

С 3450

П-121

12/VI-67

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P7 - 3355

Э.С. Парилис

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОЖЕ-НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

1967.

P7 - 3355

Э.С. Парилс

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОЖЕ-НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

5076/1
28.

В настоящее время для синтеза трансурановых элементов используются ускорители тяжёлых многозарядных ионов ^{/1/}. При анализе ионного пучка при помощи масс-анализатора с небольшой разрешающей способностью происходит их разделение по e/m , причём в один пучок попадают пары ионов, соответствующие равным или близким значениям этого отношения $/Kг^{+7}$ и C_{12}^{+1} , $Kг^{+10}_{84}$ и O_{16}^{+2} , $Хе^{+10}_{131}$ и C_{13}^{+1} , $Хе^{+8}_{131}$ и N^{+1}_{14} , U^{+13}_{238} и O_{18}^{+1} и т.д./.

Возникает проблема разделения их по зарядам. Цель настоящей заметки — указать одно явление, которое могло бы быть использовано для этого.

При сближении многозарядного иона с поверхностью металла образуется многократно возбужденная система, поскольку глубокие уровни иона вакантны, а высоколежащие энергетические зоны металла заполнены электронами. Подобная система быстро релаксирует путем оже-эффекта. Когда один из электронов металла заполняет ионную вакансию, передавая избыточную энергию другому электрону, происходит нейтрализация иона с одновременной эмиссией электрона из металла / рис. 1 /. Эта эмиссия отличается от обычной электронной эмиссии при бомбардировке быстрыми ионами ("кинетической эмиссии"): кинетическая энергия иона не принимает здесь никакого участия. Эмиссия оже-электронов может наблюдаться даже для медленных ионов ^{/2/}.

Идея предлагаемого метода идентификации многозарядных ионов состоит в использовании эмиссии оже-электронов для их обнаружения и различения на фоне однозарядных ионов, а также других заряженных частиц.

Нижеследующие оценки показывают, что эта эмиссия сильно зависит от степени ионизации иона.

Вероятность эмиссии оже-электронов из металла определяется следующими соотношениями ^{/3/}:

$$P_t(s, v) = \frac{A}{v} \exp\left(-\frac{A}{av} \exp(-as) - as\right) \quad /1/$$

$$N_i(E) = \int_0^{\infty} P_t(s, v) P_k(E, s) ds \quad /2/$$

$$P_o(E) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_0}{E}\right)^{\frac{1}{2}} \quad /3/$$

$$N_o(E) = N_i(E) P_o(E) \quad /4/$$

$$\gamma = \int_0^{\infty} N_o(E) dE \quad /5/$$

Здесь:

- v - скорость иона;
- s - его расстояние от поверхности металла;
- A, a - параметры;
- P_t - вероятность оже-нейтрализации на расстоянии s от поверхности;
- P_k - вероятность образования оже-электрона с энергией E на расстоянии s ;
- N_i - энергетическое распределение оже-электронов внутри металла;
- E - энергия оже-электрона;
- E_0 - энергия вакуумного уровня, отсчитанная от дна зоны проводимости;

P_o - вероятность выхода электрона из металла;

N_o - энергетическое распределение электронов вне металла;

γ - коэффициент электронной эмиссии, т.е. число эмитированных электронов на один ион.

Из уравнения ^{/1/} следует, что вероятность эмиссии электрона возрастает с уменьшением скорости сближения v . При достаточно малых скоростях оже-нейтрализация иона происходит до его соприкосновения с поверхностью. Это обеспечивает наилучшие условия для оже-нейтрализации ионов и эмиссии электронов. Отсюда следует, что для достижения полной нейтрализации иона на поверхности металла необходимо его предварительно затормозить до скорости $v = 0,5 \cdot 10^8$ см/сек.

Быстрое убывание электронной эмиссии с ростом скорости в этой области может служить характерным признаком оже-нейтрализации. Предварительного торможения ионов требует также необходимость исключить кинетическую эмиссию, которая появляется при скорости $5-7 \cdot 10^8$ см/сек и маскирует эмиссию оже-электронов. Между тем, как указывают теория ^{/4/} и экспериментальные данные ^{/5,6/}, кинетическая эмиссия не зависит от заряда иона, а лишь от его скорости, которая для указанных пар одинакова. Это делает непригодным этот вид эмиссии для различения многозарядных ионов.

Энергия оже-электрона равна

$$E = E_i - E' - E'' \quad /6/$$

Здесь E_i - энергия ионизации иона,

E' - энергия электрона в зоне проводимости,

E'' - энергия нейтрализующего иона в зоне проводимости.

Как следует из /3/ и /4/, эмиссия возрастает с ростом E_i и E , поскольку возрастает вероятность выхода электрона из металла. Когда энергия электрона стремится к бесконечности, тогда γ достигает максимального значения 1/2 электрона на один нейтрализованный заряд, т.к. половина оже-электронов уходит вглубь металла. Соответственно максимальная величина γ по формуле "один заряд-один оже-электрон" составляет примерно $0,5 z^2$, где z - заряд иона. В действительности эмиссия электронов возрастает с Z гораздо быстрее.

Дело в том, что заполнение глубокого уровня происходит ступенчато,

путем серии оже-переходов, в каждом из которых может эмитироваться один электрон. В самом деле, вероятность оже-нейтрализации

$$P_1 \approx \int \psi_3^* \psi_4^* \frac{c^2}{r_{12}} \psi_1 \psi_2 dr_1 dr_2. \quad /7/$$

Волновые функции ψ_1 и ψ_2 - это модулированные волны внутри металла и экспоненциально затухающие функции вне его. Скорость этого затухания тем больше, чем меньше энергия электрона. Функция ψ_3 - локализованная атомная функция иона. Область её локализации тем меньше, чем глубже ионный уровень. Функция непрерывного спектра ψ_4 свободного оже-электрона осциллирует тем сильнее, чем больше энергия электрона, т.е. чем глубже уровень иона E_1 . Оба указанных фактора - усиление локализации ψ_3 и усиление осцилляции ψ_4 - приводят к сокращению матричного элемента 17 с увеличением глубины ионного уровня E_1 . В результате вероятность оже-нейтрализации на неглубокий уровень больше, чем на глубокий, но, с другой стороны, вероятность выхода электрона из металла растет с E_1 . Оптимальное значение достигается примерно при $E_1 = 25-30$ эв и нейтрализация глубоких уровней происходит, по-видимому, ступенчато с шагом того же порядка. Это означает, что эмиссия при нейтрализации многозарядного иона пропорциональна полной энергии нейтрализации. Разумеется, такая оценка груба, однако, единственные экспериментальные данные об оже-нейтрализации многозарядных ионов, полученные Хэгструмом для ионов низкой зарядности, по-видимому, ее подтверждают.

Точное вычисление требует знания точных волновых функций. Не исключена возможность, что точное вычисление относительных вероятностей нейтрализации на различные уровни, которое производится в настоящее время, даст для некоторых глубоких уровней заметную вероятность оже-нейтрализации. В этом случае энергетический спектр электронов будет содержать соответствующие высокоэнергетические пики. Следует, однако, отметить, что свободные электроны металла сильно влияют на выход оже-электронов. Столкновения с электронами проводимости вызывают каскад вторичных электронов, который сглаживает энергетический спектр оже-электронов, в результате он слабо зависит от энергии первичных электронов. Это затрудняет возможное разделение многозарядных ионов по виду энергетического спектра электронной

эмиссии. Кроме того, следует учесть возможные радиационные эффекты.

В таблице 1 приведены ожидаемые значения γ для многозарядных ионов при скорости $v < 1.0 \cdot 10^8$ см/сек и их отношение к эмиссии под действием однозарядных ионов для пар с равными или близкими $\frac{v}{m}$.

Как видно из таблицы, для некоторых пар различие в эмиссии под действием многозарядных и однозарядных ионов очень велико. Следует указать, что приведенные величины весьма приблизительны и их следует брать лишь по порядку величины. Однако большая величина этих отношений указывает на принципиальную возможность разделения многозарядных и однозарядных ионов по вызываемой ими эмиссии оже-электронов.

По-видимому, трудно указать другое явление, которое зависело бы только от заряда иона в такой сильной степени и было бы удобно для идентификации многозарядных ионов.

Автор приносит глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР Г.Н.Флерову и А.С.Пасюку, обратившим его внимание на обсуждаемую проблему и сделавшим ряд ценных замечаний.

Литература

- G.N. Flerov. Proceedings of the II United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, P/2299, 14, 151
- H.D. Hagstrum. Phys. Rev., 89, 244 (1953)
- H.D. Hagstrum. Phys. Rev., 96, 336 (1954)
- Э.С.Парилс, Л.М.Кишиневский. Физ. твердого тела, 3, 1235 (1961).
- У.А.Арифов. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью металла, Ташкент, 1961, Изд. АН Уз ССР.
- B.L. Schram, A.J.H. Boerboom, W.Kleine and J.Kistemaker. Physica, 32, 749 (1966)

Рукопись поступила в издательский отдел
26 мая 1967 года.

Таблица I

Ион	K_{7+} 84	L_{1+} 12	L_{10+} 10784	L_{10+}^{2+} 16	L_{6+} K ₂₈₄	L_{1+} 14	L_{10+} 131	L_{10+}^{2+} 131	L_{15+} 18	L_{7+} 40	L_{3+} 17	L_{8+} 40	L_{3+} 14	L_{13+} U ₂₃₈	$L_{0^{1+}}$ 18
γ	5,4	0,02	15	0,3	0,1	15	0,02	40	0,8	5	2	7	1,5	20	0,04
K_1/K_2	270	50	750	50	40	50	2,5	4,6	300						

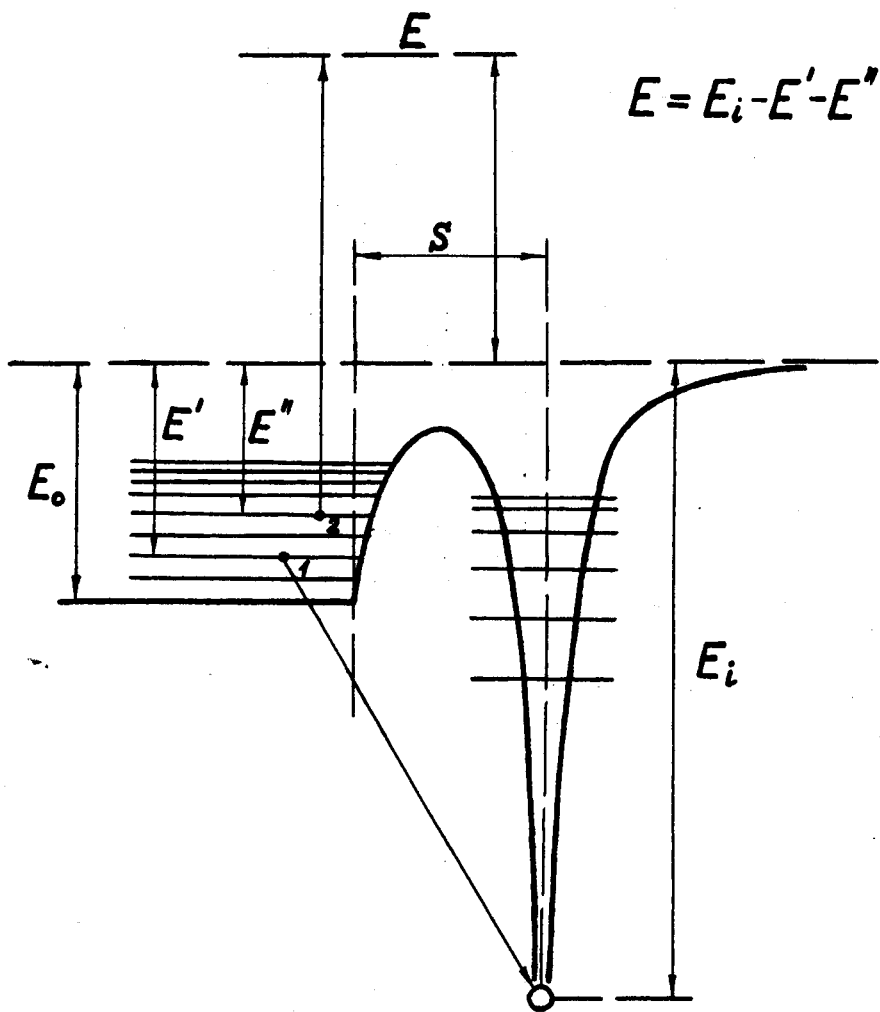


Рис. 1. Схема оже-нейтрализации.