

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**ПОЗИТРОНИЙ**

Возможность существования метастабильной атомной системы, состоящей из электрона и позитрона, обсуждалась различными авторами<sup>1</sup>. Однако экспериментально удалось обнаружить «позитроний» только после того, как теоретически было показано, что должно существовать два сорта позитрониев, обладающих резко различными свойствами<sup>2,3</sup>.

Согласно теории время жизни парапозитрония (спины электрона и позитрона антипараллельны) должно быть порядка  $10^{-10}$  сек., причём аннигиляция должна происходить с испусканием двух квантов<sup>2-4</sup>. Особенно важным было теоретическое предсказание метастабильности ортопозитрония (спины электрона и позитрона параллельны) и доказательство того, что его распад может происходить только с испусканием трёх квантов<sup>2,3</sup>. Время жизни ортопозитрония согласно расчёту должно быть порядка  $10^{-7}$  сек<sup>5,3</sup>, что вполне доступно экспериментальному измерению. Указанные особенности в продолжительности жизни и способа аннигиляции ортопозитрония и послужили основой для опытов по обнаружению и исследованию свойств этой новой атомной системы.

В нашем журнале уже сообщалось об успешном опыте по обнаружению трёхквантовой аннигиляции позитронов<sup>6</sup>. Эти эксперименты, однако, ещё не доказывают существования ортопозитрония, так как трёхквантовая аннигиляция может иметь место и для свободных электрона и позитрона, не образующих между собой связанной системы.

Первое убедительное экспериментальное доказательство существования позитрония (точнее, ортопозитрония) было дано Дейчем<sup>7</sup>. Идея его опыта заключается в следующем. Как показывает теория, самопроизвольный переход позитрония из орто- в парасостояние запрещён, несмотря на очень небольшую разность энергий этих двух состояний ( $\sim 8 \cdot 10^{-4}$  эв). Этот переход, однако, может быть индуцирован извне, например, при столкновении позитрония с молекулами газа. Особенно большой эффект можно ожидать при столкновении позитрония с молекулами, имеющими непарный электрон (например, NO или O<sub>2</sub>), так как будет происходить резонансный обмен электронами. Вообще говоря, возможны как переходы из орто- в парасостояние, так и обратные переходы. Однако вследствие различия продолжительностей жизни в основном будут иметь место переходы ортопозитрония в парапозитроний.

Напомним вскользь, что подобный механизм имеет место и при тушении фосфоресценции некоторых красителей примесями O<sub>2</sub> или NO. Как известно, возбуждённая молекула красителя переходит в долгоживущее

триплетное состояние, из которого самопроизвольный переход в основное синглетное состояние запрещён, но может быть вызван при столкновении с молекулой, имеющей непарный электрон (см., например, 8).

«Тушение» ортопозитрония обнаружилось следующим образом. Источник позитронов — препарат  $\text{Na}^{22}$  — испускает одновременно с позитроном и  $\gamma$ -квант. Следовательно, число запаздывающих двойных совпадений, вызываемых этим излучением и  $\gamma$ -излучением аннигиляции, должно характеризовать количество ортопозитрония при условии, что время запаздывания — порядка времени жизни ортопозитронов.

Согласно вышесказанному добавление  $\text{NO}$  к основному газу ( $\text{N}_2$ ) должно привести к снижению числа запаздывающих совпадений.

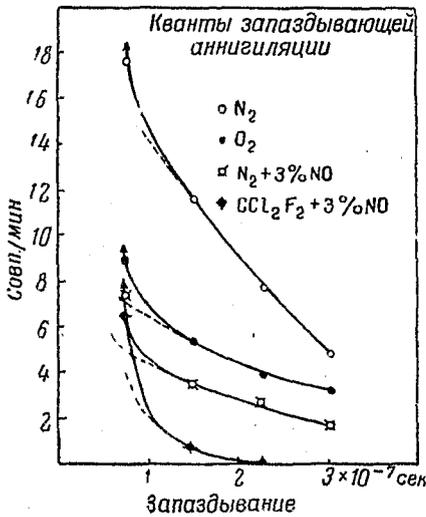


Рис. 1.

На опыте действительно наблюдался чёткий эффект: при времени запаздывания порядка  $(1 \div 3) \cdot 10^{-7}$  сек добавление 3%  $\text{NO}$  привело к уменьшению числа совпадений в 2,5—3 раза (рис. 1). Ещё более сильное тушение наблюдалось, когда в качестве основного газа был выбран газ фреон ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ). В кислороде эффект был слабый, так как этот газ сам тушит ортопозитроний. Детекторами  $\gamma$ -излучения в этих опытах служили сцинтилляционные счётчики.

Правильность интерпретации описанного опыта как доказательства существования ортопозитрония подтверждается опытом, в котором определялось распределение по величине энергии квантов аннигиляционного излучения. Измерения проводились на сцинтилляционном  $\gamma$ -спектрометре с кристаллом из  $\text{NaI}$ . Распределение определялось для чистого азота и для  $\text{N}_2 + 3\% \text{NO}$ . Как и можно было

ожидать, в  $\text{N}_2$  число квантов с энергией 510 кэв (максимум в кривой распределения) несколько меньше числа, получающегося в  $\text{N}_2 + 3\% \text{NO}$  (рис. 2); число же квантов с меньшими энергиями относительно больше в  $\text{N}_2$  (в котором, по идее, имеет место трёхквантовая аннигиляция с испусканием более мягких квантов), чем в  $\text{N}_2 + 3\% \text{NO}$ .

Описанные опыты, таким образом, устанавливают связь между тушением запаздывающей аннигиляции и жёсткостью излучения лучей аннигиляции и природой газа.

В другой серии опытов изучалась связь между кратностью излучения и его жёсткостью и природой газа<sup>9</sup>. Использовались три сцинтилляционных счётчика, симметрично расположенных около источника из  $\text{Na}^{22}$ . Измерялось распределение импульсов по величине в одном из счётчиков. При регистрации двойных совпадений наблюдался резкий максимум, соответствующий энергии 510 кэв ( $mc^2$ ), т. е. энергии кванта, образующегося при двухфотонной аннигиляции. Для тройных совпадений пик наблюдался при энергии 340 кэв ( $2/3 mc^2$ ), причём импульсы 510 кэв в этом случае полностью отсутствовали. Число тройных совпадений резко уменьшалось при вынесении одного из счётчиков из плоскости, образуемой остальными двумя счётчиками и источником. Особо резкое

снижение числа тройных совпадений наблюдалось в фреоне, что хорошо согласуется с данными, полученными тушением запаздывающей аннигиляции молекулами NO и позволяет утверждать, что в обоих случаях изучалось одно и то же явление.

Представляет большой интерес сравнить количественные предсказания теории с опытом. Согласно вычислениям Лифшица <sup>6</sup> время жизни ортопозитрония  $\tau = 8,8 \cdot 10^{-8}$  сек, или  $\lambda = \frac{1}{\tau} = 1,13 \cdot 10^{-7}$  сек<sup>-1</sup>. По Ору

и Поуэллу <sup>3</sup>  $\lambda = 7,2 \cdot 10^{-6}$  сек<sup>-1</sup>. На опыте скорость распада ортопозитрония,  $\lambda$ , измерялась как функция давления газа методом тушения примесями NO<sup>10</sup>. Результаты показаны на рис. 3. Как видно, в фреоне скорость аннигиляции,  $\lambda$ , весьма слабо зависит от давления, что лишний раз иллюстрирует особую устойчивость ортопозитрония в этом газе. Экстраполируя экспериментальную прямую к нулевому давлению, можно получить значение  $\lambda = 6,8 \cdot 10^{-6}$  сек<sup>-1</sup>, хорошо согласующееся с теоретическим значением.

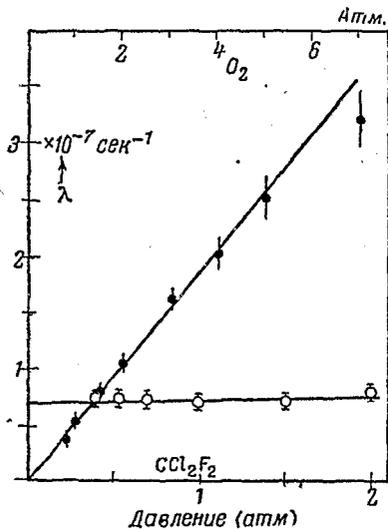


Рис. 3.

Разрушение ортопозитрония в фреоне определялось по спектру аннигиляционного излучения, измеренного на сцинтилляционном спектрометре <sup>13</sup>. Вид спектра зависит от напряжённости поля, и по изменению спектра можно судить об интенсивности орто-параперехода. На основе

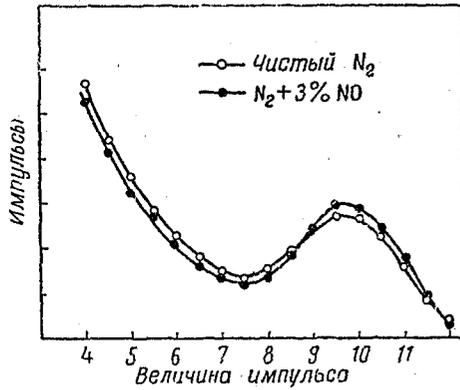


Рис. 2.

В атмосфере кислорода скорость аннигиляции прямо пропорциональна давлению. Этот факт объясняется тушением ортопозитрония кислородом; практически всё аннигиляционное излучение (при  $p > 0,5$  атм) обусловлено свободными позитронами, сталкивающимися с электронами газа.

Тонкая структура уровней позитрония также исследовалась экспериментально. Согласно теории <sup>11, 12</sup> расщепление S-состояния позитрония (разность энергий <sup>3</sup>S<sub>1</sub> и <sup>1</sup>S<sub>0</sub> состояний) складывается из энергии магнитного взаимодействия спинов, равной  $4,8 \cdot 10^{-4}$  эв, и из дополнительного расщепления, обусловленного обменным взаимодействием и равного  $3,7 \cdot 10^{-1}$  эв.

Исследуя зависимость вероятности орто-параперехода позитрония от напряжённости магнитного поля, можно определить полную разность энергии E, орто- и парасостояний позитрония.

проведённых опытов было получено значение  $E = 9,4 \cdot 10^{-4}$  эв, в общем согласующееся с теоретическим значением  $E = 8,5 \cdot 10^{-4}$  эв.

Вероятность орто-параперехода позитрония в магнитном поле определялась также и по изменению числа двойных совпадений при добавлении 3% NO к азоту<sup>14</sup>. Вычисленное на основе данных этого опыта значение  $E$  также удовлетворительно согласуется с теоретическим значением.

В заключение, отвлекаясь несколько от основной темы, отметим следующее<sup>7</sup>. При трёхквантовой аннигиляции энергия части фотонов будет меньше, но близка к 510 кэв. Эти фотоны обуславливают сдвиг в сторону меньших энергий максимума экспериментальной кривой распределения по энергиям аннигиляционных квантов. Этим сдвигом, возможно, и объясняется кажущееся расхождение между массой электрона и массой позитрона, определёнными путём сопоставления комптоновской длины волны (зависящей от массы электрона) и длины волны (двухквантового по предположению) аннигиляционного излучения<sup>6</sup>.

Л. Б.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. Ruark, Phys. Rev. 68, 278 (1945); Д. Иваненко и А. Соколов, Вестн. МГУ 6, 3 (1947).
2. И. Померанчук, ДАН LX, 213 (1948).
3. A. Ore, J. Powell, Phys. Rev. 75, 1696 (1949).
4. Д. Иваненко и А. Соколов, ДАН, LVIII, 1329 (1947).
5. Е. Лифшиц, ДАН X, 211 (1948).
6. УФН, XLV, 470 (1951).
7. M. Deutsch, Phys. Rev. 82, 455 (1951).
8. А. Теренин, Фотохимия красителей, 1947, стр. 140.
9. S. DeBenedetti, R. Siegel, Phys. Rev. 85, 371 (1952).
10. M. Deutsch, Phys. Rev. 83, 866 (1951).
11. В. Берестецкий, ЖЭТФ 19, 1130 (1949).
12. R. Ferrell, Phys. Rev. 84, 858 (1951).
13. M. Deutsch, E. Dulit, Phys. Rev. 84, 601 (1951).
14. T. Pond, R. Dicke, Phys. Rev. 85, 489 (1952).