя.

Авторы другой работы⁹ также производили измерение относительных интенсивностей «мягкого» и «жесткого» излучений при распаде Po^{210} . Для этого использовались дифференциальные кривые распределения величин импульсов, произведённых в сцинтилляционном счётчике (кристалл $\text{NaI} \cdot \text{Ti}$) «мягким» и «жестким» излучением и α -частицами, получающимися при распаде Po . Эффективность счётчика для каждого из упомянутых излучений определялась на основе теоретических расчётов дифференциальных сечений для процессов, имеющих место в кристалле при поглощении излучения (комpton-эффект, фотоэффект, вторичные процессы) с учётом «геометрии» установки.

В результате этих измерений и расчётов было установлено:

$$\frac{N_{76}}{N_{800}} = (0,134 \pm 0,025), \quad \frac{N_{76}}{N_{\alpha}} = (2,00 \pm 0,38) \cdot 10^{-6},$$

$$\frac{N_{800}}{N_{\alpha}} = (1,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-5}.$$

Введя, далее, поправку в 11% на конверсию мягкого рентгеновского излучения (оже-эффект), авторы⁹ окончательно установили для относительной интенсивности ионизации K -оболочки атомов отдачи (свинец) значение $\frac{N_k}{N_{\alpha}} = (2,2 \pm 0,42) \cdot 10^{-6}$, что примерно на 30% превышает результат ранних измерений⁸ и, соответственно, $\frac{N_k}{N_{800}} = 0,15 \pm 0,028$.

Если бы ионизация K -оболочки атомов отдачи происходила только из-за внутренней конверсии 800-кэв γ -излучения, то коэффициент конверсии этого излучения равнялся бы согласно измерениям и расчётам⁹ ~ 15%.

Независимые измерения¹⁴ показали, что отношение коэффициентов конверсии 800-кэв излучения на K - и L -оболочках равно 3,7 и общий коэффициент конверсии меньше 5%. Если даже использовать в качестве величины общего коэффициента конверсии 800-кэв излучения величину $\alpha = 0,067 \pm 0,017$, определённую в работе⁸, то и тогда коэффициент конверсии на K -оболочке $\alpha_k = 0,053 \pm 0,013$ слишком мал, чтобы объяснить вероятность ионизации K -оболочки только внутренней конверсией. Очевидно, как заключили авторы⁹, только $\frac{1}{3}$ или в лучшем случае $\frac{1}{2}$, из общего числа ионизаций K -оболочки атомов отдачи при распаде Po^{210} может быть объяснена этим механизмом. Другая, большая часть ионизаций K -оболочки, может быть объяснена только прямым влиянием α -распада на состояние электронной оболочки атома отдачи. Вероятность такого процесса, отнесённая к единичному α -распаду, легко вычисляется, если использовать величины $\frac{N_k}{N_{800}}$, $\frac{N_k}{N_{\alpha}}$ и α_k . Она найдена равной $(1,4 \pm 0,35) \cdot 10^{-6}$ ионизаций на один распад.

Мигдал¹, рассматривая влияние α -распада на состояние электронной оболочки атома отдачи, вычислял вероятность ионизации внутренних оболочек, пользуясь методами теории возмущений. При этом изменение заряда ядра считалось малым возмущением и предполагалось, что α -частицы вне ядра движутся равномерно. Для описания атома использовалась нерелятивистская водородоподобная функция.

Вероятность ионизации K -оболочки атомов отдачи, вычисленная в этих приближениях, оказалась равной $2,2 \left(\frac{137v_{\alpha}}{Z^2c} \right)^2$, что для распада Po^{210} даёт

$2,6 \cdot 10^{-6}$ ионизаций на единичный α -распад. (v_α — скорость α -частицы, Z — порядковый номер дочернего атома.) Несмотря на то, что теория даёт завышенное значение для вероятности ионизации K -оболочки при α -распаде, следует признать удовлетворительным согласие выводов теории и результатов опыта.

Несколько позднее появились работы^{15, 16}, посвящённые изучению мягкого излучения при распаде Po^{210} . Авторы работы¹⁵, используя сцинтилляционный спектрометр на совпадениях, получили результаты, совпадающие с результатами работы⁹.

В работе¹⁶ показано, что обнаруженное ещё в 1930 г. мягкое излучение при распаде полония (с энергией ~ 10 кэв) есть рентгеновское L -излучение свинца. Исследование этого излучения проведено методом критического поглощения с применением пропорционального счётчика. Ионизация L -оболочки может быть объяснена только прямым влиянием α -распада на состояние электронной оболочки, т. е. механизмом, который рассмотрен в работе Мигдала¹. Интенсивность мягкого L -излучения, наблюдаемая в работе¹⁶, оказалась, однако, больше, чем предсказанная теорией.

Реферируемые работы представляют интерес в двух отношениях: как доказательство ионизации внутренних оболочек атомов отдачи вследствие α -распада и как интересный пример применения различных методов атомной и ядерной спектроскопии для обнаружения и идентификации слабого излучения на фоне других излучений.

А. Р.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. Мигдал, ЖЭТФ 9, 1163 (1939). Journ. of Phys. (USSR) 4, 449 (1941).
2. Е. Фейнберг, ДАН СССР 23, 778 (1939). Journ. of Phys. (USSR) 4, 424 (1941).
3. A. Winther, Det. Kgl. Danske Vid. Selsk. Mat.-fys. Medd. 27, № 2 (1952).
4. E. Rutherford, I. Chadwick, G. D. Ellis, Radiations from radioactive substances. Cambridge, 1930; М. Кюри, Радиоактивность, Гостехиздат, 1947.
5. См., например, J. C. Jacobsen, O. Kofold-Hansen, Phys. Rev. 73, 675 (1948).
6. P. B. Smith, J. S. Allen, Phys. Rev. 81, 381 (1951); R. Davis, Phys. Rev. 83, 976 (1952).
7. M. L. Wertenstein, Ann. de phys. 1, 347 (1914); Madsen, Det. Kgl. Danske Vid. Selsk. Mat.-fys. Medd. 23, № 8 (1945).
8. M. A. Grace, R. A. Allen, D. West, H. Halban, Proc. Phys. Soc. 64 A, 493 (1951).
9. W. C. Barber, R. H. Helm, Phys. Rev. 83, 275 (1952).
10. N. Feather, Nucleonics 5, № 1, 22 (1949).
11. S. De Benedetti, E. H. Kerner, Phys. Rev. 71, 122 (1947).
12. B. Zajac, E. Broda, N. Feather, Proc. Phys. Soc. 60, 501 (1948).
13. См., например, S. C. Curran, A. L. Cockroft, G. M. Insch, Phil. Mag. 41, 517 (1951).
14. D. E. Alburger, G. Friedlander, Phys. Rev. 81, 141 (1951).
15. Pringle, Taylor, Standil, Phys. Rev. 87, 384 (1952).
16. Robinson, Bernstein, Phys. Rev. 83, 545 (1952).