

Если учесть все это, мы получим следующую формулу для максимальной энергии δ -электрона:

$$E_k = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - (v'/c)^2}} - m_e c^2 = 2m_e c^2 \frac{\beta^2}{1 - \beta^2}.$$

Мы видим на этом примере, что поправки, связанные с теорией относительности, в корне меняют ситуацию: энергия δ -электронов в случае быстрых частиц может стать очень большой. Возможен даже такой редкий случай, когда при лобовом столкновении первичной частицы с электроном почти вся энергия частицы воспринимается электроном.

Почему следы электронов образуют спирали

Электроны, следы которых мы наблюдали в камере, имеют небольшую энергию, но большую скорость, близкую к скорости света. Так как их энергия мала, на каждом обороте в магнитном поле они теряют заметную часть своей энергии, и следующий оборот происходит при меньшем радиусе. Поэтому следы этих электронов – сворачивающиеся спирали.

Нетрудно оценить, какую энергию теряет быстрый (релятивистский) электрон на сантиметре пути в камере. Рассмотрим, например, след того же δ -электрона с энергией порядка 14 МэВ в жидком водороде. Он совершает около 3 оборотов спирали, так что весь его путь близок к 43 см. Таким образом, средняя потеря энергии на единицу пути равна

$$A = \frac{\Delta E}{\Delta x} \approx 0,3 \text{ МэВ/см}.$$

Заметим, что табличное значение этой величины равно 0,32 МэВ/см. Наши грубые оценки дали правильное значение потерь энергии быстрого электрона в жидком водороде, а заодно – и приблизительное значение постоянной A в формуле (*) для потерь энергии.

Теперь мы можем получить представление о том, сколько ионов создает быстрый электрон в жидком водороде. На создание пары ион – электрон тратится энергия порядка 20 эВ, поэтому число таких пар будет

$$N = \frac{0,3 \cdot 10^6 \text{ эВ/см}}{20 \text{ эВ}} \approx 150000 \text{ 1/см}.$$

Возможно возникнет вопрос: если число ионов измеряется сотнями тысяч, то почему число видимых пузырьков так мало? Прежде всего, дело в механизме вскипания. Чтобы оно началось, необходим местный разогрев жидкости. Жидкость вскипает там, где случайно выделилось много тепла, т.е. образовалось большое число ионов. Таким образом, пузырьки образуются на больших скоплениях ионов, а большие скопления редки. Кроме того, далеко не все пузырьки оказываются видимыми (разрешаются) при фотографировании. В обычных камерах размер пузырьков близок к 0,3–0,5 мм и число их на 1 см пути быстрой частицы не превосходит десятка. В сверхчистых быстроциклирующих камерах при очень ярком освещении можно работать с пузырьками размером ~30 мкм.

Фотоны в камере создают вещество и антивещество

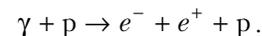
На рисунке 4 представлено событие возникновения в камере пары частиц разных знаков заряда – электрона и позитрона, т.е. частицы и античастицы, – из излучения. Условно его можно написать в виде реакции



Фотон не оставляет видимого следа в камере, и следы пары электрон – позитрон возникают как бы из ничего. Можно измерить радиусы этих следов и оценить энергию, уносимую обеими частицами. Для наших снимков энергия лежит в пределах 70–100 МэВ.

Заметим, что радиусы обеих окружностей различаются. Это означает, что энергия фотона не делится поровну между частицей (e^-) и античастицей (e^+), и наводит на мысль, что процесс распада фотона не может происходить без участия еще одного тела. Действительно, записанная реакция несовместима с законом сохранения импульса. Предположим, что энергия фотона настолько мала, что ее хватает только на создание покоящейся пары электрон – позитрон. Тогда импульс этой пары равен нулю, но импульс фотона, который имеет скорость света, никогда не может быть равен нулю. Возникает вопрос: куда же девается избыток импульса фотона?

Очевидно, что в реакции рождения пары должно участвовать третье тело, которое примет на себя избыток импульса. Таким телом является ядро атома, в электромагнитном поле которого и возникает пара. В жидководородной камере это протон, так что реакцию рождения пары можно написать в таком виде:



Хотя импульс, получаемый протоном, может быть велик, его кинетическая энергия, равная $p^2/(2m_p)$, мала, так как он имеет большую массу. Таким образом, электрон-позитронная пара уносит почти всю энергию фотона, но лишь часть его импульса.

Каскадный ливень

Мы наблюдали образование электрон-позитронных пар фотонами. Но каким образом в камере, стоящей в пучке протонов, появились фотоны? Излучать фотоны при торможении в поле ядра – свойство электронов большой энергии. На этом, например, основано действие рентгеновской трубки: электроны, тормо-

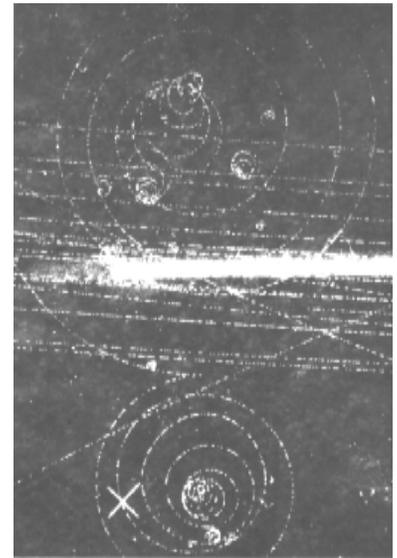


Рис.4. Рождение электрон-позитронной пары. На снимке виден пучок протонов, фотоны бали испущены в направлении этого пучка