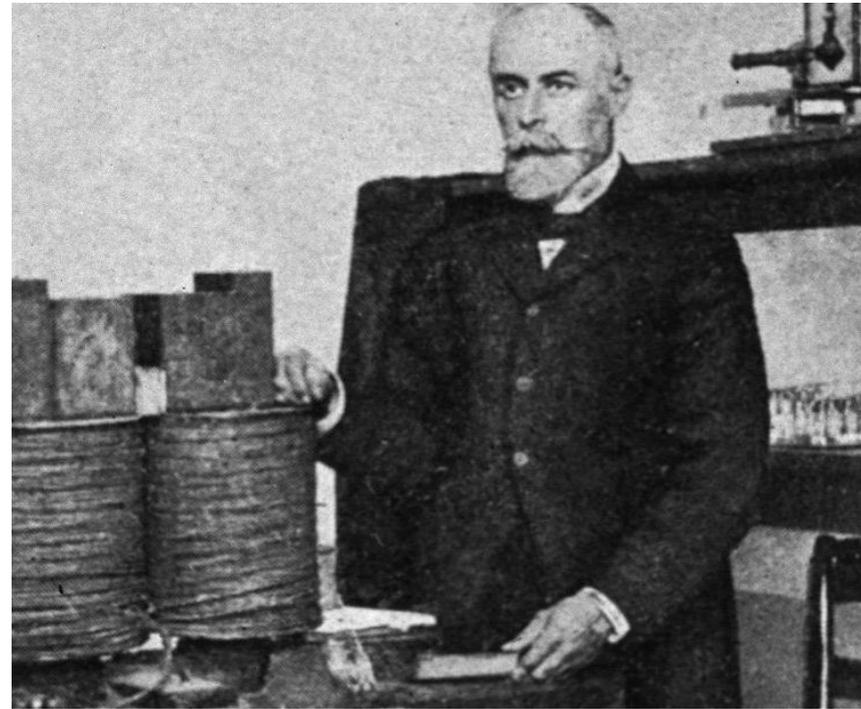


### 1.3. Бета-лучи. Измерение удельного заряда методом парабол. Зависимость массы от скорости.

Открытие радиоактивности солей урана  
Беккерелем (1896).

*Анри Беккерель (1852-1908)* □



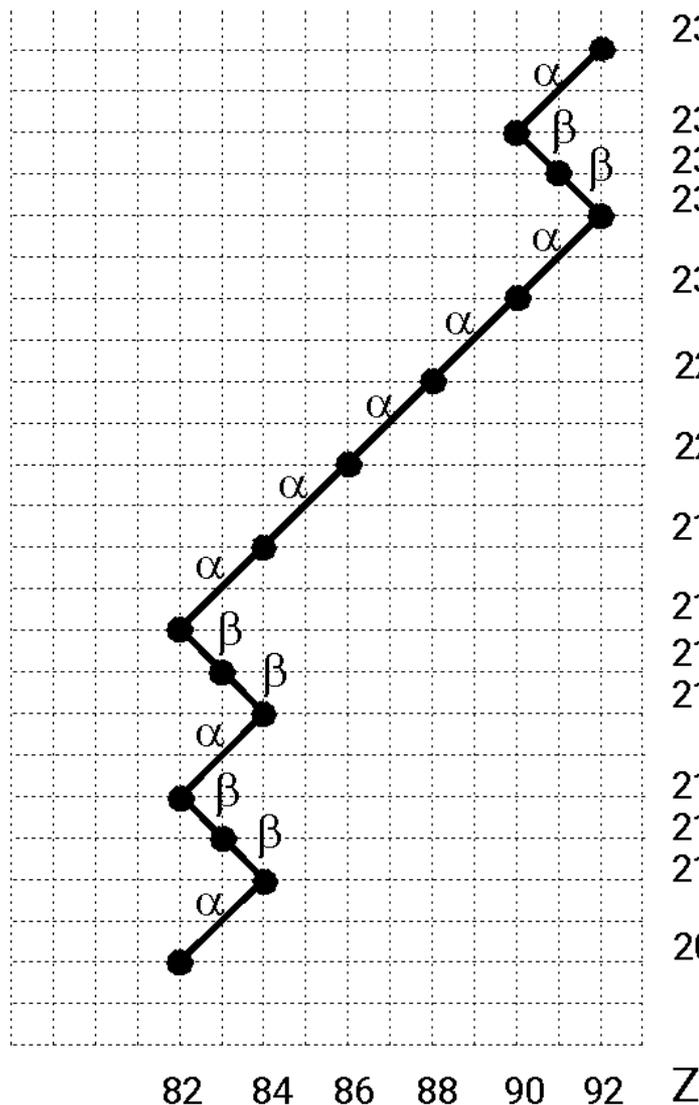
Пьер и Мария Кюри:

Радиоактивность тория.

Выделение радия и полония, элементов с высокой радиоактивностью -- на 6 и 10 порядков больше, чем у урана.

□ *Мария Склодовская-Кюри (1868-1934),  
Пьер Кюри (1859-1906)*

Забегая вперед

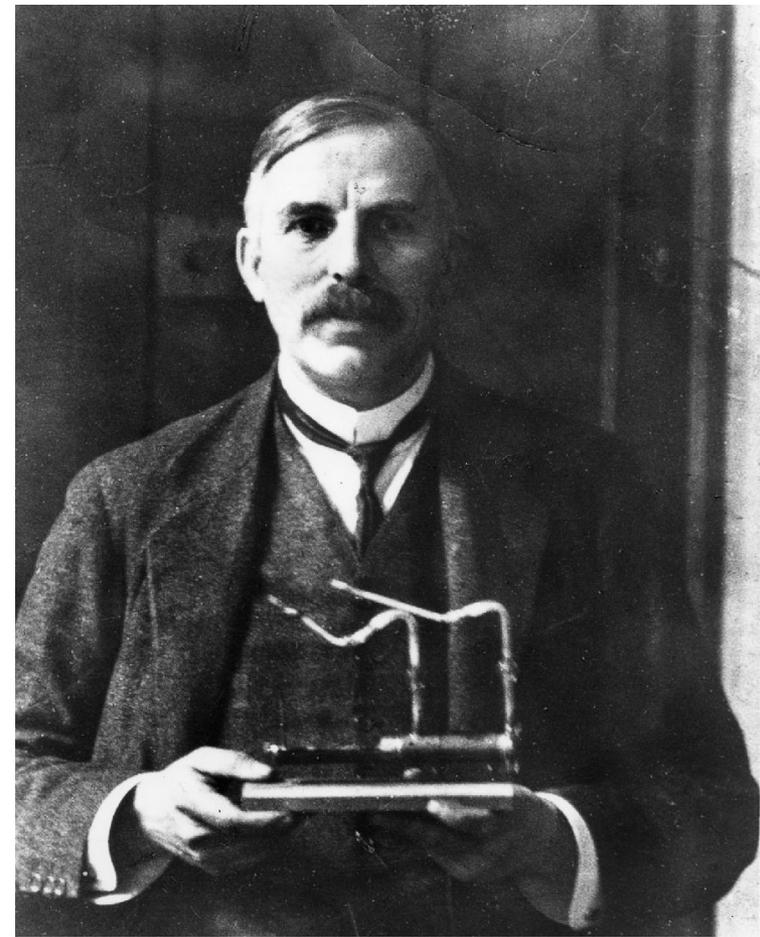
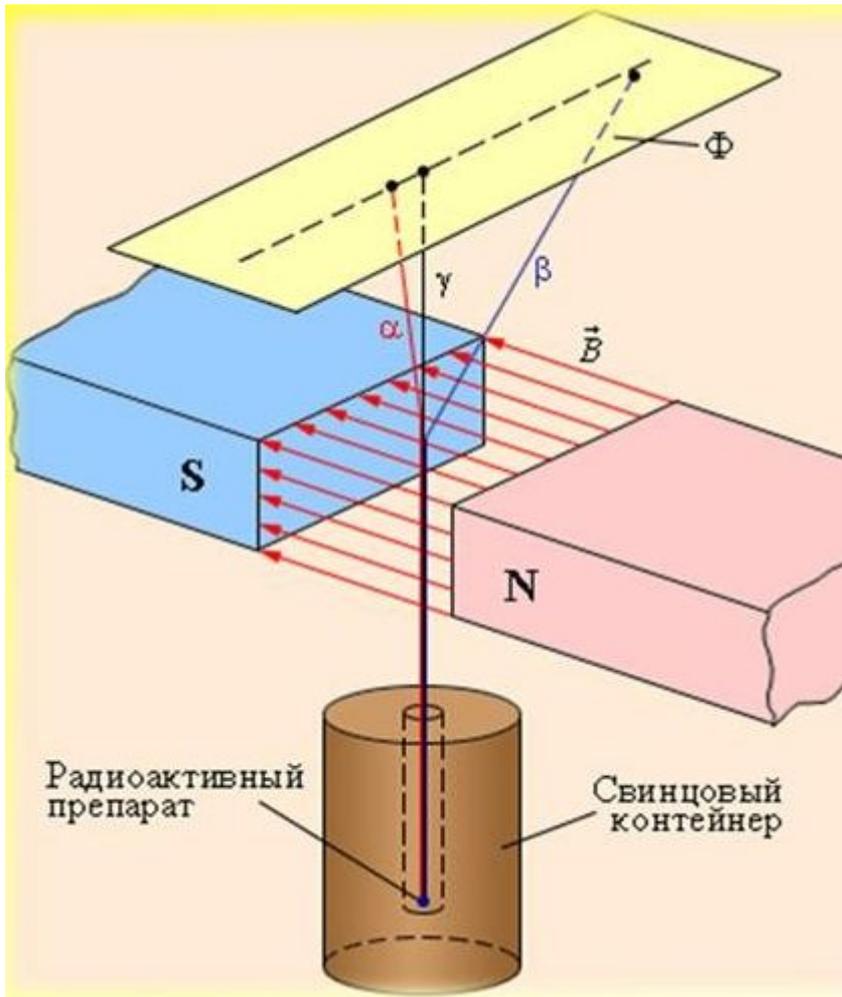


$^{238}\text{U}$	уран	4.47 млрд. лет
$^{234}\text{Th}$	торий	24.1 суток
$^{234}\text{Pa}$	протактиний	1.17 мин.
$^{234}\text{U}$	уран	245 тыс. лет
$^{230}\text{Th}$	торий	8 000 лет
$^{226}\text{Ra}$	радий	1 600 лет
$^{222}\text{Rn}$	радон	3.823 суток
$^{218}\text{Po}$	полоний	3.05 мин.
$^{214}\text{Pb}$	свинец	26.8 мин.
$^{214}\text{Bi}$	висмут	19.7 мин.
$^{214}\text{Po}$	полоний	164 мкс
$^{210}\text{Pb}$	свинец	22.3 лет
$^{210}\text{Bi}$	висмут	5.01 суток
$^{210}\text{Po}$	полоний	138.4 суток
$^{206}\text{Pb}$	свинец	стабилен

Радиоактивный ряд распада урана-238 (т.н. «ряд радия»)

Ряд распада тория-232 («ряд тория») аналогичен, заканчивается стабильным свинцом-208.

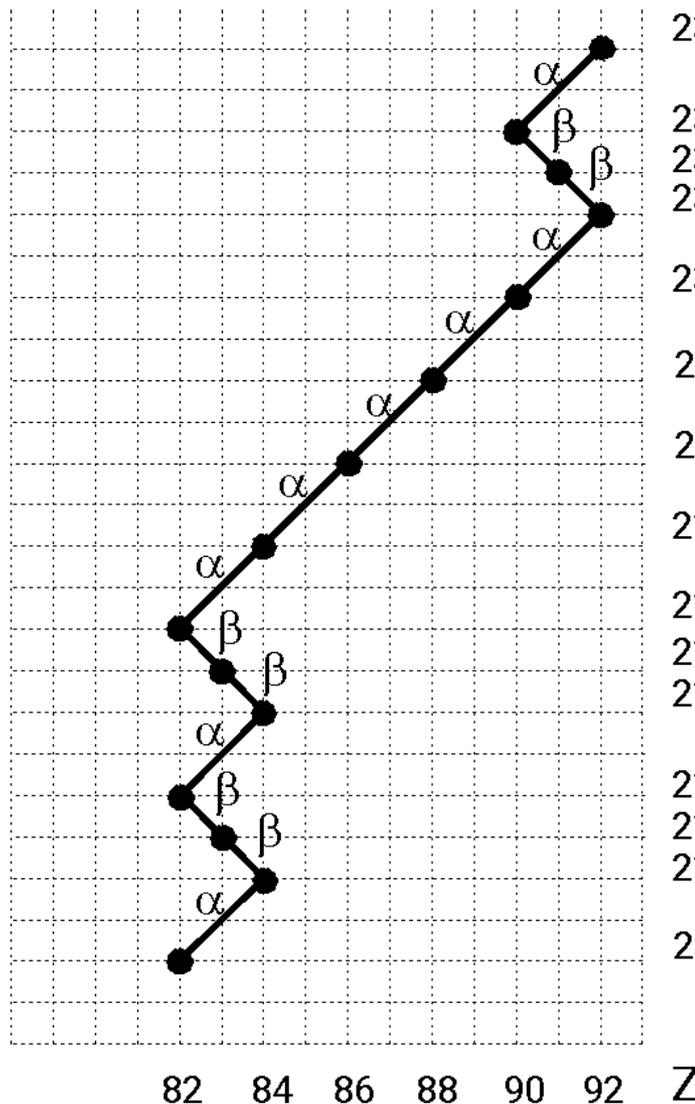
Резерфорд:  
альфа- и бета- излучение (1897).  
Отклоняются магнитным полем в  
противоположные стороны.  
Отклонение бета-лучей значительно сильнее.



*Ernest Rutherford (1871-1937)*

В 1900 г. Поль Виллар обнаружил и третью  
компоненту – гамма-лучи.

Забегая вперед



$^{238}\text{U}$	уран	4.47 млрд. лет
$^{234}\text{Th}$	торий	24.1 суток
$^{234}\text{Pa}$	протактиний	1.17 мин.
$^{234}\text{U}$	уран	245 тыс. лет
$^{230}\text{Th}$	торий	8 000 лет
$^{226}\text{Ra}$	радий	1 600 лет
$^{222}\text{Rn}$	радон	3.823 суток
$^{218}\text{Po}$	полоний	3.05 мин.
$^{214}\text{Pb}$	свинец	26.8 мин.
$^{214}\text{Bi}$	висмут	19.7 мин.
$^{214}\text{Po}$	полоний	164 мкс
$^{210}\text{Pb}$	свинец	22.3 лет
$^{210}\text{Bi}$	висмут	5.01 суток
$^{210}\text{Po}$	полоний	138.4 суток
$^{206}\text{Pb}$	свинец	стабилен

При распадах радиоактивных элементов выделяются гамма-частицы + либо бета-, либо альфа-частицы -- в зависимости от элемента (изотопа).

Относительно слабое отклонение альфа-лучей электрическими и магнитными полями было обнаружено Резерфордом лишь в 1902.

Отклонение бета-лучей значительно сильнее. Очень быстро сразу несколько исследователей определили, что их природа та же, что у катодных лучей – по величине (и знаку) удельного заряда  $q/m$  (или  $e/m$ ).

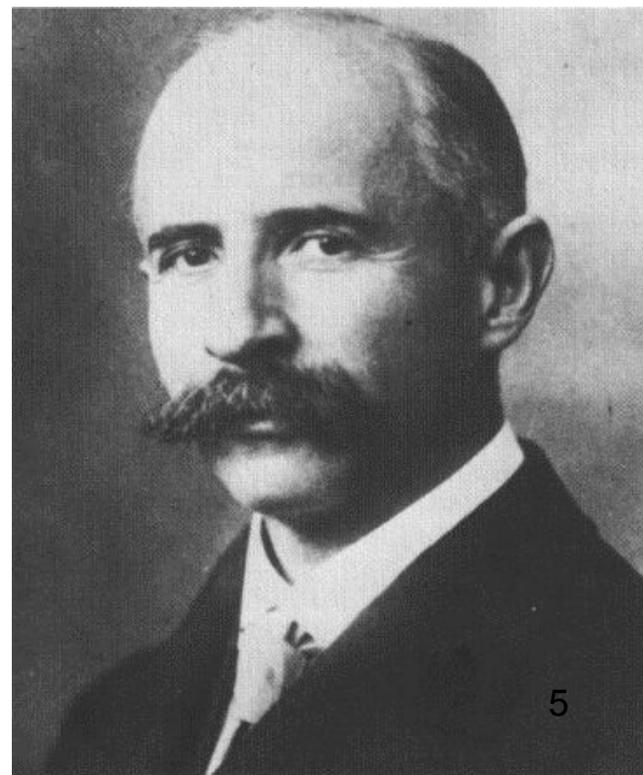
Хотя имелась проблема: большой разброс значений скорости частиц. От 0 до очень больших значений.

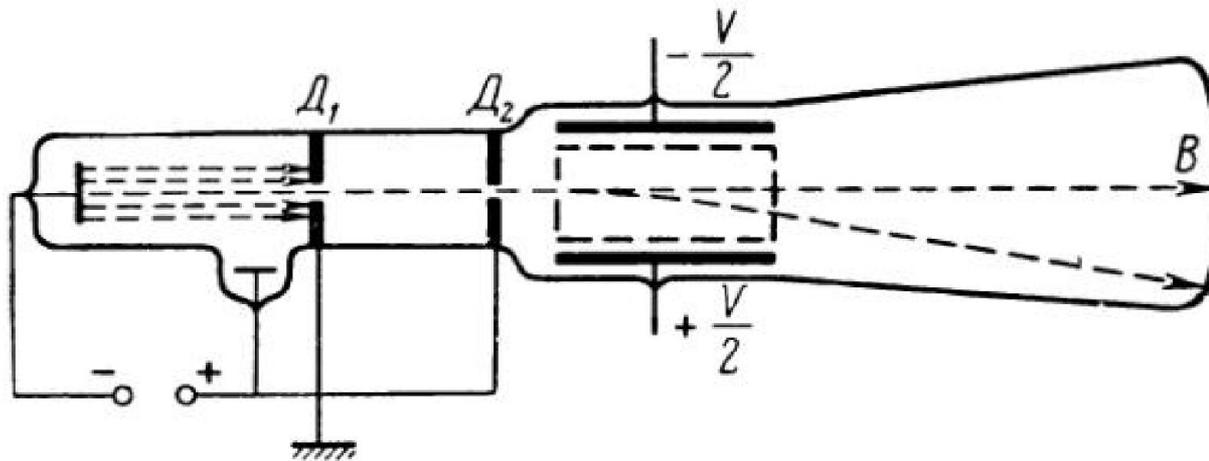
Поэтому метод Томсона с компенсацией действия электрического поля магнитным не мог быть применен.

Были предложены другие методы. Один из них впервые (?) был использован в 1901 году Вальтером Кауфманом.

Этот метод известен как «метод парабол Дж.Дж. Томсона (1910)».

*Walter Kaufmann (1871-1947)* □





Почему схема со скрещенными полями не может быть использована?

Вспомним формулу для смещения частицы с параметрами  $(q, m, v)$  под действием электрического  $E$  (немного изменив обозначения):

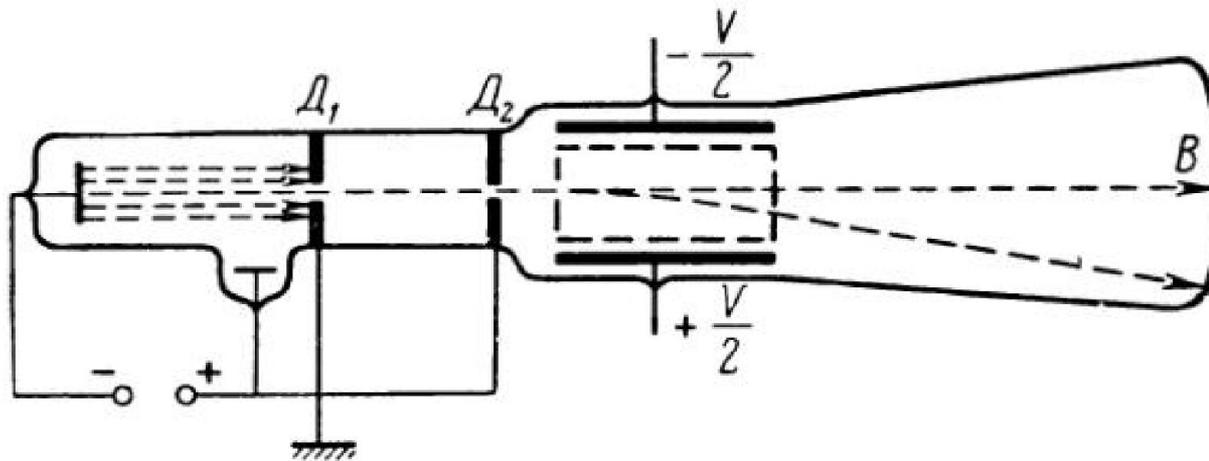
$$Y_E = \frac{qE}{m} \cdot \frac{l}{v} \cdot \frac{1}{v} \text{ или } (L + \frac{l}{2}) \quad Y_E = \frac{qEl}{mv^2} (L + \frac{l}{2})$$

(вертикальное ускорение)х(время в конденсаторе) = (вертикальная скорость);

(вертикальная скорость)/(гориз. скорость) = tg(угла наклона траектории);

tg(угла)х(расстояние) = (смещение)

Смещение зависит от скорости частицы. Если есть частицы с разными скоростями, при включении электрического поля увидим не смещенную точку, а полосу.



Теперь оценим величину смещения для магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости рисунка, в «параксиальном приближении». Все почти так же, но ускорение равно  $qvB$ :

$$Y_M = \frac{qvB}{m} \cdot \frac{l}{v} \cdot \frac{1}{v} \cdot \left(L + \frac{l}{2}\right)$$

$$Y_M = \frac{qBl}{mv} \left(L + \frac{l}{2}\right)$$

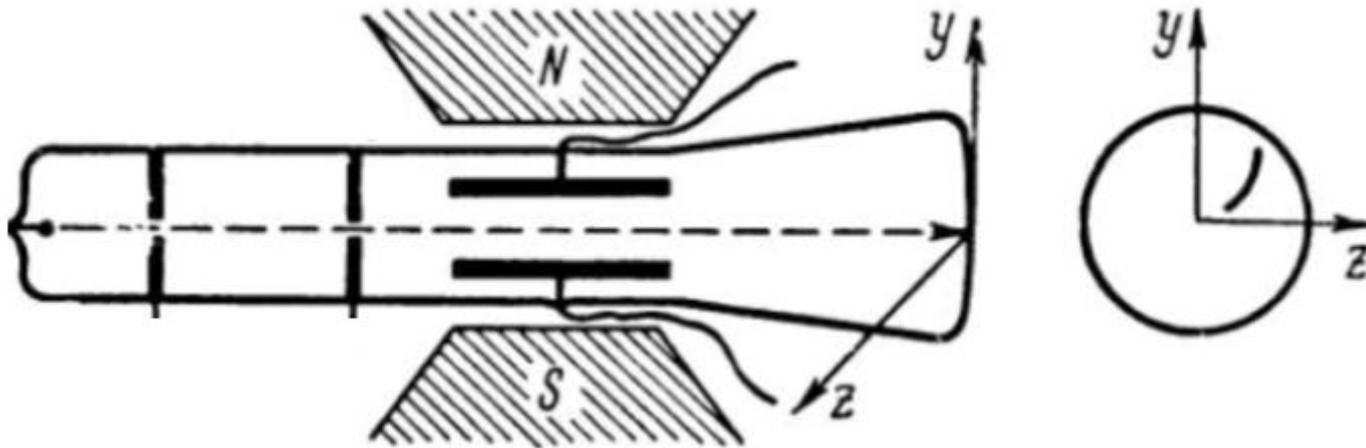
(вертикальное ускорение)х(время в конденсаторе) = (вертикальная скорость);

(вертикальная скорость)/(гориз. скорость)= tg(угла наклона траектории);

tg(угла)х(расстояние)= (смещение)

Вновь есть зависимость от скорости частицы. Но другая.

Поэтому при одновременном включении электрического и магнитного полей их действие компенсируется (при верном выборе знака) только при одном значении скорости. Если есть частицы с разными скоростями, увидим не точку, а полосу – для любого соотношения величин полей.



В «методе парабол» магнитное поле направляют не скрестно, а параллельно электрическому (в плоскости рисунка). Поэтому точка прихода частицы на экран оказывается смещенной в двух направлениях:  $Y$  и  $Z$ .

$$Y = Y_E = \frac{qEl}{mv^2} \left( L + \frac{l}{2} \right) \qquad Z = Z_M = \frac{qBl}{mv} \left( L + \frac{l}{2} \right)$$

Точки попадания частиц с разными скоростями будут разными, но они распределятся вдоль параболы. Чем меньше скорость, тем дальше от центра экрана по ветви параболы. Ее математическое представление получим, выразив  $(1/v)$  из правого второго уравнения и подставив его в левое.

$$Y = Y_E = \frac{qEl}{mv^2} \left( L + \frac{l}{2} \right)$$

$$Z = Z_M = \frac{qBl}{mv} \left( L + \frac{l}{2} \right)$$

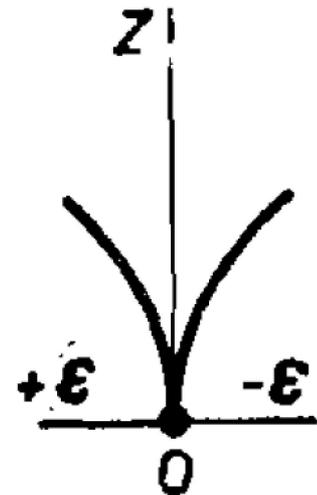
$$\frac{1}{v} = \frac{m}{qBl(L + l/2)} Z$$

$$Y = \frac{qEl}{m} \left( L + \frac{l}{2} \right) \frac{1}{v^2} = \frac{qEl}{m} \left( L + \frac{l}{2} \right) \cdot \frac{m^2}{q^2 B^2 l^2 \left( L + \frac{l}{2} \right)^2} Z^2 = \frac{E}{B^2 l \left( L + \frac{l}{2} \right)} \cdot \frac{m}{q} \cdot Z^2 = \left( K \cdot \frac{m}{q} \right) \cdot Z^2$$

Это действительно парабола, показатель которой пропорционален обратному удельному заряду частиц  $m/q$  и коэффициенту  $K$ , определяемому условиями эксперимента:

$$K = \frac{E}{B^2 l \left( L + \frac{l}{2} \right)}$$

Измерив форму параболы, определим удельный заряд. Удобно переключать направление поля, тогда увидим две соприкасающиеся параболы (на рисунке повернуты).



## Но:

- Электроны (как мы знаем теперь) – легкие частицы.
- Поэтому их скорость очень велика уже при относительно небольшой энергии.
- А энергия электронов бета-лучей как раз очень велика -- в сравнении с катодными лучами.
- Поэтому в опытах Кауфмана (1901 г.) удалось наблюдать зависимость массы от скорости, предсказываемую теорией относительности Эйнштейна (1905).

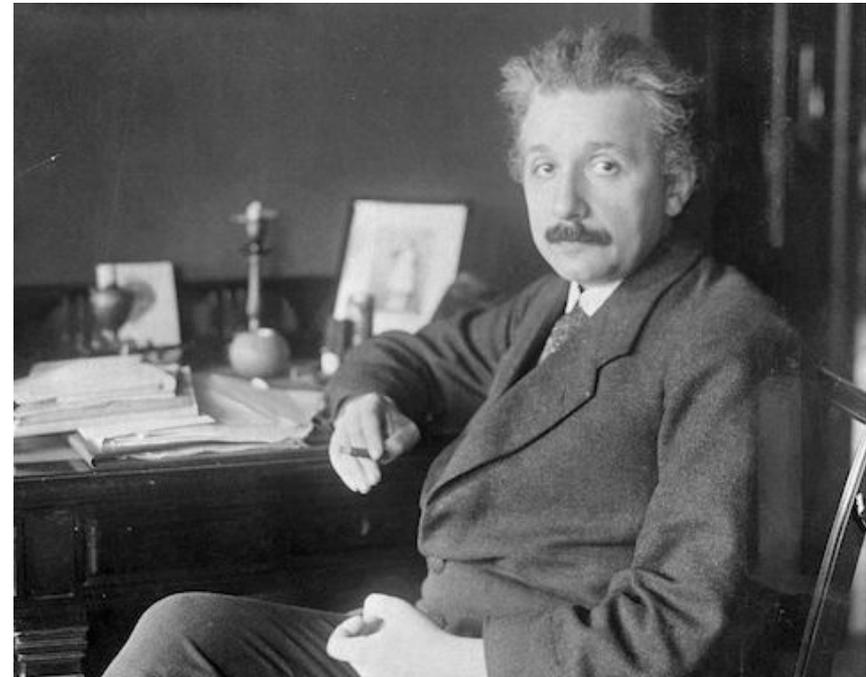
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Здесь  $m_0$  – «масса покоя» ;  $\beta = v/c$ .

Движущийся электрон тяжелее.

Или для энергии:  $E = mc^2 = m_0c^2 + eU$

Последнее слагаемое – кинетическая энергия электрона, выраженная через его заряд, в электрон-Вольтах. Эту единицу используют и для энергии, и для массы.



*Альберт Эйнштейн (1879-1955)*

(Известная сейчас) масса покоя электрона  $m_0 c^2$  равна 511 кэВ.

То есть,  $m_0 c^2 / e = 5.11 \cdot 10^5$  Вольт.

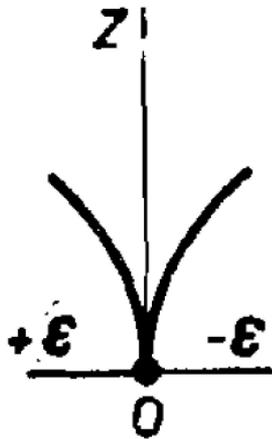
А кинетическая энергия электронов бета-лучей  $(m - m_0) c^2$  может быть значительно большей – и достигать нескольких МэВ (до 20).

$E, \text{ эВ}$	10	$10^3$	$10^5$	$10^7$
$\beta$	0,006	0,06	0,55	0,999
$\frac{m(v)}{m_0}$	1,00002	1,002	1,20	22,4

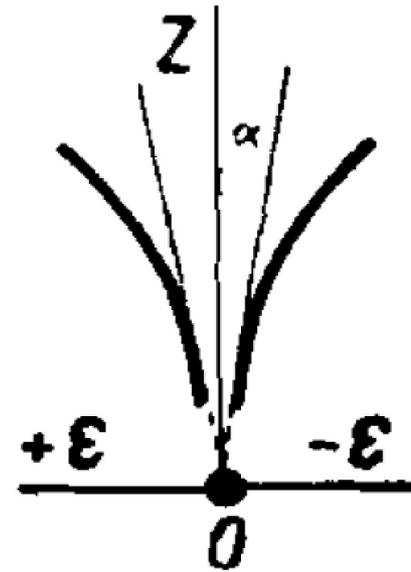
Поэтому «релятивистские поправки» весьма велики, и удельный заряд  $e/m$  для самых быстрых электронов заметно меньше, чем  $e/m_0$

Именно это и обнаружил Кауфман.

Вместо



эзалось

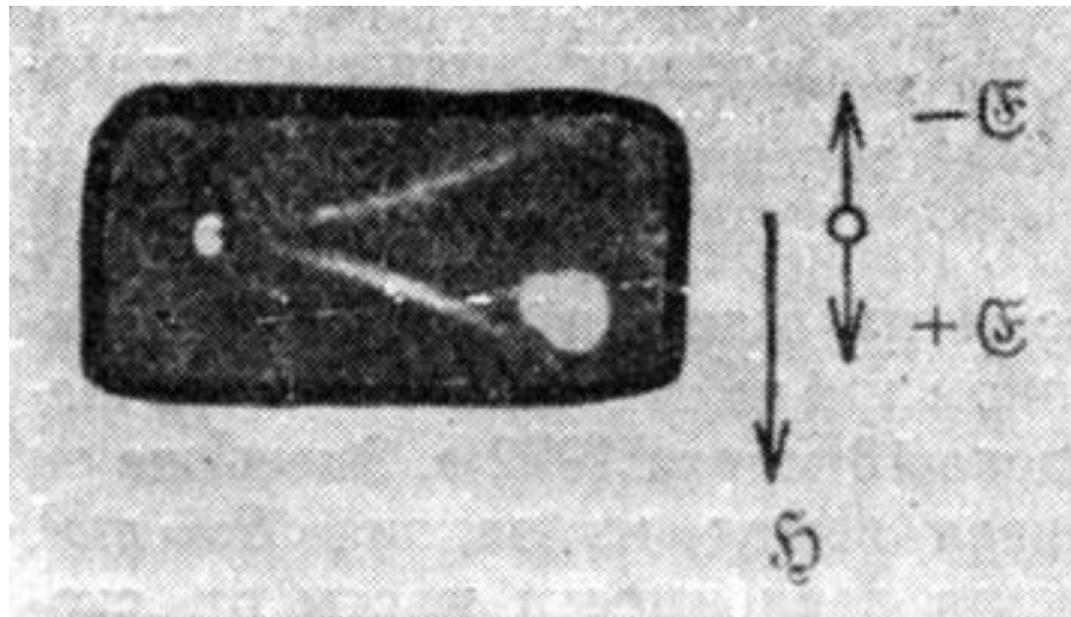


- Не совсем парабола  $Y = (K \cdot \frac{m}{q}) \cdot Z^2$
- Часть, соответствующая большим  $\nu$ , «выше» (дальше от оси), чем у параболы. Это соответствует увеличенной массе.
- Кривая подходит к «0» под конечным углом  $\alpha$ . Это соответствует бесконечной массе:  $Y = \alpha Z$

$$\alpha = K \cdot \frac{m}{q} \cdot Z$$

$\alpha$  конечна при  $Z \rightarrow 0$ , следовательно,  $(m/q) \rightarrow \infty$

- Кауфман считал, что его данные подтверждают не теорию СТО Эйнштейна-Лоренца, а альтернативную теорию Абрахама.
- Впрочем, точность измерений была невелика  $\square$



*Опыт Кауфмана: след на фотоэмульсии*

Тем не менее, данный опыт считается

- первым случаем наблюдения зависимости массы частиц от их скорости и
- первым экспериментальным подтверждением теории относительности Эйнштейна, полученным еще до ее публикации.