

ПОЗИТРОНЫ *

Жан Тибо, Париж

Позитрон был открыт Андерсоном при изучении путей ионизирующих частиц космических лучей, снятых в камере Вильсона. Это открытие было подтверждено опытами Блэккетта и Оккиалини. Позднее выяснилось, что эти частицы вылетают из вещества также под действием γ -лучей¹. Однако позитроны „попадаются“ экспериментатору сравнительно редко, и все наши сведения о них получены только из опытов с камерой Вильсона. Измерения кривизны следов позитронов в магнитном поле и исследование их длины и плотности ионизации показали, что эти частицы по массе и заряду (кроме знака) значительно ближе к электрону, чем к протону или к какой-нибудь другой известной нам положительной частице

Ниже я излагаю метод исследования, позволяющий получать концентрированные пучки заряженных частиц, испускаемых в небольшом количестве маленьким источником, и некоторые результаты полученных с помощью этого метода при изучении позитронов, вылетающих из свинца, облучаемого γ -лучами.

„МЕТОД ТРОХОИДЫ“

Рис. 1 показывает продольный разрез, а рис. 2 — поперечное сечение моего прибора. Полюсные наконечники электромагнита, обращенные друг к другу, разделены промежутком, в центре которого напряженность поля достигает 10^4 гауссов; на краях промежутка напряженность имеет значительный радиальный градиент. В этой периферической области помещен источник S (см. ниже); заряженные частицы, вылетающие из S по направлениям, расположенным в плоскости, близкой к плоскости рис. 2, под действием поля описывают „трохоидальные“ траектории, представленные на рис. 2; при этом частицы, вылетающие почти во всех направлениях в указанной плоскости или в плоскостях, близких к ней (с углом рассеяния почти равным $2\pi!$), собираются все в небольшой области F , диаметрально противоположной S , также в периферической части междуполюсного промежутка. Этот метод позволяет получать частицы в количестве в 100 или 1000 раз большем, чем любое устройство, в котором отклонение производится однородным магнитным полем.

* *Physical Review* 45, 781, 1 июнь 1934. Перевод В. Л. Пульвера.

Источник позитронов (и электронов) представляет собой узкую трубку, содержащую какой-нибудь мощный источник γ -лучей (радон, соль радия или лучше соль $RaTh$), заключенный в свинцовый „излучатель“ (прокатанная свинцовая фольга толщиной от

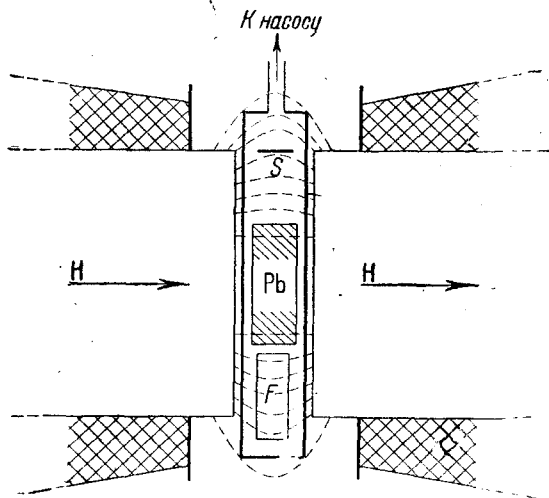


Рис. 1. Продольный разрез прибора.

0,15 до 0,3 мм). „Приемником“ F (защищенным от γ -лучей источника S свинцовым экраном толщиной от 10 до 15 см, рис. 1) может служить счетчик Гейгер-Мюллера, ионизационная камера или фотографическая пленка; я пользовался преимущественно последней. Достаточно изменить направление магнитного поля, и на пленку

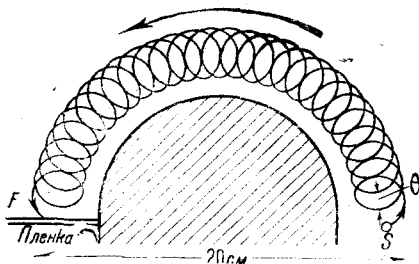


Рис. 2. Поперечное сечение прибора и форма трохоидальной траектории.

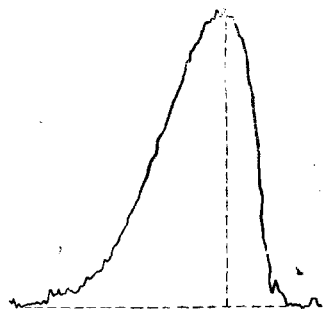


Рис. 3. Микрофотограмма следа позитронов.

начинают попадать электроны вместо позитронов, или наоборот (рис. 6). И те и другие вызывают на пленке появление очень узкой линии (рис. 6), у которой край, обращенный к S , ограничен особенно резко, как это видно на микрофотограмме рис. 3. Линии, появляющиеся под действием электро-

нов и позитронов, получаются одинаковыми, если первые частицы экспонировать в 100 или 200 раз меньше, чем вторые. Для того чтобы проверить, являются ли причиной почернения пленки частицы, летящие по трохоидальным траекториям, были произведены следующие испытания: *a)* смещение S в плоскости рис. 2 вызывало симметричное смещение линии на пленке; *b)* положение линии (в первом приближении) не зависело от напряженности магнитного поля; *c)* линия делалась более слабой, когда S смещали по направлению к оси прибора, где магнитное поле однородное; *d)* на пленке, расположенной перпендикулярно H , получаются кривые ожидаемой формы; *e)* все частицы проходили сквозь узкую щель в экране, установленном поперек трохоидальной траектории рис. 2. Заметим, что направление перемещения частиц по трохоиде в данном магнитном поле и полное подобие следов, оставляемых отрицательными электронами и новыми частицами, с самого начала позволили нам заключить, что отношение заряда этих частиц к их массе — величина положительная и того же порядка, как у отрицательных электронов.

ОТКЛОНЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Перед фотографической пленкой F перпендикулярно оси трохойды устанавливались две сетки (рис. 2 и 4); между ними накладывалась разность потенциалов V , соответственно которой в пространстве между сетками действовало электрическое поле с напряженностью E , направленное параллельно оси трохойды и перпендикулярно магнитному полю H ; это поле вызывало радиальное смещение x траекторий частиц и, следовательно, следа на пленке. Смещение x пропорционально $\frac{E}{H}$ и времени t , в течение которого частицы находятся в пространстве между сетками. Промежуток времени t зависит от расстояния θ между двумя соседними витками трохоидальной траектории; последней величиной можно управлять, изменяя градиент напряженности магнитного поля в пространстве, где расположен источник и траектории, при помощи смещения источника S в радиальном направлении. В первом приближении формулы для θ и x следующие:

$$\theta = \frac{\pi r \Delta H}{2H} \quad (1)$$

$$x = \frac{4V}{300 \beta \Delta H}, \quad (2)$$

где r — радиус витка трохойды, ΔH — разность напряженностей магнитного поля на противоположных сторонах витка и βc — ско-

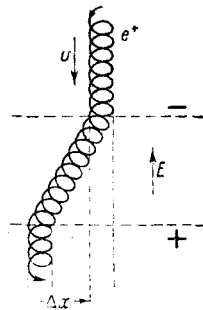


Рис. 4. Смещение трохойды под влиянием электрического поля.

рость частиц ($0 < \beta < 1$, c — скорость света). В формулах (1) и (2) единицами служат сантиметр, вольт и гаусс*.

В опыте электромагнит служат цилиндрические полюсные наконечники диаметром 2 см; ширина промежутка между ними равнялась 3,5 см; частицы двигались в изогнутой трубке из стекла Пайрекс (рис. 5); на рисунке виден справа источник S , а пленка F — слева;

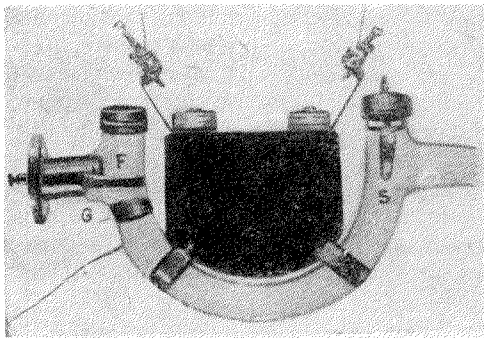


Рис. 5. Фотография прибора для получения позитронов.

две сетки G были расположены параллельно пленке и находились друг от друга на расстоянии 1 см. Когда между сетками накладывалось напряжение, след, получающийся при бомбардировке пленки частицами, смещался приблизительно на 1 мм и каждое 5 000 В; рис. 6, представляющий след позитронов, показывает смещение на 2,3 мм, получившееся в результате изменения напряжения от + 5 000 до —7500 В. При изменении направления магнитного поля, когда на пленку попадали вместо позитронов электроны, след под действием электрического поля смещался в другую сторону.

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ $\frac{e}{m}$ ПОЗИТРОНОВ

Рассматривая уравнение (2) вместе с

$$Hr = \left(m_0 c \frac{2}{e} \right) \beta, \quad (3)$$

$$\left(1 - \beta^2 \right)^{1/2}$$

видно, что $\frac{e}{m}$ и β можно найти, если во всех точках трохондальной орбиты известны r и напряженность магнитного поля. Последняя величина определялась при помощи никелевой пластинки с известной магнитной восприимчивостью, подвешиваемой в различных местах между полюсного промежутка; радиус r измерялся путем фотографирования следов позитронов. К сожалению, скорости позитронов у различных частиц были весьма различными; наиболее вероятное значение их энергии лежит между 800 и 900 тыс. электронвольт; измеренное значение r является лишь средним значением: самое большее, что можно получить из такого „абсолютного“ измерения отношения $\frac{e}{m_0}$ позитрона, — это, что оно заключено между

* Л. Картан² показал, что эти формулы остаются справедливыми и для релятивистской механики.

половиной и двухкратной величиной отношения заряда к массе электрона. Более точное „относительное“ измерение было произведено путем сравнения величин смещения x следов позитронов и электронов. Нанеся эти значения x в зависимости от напряжения, мы получили прямые, представленные на рис. 7; их наклон в пределах точности опыта одинаков, а значит одинаковы и величины*

$$\left(\frac{m_0}{e}\right) \beta^2 ; \text{ сравнивая } (1 - \beta^2)^{1/2}$$

средние значения радиусов витков трохойд, описываемых электронами и позитронами, я пришел к выводу, что отношение заряда к массе позитрона не может отличаться более, чем на 15% от того же отношения электрона.

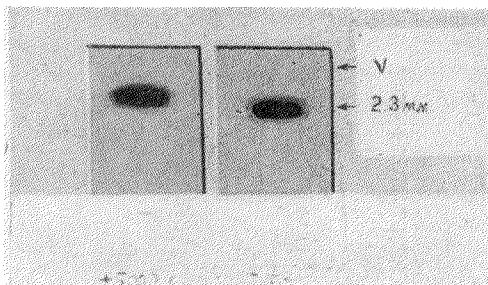


Рис. 6. — 7500 V + 5000 V

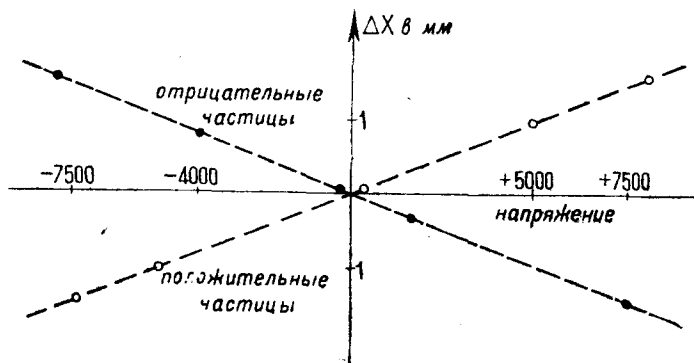


Рис. 7. Определение $\frac{e}{m}$.

ПРОХОЖДЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ СКВОЗЬ МАТЕРИЮ: РАССЕЯНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ

Метод трохойды и фотометрические измерения следов на фотопленке (мы пользовались саморегистрирующим микрофотометром

* В выражении (2) для x ΔH пропорционально градиенту магнитного поля и радиусу r траектории. Таким образом x обратно пропорционально βr , откуда согласно (3) x также обратно пропорционально величине

$$\frac{\left(\frac{m_0}{e}\right) \beta^2}{(1 - \beta^2)^{1/2}}$$

Шалонжа и Ламберта) очень удобны для изучения „поглощения“ частиц материей. Закон почернения для позитронов и электронов — одинаков³, и было проверено, что плотность S следа пропорциональна числу падающих позитронов на всем протяжении кривой почернения до $S=1$. На рис. 7а представлены микрофотограммы, снятые со следов, полученных с тремя толщинами поглощающего вещества (поглощающие экраны помещались вплотную к пленке):

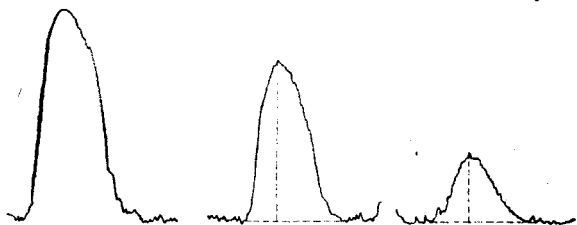


Рис. 7а. Микрофотограмма следов одного и того же пучка позитронов, прошедшего сквозь три слоя поглощающего вещества различной толщины.

хорошо заметно, что общий характер следов (в особенности их асимметрия) остается неизменным.

Для каждого исследованного элемента, мы строили график, на котором по оси ординат откладывали логарифм интенсивности пучка частиц, прошедшего сквозь вещество (или фотографическую плотность следа на пленке), а по оси абсцисс — массу вещества, приходящуюся на 1 см^2 поглощающего экрана (на рис. 9 приведен график, построенный для платины). Обычно кривые, построенные таким образом в пределах от $x=0$ до $x=50 \text{ мг/см}^2$, вогнуты по направлению к оси абсцисс; в дальнейшем они идут прямолинейно на протяжении значительного (но конечного!) интервала x , что позволило нам находить

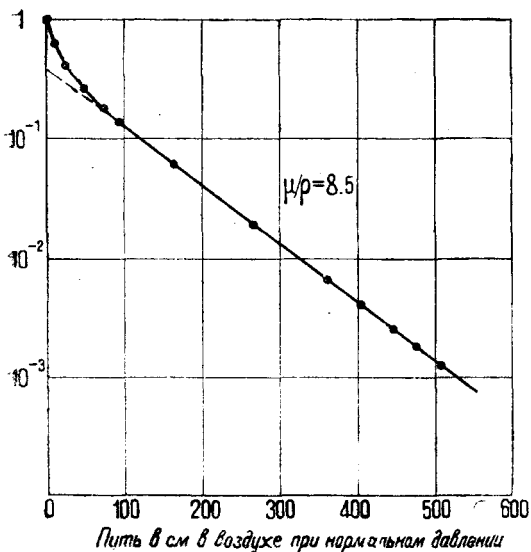


Рис. 8. Кривая поглощения позитронов в воздухе.

обычным образом коэффициент поглощения единицы массы $\frac{\mu}{\rho}$. У большого числа исследованных элементов (С, Al, S, Ca, Mn,

Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Pd, Ag, Cd, Sn, Ce, Ta, Pt, Au, Pb) найденные значения $\frac{\mu}{\rho}$ для частиц, распределение скоростей которых определялось выбранным нами источником (RaTh), колебались в пределах от 8 до 10; отдельные отклонения, вероятно, частично объясняются погрешностями измерений, а частично периодическими изменениями $\frac{\mu}{\rho}$ в зависимости от атомного номера Z . Отрицательные электроны, вылетающие из того же источника (выбитые

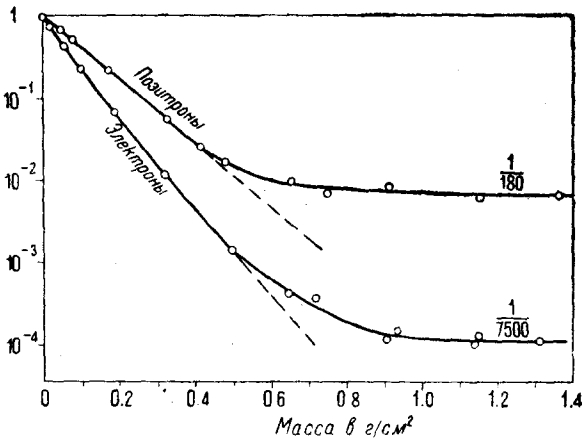


Рис. 9. Кривые поглощения позитронов и электронов в платине. Изогнутые части кривых следует приписать действию фотонов.

γ -лучами тория из атомов радиоактивных веществ и из окружающей их свинцовой фольги), имеют аналогичную кривую поглощения, которая, будучи нарисованной в полулогарифмическом масштабе, обладает длинным прямолинейным участком*; в примере, приведенном на рис. 9 (нижняя кривая), значение $\frac{\mu}{\rho}$ получилось равным 13,7.

Поглощение позитронов в воздухе исследовалось путем введения в прибор воздуха при различном давлении и измерения плотности получающихся на пленке следов. При этом общая длина L трохои-

* Уже давно известно, что неоднородный электронный пучок, вроде нашего, может поглощаться по экспоненциальному закону (которому в полулогарифмическом масштабе соответствует прямолинейная кривая)†.

дальней траектории вычислялась по формуле $L = \frac{4\pi RH}{\Delta H}$, где R — расстояние источника S от оси прибора (рис. 2). Полулогарифмическая кривая, соответствующая этому случаю, представлена на рис. 8; она вогнута^{5*} вниз при малых значениях x и вскоре становится прямолинейной; в хорошем согласии с результатами измерений поглощения в твердых веществах значение $\frac{\mu}{\rho}$ для воздуха получилось равным 8,5.

Наши заключения сводятся к тому, что при прохождении позитронов сквозь материю, до тех пор пока толщина слоя последней не превышает 500 мг/см^2 , эти частицы ведут себя так же, как отрицательные электроны, подвергаясь такому же рассеянию и торможению в результате их взаимодействия с атомными электронами и ядрами^{**}. В то же время при дальнейшем увеличении толщины экранов поведение позитронов резко отличается от поведения отрицательных электронов.

ИЗЛУЧЕНИЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЕ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ И АННИГИЛЯЦИИ

Возвращаясь к рис 9, мы видим, что прямолинейные участки обеих абсорбционных кривых переходят при больших толщинах в кривые, обращенные выпуклостью вниз и стремящиеся к не вполне горизонтальному асимптотам. Это можно объяснить тем, что действие на пленку фотонов, возникающих под влиянием частиц, летящих внутри металла, становится заметным по сравнению с действием самих частиц, которые, прежде чем попасть на пленку, проходят всю толщу металла. В случае отрицательных электронов эти фотоны следует отождествлять с хорошо известным рентгеновским излучением (как линейным, так и сплошным), возникающим при столкновениях быстрых электронов с атомами материи. Почернение пленки под действием этих фотонов весьма слабо; оно составляет всего лишь $\frac{1}{7500}$ плотности почернения первичного пучка, когда поглощающее вещество отсутствует. Это не удивительно, если вспомнить о малом „выходе“ (несколько процентов) рентгеновского излучения платины, бомбардируемой электронами таких скоростей. Сравнивая две кривые рис. 9, видно, что фотоны, появляющиеся под влиянием позитронов, обладают значительно большим действием.

* Кривые такого вида получил с отрицательными электронами Кроузер⁴.

** Заметим, что трохоидальная траектория входит в твердый поглощающий экран почти параллельно поверхности последнего, однако из-за рассеяния позитронов, начинающегося сейчас же после того, как частицы попадают в материю, можно считать, что толщина экранов соответствует тому пути, который позитроны проходят в металле. Это предположение подтверждается совпадением значений, полученных из измерений с твердыми телами и с воздухом.

При толщине платины, превышающей 500 мг/см^2 (когда проходит еще более 10% падающих позитронов), очевидно присутствие интенсивной и сильно проникающей радиации. Максимально она вы-

зывает на пленке почернение, составляющее $\frac{1}{180}$ плотности почернения от первичного пучка, т. е. почти в пятьдесят раз более сильное, чем вызванное фотонами, возникающими под действием отрицательных электронов (это различие наглядно видно из того, что при поглощающем слое в 100 мг/см^2 одинаковое почернение от позитронов и электронов получается при экспозиции первых в 200 раз большей, чем вторых, тогда как при 1000 мг/см^2 соотношение экспозиций составляет только 4). Одновременно меняется вид следа на пленке: первоначально узкая „линия“ (рис. 3) сильно расширяется и теряет резкое очертание краев и центрального максимума почернения. Мы заключили из этого, что след прямо прошедшей части пучка позитронов замаскирован вторичным излучением (фотонами), идущим по всем направлениям.

Средняя величина частоты этого нового излучения могла быть найдена по наклону упомянутой выше не вполне горизонтальной асимптоты (рис. 9). Большинство фотонов, повидимому, возникает вблизи передней поверхности поглощающего металла*, тогда как большая часть их фотографического действия, вероятно, объясна своим происхождением вторичным электронам, выбиваемым вблизи задней поверхности и летящим из металла на пленку. Мы располагали экраны таким образом, чтобы задняя поверхность металла прижималась к пленке, но чтобы при этом передняя поверхность находилась всегда на одном и том же расстоянии от пленки; эти с первого взгляда противоречивые требования осуществлялись применением нескольких экранов, расположенных на соответствующих расстояниях друг от друга и игравших роль поглощающего вещества различной толщины. Пользуясь функциями Кинга, можно вычислить, какая часть энергии, испускаемой (в виде фотонов по всем направлениям) после поглощения в экранах, расположенных указанным выше образом, вызывает появление вторичных электронов, попадающих на пленку; эта остающаяся часть оказывается близкой к 0,05.

Произведенные таким образом опыты с толщинами поглощающих веществ, достигавшими 1700 мг/см^2 , дали для коэффициента поглощения фотонов значение 0,2. Этот результат был подтвержден

* Это получается вследствие очень сильного рассеяния частиц, входящего вскоре после попадания их в металл; поэтому на очень малом расстоянии ϵ от передней поверхности металла можно обнаружить частицы, уже прошедшие в металле расстояние L , значительно превышающее ϵ , и приближающиеся к концу свободного пути и к окончательному уничтожению. Наши измерения показывают, что в платине половина позитронов оказывается рассеянной в стороны уже на глубине $0,0035 \text{ см}$. При толщине $0,05 \text{ см}$ или большей, соответствующей плотности 1000 мг/см^2 , лишь очень немногие позитроны проходят металл неотклоненными. „Центр излучения“ фотонов, таким образом, оказывается очень близким к передней поверхности.

непосредственным счетом фотонов, проходящих сквозь поглощающее вещество, счетчиком Гейгера, установленным вместо пленки (в этом случае много хлопот доставили γ -лучи, испускаемые радиоактивными веществами источника позитронов). Значение коэффициента поглощения 0,2 приводит к заключению, что энергия фотонов близка к 0,5 MEV ($1 \text{ MEV} = 10^6$ электрон-вольт). Энергия рентгеновских фотонов, возникающих под действием отрицательных электронов, достаточно близка к указанному значению, для того чтобы оправдать наше предположение об одинаковом фотографическом действии отдельных фотонов как излучения, появляющегося под действием электронов, так и позитронов. Отсюда следует, что позитроны вызывают появление фотонов в количестве, в 50 раз большем, чем электроны.

Мы знаем выход рентгеновских лучей при бомбардировке электронами различных скоростей антикатодов, состоящих из разных веществ. Отсюда можно грубо найти ожидаемое число рентгеновских фотонов, появляющихся в результате бомбардировки различных поглощающих веществ отрицательными электронами, фигурирующими в этих опытах, скорости которых имеют некоторое распределение вблизи среднего значения, близкого к 0,4*.

В случае платины один фотон приходится приблизительно на каждые 25 электронов. Деля это число на 50, мы получаем около двух фотонов на каждый позитрон. Таков „выход“ этого дополнительного процесса, свойственного позитронам. Для получения более верных цифр необходимо точнее знать распределение энергии отрицательных электронов.

Наши два основных заключения, что энергия фотонов близка к 0,5 MEV, и что их число превышает в 2 раза число позитронов, очевидно, полностью совместимы с теорией, согласно которой эти фотоны возникают при слиянии позитронов, с отрицательными электронами (последние, повидимому, берутся из числа присутствующих в металле), причем каждый такой процесс порождает два фотона, между которыми разделяется энергия, эквивалентная покоящейся массе обеих частиц. Потому что если две частицы противоположного знака при движении с пренебрежимо малыми скоростями сталкиваются и, уничтожаясь, превращаются в излу-

* Эти электроны имеют сплошной спектр скоростей, простирающийся за 2 MEV, и, кроме того, отдельные „линии“ фотоэлектрического происхождения. „Практическая средняя скорость“, которой обладают электроны, преодолевшие тонкий поверхностный слой платины, находилась по вышеуказанному коэффициенту поглощения ($\mu/\rho = 13,7$). Мы определили этот коэффициент для Al, после чего взяли соответствующую скорость электронов из таблиц Ленарда; оказалось, что значение β немного меньше 0,85, что соответствует энергии около 0,4 MEV. Мы подсчитывали выход лучистой энергии по формуле $C \cdot Z \cdot U$, полагая $Z = 78$ (атомный номер Pt), $U = 0,4 \text{ MEV}$ (энергия электронов), считая постоянную $C = 10^{-6}$ и деля величину $C \cdot Z \cdot U$ на найденную среднюю энергию фотонов. Такое вычисление оправдано результатами измерений⁷ рентгеновского излучения, возникающего под действием β -лучей радиоактивных веществ. Мы пренебрегали влиянием линии K α , ослабленной поглощением в десятки раз.

ние, то при этом в противоположные стороны должны вылетать два одинаковых фотона, для того чтобы имело место сохранение импульсов. Каждый квант должен обладать половиной энергии, сосредоточенной до столкновения в покоящихся массах двух частиц, равной 1,2. В предыдущем рассуждении под „пренебрежимо малыми скоростями“ следует понимать такие, которым соответствует кинетическая энергия, весьма малая по сравнению с 0,5 MEV; естественно предполагать, что позитроны и электроны особенно „склонны“ к слиянию, когда их скорости малы именно в этом смысле.

Все сказанное позволяет заключить, что мы имеем теперь доказательство, самое очевидное из всех существовавших до сих пор, превращения электрических зарядов, иначе говоря, превращения вещества в излучение — процесс, который часто предполагался в последние годы и который является чрезвычайно плодотворной гипотезой во многих космогонических теориях *. Этот процесс прямо противоположен процессу превращения излучения в электрические заряды, впервые постулированному Дираком, предполагавшим, что он происходит во многих случаях, когда наблюдаются позитроны. Например, когда эти частицы вылетают при бомбардировке тяжелых металлов γ -лучами **. Однако этот обычно предполагаемый процесс в последнем случае не является прямой противоположностью, чтобы объяснить опыты, описанные в настоящей работе. В этих опытах при слиянии двух частиц, повидимому, возникают два одинаковых фотона, тогда как в случае, упомянутом выше, один фотон вызывает появление двух частиц. Превращение одного фотона в две частицы нарушает сохранение импульсов, если только этот процесс, происходящий в непосредственной близости от ядра, не сообщает последнему некоторого импульса; вообще говоря, можно предполагать, что это имеет место. В то же время кажется (из опытов, описанных в литературе), что превращение фотонов в заряженные частицы происходит главным образом в таких условиях, при которых атомные ядра принимают участие в явлении, тогда как превращение частиц в фотон является преимущественно замкнутым процессом, происходящим без участия ядер ***.

* Грэй и Таррант, а также другие авторы, наблюдали излучение, испускаемое металлами, облучаемыми γ -лучами, которое они приписали этому процессу. Предполагалось, что позитроны, фигурирующие в этом явлении, создаются фотонами γ -лучей (наряду с электронами) внутри металлов. Жолио * также наблюдал методом трохонды излучение той же природы, испускаемое металлами при бомбардировке их позитронами. Он пользовался для наблюдения счетчиком Гейгера, причем значительная часть (86%) наблюдаемого излучения, повидимому, получалась вследствие паразитных явлений, возможно из-за заражения лабораторий (см. мои критические замечания⁹); фотографический метод избавляет от этих источников ошибок.

** См. ссылки в конце примечания 1; см. также работу Оппенгеймера и Плессета¹⁰.

*** Это представление подтверждается наблюдениями Грэя и Тарранта, которые пришли на основании своих опытов к заключению, что фотоны с энергией 0,5 MEV появлялись в значительно большем количестве, чем фотоны с энергией 1 MEV.

ПРОБЕГ ПОЗИТРОНОВ ДО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Позитрон отличается от своего отрицательного „близнеца“ очень короткой „средней продолжительностью существования“, заканчивающегося превращением его в излучение. Мы вправе утверждать, что, вообще говоря, это различие, может быть, не является существенным, а просто получилось в результате значительного преобладания электронов в той вселенной, которую мы знаем. Если бы орбитальные электроны атомов были вместо отрицательных положительными, тогда короткую продолжительность существования имели бы, вероятно, первые.

Из кривых рис. 9 мы заключаем, что свободный пробег позитронов до превращения составляет в платине по меньшей мере 0,03 см; он соответствует слою металла с общей плотностью 600 мг/см³; в то же время наши измерения в воздухе дают для пробега величину 640 мг/см² (по меньшей мере 500 см воздуха при нормальной температуре и давлении). Весьма близкое совпадение этих двух чисел приводит к выводу, что взаимодействие позитронов с электронами заключается как в торможении, так и в окончательном превращении их в излучение.

ПОЗИТРОНЫ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Мы обнаружили, что тонкостенная стеклянная ампула с радием испускает позитронов больше, чем наш источник, представляющий собой ту же ампулу, заключенную в свинец¹¹; аналогичный результат получается с ампулой RaTh. Вряд ли тонкие стеклянные стенки, состоящие из легких элементов, являются причиной этого излучения. Мы видим эту причину в явлениях, происходящих в самом радиоактивном веществе; возможно—в превращении в позитроны γ -лучей, а, может быть, в столкновениях α -частиц с ядрами.

Несколько лет назад я наблюдал¹² фотоны γ -лучей с энергией 0,507 MEV, излучаемые RaC- и ThC''-веществами, в γ -спектрах которых присутствует излучение с энергией, значительно превышающей 1 MEV. Довольно правдоподобным является предположение, что эти γ -лучи могут возникать при превращении в излучение „природных“ позитронов, испускаемых самим радиоактивным веществом и превращающихся в излучение прежде чем они выходят наружу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson, Science **76**, 238, 1932; Blackett a. Occhialini, Proc. Roy. Soc., A **139**, 699, 1933; Anderson a. Neddermeyer, Phys. Rev., **43**, 1043, 1932; Curie et Joliot C. R. **196**, 1581, 1933; Meitner u. Philipp, Naturwiss. **24**, 468, 1933; История открытия и обзоры Blackett, Natur **132**, 917, 1933; Darrow, Rev. Sci. Inst. **4**, 263, 427, 1933 M. **5**, 115, 1932; Scientific Monthly **38**, 1, 1932.
2. L. Cartan, C. R. **197**, 1604, 1933.
3. Thibaud et Dupré la Tour, C. R. **198**, 805, 1934.
4. См. например, K. W. F. Kohrausch, Radioaktivität, S. 367, Handb. d. Physik.
5. Thibaud, C. R. **198**, 562, 1934.
6. Crowther, Proc. Roy. Soc., A **80**, 186, 1908.
7. J. A. Gray, Phys. Rec. **25**, 237, 1925.
8. Joliot, C. R., **197**, 1622, 1933.
9. Thibaud, C. R. **198**, 562, 1934.
10. См. также Oppenheimer a. Plesset, Phys. Rev. **44**, 53—55, 1933.
11. Thibaud, C. R., **197**, 915, 1933.
12. J. Thibaud, Thesis, Paris. 1925; см. C. R. **198**, 562, 1933.