

Анализ опытов Кауфмана с позиций классической электродинамики

С.А. Цикра, Украина
kgs_2@mail.ru

Проведен анализ результатов опытов Кауфмана по отклонению быстрых электронов электрическим и магнитным полем и дано их объяснение с позиций классической электродинамики.

1. Цели проведения эксперимента и его анализа

Кауфман проводил свои опыты по отклонению быстрых электронов в постоянных электрическом и магнитном полях с целью проверки гипотезы наличия «электромагнитной массы», зависящей от скорости электронов. В более общем смысле изучалось влияние скорости заряженных частиц (электронов) на отклонение электрическим и магнитным полем, с целью проверки известных в механике динамических соотношений:

$$d(m\vec{u}) = \vec{F} dt; \quad (1)$$

$$m\vec{a} = \vec{F}. \quad (2)$$

В классической механике для незаряженных тел эти соотношения определяются только величиной силы и коэффициентом пропорциональности, называемым массой m , не зависящими от скорости. Если сила направлена перпендикулярно скорости, она изменяет направление скорости (импульса), не совершая работы и не изменяя энергии тела. Если сила направлена параллельно скорости, она изменяет величину скорости (импульса) и кинетическую энергию тела, совершая работу:

$$dA = \vec{F} d\vec{s} = d(mu^2) / 2. \quad (3)$$

В классической электродинамике работа электрической силы идет не только на изменение механической кинетической энергии заряженного тела, но и на изменение его электрического и магнитного полей. Это приводит в соотношениях (1)-(3) к нарушению пропорциональности, зависящему от скорости заряда, что и подтвердил Кауфман.

В современной электродинамике сформировались две трактовки этого нарушения. Исторически первой является трактовка с учетом «электромагнитной массы», которая складывается с массой инертной (Лоренц, «Теория электронов»). Эта трактовка переросла в понятие релятивистской массы, зависящей от скорости тела и массы покоя (Эйнштейн, Паули), широко поддерживаемое впоследствии (Меллер, Фейнман и др.):

$$m_u = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}. \quad (4)$$

В этой трактовке выражения (1)-(3) считаются инвариантными для любой инерционной системы отсчета (ИСО) с учетом переменной релятивистской массы.

В другой трактовке (Ландау, Лифшиц) масса считается инвариантной, одинаковой и неизменной в любой ИСО, а выражения классической механики считаются частным случаем (приближением), справедливым для малых скоростей, от более общих (точных) выражений, содержащих соответствующий релятивистский корень. В частности, уравнения (1) и (2) получаются из релятивистского выражения импульса:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}; \quad (5)$$

а энергия тела определяется релятивистским выражением:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (6)$$

Формальная запись всех уравнений в обеих релятивистских трактовках совершенно одинаковая, поэтому разница в трактовках не имеет принципиального значения, по крайней мере в контексте дальнейшего анализа. Гораздо важнее, насколько реальные результаты, полученные Кауфманом в опытах, соответствуют расчетам классической, релятивистской или предлагаемой автором статьи теории.

1. Описание установки Кауфмана

В соответствии с оригинальным описанием [1] прибор Кауфмана (рис.1) имел латунный корпус с размерами 2x3x4,5 см (величина спичечного коробка). Внутри на нижнем основании прибора крепились две прямоугольные латунные пластины длиной 17,8 мм на расстоянии 1,5 мм одна от другой, симметрично и параллельно вертикальной оси прибора. Пластины проводниками соединялись с изолированными выводами в основании, к одной из которых в дальнейшем подводилось напряжение (до 7000 В), а вторая заземлялась вместе с корпусом. В центре основания прибора имелось углубление, в котором помещалась крупинка бромида радия размерами 0,3x1 мм, длинной стороной вдоль зазора пластин, которая являлась радиоактивным источником заряженных частиц, в том числе и электронов. На расстоянии 20,7 мм от основания параллельно ему помещалась диафрагма из свинца с платиновой вставкой посередине, в центре которой (по оси прибора) имелось отверстие диаметром 0,5 мм. На расстоянии 20 мм от диафрагмы в зажимах помещалась фотографическая пластинка, завернутая в алюминиевую фольгу толщиной 0,0002 дюйма (5 микрон), на которую попадал пучек частиц.

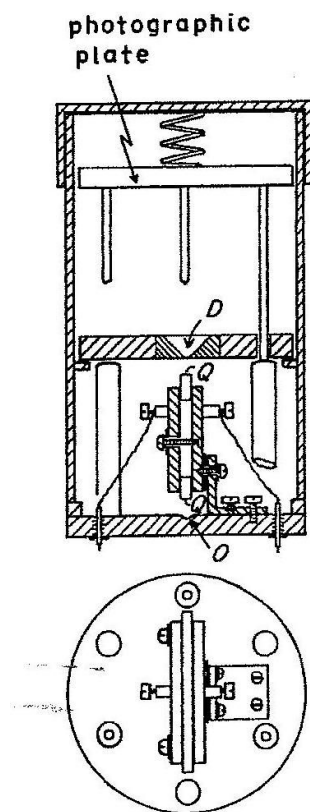


FIGURE 15.3 A sketch of Kaufmann's actual apparatus

Рис.1

Весь прибор помещался в магнитное поле, создаваемое между полюсами электромагнита. Благодаря небольшому размеру прибора обеспечивалась хорошая равномерность поля в его объеме. Внутренний объем прибора вакуумировался.

Напряжение, подаваемое на пластины, получалось от батареи 1000 В с помощью умножителя напряжения, собранного из лейденских банок.

Радиоактивные частицы, испускаемые источником, пройдя диафрагму, образовывали пучек, засвечивающий определенные места фотопластинки. Траектория частиц зависит от их массы, заряда, скорости, величины электрического и магнитного полей. Тяжелые положительные альфа-частицы практически не отклонялись от оси прибора и засвечивали центральную часть пластинки. Легкие электроны отклонялись тем сильнее, чем меньше их скорость, и образовывали линию, выходящую от центрального пятна в сторону, определяемую направлением полей. В ходе эксперимента полярность напряжения на пластинах менялась, поэтому получалось две линии. Экспозиция фотопластинки длилась 3-4 дня. Измерения производились на отснятой фотопластине с помощью микроскопа. Отклонение электронов, вызванное магнитным полем, определялось параллельно вертикальной оси симметрии полученных линий (оси Z), измеряя расстояние от прямой, проходящей через середину центрального пятна. Отклонение электронов, вызванное электрическим полем (по оси Y), определялось по горизонтали как половина расстояния между линиями.

Отмечу несколько особенностей эксперимента, обычно не указываемых другими авторами при его рассмотрении, или неправильно представляемых.

1. Направленный пучек электронов получался не до попадания их в активную зону полей, а формировался диафрагмой уже *после* пролета заряженных пластин. С одной стороны, это позволяет получить пучек, выходящий после пролета пластин точно из центра, а все отклонение рассчитывать только за время пролета от диафрагмы до фотопластины. С другой стороны, нужно учитывать, что поперечный импульс, получаемый электроном от электрического поля между пластинами на дугообразной траектории, оказывается примерно вдвое меньше. Ведь для того, чтобы попасть из источника на оси прибора в отверстие диафрагмы (тоже на оси), электрон должен изначально иметь поперечный импульс, уменьшающийся до нуля в первой половине пути до середины пластин, и увеличивающийся во второй половине пути до исходной величины, но противоположного направления. Эта особенность учитывается уменьшением вдвое эффективной длины пластин L_1 и не влияет принципиально на вид традиционно указываемых зависимостей (например, Шпольский «Атомная физика»):

$$y = \frac{e}{m} \frac{EL_1L_2}{u^2}. \quad (7)$$

2. Обычно в учебной литературе представляется, будто в эксперименте Кауфмана область действия магнитного поля ограничена небольшим участком траектории, как и область электрического поля. Тогда оставшаяся часть пути является прямолинейным участком инерциального движения, а отклонение от оси определяется только импульсом, полученным электроном до выхода из этой области. Для отклонения магнитным полем в этом случае получается такая же простая зависимость, как и указанная выше зависимость для электрического отклонения:

$$z = \frac{e}{m} \frac{BL_1L_2}{u}. \quad (8)$$

Отклонения по осям Y и Z связываются выражением:

$$\frac{y}{z^2} = \frac{m}{e} \frac{E}{B^2 L_1 L_2}. \quad (9)$$

Если отношение заряда электрона к массе остается неизменным, линия должна быть частью параболы. Собственно говоря, вся значимость результатов опыта Кауфмана для подтверждения релятивистской теории заключается в том, что полученные линии *не являлись* частями параболы, а проходили ближе к оси Y, т.е. имели меньшее значение z при заданном u, что трактовалось как уменьшение отношения e/m .

На самом же деле в приборе *вся* траектория электронов от источника до фотопластины полностью проходит в области равномерного магнитного поля. Если действие поля неизменно (в дальнейшем увидим, что и это не так), проекция траектории на плоскость, проходящую через ось прибора X в направлении магнитного отклонения Z, представляется дугой окружности, проходящей через источник и отверстие диафрагмы (рис.2), радиус которой r определяется выражением:

$$\frac{1}{r} = \frac{e B}{m u}. \quad (10)$$

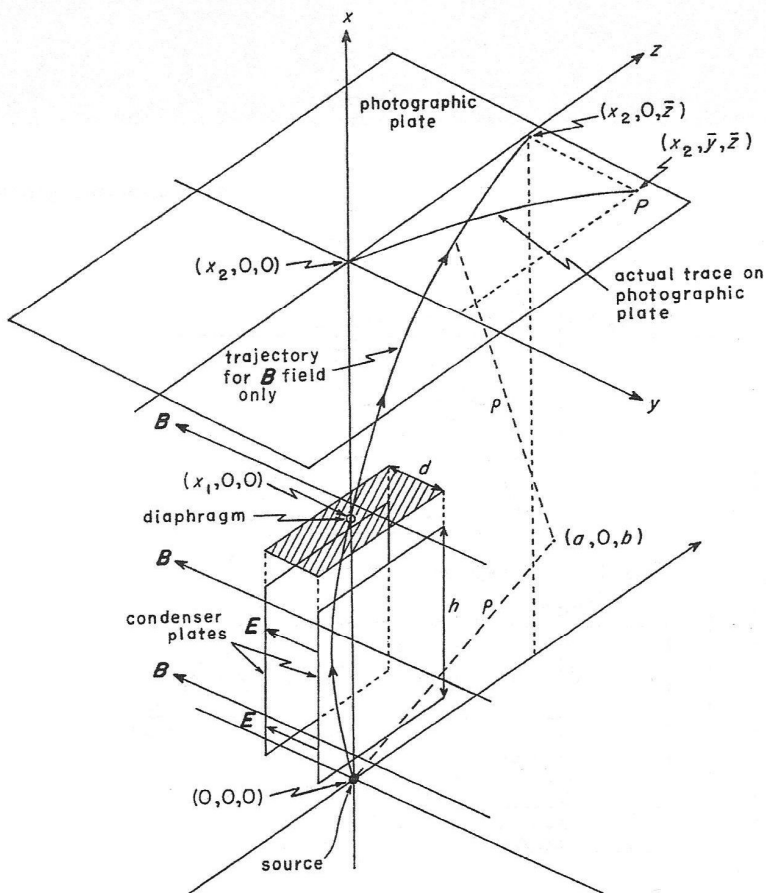


FIGURE 15.4 A diagram of Kaufmann's apparatus

Рис.2

Центры таких окружностей, получаемых при разных скоростях, лежат на прямой, перпендикулярной оси X прибора, и проходящей посередине между источником и отверстием диафрагмы. Отклонение z от оси при попадании на фотопластину определяется в этом случае довольно сложной тригонометрической зависимостью от радиуса, и только косвенно через радиус зависит от величины поля и скорости. При обработке же результатов эксперимента наоборот, радиус траектории вычисляется как сложная функция отклонения z, а затем вычисляется скорость при известной величине поля. При сопоставлении соотношений (7) и (10) получается зависимость:

$$y r^2 = \frac{m E L_1 L_2}{e B}. \quad (11)$$

Сравнивая с «учебной» зависимостью (9), замечаем, что при неизменном отношении e/m отклонение y ожидается квадратичной функцией не от отклонения z, как традиционно представляется, а от аргумента $1/r$.

3. Электроны, образующиеся при радиоактивном распаде вещества источника, отличаются от образующихся при термоэмиссии катода электронов тем, что они *«новорожденные»*. Непосредственно до акта распада их не было, как не было и соответствующего им собственного электрического поля – оно рождается вместе с электроном и распространяется в пространстве со скоростью света. Электрон сразу при рождении получает импульс, соответствующий околосветовой скорости, ему не нужно линейно ускоряться. Термоэмиссионные же электроны существуют до акта эмиссии, существует и их собственное электрическое поле, рассредоточенное во всем окружающем пространстве. После эмиссии их нужно еще ускорять до нужной скорости вместе с собственным полем, в частности и магнитным, увеличивая его энергию. При этом они взаимодействуют с внешними полями и другими зарядами во всем окружающем пространстве, хотя и с задержкой во времени, обусловленной конечной скоростью взаимодействия.

Электроны радиоактивности попадают в зону электрического поля между пластинами сразу же после рождения, когда их собственное электрическое поле не распространилось даже на всю длину пластин. Все заряды, которых еще не достигло собственное поле электрона, совсем еще не испытали его воздействия, а ответное воздействие от тех зарядов, которые уже оказались в поле электрона, вернулось к нему обратно еще через некоторое время, поэтому общее действие поля оказывается меньше ожидаемого.

Предварительно не известно, действует ли напряженность электрического поля пластин в локальной области полета такого электрона в полной мере, так, как она действовала бы на длительно пребывающий в поле электрон, или на термоэмиссионный электрон, разгоняемый задолго до попадания между пластин. Вполне может быть, что общее действие поля во время полета «новорожденного» электрона так или иначе может уменьшаться с ростом скорости при неизменной его массе, а трактоваться это может как увеличение массы при неизменной силе.

Действие внешнего магнитного поля может определяться только его величиной в локальной области полета электрона и не зависеть от его скорости описанным выше образом. Тогда соответствующая проекция его траектории будет дугой окружности, как и принималось в расчетах Кауфмана. Но не исключено, что это действие тоже может изменяться со временем совершенно аналогично электрическому, а в целом уменьшаться для большей скорости. Тогда радиус кривизны траектории будет переменным, а отклонение в целом меньше расчетного даже при неизменной массе, что опять может трактоваться как зависимость массы от скорости.

Все эти возможности следовало бы проверить в модификациях опытов Кауфмана. Например, исследовать зависимость влияния на результаты расстояния от источника до активной зоны внешних полей. Если верны приведенные рассуждения, при изменении этого расстояния должно увеличиваться эффективное действие одного из них. Это, к сожалению, не проверено. Однако, как показано в дальнейшем, такая трактовка подтверждается при анализе уже имеющихся результатов.

3. Первичные результаты экспериментов

Результаты экспериментов Кауфман опубликовал в нескольких статьях в период с 1901 по 1906 г. [1-3]. Первый эксперимент проводился в 1901 г. при напряжении 6750 В, расстояние между пластинами 0,1525 см, индукция магнитного поля 299 Гаусс. В 1902 г. проведено два эксперимента при напряжении 2000 В и один при напряжении 5000 В. Величину расстояния между пластинами Кауфман не указывает (далее взято 0,1525 см), а величину магнитного поля указал ту же (299 Гаусс). Результаты показаны на графиках рис.3. и в таблицах далее по тексту.

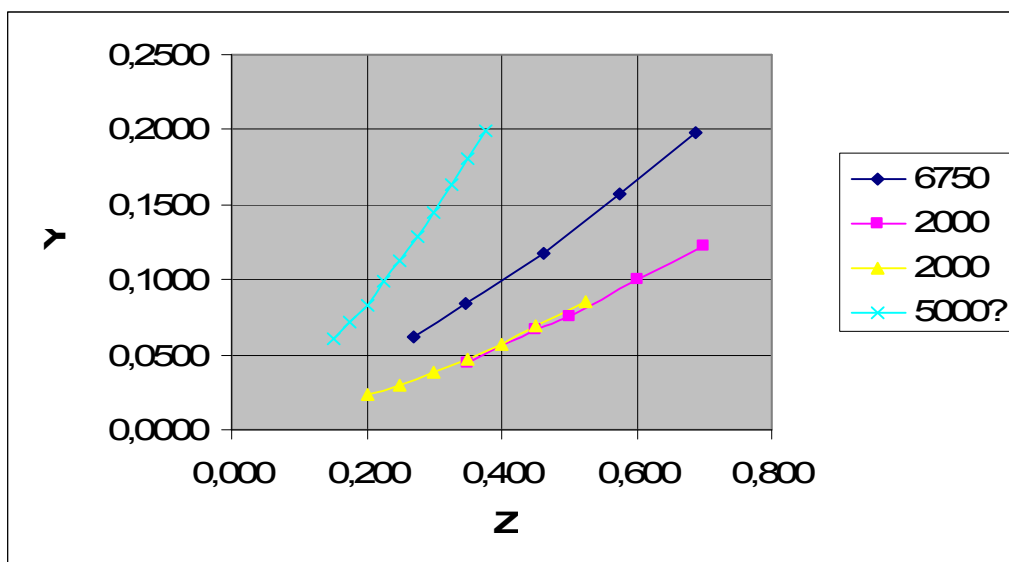


Рис.3

Сразу же становится заметно, что график эксперимента при 6750 В проходит между графиками экспериментов 1902 г. при 5000 В и 2000 В, хотя естественно ожидать, что график для 5000 В будет проходить между графиками для 6750 В и 2000 В. Более того, отклонения электронов по оси Y, полученные при 5000 В, отличаются от результатов при 2000 В не в 2,5 раза, а почти в 3,5 раза, а результаты всех трех экспериментов 1902 г. не пропорциональны результатам эксперимента 1901 г. Пропорциональности между результатами отдельных экспериментов нет ни количественно, ни даже качественно.

Попробуем все-таки установить порядок в предоставленных данных. Начнем с того, что результаты двух экспериментов 1902 г. при 2000 В весьма близки друг к другу, но не пропорциональны результатам при 5000 В и при 6750 В. Однако, уменьшив указанное отклонение по оси Y в два раза, получим данные, пропорциональные результатам при 6750 В (меньше в 3,4 раза). На основании этого можно предположить, что Кауфман не разделил пополам измеренное в этих опытах расстояние между двумя линиями, полученными на фотопластине при противоположных напряжениях пластин, хотя это было оговорено в методике эксперимента 1901 г., вероятно сделав это по причине, которую укажу позже. Если вслед за этим разделить пополам и отклонение, указанное при 5000 В, получим линию, близкую к графику при 6750 В (хотя ожидалось ниже) (рис.4).

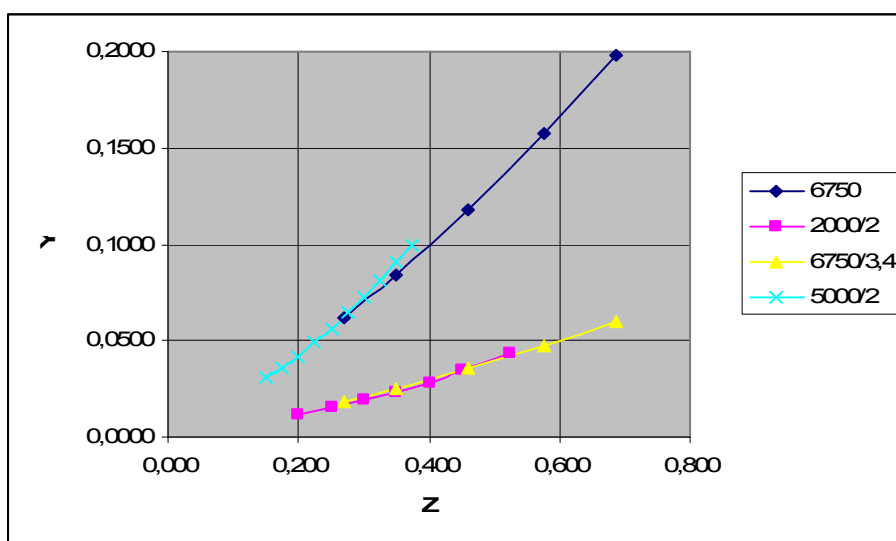


Рис.4

4. Анализ результатов экспериментов 1901.

В статье 1901 г. с описанием первого эксперимента [1] Кауфман изложил методику обработки полученных первичных результатов в виде измеренных отклонений по осям Y (электрическим полем) и Z (магнитным полем).

Как уже отмечено выше, проекция траектории электронов на плоскость, проходящую через оси X и Y, в области между пластин (от источника до диафрагмы) является частью параболы, а за диафрагмой является прямой, приводящей к отклонению на фотопластине на величину (по уравнению (7)):

$$y = \frac{e EL_1 L_2}{m u_x^2} . \quad (12)$$

Проекция траектории электронов на плоскость, проходящую через оси X и Z, при неизменном действии магнитного поля является дугой окружности с радиусом r (уравнение (10)):

$$\frac{1}{r} = \frac{e B}{m u} .$$

Разделив одно уравнение на другое, Кауфман определяет скорость, исключив отношение e/m:

$$u = \frac{Es_1 s_2}{B r y} . \quad (13)$$

Если же первое уравнение разделить на квадрат второго, исключается скорость u:

$$\frac{e}{m} = \frac{Es_1 s_2}{H^2 r^2 y} . \quad (14)$$

Радиус дуги окружности определяется Кауфманом как функция отклонения z:

$$r = \frac{z^2 + x_2^2 + x_1 x_2}{2z} - \frac{x_1^2 z}{4z^2 + x_2^2 + x_1 x_2} . \quad (15)$$

Для размеров прибора $x_1=2,07$ см и $x_2=2,0$ см получим:

$$r = \frac{z^2 + 8,15}{2z} - \frac{4,29z}{4z^2 + 8,15} .$$

Отмечу важную особенность этой нелинейной зависимости. В диапазоне измеренных отклонений z от 0,2 до 0,7 см произведение rz изменилось с 4,07 до 4,11, то есть незначительно, и величину r можно было считать просто обратно пропорциональной отклонению z:

$$r = k / z = 4,09 / z . \quad (16)$$

Ниже в таблице 2 указаны результаты обработки первичных данных, полученных в опыте 1901г. Расчеты велись в системе СГС.

Таблица 2.

U	x2	s1	E	Es1x2	H
6750	2,0000	0,89	4,43E+12	7,89E+12	2,99E+02

z	y	r	e/m	u	e/m(u)
0,271	0,0621	15,03471	6,28E+06	2,82E+10	5,93E+06
0,348	0,0839	11,71087	7,67E+06	2,68E+10	7,86E+06
0,461	0,1175	8,850238	9,58E+06	2,54E+10	9,40E+06
0,576	0,1575	7,101915	1,11E+07	2,36E+10	1,09E+07
0,688	0,1980	5,973088	1,25E+07	2,23E+10	1,18E+07

В последней колонке указано отношение $e/m(u)$, определенное для расчетной скорости u по релятивистской зависимости. Видно, что оно совпадает с определенным по формуле (14) эмпирическим отношением e/m с удовлетворительной точностью до 8%.

4. Опыты 1902 г.

Как уже сказано выше, результаты опытов 1902 г. при напряжениях на пластинах 2000 В и 5000 В почему-то непропорциональны как между собой, так и опыту 1901 г. при напряжении 6750 В. Приведу сначала в Таблице 2, 3 обработку данных без предложенных выше поправок и по методике 1901 г. Как видим, получились скорости электронов в два-три раза меньше скорости света. Значение отношения e/m для таких скоростей по релятивистской зависимости мало отличается от предельного значения, известного для малых скоростей ($1,76 \cdot 10^{11}$ К/кг СИ, $1,76 \cdot 10^7$ ед./г СГС). С другой стороны, для напряжения 2000 В полученное по уравнению (14) эмпирическое отношение e/m отличается от релятивистского расчета в три-пять раз, а для напряжения 5000 В – почти в десять раз! Вряд ли это можно назвать хорошим совпадением эксперимента с теорией.

Таблица 2.

U	x2	s1	E	Es1x2	H
2000	2	0,89	1,33E+12	2,37E+12	2,99E+02

z0	y0	r	e/m	u	e/m(u)
0,200	0,024	20,37175	2,65E+06	1,61E+10	1,48E+07
0,250	0,030	16,29732	3,32E+06	1,62E+10	1,48E+07
0,300	0,038	13,5821	3,78E+06	1,53E+10	1,51E+07
0,350	0,047	11,64407	4,16E+06	1,45E+10	1,54E+07
0,400	0,057	10,19228	4,47E+06	1,36E+10	1,57E+07
0,450	0,069	9,065098	4,67E+06	1,27E+10	1,60E+07
0,525	0,086	7,780984	5,09E+06	1,18E+10	1,62E+07

Таблица 3.

U	x2	s1	E	Es1x2	H
5000	2	0,89	3,33E+12	5,93E+12	2,99E+02

z0	y0	r	e/m	u	e/m(u)
0,150	0,061	27,16357	1,47E+06	1,20E+10	1,61E+07
0,175	0,072	23,28246	1,70E+06	1,18E+10	1,62E+07
0,200	0,083	20,37175	1,92E+06	1,17E+10	1,62E+07
0,225	0,099	18,10805	2,04E+06	1,11E+10	1,64E+07
0,250	0,113	16,29732	2,21E+06	1,08E+10	1,64E+07
0,275	0,129	14,81611	2,34E+06	1,04E+10	1,65E+07
0,300	0,145	13,5821	2,48E+06	1,01E+10	1,66E+07
0,325	0,163	12,53832	2,59E+06	9,70E+09	1,67E+07
0,350	0,181	11,64407	2,70E+06	9,41E+09	1,67E+07
0,375	0,199	10,86952	2,82E+06	9,16E+09	1,68E+07

В таблицах 4, 5 приведены расчеты для уменьшенных вдвое отклонений по оси Y, и с напряжением 6750 В вместо 5000 В. Графики полученных экспериментально и теоретически величин отношений e/m представлены на рис.5. Справа представлены графики для оригинальных значений отклонений по оси Y, а слева – для уменьшенных вдвое отклонений y . Как видим, это дало увеличение расчетной скорости электронов, даже с превышением скорости света. В нескольких местах релятивистские и

экспериментальные значения отношения e/m совпадают, но в основном они существенно отличаются – изменение экспериментальных значений e/m с ростом скорости меньше, чем предусматривает теория.

Таблица 4.

U	x2	s1	E	Es1x2	H
2000	2	0,89	1,33E+12	2,37E+12	2,99E+02

z	y/2	r	e/m	u	e/m(u)
0,200	0,012	20,37175	5,30E+06	3,23E+10	#ЧИСЛО!
0,250	0,015	16,29732	6,65E+06	3,24E+10	#ЧИСЛО!
0,300	0,019	13,5821	7,56E+06	3,07E+10	#ЧИСЛО!
0,350	0,024	11,64407	8,31E+06	2,89E+10	4,65E+06
0,400	0,029	10,19228	8,94E+06	2,73E+10	7,35E+06
0,450	0,035	9,065098	9,34E+06	2,53E+10	9,44E+06
0,525	0,043	7,780984	1,02E+07	2,37E+10	1,08E+07

Таблица 5.

U	x2	s1	E	Es1x2	H
6750	2	0,89	4,43E+12	7,88E+12	2,99E+02

z	y/2	r	e/m	u	e/m(u)
0,150	0,031	27,16357	3,92E+06	3,18E+10	#ЧИСЛО!
0,175	0,036	23,28246	4,52E+06	3,14E+10	#ЧИСЛО!
0,200	0,042	20,37175	5,12E+06	3,12E+10	#ЧИСЛО!
0,225	0,050	18,10805	5,43E+06	2,94E+10	3,51E+06
0,250	0,057	16,29732	5,87E+06	2,86E+10	5,28E+06
0,275	0,065	14,81611	6,22E+06	2,76E+10	6,93E+06
0,300	0,073	13,5821	6,59E+06	2,68E+10	7,96E+06
0,325	0,082	12,53832	6,88E+06	2,58E+10	8,99E+06
0,350	0,091	11,64407	7,18E+06	2,50E+10	9,72E+06
0,375	0,100	10,86952	7,50E+06	2,44E+10	1,03E+07

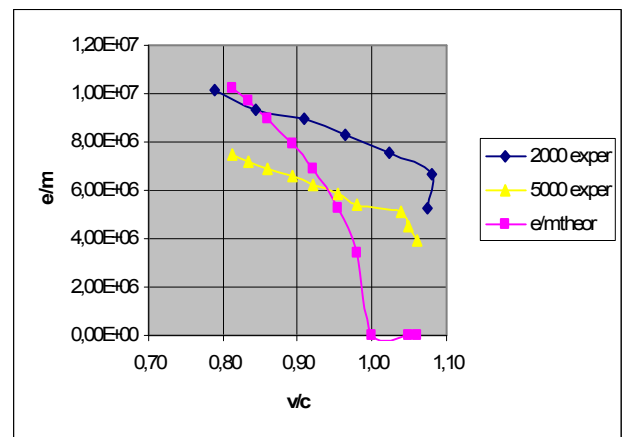
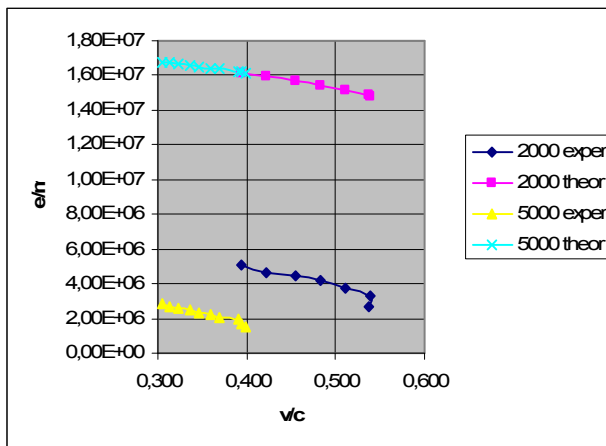


Рис.5

Есть основания предположить, что именно с целью скрыть эти проблемы Кауфман указал удвоенные значения отклонений и разработал новую методику, оправдывая это тем, что «в первых расчетах абсолютные значения u и e/m были определены с использованием абсолютных значений электрических и магнитных полей, которые были оценены в то время с возможной ошибкой около 5%, что значительно больше, чем

относительная погрешность измерений». Суть новой методики он сам выразил в том, что так как «мы не можем определить постоянные кривой непосредственно ... вероятные значения должны быть выявлены в соответствии с методом наименьших квадратов».

Кауфман пишет: «мы не можем определить постоянные кривой непосредственно», но не пишет, что эти постоянные, определенные на основе физических параметров установки по предыдущей методике, в одних случаях дают сверхсветовую скорость электронов, а в других случаях слишком большое различие с теоретическим отношением e/m . Да и насчет высокой точности измерения отклонений электронов он скорее всего не прав. Ведь при указанных размерах радиоактивного источника $1,0 \times 0,3$ мм и диаметра отверстия в диафрагме $0,5$ мм ширина линий на фотопластине по оси Z может достигать 2 мм. Если она оказывается меньше, то за счет действия алюминиевой фольги, ослабляющей поток электронов, оставляя только наиболее интенсивную его центральную часть. При отклонениях до 5 мм относительную погрешность в 1% должна давать линия не шире $0,05$ мм. Кауфман же указывает отклонения с точностью до нескольких микрон, что весьма сомнительно.

Проанализируем новую методику Кауфмана для обработки измерений.

Кауфман использует измеренные на конкретных пластинах отклонения y и z лишь для получения обобщенных отклонений η и ζ , пользуясь в дальнейшем ими, делая шаг в сторону от реальных физических параметров эксперимента. В работе не указано, как именно он преобразовывает измерения отклонений, и не указаны величины обобщенных отклонений η и ζ . Для сохранения физического смысла я буду использовать указанные отклонения y и z , а также использую общепринятое обозначение напряженности E .

Кауфман вводит функцию зависимости массы электрона m от относительной скорости $\beta = u/c$ (нумерация формул соответствует работе Кауфмана):

$$\frac{e}{m} \psi(\beta) = \frac{4}{3} \frac{e}{m_0}. \quad (1K)$$

При этом он полагает неизменной величину заряда электрона и **неизменные величины действия полей**, хотя выше указывались предположения, что это не так. Коэффициент $4/3$ введен потому, что Кауфман вначале собирался проверить не релятивистскую зависимость (тогда ее еще не было), а зависимость, предложенную Абрагамом, в которой этот коэффициент присутствует:

$$\psi(\beta) = \frac{3}{4} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \lg \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right). \quad (2K)$$

Затем он вводит коэффициент k_1 , связывающий скорость электронов с измеренными отклонениями:

$$\beta = k_1 \frac{z}{y}. \quad (5K)$$

Найти этот коэффициент можно из представленного ранее выражения (13) (хотя сам Кауфман этого и не делает) с учетом того, что радиус траектории r с хорошей точностью представляется обратно пропорционально отклонению z :

$$r = k/z = 4,09/z;$$

$$\beta = \frac{u}{c} = \frac{z}{y} \frac{E}{H} \frac{s_1 s_2}{kc};$$

$$k_1 = \frac{E}{H} \frac{s_1 s_2}{kc}.$$

Тогда из уравнения (14) опять с учетом обратной пропорциональности r и z получаем следующее уравнение новой методики, приведенное к физическим параметрам:

$$\frac{e}{m} = \frac{z^2}{y} \frac{E}{H^2} \frac{s_1 s_2}{k^2}. \quad (6K)$$

Таким образом, уравнение (5К) новой методики эквивалентно уравнению (13) старой, а уравнение (6К) – уравнению (14). Из уравнения (6К) с учетом (1К) получается основная константа экспериментальной установки k_2 :

$$\frac{y}{z^2} \frac{1}{\psi(\beta)} = \frac{3}{4} \frac{m_0}{e} \frac{E}{H^2} \frac{s_1 s_2}{k^2} = Const = k_2.$$

Воспользовавшись выражением коэффициента k_1 , можем также записать:

$$\frac{y}{z^2} \frac{1}{\psi(\beta)} = \frac{3}{4} \frac{k_1 c}{H} \frac{m_0}{e}, \quad (7К)$$

$$\frac{y}{z^2} \frac{1}{\psi(k_1 z / y)} = k_2. \quad (8К)$$

Как видим, оба введенные Кауфманом коэффициента имеют вполне конкретную связь с физическими параметрами установки, из которых и могут и должны быть определены, а расчеты по обеим методикам должны быть одинаковыми. Но как показывают проделанные расчеты, при этом для опытов 1902 г. получаются результаты, значительно отличающиеся от теоретических. Поэтому Кауфман не пользуется расчетом коэффициентов исходя из физических параметров. Он пишет:

«Проблема в том, чтобы по методу наименьших квадратов определить такое значение постоянной k_1 , чтобы соотношение по левую сторону выражения (8) получалось по возможности постоянным, близким к найденному по результатам всех опытов среднему значению коэффициента k_2 ... Из-за сложной формы зависимости это можно сделать только путем проб и ошибок, и после некоторой практики вы можете найти подходящие значения k_1 очень скоро и с определенной степенью точности 0,5%».

Это означает, что нужно подбирать такой коэффициент k_1 , который при подстановке вместе с отклонениями y/z давал бы такие значения наперед заданной теоретической зависимости $\psi(k_1 z / y)$, которые обеспечивали бы наименьшее отклонение значений левой части выражения (8К) от некоторой неизвестной константы k_2 . В 1902 г. в качестве зависимости $\psi(k_1 z / y)$ рассматривалась только зависимость, предложенная Абрахамом. В более поздней работе 1906 г. к ней добавились зависимости Лоренца $\psi(\beta) = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ и Бухерера $\psi(\beta) = (1 - \beta^2)^{-1/3}$.

То есть Кауфман предлагает подгонять коэффициенты под нужный результат, определяемый наперед заданной теоретической зависимостью, совершенно не обращая внимания на их связь с физическими параметрами установки. В этот раз он не измерял ни зазора между пластинами, определяющего напряженность электрического поля, ни величину магнитного поля, и нет ничего странного в том, что даже при указанных непропорциональностях измеренных отклонений электронов, заметных сразу же при сравнении графиков, Кауфман получил результаты, которые по его словам «согласуются с теорией настолько хорошо, насколько позволяет ожидать точность наблюдений».

То, что Кауфман при определении коэффициентов чинил полный произвол в угоду теории, подтверждается следующими цифрами. В соответствии с полученными соотношениями, при указанных физических параметрах установки коэффициенты должны иметь величины:

При 2000 В	$k_1=0,066$	$k_2=0,0705$
При 5000 В	$k_1=0,165$	$k_2=0,177$.

Оба коэффициента имеют один порядок величины и изменяются пропорционально изменению напряжения. Кауфман же указал следующие величины:

При 2000 В	$k_1=0,26$	$k_2=1,863$
При 5000 В	$k_1=0,905$	$k_2=8,09$.

Отличие в абсолютных величинах коэффициентов очевидно. Один коэффициент от другого отличается на порядок, а оба они изменяются не пропорционально изменению напряжения в 2,5 раза, а в 3,45 и в 4,35 раза соответственно. Последнее можно попытаться

объяснить предположением, что Кауфман указал неправильное напряжение 5000 В вместо 6750 В, основываясь на совпадении графиков этих опытов (рис 4). Но, как увидим далее, объяснение другое.

Становится также понятным, что Кауфман вполне мог и не делить надвое измеренное расстояние между линиями, определяя величину отклонения u , оправдываясь тем, что в коэффициентах это все равно учтется.

Таким образом, в методике Кауфмана 1902 г. связь результатов с реальными физическими параметрами установки и сделанными измерениями только кажущаяся, чисто внешняя. На самом деле он предпринял все усилия, чтобы скрыть несоответствия в полученных данных и подогнать их под заранее определенный теоретический результат. К сожалению, этот дурной пример работы в среде обобщенных параметров в дальнейшем не только не был пресечен или исправлен. Он стал образцом для подражания в физических исследованиях всего последующего столетия, послужил оправданием отрыва от физической реальности в угоду математическим абстракциям господствующих теорий.

5. Опыты 1906 г.

В 1906 г. вышла статья Кауфмана с анализом новой серии опытов. Как он сам пишет, за основу анализа была принята предыдущая методика 1902 г., а основные усилия были направлены на повышение точности измерений для того, чтобы сделать выбор в пользу одной из трех теоретических зависимостей $\psi(\beta)$: Абрахама, Лоренца или Бухерера. Как я уже отметил, в связи с оторванностью окончательных результатов от физических параметров точность измерений уже не имела принципиального значения. Наоборот, Кауфман только усложнил методику, сделав ее еще менее естественной и наглядной. К тому же, окончательного выбора ему сделать так и не удалось. Так что основную ценность этой работы представляют полученные результаты измерений отклонений электронов в электрическом и магнитном полях, которые проанализирую по первой, наиболее естественной, четкой, понятной и простой методике 1901 г.

Новую серию опытов Кауфман проводил при вдвое меньшей величине магнитного поля (144 Гаусс против 299 в предыдущих опытах) и при напряжениях 1630 В, 2600 В (три опыта) и 3250 В с уменьшенным расстоянием между пластинами (1,25 мм против 1,52 мм). Графики полученных отклонений представлены на рис. 6. На этом же рисунке для

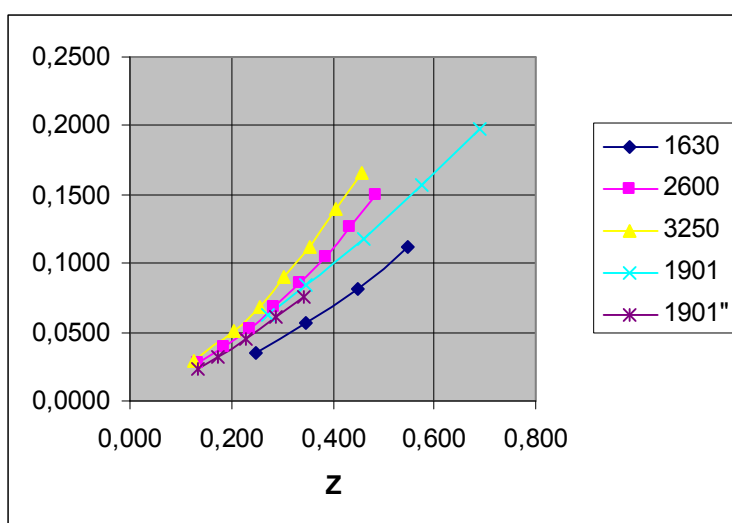


Рис.6

сравнения представлены результаты опыта 1901 г. при напряжении 6750 В в натуральную величину (линия 1901), и те же отклонения, приведенные к напряжению 2600 В

$$y'' = y \frac{2600}{6750};$$

и к новому магнитному полю (линия 1901''):

$$z'' = z \frac{144}{299}.$$

На этот раз, в отличие от результатов 1902 г., наблюдается хорошая пропорциональность результатов с ростом напряжения, а также пропорциональность зависимости отклонений по оси Z при увеличении магнитного поля. Однако, на графиках рис.7 видно, что снова нет совпадения эмпирического отношения e/m с расчетным по Лоренцу (релятивистским), а для напряжения 3250 В получаются скорости, превышающие скорость света, как и в 1902 г.. И наконец, непонятно, почему в статье Кауфман, приводя все напряжения к величине 2500 В, для опытов с напряжением 2600 В указывает коэффициент пересчета 1, если должно быть $2600/2500=1,04$ (для остальных опытов коэффициенты указаны правильно с точностью до двух знаков после запятой: 0,65 и 1,30).

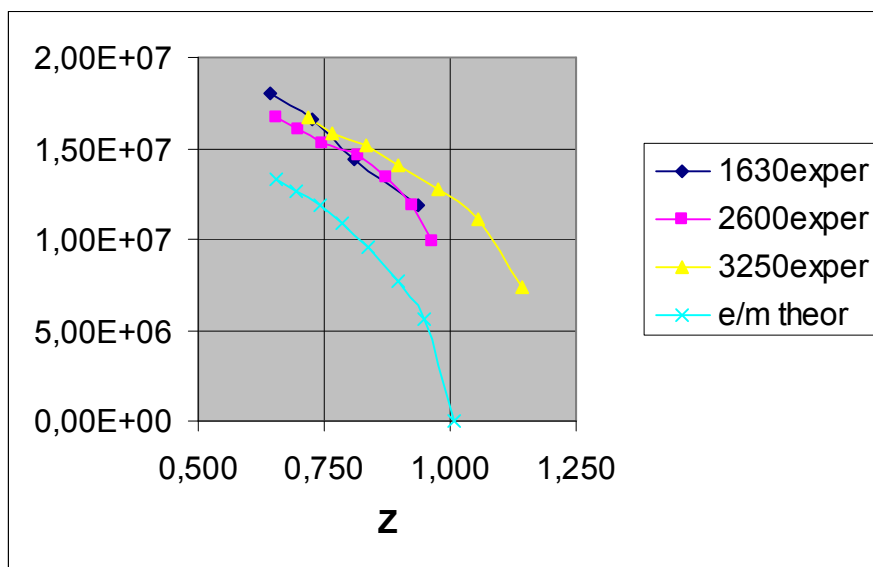


Рис.7

Вполне хорошее совпадение эмпирического отношения e/m с расчетным релятивистским получается, если принять расстояние между пластинами такое же, какое было в предыдущих опытах – 1,525 мм., то есть для меньшей напряженности электрического поля. Соответствующие графики представлены на рис. 8. Однако, как увидим дальше, это имеет другое объяснение.

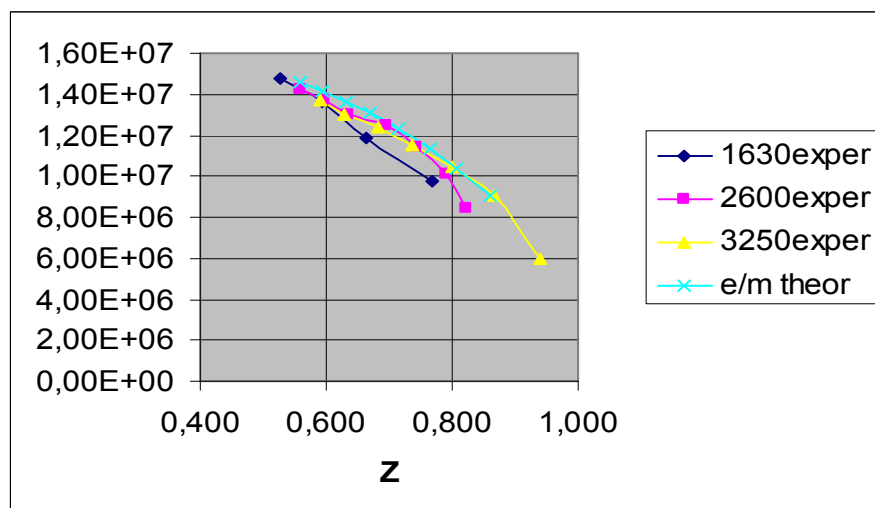


Рис. 8

6. Новая трактовка физических процессов в установке Кауфмана

Как показано выше, предоставленные Кауфманом результаты измерений отклонений электронов не являются прямым подтверждением релятивистской зависимости массы от скорости. Однако, и другие теории не дают достаточно точного, а главное – физически полного выражения происходящих в опыте явлений, проявляющихся в результатах измерений. Главное, что следует объяснить – почему наблюдаемые отклонения быстрых электронов в обоих направлениях (в «электрическом» y и «магнитном» z) гораздо меньше, чем должны быть при неизменной массе и неизменном воздействии полей. Релятивистское объяснение за счет увеличения массы качественно оправдано, но недостаточно точно подтверждается количественно. Еще хуже обстоит дело у нерелятивистских теорий. Изменение массы они отвергают, а ясной картины изменения воздействия полей взамен не дают даже качественно, не говоря уже о количественных зависимостях.

6. 1. Отклонение электрическим полем

О некоторых общих для всех теорий упущениях я уже писал, в том числе и об игнорировании факта «новорожденности» наблюдаемых электронов. Этот факт может проявляться в том, что на появившийся в результате радиоактивного распада электрон воздействуют не все окружающие его заряды сразу, а только те, до которых успело дойти «новорожденное» поле и вернуться опять к электрону в виде ответного воздействия. В частности, на электрон будут воздействовать только те заряды пластин, для которых выполняется соотношение:

$$r_1 + r_2 < ct; \quad (17)$$

Где r_1 – расстояние от источника электронов до зарядов пластин;

r_2 – расстояние от зарядов пластин до электрона;

t – время существования электрона.

Выберем за начало отсчета O радиоактивный источник электронов, ось X вдоль продольной оси прибора, ось Z параллельно плоскости пластин, (x, z) – координаты зарядов на пластинах, v – продольная скорость электрона, $vt=x$ – координата электрона вдоль оси X . Из-за малого расстояния пластин от оси X соотношение (17) с хорошей точностью получает вид:

$$\sqrt{x^2 + z^2} + \sqrt{(vt - x)^2 + z^2} < ct. \quad (18)$$

Тогда ширина эффективной полосы зарядов пластин $h_{ef}=z$ в области напротив самого электрона с координатой $x=vt$ определяется выражением:

$$(vt)^2 + h_{ef}^2 + 2h_{ef}\sqrt{(vt)^2 + h_{ef}^2} = (ct)^2.$$

При скоростях электрона, близких к скорости света, $h_{ef} \ll vt$ тогда это выражение приближено принимает вид квадратного уравнения:

$$h_{ef}^2 + 2h_{ef}vt - (c^2 - v^2)t^2 = 0;$$

решение которого:

$$h_{ef} = (c - v)t.$$

С учетом того, что $t=x/v$, получим:

$$h_{ef} = (c/v - 1)x. \quad (19)$$

Это соотношение задает на пластинах области около продольной оси X , удлиняющиеся и расширяющиеся вместе с продвижением электрона. В расчете напряженности поля при заданной разности потенциалов им соответствует уже не равномерное поле плоского конденсатора, а поле двух заряженных полос с одинаковой поверхностной плотностью заряда, но переменной ширины. Поверхностная плотность заряда равна (в системе СГС):

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{CU}{S} = \frac{U}{4\pi d}; \quad (20)$$

Где Q – заряд на пластине;

S – площадь пластины;

d – расстояние между пластинами

$C = S/4\pi d$ - емкость пластин (плоского конденсатора).

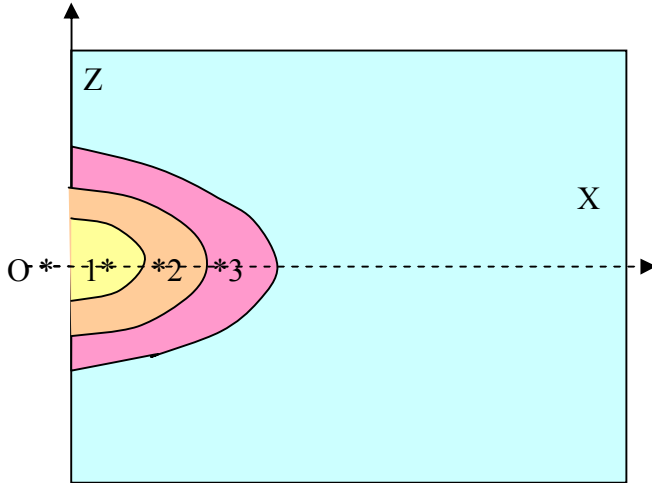


Рис.9

В начале полета электрона ширина эффективной полосы зарядов пластин h_{ef} будет минимальной, и эффективное поле будет представляться полем между двух параллельных проводников с линейной плотностью заряда σh_e (рис.9):

$$E_{ef} = \frac{\sigma h_{ef} d}{y'(d - y')} = \frac{U h_{ef}}{4\pi y'(d - y')}; \quad (21)$$

где y' – расстояние от положительного проводника (пластины).

Если электрон летит посередине между пластинами, $y' = d/2$, тогда получим:

$$E_{ef} = \frac{U h_{ef}}{\pi d^2}. \quad (22)$$

Если скорость достаточно большая для того, чтобы эффективная ширина к моменту окончания полета электрона между пластинами была сопоставима с величиной зазора между пластинами, напряженность поля по-прежнему можно считать по формуле (22). По выражению (19) эта скорость должна соответствовать условию:

$$\frac{v}{c} > \frac{L_1}{L_1 + d}. \quad (23)$$

Для указанных в опыте Кауфмана размеров $d=0,1525$ см $L_1 = 1,78$ см получим $v/c=0,922$, что вполне соответствует не только указанным Кауфманом скоростям, но и скоростям, полученным ниже в новой трактовке опыта. С уменьшением скорости и увеличением времени продвижения электрона вдоль пластин ширина эффективной полосы увеличивается. Если эффективная ширина получается примерно на порядок больше величины зазора между пластинами (около 1см), напряженность в этой области можно считать по формуле плоского конденсатора:

$$E = \frac{U}{d}. \quad (24)$$

По формуле (19) оценим скорость, при которой ширина эффективной полосы к моменту окончания полета электрона между пластинами становится на порядок больше величины зазора между пластинами:

$$\frac{v}{c} = \frac{L_1}{10d + L_1}. \quad (25)$$

Для указанных размеров получим $\beta=v/c=0,54$.

Все скорости, указанные Кауфманом, больше этой величины. Значит, при определении напряженности электрического поля, действующего на электрон, нужно вводить коэффициент пересчета стандартного поля плоского конденсатора, зависящий от отношения h_{ef}/d :

$$E_{ef} = k_{ef} \frac{U}{d}. \quad (26)$$

Начальная величина коэффициента (при $h_{ef}/d=0$) должна соответствовать формуле (22), т.е. $k_{ef}(0)=h_{ef}(0)/(\pi d)=0$. Предельная величина коэффициента при $h_{ef}/d>10$ равна единице. Приближенно коэффициент можно выразить экспоненциальной функцией:

$$k_{ef} = e^{-d/h_{ef}}. \quad (27)$$

Следует иметь в виду, что такое приближение дает величину напряженности электрического поля только посередине между пластинами, и не учитывает изменения с приближением к одной из пластин. Также пока не учтено увеличение взаимодействия электрического поля на величину динамического взаимодействия, обусловленного наличием магнитного поля движущегося электрона как «элемента тока» по закону Био-Саварра. Это взаимодействие описывается в инвариантном нерелятивистском выражении полной силы Лоренца [4] и пропорционально квадрату тангенциальной скорости электрона относительно других зарядов. Поскольку электрон в промежутке между пластинами движется именно тангенциально (перпендикулярно) к зарядам, расположенным на пластинах ближе всего к нему и поэтому воздействующих больше всего, величина динамического взаимодействия пропорциональна $(v/c)^2$, а величина эффективной напряженности поля будет иметь вид:

$$E_{ef} = k_{ef} \frac{U}{d} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (28)$$

Таким образом описывается общее воздействие электрического поля на электрон и появляется возможность оценить количественно его величину, изменяющуюся в каждый момент времени. Как следствие, проекция траектории электронов в промежутке между пластинами на плоскость XOY уже не будет частью параболы, как предполагалось раньше, она вообще не задается точно какой-либо простой математической функцией, а определяется численным методом.

Величина поперечной составляющей скорости u_y при выходе электрона из зазора пластин и расположенной непосредственно за ними диафрагмой с отверстием определяется суммой начальной скорости и интеграла эффективной силы воздействия электрического поля за время пролета между пластинами:

$$u_y = \frac{e}{m} \int_0^{t_1} E_{ef} dt = \frac{e}{m} \frac{1}{v} \int_{L_1} k_{ef} E dx; \quad (29)$$

Во время дальнейшего движения от диафрагмы к фотопластине эта скорость не меняется и проекция этого участка траектории на плоскость XOY есть прямая, задающая результирующее отклонение:

$$y = u_y \frac{L_2}{v} = \frac{q_e}{m} \frac{UL_2}{v^2 L_1} e^{-d/((c/u-1)L_1)}. \quad (30)$$

Непосредственные измерения в эксперименте дают отклонение y , по которому нужно определить продольную скорость электронов. Ввиду сложности задачи практичнее вначале по полученным соотношениям получить теоретическую зависимость отклонения y от продольной скорости. При этом, как уже было отмечено, поперечная скорость и траектория электрона определялись численным методом с условием попадания в отверстие ($y=0$ при $x=L_1$). Затем строится график обратной зависимости (скорости от отклонения, рис.10) и определяется уравнение его полиномиальной аппроксимации. По графику или по уравнению для каждого измеренного отклонения определяется продольная скорость v . Ниже даны результаты для опыта 1901 г. с напряжением 6750 В.

Таблица 6.

v/c	y
0,947	0,062
0,938	0,085
0,922	0,117
0,899	0,156
0,869	0,198

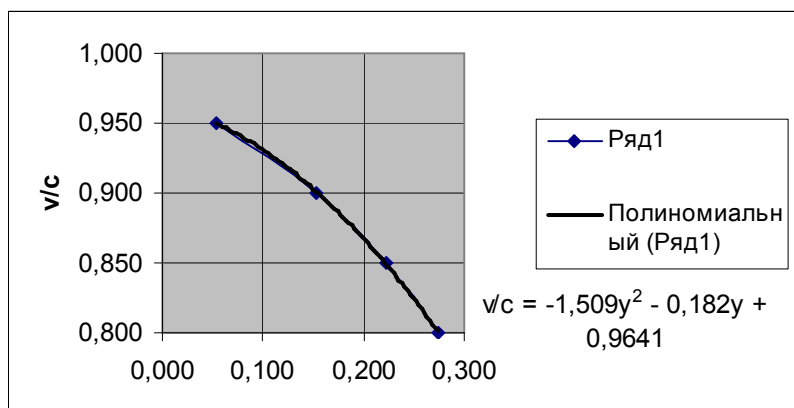


Рис.10

Отклонение магнитным полем

Измеренное по оси Z отклонение электронов магнитным полем также гораздо меньше, чем ожидается при неизменной его массе и силе воздействия поля. Это также может объясняться проявлением особенностей взаимодействия «новорожденного» электрона с физическими источниками магнитного поля. В опыте Кауфмана весь прибор помещался в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита, которые и являлись источником магнитного поля. На электрон начинает действовать магнитное поле только тогда, когда его собственное поле, образовавшееся при его возникновении, достигнет источников (полюсов), и ответное воздействие придет к электрону. Как и в случае электрического поля, это выражается условием (17):

$$r_1 + r_2 < ct.$$

Применительно к магнитному полю, теперь надо полагать:

r_1 – расстояние от источника электронов до области на полюсном наконечнике;

r_2 – расстояние от области полюсного наконечника до электрона;

t – время существования электрона.

Это означает, что на электрон действует магнитное поле, если выполняется условие:

$$\begin{aligned} 2\sqrt{(vt)^2 / 4 + b^2} &< ct; \\ v^2 &< c^2 - b^2 / (2t)^2; \\ \frac{c^2}{v^2} &> 1 + \frac{b^2}{4x^2}; \end{aligned} \quad (31)$$

Где b - расстояние от продольной оси до наконечника,

$x=vt$ – продольная координата электрона.

Расстояние между полюсными наконечниками (магнитный зазор) Кауфман не указывает, но оно не менее соответствующего размера корпуса (2 см) . Примем расстояние равным 2,5 см, а, соответственно, вдвое меньше: $b=1,25$ см. Продольная скорость электронов, при которой они успеют подвергнуться воздействию магнитного поля до попадания на фотопластину (и хоть немного отклониться) определяется выражением:

$$\frac{c^2}{v^2} > 1 + \frac{b^2}{4(L_1 + L_2)^2}; \quad \frac{v}{c} < 0,994.$$

Для того, чтобы электроны начали отклоняться магнитным полем до попадания на диафрагму, их продольная скорость должна удовлетворять условию:

$$\frac{c^2}{v^2} > 1 + \frac{b^2}{4L_1^2}; \quad \frac{v}{c} < 0,955.$$

Если известна продольная скорость электрона, то по выражению (31) определяется координата x_τ , при которой на него начнет действовать магнитное поле:

$$x_\tau = \frac{b}{2\sqrt{c^2/v^2 - 1}}. \quad (32)$$

Радиус круговой траектории электрона под воздействием магнитного поля (записано в системе СГС) определяется выражением:

$$R = \frac{mv}{eH}. \quad (33)$$

Эта траектория проходит через отверстие диафрагмы D и точку B на фотопластине на расстоянии z от продольной оси прибора и расстоянии L_2 от диафрагмы (Рис.11). Центр окружности траектории O_1 лежит на прямой, перпендикулярной отрезку |DB| и проходящей через его середину. Тангенс угла α наклона этой прямой к оси Z, перпендикулярной оси X:

$$\operatorname{tg}\alpha = z/L_2. \quad (34)$$

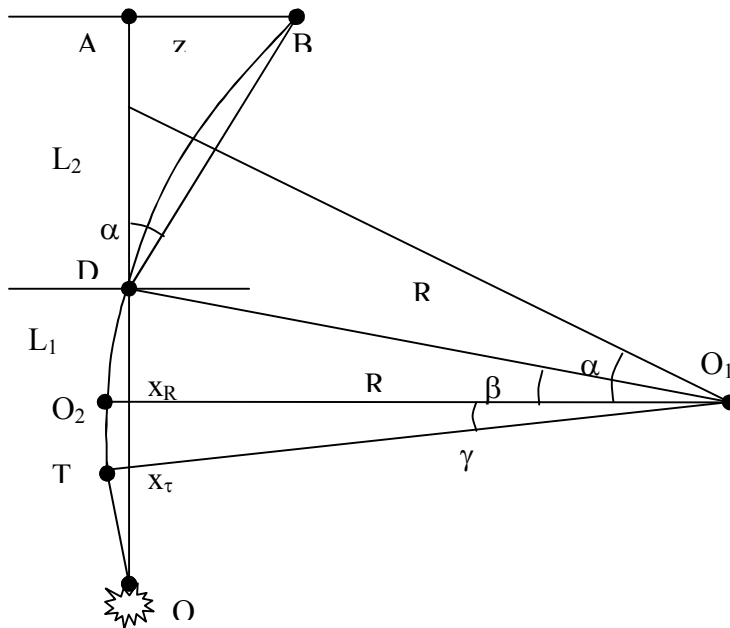


Рис.11

Величина проекции радиуса, отложенного вдоль этой прямой, на ось X равна:

$$R_x = Rz/L_2. \quad (35)$$

Координата x_R центра траектории с хорошим приближением определяется выражением:

$$x_R = L_1 + 0,5L_2 - R_x. \quad (36)$$

Она же определяет положение точки O_2 траектории, где поперечная скорость электрона u_z под воздействием магнитного поля меняет свой знак, проходя через ноль. В этой точке происходит максимальное удаление траектории электрона от оси прибора на участке перед диафрагмой D, величина

которого определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{Sin}\beta &= \operatorname{Sin}\angle O_2O_1D = \operatorname{Sin}\frac{L_1 - x_R}{R} = \operatorname{Sin}\frac{R_x - 0,5L_2}{R} = \operatorname{Sin}\left(\frac{z}{L_2} - \frac{0,5L_2}{R}\right); \\ z_{O_2} &= R(1 - \operatorname{Cos}\beta). \end{aligned} \quad (37)$$

Точка O_2 лежит дальше от начала координат, чем точка T перехода от прямолинейной к круговой траектории (точка касания), определяемая координатой x_τ по уравнению (31), при которой начнет действовать магнитное поле: $x_\tau < x_R$. Поперечное отклонение траектории в точке касания z_τ определяется углом $\gamma = \angle TO_1O_2$ и радиусом R:

$$\begin{aligned} \operatorname{Sin}\gamma &= (x_R - x_\tau)/R; \\ z_\tau &= z_{O_2} - R(1 - \operatorname{Cos}\gamma). \end{aligned} \quad (38)$$

Казалось бы, все элементы траектории рассчитаны. Нужно только проверить, является ли действительно прямая, проведенная из источника O в точку касания T, касательной к окружности дальнейшей траектории. Поскольку угол $\angle OTO_1$ должен быть

прямым, должно выполняться соотношение для сторон соответствующего прямоугольного треугольника:

$$\begin{aligned} |OO_1|^2 &= |OT|^2 + |TO_1|^2; \\ (R - z_{O2})^2 + x_R^2 &= x_T^2 + R^2. \end{aligned} \quad (39)$$

По этому критерию и проверяется правильность расчетов и соответствие предлагаемой трактовки реальным измерениям. Как видно из представленных в приложении таблиц расчетов, где последние два столбика соответствуют правой и левой части выражения (39), полученные Кауфманом экспериментальные данные хорошо описываются предложенной теорией. Это касается как опытов 1901 г. и 1906 г., так и опытов 1902 г., если согласиться с тем, что Кауфман действительно указал удвоенную величину отклонений по оси Y, прикрывая это новой методикой.

7. Сравнение с другими экспериментами

За прошедшие сто лет опыты, аналогичные опытам Кауфмана, проводились неоднократно вплоть до 40-х годов (Бухерер, Ньюмен, Роджерс). Все авторы, к сожалению, не учитывали изложенные мной особенности процесса, обусловленные фактом конечного времени существования излученных электронов. К тому же, они не знали о существовании дополнительной динамической силы воздействия электрического поля, как и не вдали о нерелятивистском инвариантном выражении полной силы Лоренца, определяющем дополнительную силу. Все это обнаружилось только теперь, хотя все необходимые предпосылки для выявления и учета указанных факторов были уже тогда.

Рассмотрим опыт Роджерса с отклонением электрона в электрическом поле цилиндрического конденсатора. Теория его эксперимента заключается в четырех уравнениях:

$$Hr = vm / e, \quad (P1)$$

г - радиус искривления траектории под воздействием магнитного поля Н,

$$ER = v^2 m / e, \quad (P2)$$

R - радиус искривления траектории под воздействием электрического поля цилиндрического конденсатора E (т.е. радиус обкладок конденсатора).

Зная Hг и ER можно определить скорость v и отношение m/e:

$$v = \frac{ER}{Hr}; \quad (P3)$$

$$\frac{m}{e} = \frac{(Hr)^2}{ER}. \quad (P4)$$

Параметры поведения электрона в магнитном поле Роджерс сам не измерял, сослался на проделанные до него эксперименты, взяв готовые значения Hг для трех выраженных максимумов в бета-излучении радия. Как показано выше эффективное воздействие магнитного поля на новорожденный электрон меньше ожидаемого всвязи с запаздыванием реакции полюсов магнита на возмущение, что до сих пор никто не учитывал. Предшественники Роджерса скорее всего измеряли отклонение электронов, родившихся непосредственно в зазоре между полюсами магнита, как и у Кауфмана. Поэтому они невольно ошиблись, выдав Роджерсу вместо реальной эффективной величины завышенные расчетные значения произведения Hг.

В отношении отклонения электрическим полем, которое измерял сам Роджерс, тоже произвольная ошибка. Он не знал и не учел действия дополнительной динамической силы [4]:

$$F_\phi = qE(v/c)^2.$$

Поэтому величина произведения ER взята заниженной.

Как видно на рисунке установки, радиоактивный источник находился на значительном расстоянии от цилиндрического конденсатора - примерно 10 см, что в 2,5 раза больше полного пути электронов в опыте Кауфмана. Уже подлетая к конденсатору, электроны у Роджерса успевали значительно "постареть", не говоря уже о том, что их путь в конденсаторе составлял еще 24 см. Поэтому существенного уменьшения эффективного воздействия электрического поля в связи с эффектом запаздывания взаимодействия, как это было у Кауфмана, здесь не наблюдалось, а вот увеличение за счет динамической силы было.

Таким образом, в расчетах Роджерса значения Hr завышены, а значения ER занижены. Как следует из уравнения (P3), это приводит к заниженной оценке скорости электронов. Это подтверждается сравнением со скоростями в опытах Кауфмана, которые значительно больше как по оценкам самого Кауфмана, так и по моим расчетам. Из уравнения (P4) следует, что вычисленное значение m/e еще более завышено из-за квадрата $(Hr)^2$. Вообще, как следует из всего вышесказанного, параметры Hr и ER не могут быть применены к расчету, поскольку существенными являются мгновенные параметры: эффективные величины действия полей и радиусы кривизны. В крайнем случае речь может идти об интегральных значениях $(Hr)_{ef}$, $(ER)_{ef}$, обобщенных для всей траектории на основании мгновенных величин.

Таким образом, эксперимент Роджерса не дает реальных подтверждений роста массы. Более того, изучив первичные данные по измерению величины Hr , скорее всего можно получить еще одно экспериментальное подтверждение изложенной выше трактовки, основанной на нерелятивистском инвариантном выражении полной силы Лоренца.

ВЫВОД

Результаты опытов Кауфмана соответствуют их трактовке с позиций классической электродинамики с учетом инвариантного нерелятивистского выражения полной силы Лоренца и изменения эффективного действия электрического и магнитного полей на электроны, появившиеся в результате радиоактивного распада в источнике.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Walter Kaufmann](#). **Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Bequerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen**. Göttinger Nachrichten, 1901, (2): 143–168.
2. [Walter Kaufmann](#). **Die elektromagnetische Masse des Elektrons**. Physikalische Zeitschrift, 1902, 4 (1b): 54-57.
3. Kaufmann, W. "Über die Konstitution des Elektrons", Annalen der Physik, 1906, T. 19: 487–553.
4. Цикра С.А. Нерелятивистское выражение силы, действующей на электрический заряд, инвариантное в различных ИСО.
<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/10116.html>
5. Rogers, M. M. et al. (1940), "A Determination of the Masses and Velocities of Three Radium B Beta-Particles", Physical Review 57: 379–383.
http://ivanik3.narod.ru/Vacuum/p379_1Rogers.pdf

Результаты расчетов опытов Кауфмана по новой методике

Опыт 1901 г.

H, Гс	b, см	e/m(СГС)	L, см	v/c = -1,509y ² - 0,182y + 0,9641			U, В	d, см	
300,00	1,5	1,76E+07	4,00				6750,00	0,1525	
v/c	y	z	x	R	Rx	L'	z1	R ² +x ²	катеты
0,947	0,062	0,271	2,211	5,381	0,729	3,940	0,007	3,38E+01	3,40E+01
0,938	0,085	0,350	2,025	5,328	0,932	3,957	0,000	3,25E+01	3,27E+01
0,922	0,117	0,461	1,788	5,239	1,208	3,996	0,004	3,06E+01	3,06E+01
0,899	0,156	0,576	1,539	5,108	1,471	4,010	0,022	2,85E+01	2,82E+01
0,869	0,198	0,688	1,317	4,937	1,698	4,015	0,049	2,61E+01	2,56E+01

Опыты 1902 г. (использовано уменьшенное вдвое отклонение по оси Y)

H	b	e/m	L	v/c = -5,1491y ² - 0,0798y + 0,9588			U	d	
300,00	1,5	1,76E+07	4,00				5000,00	0,1525	
v/c	y	z	x	R	Rx	L'	z1	R ² +x ²	катеты
0,952	0,0305	0,150	2,322	5,407	0,406	3,727	0,033	3,46E+01	3,56E+01
0,949	0,0360	0,175	2,264	5,393	0,472	3,736	0,026	3,42E+01	3,52E+01
0,947	0,0415	0,200	2,202	5,379	0,538	3,740	0,020	3,38E+01	3,48E+01
0,942	0,0495	0,225	2,110	5,354	0,602	3,712	0,015	3,31E+01	3,43E+01
0,938	0,0565	0,250	2,027	5,329	0,666	3,693	0,010	3,25E+01	3,37E+01
0,932	0,0645	0,275	1,932	5,297	0,728	3,660	0,007	3,18E+01	3,31E+01
0,926	0,0725	0,300	1,839	5,261	0,789	3,628	0,004	3,11E+01	3,25E+01
0,918	0,0815	0,325	1,737	5,216	0,848	3,585	0,002	3,02E+01	3,18E+01
0,909	0,0905	0,350	1,640	5,167	0,904	3,544	0,001	2,94E+01	3,11E+01
0,900	0,0995	0,375	1,547	5,113	0,959	3,506	0,000	2,85E+01	3,03E+01

H	b	e/m	L	v/c = -33,508y ² - 0,0857y + 0,9578			U	d	
300,00	1,5	1,76E+07	4,00				2000,00	0,1525	
v/c	y	z	x	R	Rx	L'	z1	R ² +x ²	катеты
0,952	0,0121	0,200	2,330	5,409	0,541	3,871	0,019	3,47E+01	3,51E+01
0,949	0,0150	0,250	2,257	5,392	0,674	3,931	0,010	3,42E+01	3,44E+01
0,944	0,0190	0,300	2,147	5,364	0,805	3,952	0,004	3,34E+01	3,36E+01
0,937	0,0235	0,350	2,017	5,325	0,932	3,949	0,000	3,24E+01	3,26E+01
0,928	0,0285	0,400	1,870	5,274	1,055	3,925	0,000	3,13E+01	3,16E+01
0,915	0,0345	0,450	1,700	5,199	1,170	3,870	0,003	2,99E+01	3,03E+01
0,892	0,0430	0,525	1,481	5,069	1,331	3,812	0,011	2,79E+01	2,84E+01

Опыты 1906 г.

H	b	e/m	L	v/c = -38,489y ² + 0,77y + 0,9491			U	d	
144,00	1,25	1,76E+07	4,00				1630,00	0,125	
v/c	y	z	x	R	Rx	L'	z1	R ² +x ²	катеты
0,929	0,0350	0,249	1,568	10,996	1,367	3,935	0,006	1,23E+02	1,23E+02
0,869	0,0568	0,349	1,096	10,282	1,793	3,889	0,031	1,07E+02	1,07E+02
0,757	0,0814	0,449	0,724	8,958	2,010	3,733	0,057	8,08E+01	8,02E+01
0,553	0,1119	0,549	0,415	6,550	1,797	3,212	0,048	4,31E+01	4,37E+01

H	b	e/m	L	v/c = -14,458y ² + 0,3496y + 0,9532			U	d	
144,00	1,25	1,76E+07	4,00				2600,00	0,125	
v/c	y	z	x	R	Rx	L'	z1	R ² +x ²	катеты
0,945	0,0384	0,190	1,811	11,190	1,063	3,874	0,000	1,28E+02	1,29E+02
0,933	0,0512	0,240	1,623	11,046	1,326	3,949	0,005	1,25E+02	1,25E+02
0,914	0,0655	0,290	1,409	10,820	1,569	3,978	0,015	1,19E+02	1,19E+02
0,882	0,0831	0,340	1,172	10,445	1,776	3,948	0,029	1,10E+02	1,10E+02
0,834	0,1036	0,390	0,946	9,875	1,926	3,871	0,043	9,84E+01	9,78E+01
0,754	0,1302	0,440	0,717	8,921	1,963	3,679	0,052	8,01E+01	7,97E+01
0,683	0,1493	0,485	0,585	8,086	1,961	3,546	0,057	6,57E+01	6,55E+01

H	b	e/m	L	v/c = -5,9194y ² + 0,2607y + 0,9511			U	d	
144,00	1,25	1,76E+07	4,00				3250,00	0,125	
v/c	y	z	x	R	Rx	L'	z1	R ² +x ²	катеты
0,953	0,034	0,146	1,969	11,282	0,821	3,790	0,001	1,31E+02	1,32E+02
0,950	0,049	0,196	1,895	11,241	1,099	3,994	0,000	1,30E+02	1,30E+02
0,943	0,066	0,246	1,767	11,160	1,370	4,138	0,006	1,28E+02	1,27E+02
0,931	0,085	0,296	1,592	11,019	1,629	4,221	0,018	1,24E+02	1,23E+02
0,910	0,108	0,346	1,374	10,774	1,862	4,235	0,034	1,18E+02	1,17E+02
0,880	0,134	0,396	1,156	10,414	2,060	4,216	0,054	1,10E+02	1,08E+02
0,840	0,161	0,446	0,966	9,939	2,214	4,181	0,074	9,97E+01	9,79E+01