

Если частица движется по окружности радиусом  $R$  со скоростью  $v$ , то ее импульс  $\vec{p}$ , оставаясь постоянным по модулю, поворачивается с угловой скоростью  $\omega = v/R$ . При этом изменение импульса за время  $\Delta t$  равно  $\Delta p = p\Delta\varphi = p\omega\Delta t$  (проверьте это самостоятельно). Тогда второй закон Ньютона принимает вид

$$p\omega = ZevB.$$

(Если частица движется медленно, то  $p = mv$ , и в левой части последнего равенства появляется произведение массы на центростремительное ускорение. Для релятивистских и ультрарелятивистских частиц это не так.) Подставляя сюда  $v = \omega R$ , получаем формулу, выражающую импульс частицы через радиус окружности:

$$p = ZeRB.$$

Специалисты, работающие на ускорителях, любят выражать не импульс, а произведение импульса на скорость света, т.е. величину  $pc$ , имеющую размерность энергии. Разделив на заряд электрона, мы выразим эту величину в электрон-вольтах. Кроме того, физики привыкли измерять магнитную индукцию не в теслах, а в гауссах ( $1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тл}$ ). Учтя все это, получим рабочую формулу, которая используется при расчетах траекторий частиц:

$$pc = 300BR,$$

где  $R$  измеряется в сантиметрах.

Отметим, что величина  $pc$  удобна еще и тем, что через нее простым образом выражается энергия  $E$  частицы. В частности, для медленных частиц

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2} pc \frac{pc}{mc^2},$$

где  $mc^2$  – энергия покоя (в случае электрона она равна 0,51 МэВ). А для ультрарелятивистских частиц, энергия которых гораздо больше энергии покоя,

$$E \approx pc.$$

### Число капель на следе – мера скорости частицы

Когда заряженная частица движется в пузырьковой камере, она растрчивает свою энергию на возбуждение атомов или молекул жидкости. Если переданная энергия достаточно велика, электрон может быть выбит из атома – произойдет образование иона и свободного электрона. Энергия, потерянная частицей на единице пути, т.е. величина  $\Delta E/\Delta x$ , зависит от скорости частицы: чем скорость меньше, тем больше времени частица взаимодействует с электроном. Величина  $\Delta E/\Delta x$  оказывается обратно пропорциональной квадрату скорости частицы. В первом приближении можно считать, что

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{A}{\beta^2}, \quad (*)$$

где  $\beta = v/c$  – отношение скорости частицы к скорости света,  $A$  – некоторая постоянная, зависящая от свойств

среды, в которой тормозится частица (далее мы оценим эту величину для жидкого водорода). Таким образом, получается, что быстрая частица ( $\beta \approx 1$ ) ионизирует слабее всего. Соответственно, тонкие следы в камере принадлежат быстрым (релятивистским) частицам, а жирные следы из слипшихся капель образованы медленными частицами. На рисунке 3 ясно видно, что частицы основного пучка, пронизывающие камеру снизу вверх, – быстрые частицы (для  $\pi$ -мезона с энергией 1 ГэВ, например,  $\beta = 0,99$ ). Скорость же протона, возникшего при  $\Lambda^0$ -распаде, мала, и поэтому протон оставляет плотный след.

Итак, мы видим, что по следам в пузырьковой камере можно измерить импульс частицы и ее скорость. А зная скорость и импульс, можно определить массу частицы.

### Образование $\delta$ -частиц

Мы обращали внимание (см. рис.3, например) на спиральные следы частиц. Их скорость велика (тонкие следы), но энергия мала. Это либо следы электронов и позитронов, возникающих при распаде мюонов, либо следы так называемых  $\delta$ -электронов, выбиваемых при ионизации атома жидкости. Обычно пробег таких электронов мал и не превышает размера пузырьков. Однако иногда (как видно на снимках) выбитый электрон имеет энергию, достаточную для того, чтобы самому начать ионизировать. В этом случае мы видим спираль, ответвляющуюся от основного следа.

Оценим максимальную энергию, которую электрон может получить от столкновения с тяжелой частицей массой  $M$ , движущейся со скоростью  $v$ . Предположим, что до столкновения электрон покоился. Перейдем в систему отсчета, где частица  $M$  неподвижна. В этой системе электрон падает на частицу, имея скорость  $-v$ , и, если столкновение упругое, отражается от нее почти с такой же по величине скоростью. Теперь, после взаимодействия, нам остается перейти в первую, лабораторную систему отсчета. Скорость электрона в этой системе равна  $2v$ , а его кинетическая энергия –

$$E_k = \frac{m_e(2v)^2}{2} = 2m_e c^2 \frac{v^2}{c^2} = 2m_e c^2 \beta^2.$$

Величина  $m_e c^2$  – это энергия покоя электрона, равная 0,51 МэВ.

Из формулы следует, что даже при очень больших скоростях первичной частицы (близких к скорости света) энергия электрона не может превзойти 1 МэВ. Однако внимательно рассмотрев траектории  $\delta$ -частиц, мы обнаруживаем, что энергия  $\delta$ -электронов часто значительно больше. Например, для траектории на рисунке 3 она составляет приблизительно 14 МэВ. Причина расхождения очевидна: мы не приняли во внимание теорию относительности. Ведь при увеличении скорости вместо галилеевского закона сложения скоростей:  $v' = v + v = 2v$  действует эйнштейновский закон:

$$v' = \frac{v + v}{1 + v^2/c^2} = \frac{2v}{1 + \beta^2}.$$