

ЯДЕРНАЯ ИЗОМЕРИЯ

Н. Н. Дмитриев, Ленинград

В опубликованной ранее статье¹ были приведены экспериментальные данные о ядерных изомерах Br, Sr, Ag, In, Gd, Yb, Pt, Au, Ir, U. Там же была изложена общая теория изомерии и дана трактовка экспериментальных данных с точки зрения этой теории. За небольшой промежуток времени появились новые данные, которые мы и приводим в этой статье.

Особенный интерес представляет изомерия урана Z и урана X₂, потому что ее исследование позволило внести некоторые исправления в схему распада уранового ряда.

До сих пор было известно, что уран Z и уран X₂ имеют один и тот же атомный номер ($z=91$) и один и тот же атомный вес ($A=234$) и что оба они распадаются с испусканием электронов, превращаясь в уран II. Кроме того, было известно, что периоды полураспада у них различны; у урана Z период равен 6,7 часа, а у урана X₂ период имеет величину 1,14 мин. Было также известно, что верхние границы электронного спектра у этих двух элементов различны. На основании приведенных выше данных делался вывод, что уран Z и уран X₂ являются изомерами. Однако сколько-нибудь удовлетворительного теоретического объяснения изомерии урана Z и урана X₂ до сих пор дано не было.

В сравнительно недавно опубликованной работе Фезер и Бретчер² на основании свих экспериментальных данных и данных других авторов рассмотрели вопрос об изомерии урана Z и урана X₂ с точки зрения наиболее приемлемой в настоящее время теории изомерии, которая была предложена Вейцекером при участии Бора. Как известно¹, согласно этой теории один из изомеров (уран Z или уран X₂) должен быть метастабильным состоянием, а другой — основным состоянием одного и того же изотопа. При этом метастабильный уровень должен лежать близко к основному и отличаться от основного на большую величину ядерного спина. Поэтому для того чтобы решить вопрос о том, можно ли объяснить изомерию урана Z и урана X₂ с точки зрения теории Вейцекера, необходимо решить вопрос о том, может ли ядро с порядковым номером 91 и атомным весом 234 иметь метастабильный уровень. Необходимым условием существования последнего является то, что энергия возбуждения первого возбужденного состояния (E_1) должна

быть малой. Уран Z и уран X_2 принадлежат к типу ядер, имеющих нечетный атомный номер и четный атомный вес. Для всех других радиоактивных элементов этого типа (кроме $M\text{S}\text{Th}_2$) энергия возбуждения первого возбужденного состояния E_1 определена экспериментально по изучению γ -лучей и тонкой структуры α -частиц, сопровождающих распад этих элементов. Значения E_1 даны в табл. 1, приведенной Фезером и Бретчером².

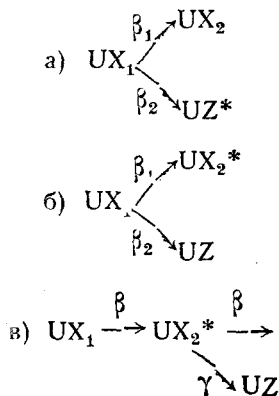
ТАБЛИЦА 1

Я д р о	RaC	ThC	RaE	RaC''	ThC''
Z	83	83	83	81	81
A	214	212	210	210	208
E_1 в keV	52,9	238	47,2	62	40,0

Из табл. 1 видно, что у всех исследованных элементов энергия возбуждения E_1 , действительно, очень мала. На этом основании можно предполагать, как это и делают Фезер и Бретчер, что и у элемента UZ — UX_2 E_1 будет мало, т. е. первый возбужденный уровень лежит близко к основному, и поэтому этот уровень может быть метастабильным. Таким образом оказывается возможным трактовать изомерию урана Z и урана X_2 с точки зрения теории Вейцекера.

Основным вопросом согласно этой теории является вопрос о том, какой из двух изомеров, в данном случае уран Z или уран X_2 , является метастабильным состоянием и какой — основным.

Из различных возможностей Фезер и Бретчер выбирают ту, которой соответствует наименьшая продолжительность жизни метастабильного состояния по отношению к испусканию γ -лучей. В связи с этим возможны, вообще говоря, три различных случая, а именно:



В случае а) UZ является метастабильным состоянием, а UX_2 — основным (звездочкой мы обозначаем возбужденное состояние). В случае б), наоборот, UX_2 — метастабильное состояние, а UZ — основное, причем как UX_2 , так и UZ образуются в этом случае из UX_1 в результате β -распада последнего. Наконец, в случае в), так же как и в случае б), UX_2 является метастабильным состоянием, а UZ — основным. Но в этом случае, в отличие от случая б), UZ образуется из UX_2 в результате испускания последним γ -лучей. С помощью полученных ими экспериментальных данных о β -распаде UZ , Фезер и Бретчер нашли, что наименьшая продолжительность жизни метастабильного состояния по отношению к испусканию γ -лучей будет иметь место в случае в), и, следовательно, этот случай по их мнению и является наиболее вероятным. Таким образом согласно данным этих авторов оказывается, что уран X_2 является метастабильным состоянием, а уран Z — основным состоянием одного и того же радиоактивного изотопа. При этом уран Z образуется из урана X_2 в результате испускания последним мягких γ -лучей, а не при β -распаде UX_1 , как предполагалось до сих пор.

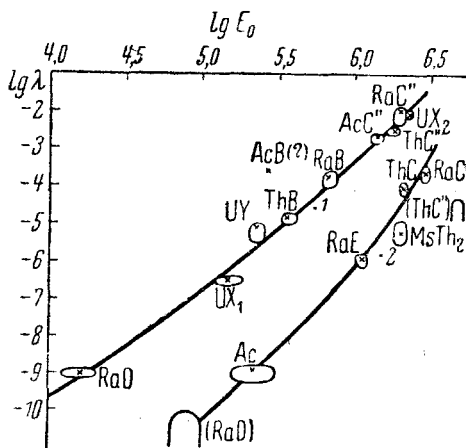


Рис. 1. Кривые Сержента для естественных радиоэлементов. Точка 1 соответствует мягкой компоненте β -излучения (0,56 MeV), точка 2 соответствует жесткой компоненте (1,55 MeV). Замкнутые линии, проведенные вокруг точек, дают возможную погрешность в определении положения точек

Фезер и Бретчер исследовали γ - и β -лучи урана Z . Максимальная энергия электронов, определенная по поглощению электронов в алюминий, оказалась равной 1,16 MeV. Если принять эту величину верхней границы β -спектра, то точка, соответствующая UZ ($\lambda = 2,9 \cdot 10^{-5}$ сек.⁻¹), ляжет как раз посредине между кривой Сержента, соответствующей изменению ядерного спина на 0 или 1, и кривой Сержента, соответствующей изменению спина на 2 еди-

ницы. Эти кривые приведены на рис. 1. Основываясь на этих кривых, а также сравнивая ход кривой поглощения электронов от урана Z с ходом кривой поглощения электронов от UX_2 и RaE, авторы пришли к заключению, что β -излучение урана Z состоит по крайней мере из двух компонент с сильно отличающимися друг от друга верхними границами. Они нашли, что полученная ими кривая поглощения может быть разложена на две кривых, соответствующих двум компонентам β -лучей, из которых мягкая компонента имеет верхнюю границу 0,56 MeV и относительную интенсивность 0,944, а жесткая компонента обладает верхней границей, равной 1,55 MeV, и относительной интенсивностью 0,056.

Определенная по поглощению в свинце и других материалах эффективная энергия γ -квантов от урана Z оказалась равной 0,7 MeV, причем на один β -распад урана Z приходится в среднем $1,50 \pm 0,25$ квант в.

Были также определены относительные активности обоих изомеров. Оказалось, что отношение активности урана X_2 к активности урана Z равно $(665 \pm 65):1$.

На основании приведенных выше данных о γ - и β -излучении урана Z, а также на основании данных о γ - и β -излучении урана X_1 и урана X_2 , Фезер и Бретчер построили схему распада UX_2 и UZ, приведенную на рис. 2. На этой схеме цифры справа от линий уровней дают энергию соответствующего уровня в MeV по отношению к основному уровню урана II, принятому условно за нулевой. Значки β и γ обозначают род излучения (соответственно электроны и γ -лучи). Цифры внизу у значков β и γ дают энергию данного излучения, а цифры наверху — его относительную интенсивность. Масштаб кверху и книзу от линии AA' — различный. Цифры слева от линий уровня дают соответствующие значения ядерного спина. Из этой схемы вытекает, что UZ должен испускать две группы γ -лучей. Произведенное

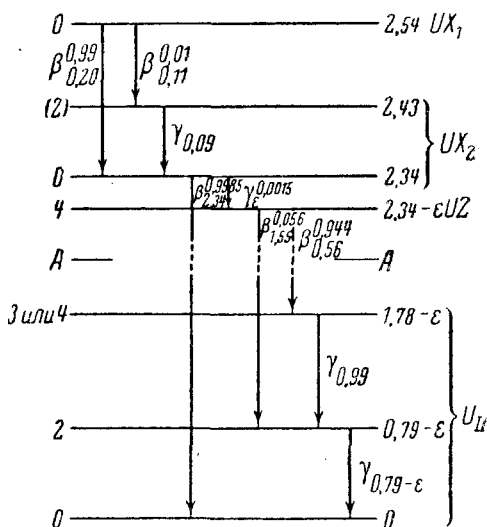


Рис. 2. Схема уровней и распада ядер UZ и UX_2 (пояснение обозначений см. в тексте)

впоследствии Фезером и Бретчером изучение γ -лучей с помощью метода совпадений показало, что, действительно, γ -лучи состоят из двух групп. Этот факт является непосредственным экспериментальным подтверждением правильности этой части схемы.

С точки зрения теории метастабильных уровней наибольший интерес в этой схеме представляет разность энергии ϵ между основным уровнем (уровень UZ) и метастабильным (основной уровень UX_2) и разность значений спина между этими уровнями. Что касается энергии ϵ , то ее Фезер и Бретчер не могли определить (поэтому на их схеме она обозначена просто через ϵ). Для того же чтобы приписать уровням значения спина, авторам пришлось пользоваться кривой Сержента. Кроме того, как указывают сами авторы, в некоторых отношениях при построении этой схемы имелось несколько различных возможностей. Отсюда, естественно, проистекает и некоторая неопределенность в результатах, вытекающих из этой схемы.

Разность значений спина l между уровнем урана Z и основным уровнем урана X_2 , а также разность энергии между этими двумя уровнями были вполне однозначно определены Н. Дмитриевым³. Оказалось возможным найти ϵ и l , пользуясь формулой для продолжительности жизни метастабильного состояния, приведенной Бете, и с помощью экспериментальных данных Фезера и Бретчера. Приводим здесь вкратце ход рассуждений и результаты.

Как известно¹, продолжительность жизни метастабильного состояния по отношению к испусканию γ -лучей τ_γ разность энергии ϵ и разность l значений спина связаны следующим соотношением:

$$\tau_\gamma = 5 \cdot 10^{-21} l!^2 \left(\frac{20}{\epsilon} \right)^{2l+1} \text{ сек.}, \quad (1)$$

где ϵ выражено в MeV. Величина τ_γ была определена Фезером и Бретчером экспериментально и оказалась равной $\tau_\gamma = 17,4$ часа $= 6,2 \cdot 10^4$ сек. Подставив это значение τ_γ в формулу (1), мы получаем одно уравнение с двумя неизвестными (ϵ и l). Относительно величины ϵ на основании данных табл. 1 может быть сделано определенное предположение. А именно, из табл. 1 видно, что у элементов того же типа, что и элемент $UZ \rightarrow UX_2$, $\epsilon = E_1$ изменяется в очень узких пределах, незначительно отклоняясь от среднего значения $\epsilon = 50$ keV (исключая ThC). Поэтому естественно было предположить, что у элемента $UZ \rightarrow UX_2$ ϵ будет иметь величину, лежащую в пределах изменения ее для других элементов этого типа, т. е. в пределах 40—60 keV. Беря вначале среднее значение $\epsilon = 50$ keV, Н. Дмитриев с помощью формулы (1) нашел, что этому значению ϵ соответствует величина $l = 4$. Автор показал также, что эта величина l однозначно удовлетворяет не только среднему значению, но и любому значению ϵ в промежутке 40—60 keV. Таким образом было найдено вполне однозначным образом, что разность значений спина должна быть равна 4 единицам. При этом нам не пришлось обращаться к помощи кривых Сержента, как это пришлось делать Фезеру и Бретчеру. Найденное Н. Дмитриевым значение $l = 4$ совпадает со значением этой величины, полученным другим путем Фезером и Бретчером (из схемы рис. 2). Это говорит в пользу правильности этого значения l .

Идя таким путем дальше, автору удалось найти и значение разности энергий между основным уровнем ядра ϵ и метастабильным, чего не могли найти Фезер и Бретчер с помощью их схемы. Чтобы найти ϵ , автор исходил опять-таки из формулы (1), считая в ней на этот раз известным l ($l = 4$) и ($\tau_\gamma = 6,2 \cdot 10^4$ сек.) и рассматривая как неизвестное величину ϵ . Решая уравнение (1) относительно ϵ , Н. Дмитриев получил для ϵ значение $\epsilon = 51,2$ keV. Как видим, полученное таким путем значение ϵ лежит очень близко к среднему значению $\epsilon = 50$ keV, имеющему место для ядер того же типа, что и ядро $UZ - UX_2$. Таким образом автор показал, что метастабильный уровень лежит на 51,2 keV выше основного и его спин отличается от спина последнего на 4 единицы.

В ранее опубликованной статье¹ была подробно описана изомерия у индия. В последнее время появились новые экспериментальные данные об изомерах In^{116} с периодами 13 сек. и 54 мин. Митчелл и Лэнджер⁴ нашли, что верхняя граница электронного спектра периода 13 сек. равна 3,1 MeV, и этот период не сопровождается γ -лучами. Период 54 мин. дает электроны с верхней границей спектра, равной 1,4 MeV, и распад этого периода сопровождается γ -лучами с энергией 1,4 MeV. Отношение активностей обоих периодов оказалось приблизительно равным единице. Напомним, что оба эти изомера индия образуются в результате резонансного захвата медленных нейтронов ядром устойчивого In^{115} . Митчелл и Лэнджер нашли, что резонансные кривые для образования периодов 13 сек. и 54 мин. совпадают друг с другом. Если резонансные кривые совпадают, то отношение активностей двух изомеров, полученных с помощью нейтронов различных энергий, должно быть одно и то же. Оказалось, что в пределах погрешности эксперимента отношение активностей изомеров In^{116} осталось тем же, когда медленные нейтроны были отфильтрованы кадмием. Отсюда и был сделан вывод о совпадении резонансных кривых.

На основании приведенных выше экспериментальных данных, Митчелл и Лэнджер построили схему уровней изомеров In^{116} , приведенную на рис. 3. На этой схеме энергия в MeV отсчитывается от условно принятого за нулевой основного уровня Sn^{116} . Это ядро получается в результате β -распада обоих изомеров In^{116} . Как видно из этой схемы, метастабильным уровнем оказывается уровень, соответствующий более длинному периоду (54 мин.). Разность энергий между этими уровнями получается равной 0,3 MeV. Положение уровня In^{116} , соответствующего захвату медленного нейтрона, определено на основании данных об

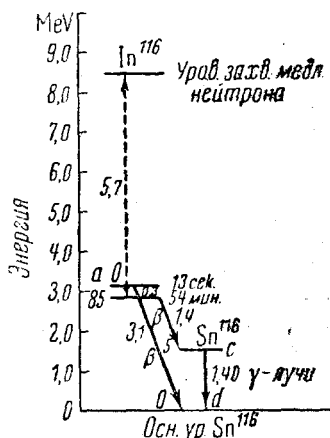


Рис. 3. Схема уровней и распада изомеров ядра In^{116} . Цифры слева дают значения спина уровней

энергии связи нейтрона: расстояние между этим уровнем и нулевым представляет собой энергию связи нейтрона, которая в этой части периодической таблицы составляет около 8,5 MeV. Таким образом при переходе In^{116} в основное состояние он должен испускать γ -лучи с общей энергией около 5,7 MeV.

Разность значений спина между основным уровнем и метастабильным была найдена на основании следующих соображений.

Экспериментальный факт, состоящий в том, что при распаде из состояния a наблюдаются лишь электроны перехода $a \rightarrow d$, а не γ -лучи перехода $a \rightarrow b$, показывает, что вероятность испускания γ -лучей при переходе $a \rightarrow b$ (λ_γ) гораздо меньше, чем вероятность испускания электронов при переходе $a \rightarrow d$ (λ_β). Из величины периода (13 сек.) находится постоянная распада λ , представляющая собой сумму $\lambda = \lambda_\beta + \lambda_\gamma = 5,32 \cdot 10^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Таким образом должно иметь место соотношение:

$$\frac{\lambda_\gamma}{\lambda_\beta + \lambda_\gamma} = \frac{\lambda_\gamma}{5,32 \cdot 10^{-2}} \ll 1. \quad (2)$$

Полагая $\epsilon = 0,3 \text{ MeV}$, можно с помощью формулы (1) подобрать такое l , чтобы τ_γ и, следовательно, λ_γ удовлетворяли условию (2). Таким оказывается значение $l = 5$, которое Митчелл и Ленджер и считают реальным.

Приписание каждому из уровней схемы рис. 3 определенного значения ядерного спина пока не может быть сделано вполне достоверным способом. Однако некоторые соображения по этому поводу могут быть высказаны. Во-первых, ядро In^{116} , повидимому, в основном состоянии d имеет спин, равный нулю, потому что это ядро принадлежит к типу ядер, содержащих $4n$ частиц. Далее, точки, соответствующие обоим изомерам In^{116} , лежат на первой кривой Сержента, для которой изменение спина $l = 0$. Отсюда следует, что уровни a и d имеют одинаковые значения, так же как и спины уровней b и c . Из равенства спинов уровней a и d следует, что спин для уровня a равен нулю. Тогда уровень b должен иметь спин, равный 5 единицам, так как разность $l = 5$. Но тогда и уровень c должен иметь спин, равный 5 единицам. Получившаяся между уровнями c и d разность спина $l = 5$ не запрещает γ -перехода $c \rightarrow d$ вследствие наличия большой разности энергий между этими уровнями (1,4 MeV). Действительно, полагая $\epsilon = 1,4 \text{ MeV}$ и $l = 5$, из формулы (1) получаем $\tau_\gamma \sim 10 \text{ сек.}$, т. е. получается малая продолжительность жизни, и, следовательно, вероятность перехода будет иметь еще весьма заметную величину. Отметим, что вследствие большой разности спинов, между уровнями a и b (метастабильным и основным) вероятности переходов In^{116} с уровня, соответствующего захвату медленного нейтрона, на уровни a и b должны быть весьма различны. Однако опыт показывает, что относительные активности обоих периодов и, следовательно, вероятности переходов на уровень a и на уровень b практически одинаковы. Это указывает на то, что, повидимому, переход с уров-

ня In^{116} , соответствующего захвату медленного нейтрона, на уровнях a и b происходит каскадно (через ряд промежуточных уровней), сопровождаясь испусканием нескольких групп γ -лучей, так что в конечном итоге вероятности попадания ядра на уровни a и b оказываются одинаковыми. Поэтому было бы интересно произвести экспериментальное изучение γ -лучей, возникающих при захвате медленных нейтронов ядрами In^{115} с целью обнаружения этих групп γ -лучей.

В первой статье был рассмотрен вопрос о процессе образования изомеров. Поскольку с точки зрения современной теории изомеры являются двумя различными состояниями одного и того же ядра, постольку процесс их образования должен быть один и тот же. Одинаковость процесса образования скажется в том, что, например, если оба изомера образуются в результате резонансного захвата медленных нейтронов (как это имеет место у Br , In и т. д.), то резонансный уровень, на который захватывается нейтрон, будет один и тот же для обоих изомеров. При этом и форма резонансных кривых для обоих изомеров должна быть одинаковой. Экспериментально сравнить формы резонансных кривых можно следующим путем. Если форма резонансных кривых одинакова, то отношение активностей изомеров должно оставаться неизменным при облучении нейтронами различной энергии. Именно таким путем было обнаружено, что резонансные кривые изомеров брома Br^{801} и изомеров In^{116} (см. выше эту статью) имеют одинаковую форму и даже просто совпадают друг с другом.

Обратно, если мы экспериментально убедимся, что отношение активностей двух радиоактивных периодов одного и того же элемента, образующегося в результате резонансного захвата нейтронов, остается неизменным при облучении нейтронами различных энергий, то на основании сказанного выше мы можем предполагать, что эти периоды принадлежат двум изомерам этого радиоэлемента. Так, оказалось, что отношения активностей двух периодов радиоактивного родия (периоды 44 сек. и 4,2 мин.), образующихся в результате резонансного захвата медленных нейтронов, не изменяются в том случае, когда медленные нейтроны фильтруются кадмием и родием⁵. Такая фильтрация эквивалентна изменению энергии нейтронов, бомбардирующих родий. Поэтому на основании приведенных выше соображений предполагается, что периоды 44 сек. 4,2 мин. принадлежат двум изомерам радиоактивного родия. Таким образом мы видим, что сравнение форм резонансных кривых представляет собой новый способ обнаружения изомеров¹⁾.

В настоящее время можно говорить по крайней мере о существовании изомеров у одиннадцати элементов периодической системы, а именно у: Br_{35} , Sr_{38} , Ag_{47} , In_{48} , Gd_{64} , Ib_{70} , Ir_{77} , Pt_{78} , Au_{79} .

¹⁾ Совсем недавно Солтан и Вертенштейн⁶ нашли для Br^{83} , а Реддеман⁷ — для родия, что отношение активностей изомеров заметно изменяется при переходе к быстрому нейтрону. Этим ставится под сомнение вопрос о совпадении резонансных кривых для любой энергии. Однако для того чтобы сделать окончательный вывод, необходимо произвести еще ряд опытов в этом направлении.

(UZ — UX₂)₉₁, U₉₂. При этом нужно еще иметь в виду, что явление изомерии наблюдалось у двух изотопов серебра и у двух изотопов индия. Как видим, изомеры довольно часто встречаются у элементов с порядковым номером больше 35, вплоть до конца периодической системы. При этом список известных изомеров все время весьма быстро пополняется.

Отношение величины более длинного периода к величине более короткого у уже известных изомеров варьирует в весьма широких пределах, а именно от 4 до 760. У шести из перечисленных выше элементов: Sr₃₈, Ag₄₇, In₄₈, Gd₆₄, Ir₇₇ и (UZ — UX₂), это отношение имеет величину порядка нескольких сот (от 270 до 760), у трех элементов (Br₃₅, Yb₇₀, и Au₇₉) это отношение лежит в пределах от 10 до 20 и для двух (Pt₇₈ и U₉₂) оно имеет величину от 4 до 7.

У всех пяти элементов, для которых имеются сведения о γ - и β -излучении, сопровождающем распад изомеров (у Br₃₅, Sr₃₈, Ag₄₇, In₄₈ и UZ — UX), можно заметить общее свойство. Оно состоит в том, что у всех этих элементов один из изомеров распадается без испускания γ -лучей, а другой — с испусканием их. При этом у более легких элементов (Br₃₅ и Sr₃₈) γ -лучи сопровождают распад изомера с коротким периодом, а у более тяжелых элементов (Ag₄₇, In₄₈ и UZ — UX₂) γ -излучение возникает в результате распада изомера с длинным периодом.

Соответственно испусканию γ -лучей верхняя граница β -спектра для последних трех элементов (Ag₄₇, In₄₈ и UZ — UX₂) лежит выше для изомера с более коротким периодом, чем для изомера с более длинным. Для Br₃₅, Sr₃₈ имеет место обратная картина.

Разность верхних границ β -спектра изомеров лежит в пределах от 0 до 1,7 MeV, но для большинства изученных в этом отношении изомеров лежит близко к 1,5 MeV. Так, для Br₃₅⁸⁰ она близка к нулю, для Sr₃₈⁸³ — 1,3 MeV, для In₄₈¹¹⁶ — 1,7 MeV, для Ag₄₇¹⁰⁸ — 1,3 MeV (позитроны) и 0,6 MeV (позитроны и электроны).

Можно отметить некоторую общность во всех приведенных выше схемах уровней (Ag₄₇¹⁰⁸, In₄₈¹¹⁶ и UZ — UX₂ см. выше). Эта общность проявляется в том, что метастабильным состоянием является изомер с более коротким периодом, а основным состоянием — изомер с более длинным периодом. При этом распад из метастабильного состояния не сопровождается γ -лучами в то время, как распад из основного состояния сопровождается γ -лучами. Ответить на вопрос, имеет ли это место для всех элементов, обладающих изомерами, должно дальнейшее изучение γ -и β -лучей, сопровождающих распад изомеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Дмитриев, Усп. физич. наук, 19, 535, 1933.
2. N. Feather a. Bretscher, Proc. Roy. Soc., 165, 530, 1938.
3. Н. Дмитриев, Докл. Акад. наук СССР, 20, № 4, 1938.
4. A. Mitchell a. M. Langer, Phys. Rev., 53, 505, 1938.
5. B. Pontecorvo, Nature, 141, 785, 1933.
6. A. Soltan a. L. Wertenstein, Nature, 141, 76, 1933.
7. H. Reddemann, Naturwiss., 26, 125, 1933.