

тогда как

$$m_{\text{прот}} = 1,007596 \text{ яд. ед. массы.}$$

Об исключительно большой проникающей способности нейтронов Чадвик пишет: «Проходя сквозь вещество, нейтроны теряют энергию только вследствие столкновений с атомными ядрами, а не с электронами. Такое поведение сильно отличается от поведения заряженной частицы... Протон, летящий со скоростью 0,1 с, имеет пробег в воздухе около 30 см, в то время как нейтрон при той же скорости испытывает в среднем только одно столкновение с ядром азота на протяжении 300—400 м. При близкой встрече с ядром нейтрон отклоняется от своего пути, а отброшенное ядро приобретает скорость, достаточную, чтобы вызвать ионизацию. Вследствие этого ядра, подвергнувшиеся столкновениям с нейтронами, могут быть обнаружены по следам, появляющимся в камере Вильсона».

К концу 30-х годов было получено множество фотографий, иллюстрирующих процесс соударения нейтрона с ядрами различных элементов. По величине отброса атомов, претерпевших соударение с нейтроном, а также по уравнениям ядерных реакций и была вычислена масса нейтрона.

§ 91. Открытие позитрона. Взаимопревращение фотонов определенной энергии и электронно-позитронных пар

Позитроны были открыты при исследовании *космических лучей*. Космические лучи впервые были обнаружены в 1910 г. Гокелем, позже Гессом и с полной определенностью в 1921 г. Миллиkenом.

Уже давно было известно, что всякий электромметр, даже изолированный весьма тщательно, не может удерживать сообщенный ему заряд в течение длительного времени. Вначале считали, что спадание листочков электромметра вызывается ионизацией воздуха, возникающей из-за присутствия радиоактивных элементов в земной коре, облучения рентгеновыми лучами и пр. Однако ионизирующее действие этих источников может быть устранено применением соответствующей защиты, например толстой (в несколько сантиметров) свинцовой брони, через которую не проникает ни рентгеново, ни радиоактивное излучение.

Опыты, сделанные с чувствительными электромметрами, показали, что даже весьма толстая броня, окружающая электромметр, полностью не предохраняет его от разряда. Экспериментаторы опускали электромметры в глубоководные озера (приборы автоматически регистрировали показание электромметра, находящегося на большой глубине под водой). Оказалось, что скорость разряда убывает с увеличением глубины очень медленно. Даже на глубине 200 м спадание заряда было еще заметно (для получения такого же защитного действия эквивалентная свинцовая броня должна была

иметь толщину в несколько метров). Так было обнаружено существование лучей, обладающих ни с чем не сравнимой проникающей способностью. Измерения на вершинах гор и при полетах в стратосферу, предпринятых Пикаром и советскими стратонавтами, показали, что интенсивность проникающего излучения быстро возрастает с высотой.

Последнее обстоятельство, а также преобладающее поступление лучей из зенита свидетельствуют о внеземном происхождении этих лучей, названных космическими.

Космические лучи выбивают из атомов частицы, о заряде и величине скорости которых можно судить, фотографируя оставляемый ими ионизационный след в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. Изучение космических лучей таким методом было проведено в 1927 г. и в последующие годы Д. В. Скобельцыным и другими экспериментаторами. Анализируя полученные при этом фотографии, Андерсен в 1932 г. сделал важное открытие — обнаружил, как это пояснено ниже, существование позитрона.

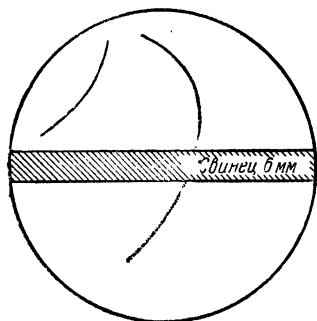


Рис. 350. Фотография следов сверхбыстрых частиц в камере Вильсона.

На рис. 350 представлена траектория частицы, прошедшей сквозь шестимиллиметровый слой свинца. (Позже было получено множество подобных снимков.) Слева, в верхней части этого же рисунка, изображен след сверхбыстрого электрона, летящего сверху вниз. Если бы частица, след которой проходит сквозь слой свинца, была электроном, летящим в том же направлении, что и первый (направление кривизны такое же), то вследствие потери энергии в свинце кривизна траектории под свинцом была бы значительно больше, чем над ним; а наблюдается обратное: скорость частицы над свинцом в 3 раза меньше, чем под ним. С другой стороны, электрон, прошедший сквозь свинцовую пластинку снизу вверх, имел бы траекторию, искривленную в противоположную сторону.

Лишь положительно заряженная частица может оставить след, подобный приведенному на рис. 350. Однако протоном эта частица быть не может; зная массу протона, можно определить его скорость, соответствующую наблюдаемой кривизне следа. Вычисления показывают, что эта скорость оказывается такой, при которой длина пробега протона не может превышать 5 мм, в то время как наблюдаемые на фотографиях следы имеют протяженность, достигающую нескольких сантиметров, без заметных изменений в скорости частицы. Оставалось два предположения, дававших объяснение полученным фотографиям: либо сквозь свинцовую пластинку снизу

вверх пролетела положительно заряженная частица с массой, близкой к массе электрона (позитрон), либо γ -фотон, поглощенный свинцом, привел к возникновению электрона, движущегося вниз, и позитрона, движущегося вверх, с несколько различающимися между собой скоростями.

Реальность существования позитронов вскоре была подтверждена опытами, не связанными с исследованием космических лучей. В 1933 г. Чадвик, Блеккет и Оккиалини обнаружили, что позитроны вылетают из свинцовой пластинки, облучаемой γ -лучами. Опыты Кюри и Жолио (1934 г.) по «искусственной» («индуцированной») радиоактивности, появляющейся у многих элементов под влиянием бомбардировки нейтронами, показали, что некоторые радиоактивные вещества испускают вместо электронов позитроны.

Было установлено, что масса позитрона равна массе электрона. Равны также их механические и (численно) магнитные спиновые моменты; однако так как позитрон имеет положительный заряд, то направление его магнитного момента в противоположность электрону совпадает с направлением механического момента:

$$\begin{aligned} m_{\text{поз}} &= m_{\text{эл}}; \\ I_{\text{поз}} &= I_{\text{эл}}; \\ \mu_{\text{поз}} &= -\mu_{\text{эл}}. \end{aligned}$$

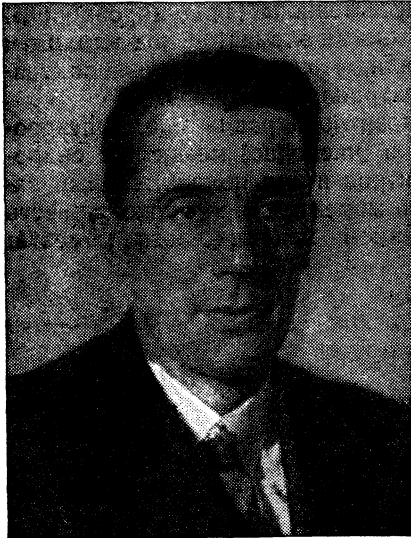
Замечательно, что существование позитрона было предсказано теорией Дирака, которая представляет собой обобщение квантовой механики на область движений с релятивистскими скоростями. Тот факт, что позитрон наблюдается только в исключительных условиях, объясняется весьма малой продолжительностью его жизни, порядка 10^{-8} сек (в атмосферном воздухе). В течение указанного времени позитрон встречается с каким-нибудь электроном вещества, что приводит к превращению позитрона и этого электрона в два фотона. Описанный процесс превращения электрона и позитрона в два фотона, ведущий к нейтрализации, к уничтожению их зарядов, принято называть «аннигиляцией пары». Каждый из двух образующихся при этом γ -фотонов имеет энергию не меньшую, чем

$$h\nu = m_{\text{эл}}c^2 = 0,51 \text{ Мэв}. \quad (12)$$

Опыты Ж. Тибо в 1934 г. подтвердили, что прохождение позитронов сквозь вещество сопровождается испусканием γ -лучей как раз той энергии, какая должна получиться при превращении двух частиц, имеющих каждая массу электрона, в два фотона.

Исследуя прохождение электронов и позитронов сквозь вещество, Тибо установил, что при сравнительно малых толщинах поглощающего слоя электроны и позитроны поглощаются одинаково.

При прохождении же этих частиц через большие толщи вещества обнаружались новые явления. Было известно, что прохождение электронов сопровождается возникновением рентгеновых лучей (на каждые 25 электронов возникает один фотон). Замечательный результат, полученный Тибо, заключается в том, что количество фотонов, возникающих под действием позитронов, превышало в 50 раз эффект, производимый электронами, т. е. на каждый позитрон возникает два фотона. Энергия фотонов оказалась приблизительно равной $0,5 \text{ Мэв}$, т. е. величине, как раз соответствующей энергии аннигиляции пары электрон-позитрон.



Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958).

Установлено, что наряду с аннигиляцией пары электрон-позитрон может происходить и обратный процесс — *превращение фотона соответствующей массы и энергии в поле ядра в пару электрон-позитрон или образование такой пары с уменьшением энергии фотона на величину $2 m_{эл} c^2$* . Образование электронно-позитронных пар впервые детально изучил Ф. Жолио в 1934 — 1935 гг. Из своих опытов Жолио сделал следующие выводы: «Нам удалось показать, что γ -лучи большой энергии, испускаемые ThC'' ($h\nu = 2,65 \text{ Мэв}$), вызывают появление позитронов, если освещать ими свинцовую пластинку.

В наших опытах свинцовая пластинка, помещенная внутрь камеры Вильсона, освещалась при помощи тонкого пучка γ -лучей ThC'' , прошедших через фильтр в 3 см свинца. На некоторых снимках можно заметить два электронных пути: один принадлежит позитрону, другой — электрону, причем оба пути начинаются в одной и той же точке на поверхности свинцовой пластинки. Иногда позитрон и электрон возникают в одной точке внутри газа, наполняющего камеру Вильсона.

То обстоятельство, что позитрон появляется одновременно с электроном, приводит к следующему представлению о механизме этого явления. Фотон большой энергии $h\nu$, встречаясь с тяжелым ядром, превращается в пару электрон-позитрон, на что затрачивается энергия $1,02 \text{ Мэв}$. Остаток энергии фотона проявляется в виде кинетической энергии электрона и позитрона;

возможно также образование рассеянного кванта с энергией $h\nu'$ (рис. 351).

Хотя присутствие ядра и необходимо для того, чтобы образование пары электрон-позитрон могло произойти, однако в обмене энергии ядро заметного участия не принимает; чаще всего остаток энергии кванта ($h\nu - 1,02 \text{ Мэв}$) делится поровну между кинетическими энергиями электрона и позитрона.

Фотоны, энергия которых меньше $1,02 \text{ Мэв}$, не могут вызывать появления пар. Этим объясняется аномальное поглощение γ -лучей, наблюдаемое, когда энергия фотонов превышает $1,1 \text{ Мэв}$. Для γ -лучей большой энергии поглощение фотонов, связанное с образованием пар, оказывается более значительным, чем поглощение вследствие комптоновского рассеяния и фотоэффекта.

Как будет пояснено в § 97, доказано, что в поглощении космических лучей образование электронно-позитронных пар играет весьма важную роль.

§ 92. Индуцированная позитронная и электронная радиоактивность. Фоторасщепление ядер. К-захват

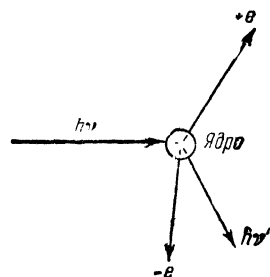


Рис. 351. Образование пары электрон-позитрон с рассеянием энергии γ -фотона.

В начале 30-х годов (всего в течение 3 лет — в 1932—1934 гг.), кроме открытия нейтронов, позитронов и процессов взаимопревращения γ -фотонов и электронно-позитронных пар, было сделано еще одно важнейшее открытие. Именно в 1933—1934 гг. супруги Кюри-Жолио, а вслед за ними другие физики установили, что *распад ядер происходит не только во время облучения элемента потоком α -частиц, протонов, нейтронов или дейтонов, но и после облучения (когда облучение прекращено), в продолжение более или менее значительного промежутка времени — порядка минут, часов или даже дней.* Кюри-Жолио, Ферми и другие ученые установили, что при облучении элементов α -, p -, n - или d -лучами возникают новые радиоактивные изотопы, распадающиеся по тем же законам, что и естественные радиоактивные вещества и испускающие в процессе распада электроны или позитроны и γ -фотоны. Это явление получило название *индуцированной или искусственной радиоактивности.*

Например, можно получить радиоактивный изотоп азота (р а д и о а з о т) N^{13} . Для этого нужно в течение некоторого времени подвергать бор бомбардировке α -частицами или же бомбардировать углерод быстрыми протонами. В последнем случае происходит пре-

