

1.4. Измерение заряда электрона в опыте Милликена

Значение экспериментов Милликена:

- Впервые измерен абсолютный элементарный заряд e (а не удельный заряд e/m)
- Измерение заряда тел дискретными порциями наблюдалась не в среднем, а для конкретных событий
- Установлена независимость величины элементарного заряда от вида и знака переносящего его иона
- Величина e была измерена с высокой точностью (около 1%)

Вообще говоря, измерялся заряд не электрона, а макроскопических объектов

Опыт Милликена и Флетчера (1909-1914)

- использовались частицы масла,
- в дальнейшем – и других материалов,
- использовались разные газы (показано, что заряд разных ионов одинаков или кратен),
- определена абсолютная величина e .

Роберт Милликен, □
1868-1953



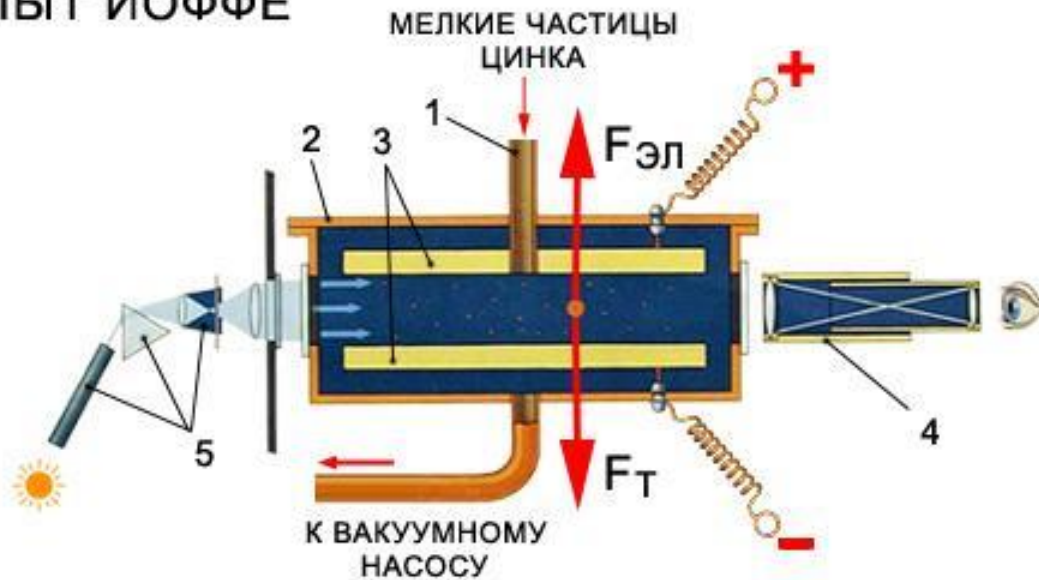
Опыт Иоффе (1912)

- использовались частицы цинка,
- обнаружена дискретность изменения их заряда при фотоэффекте.

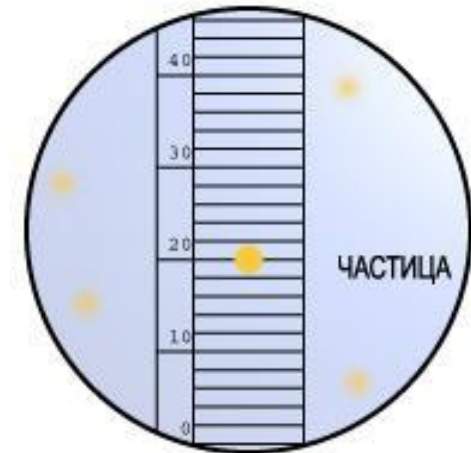
□ Абрам Федорович Иоффе,
1880-1960

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

ОПЫТ ИОФФЕ

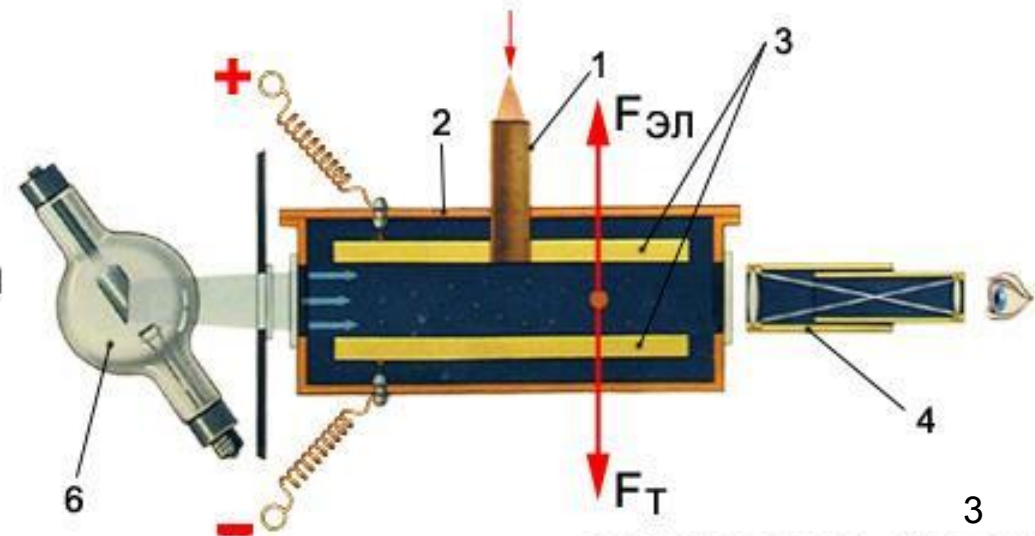


ЗАРЯЖЕННАЯ
ЧАСТИЦА В
ПОЛЕ ЗРЕНИЯ
МИКРОСКОПА



- 1 Трубка
- 2 Камера
- 3 Заряженные металлические пластины
- 4 Микроскоп
- 5 Устройство для получения ультрафиолетового излучения
- 6 Устройство для получения рентгеновского излучения
- 7 Заряженная частица в поле зрения микроскопа

МЕЛКИЕ ЧАСТИЦЫ
МАСЛА



ОПЫТ МИЛЛИКЕНА

Основная идея (в начальном варианте и в опыте Иоффе) – уравнивание электрической силы силой тяжести $F_{ЭЛ} = F_T$

Для сферической капли радиуса r и плотности ρ в воздухе (ρ_0):

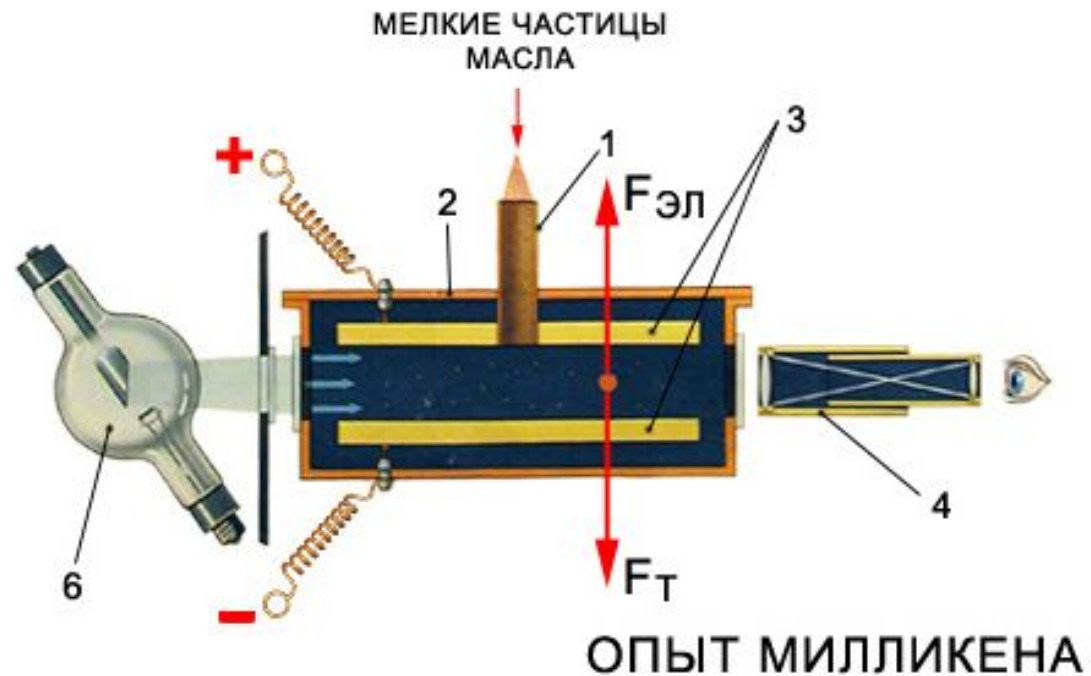
$$F_T = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 (\rho - \rho_0) g$$

Электрическая сила выражается через напряженность поля в конденсаторе E и заряд капли q :

$$F_{ЭЛ} = Eq$$

Отсюда, казалось бы, легко определяется заряд капли.

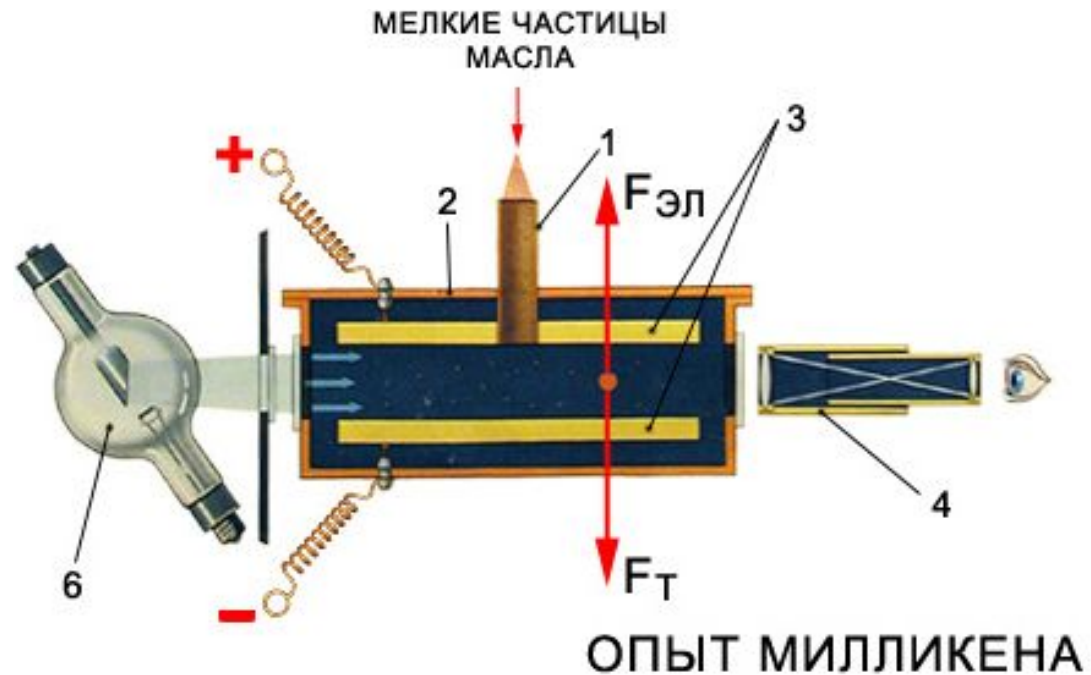
Далее: ионизуем воздух в объеме, ждем изменения заряда капли за счет присоединения к ней иона (или нескольких).



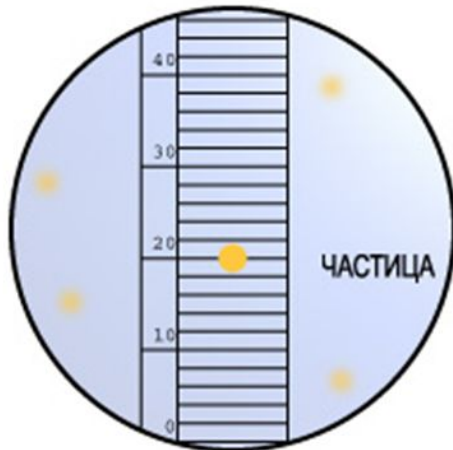
Повторив измерение многократно, определим, любые ли значения может принимать заряд капли q , или только дискретные.

Проблема:

нужно работать с очень мелкими каплями. Но их радиус нельзя измерить с помощью микроскопа – если взять r меньше дифракционного предела. Кроме того, их движение очень медленное из-за сильного взаимодействия с воздухом – вязкого трения.



ЗАРЯЖЕННАЯ
ЧАСТИЦА В
ПОЛЕ ЗРЕНИЯ
МИКРОСКОПА



Решение: использовать вязкое трение для измерения размера капель.

В отсутствие поля ($E=0$) капли падают с установившейся скоростью v_0 , для которой сила трения F_B уравновешена силой тяжести F_T . Эту скорость v_0 можно измерить, выключив поле.

Формула Стокса для сферы радиуса r , движущейся со скоростью v в среде с вязкостью η :

$$F_B = 6\pi\eta \cdot rv$$

Приравняв $F_B = F_T$, для скорости $v = v_0$ можно выразить радиус через скорость:

$$r = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{(*) \eta \cdot v_0}{(\rho - \rho_0)g}}$$

Далее мы используем его также в виде: $r^2(\rho - \rho_0)g = \frac{9}{2}(**)v_0$

После включения поля E позволим частице двигаться вверх и измерим установившуюся скорость подъема v .

При этом выполняется условие $F_B + F_T = qE$ или

$$\frac{4}{3}\pi \cdot r^3(\rho - \rho_0)g + 6\pi\eta \cdot rv = qE$$

$$q = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{r^3(\rho - \rho_0)g}{E} \left(1 + \frac{9}{2} \frac{\eta v}{r^2(\rho - \rho_0)g} \right)$$

Подставив сюда (*) и (**), получим выражение в окончательной форме.

Подставив (*) и (**), получим выражение в окончательном виде:

$$q = \frac{9\sqrt{2}\pi}{E} \sqrt{\frac{\eta^3 v_0^3}{(\rho - \rho_0)g}} \left(1 + \frac{v}{v_0}\right)$$

Все величины в правой части были известны или могли быть измерены.

Многочисленные измерения q для одной капли, изменявшей заряд, дали Милликену значения, кратные одной и той же величине e .

Но: для разных капель значения e немного различались (??).

Причина:

формула Стокса неточна при размере капли r , меньшем, чем длина пробега молекул газа λ . «Эффективная» вязкость зависит от r :

$$F_T = \frac{6\pi\eta r v}{1 + B}$$

Но коэффициент B неизвестен.
Что делать?

$$F_T = \frac{6\pi\eta r v}{r}$$

Но коэффициент B неизвестен.
 1 Что делать?

Создать условия, при которых стало бы понятно, что будет происходить

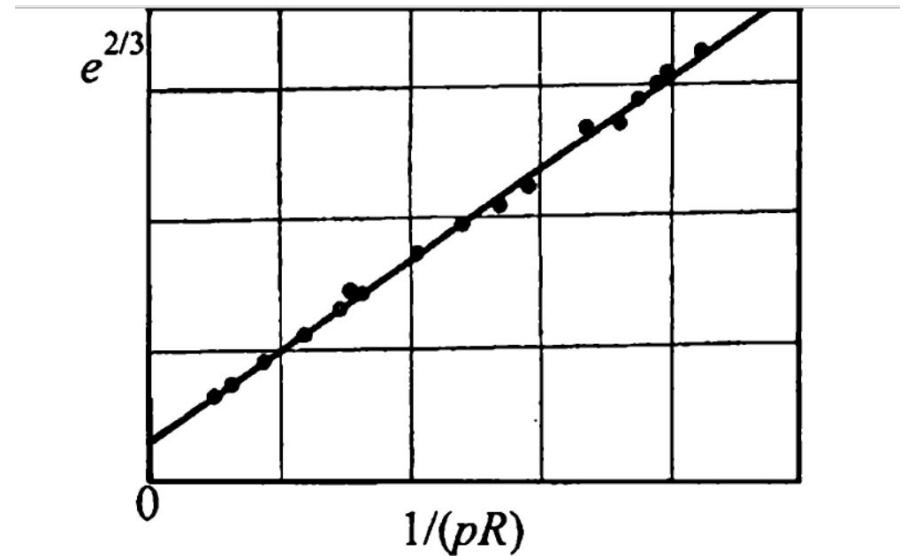
при $\frac{\lambda}{r} \rightarrow 0$. Менять давление газа!

Построить зависимость измеренного значения e от давления p . И проследить тенденцию в пределе $p \rightarrow \infty$

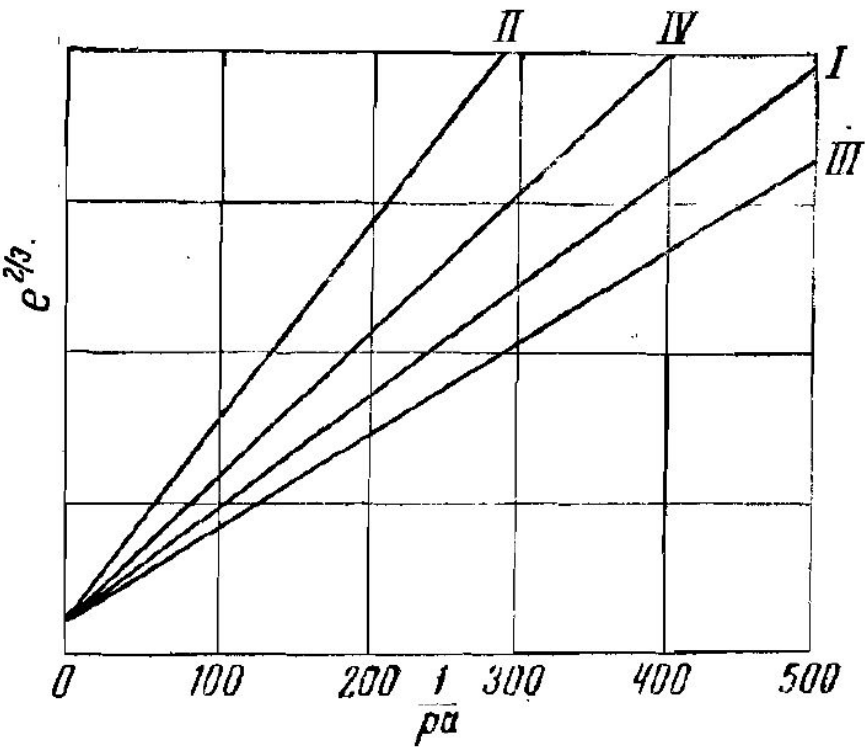
(то есть, $\frac{1}{rp} \rightarrow 0$)

Милликен изменял (уменьшал) давление воздуха до 30 раз. Брал капли разного размера.

Все такие зависимости пресекли вертикальную ось при одном и том же значении e !



Вид зависимости приближенного значения $e^{2/3}$ от параметра $1/(pR)$, полученной Милликеном



Зависимости определенной Милликоном величины e от давления газа p для разных видов капель и газа:

- I – масло в воздухе;
- II – масло в водороде;
- III – ртуть в воздухе;
- IV – шеллак в воздухе.

Опыты, проведенные для разных видов частиц и газов, дали практически одно и то же значение.

Значит, «атом электричества» един.

Современное значение заряда электрона:

$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

В совокупности со значением величин удельного заряда, полученных в более ранних опытах, это позволило оценить также и массу электрона

$$(m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}),$$

ИОНОВ И АТОМОВ.