

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 интенсивности «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 расчётов¹, касающихся вероятности ионизации внутренних оболочек атомов отдачи при α -распаде.

Относительная интенсивность «жесткого» γ -излучения, определённая в одной из реферируемых работ⁸, оказалась равной $\frac{N_{800}}{N_\alpha} = (1,8 \pm 0,14) \times$

$\times 10^{-5}$ 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 определённых 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 сцинтиляционном счётчике (кристалл $NaI(Tl)$) «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 $12 \cdot 10^{-6}$ 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^{210} и от стандартного источника $Ra(D+E)$ 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 $NaI \cdot Tl$) «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 $(1,4 \pm 0,35) \cdot 10^{-6}$ ионизации на один распад.

Мигдал¹, рассматривая влияние α -распада на состояние электронной оболочки атома отдачи, вычислил 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 перелати-вистская 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.

A. P.

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. Crace, R. A. Allen, D. West, H. Halban, Proc. Phys. Soc. **64 A**, 493 (1951).
9. W. C. Barber, R. H. Helm, Phys. Rev. **85**, 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. Rubinson, Bernstein, Phys. Rev. **83**, 545 (1952).