

Государственный университет «Дубна»  
Факультет естественных и инженерных наук  
Кафедра ядерной физики

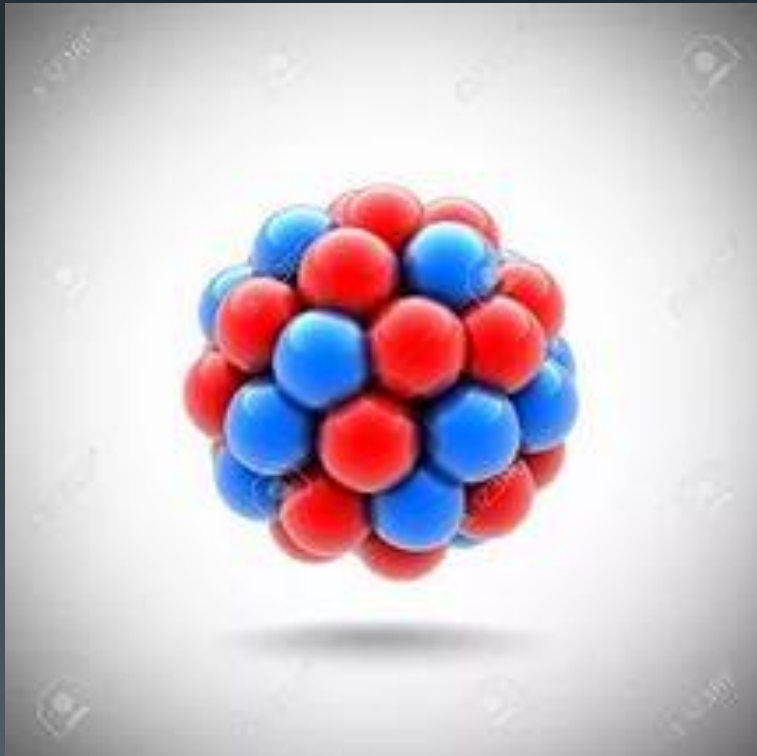
# Основные свойства атомных ядер

Абакумов А.М.

# АТОМНОЕ ЯДРО – общие сведения

Атом состоит из ядра и электронной оболочки.

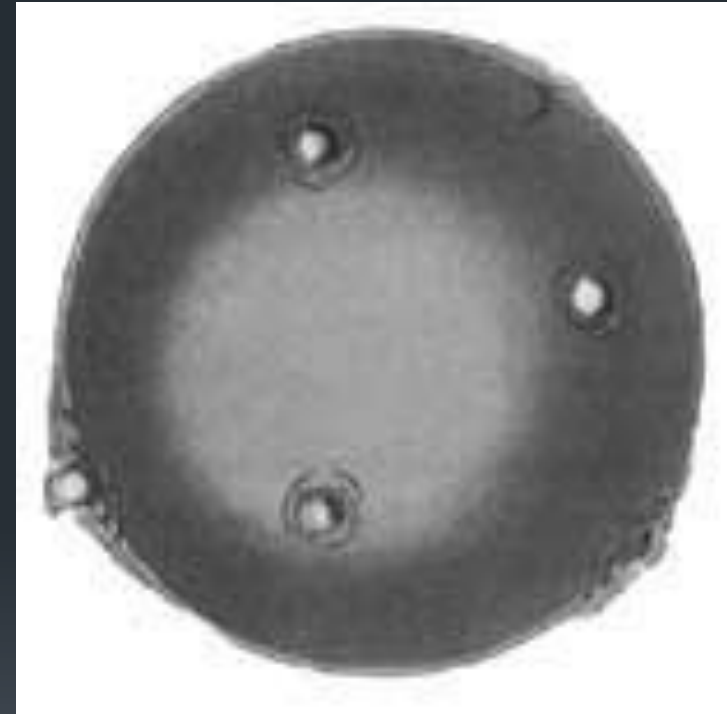
***Атомное ядро** – положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома. Ядро атома состоит из нуклонов(протонов и нейтронов).*



# открытие ядра

Первая попытка создания модели атома принадлежит Дж.Томсону (1903). Он считал, что атом представляет собой электронейтральную систему шарообразной формы радиусом  $10^{-10}$  м.

Положительный заряд атома равномерно распределён по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него. Через несколько лет в опытах Э.Резерфорда было доказано, что модель Томсона неверна.



# опыт Резерфорда

Первые прямые эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены Э.Резерфордом и его сотрудниками Э.Марсденом и Х.Гейгером в 1909–1911 годах.

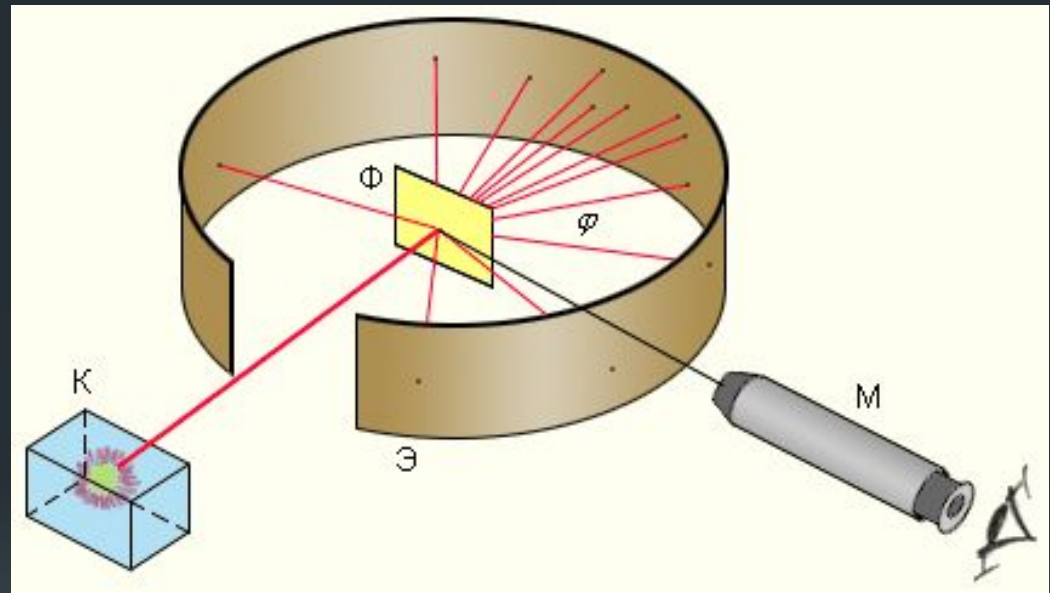
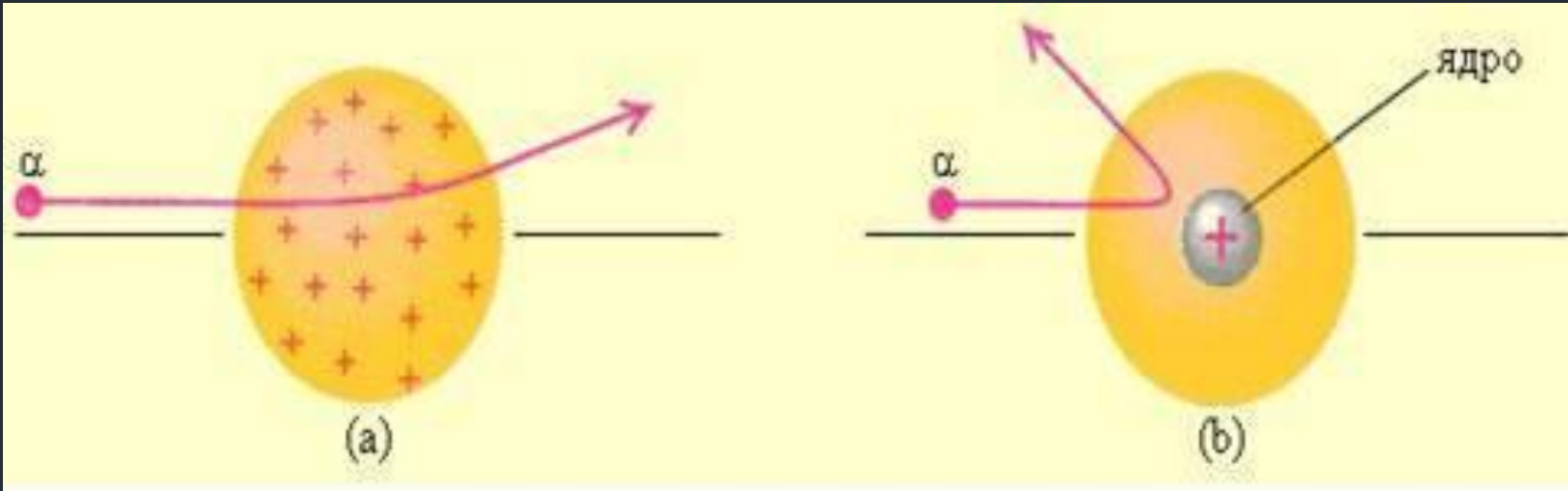


Схема опыта Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц.

К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый сернистым цинком, Ф – золотая фольга, М – микроскоп.

# опыт Резерфорда

Рассеяние альфа-частиц в модели : Томсона (а), Резерфорда (b)



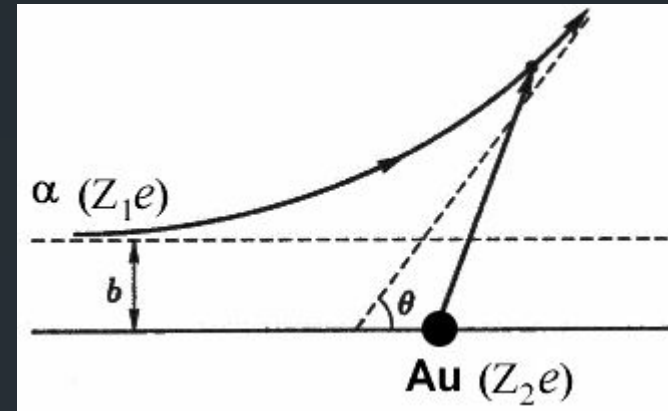
Таким образом, оказалось, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро. Это ядро содержит весь положительный заряд и не менее 99,95 % его массы. Вещество, составляющее ядро атома, имеет колоссальную плотность  $\rho \approx 10^{15} \text{ г/см}^3$ . Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.

# размер ядра

На основании закона Кулона для точечных зарядов можно вычислить наименьшее расстояние  $r_{min}$ , на которое может подойти к центру ядра  $\alpha$ -частица, летящая точно по направлению к ядру (прицельный параметр  $b = 0$ ). Для этого следует приравнять ее начальную кинетическую энергию к потенциальной энергии взаимодействия  $\alpha$ -частицы с ядром в момент ее полной остановки (в точке поворота):

$$\frac{m_{\alpha} v^2}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r_{min}}$$

$\alpha$  – частица, с энергией 5 МэВ налетала на атомное ядро золота. На этих данных было рассчитано, что минимальное расстояние, на которое может приблизиться  $\alpha$  – частица составляет  $r_{min} = 4,5 \cdot 10^{(-12)} \text{ см}$ . Естественным было принять эту величину за верхнюю оценку радиуса ядра золота.



Рассеяние  $\alpha$ -частицы на атомном ядре (Au).

# Заряд атомного ядра

Величина положительного электрического заряда атомного ядра  $Z$  определяется количеством протонов в ядре (и, следовательно, количеством электронов в атомных оболочках), которое совпадает с порядковым номером элемента в Периодической таблице. Заряд равен  $Z \cdot e$ , где  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  Кл – абсолютная величина элементарного электрического заряда.

Прямые опыты по измерению заряда ядер на основе закона Кулона были выполнены Чедвиком в 1920. В 1911 Резерфорд, используя закон Кулона, получил формулу :

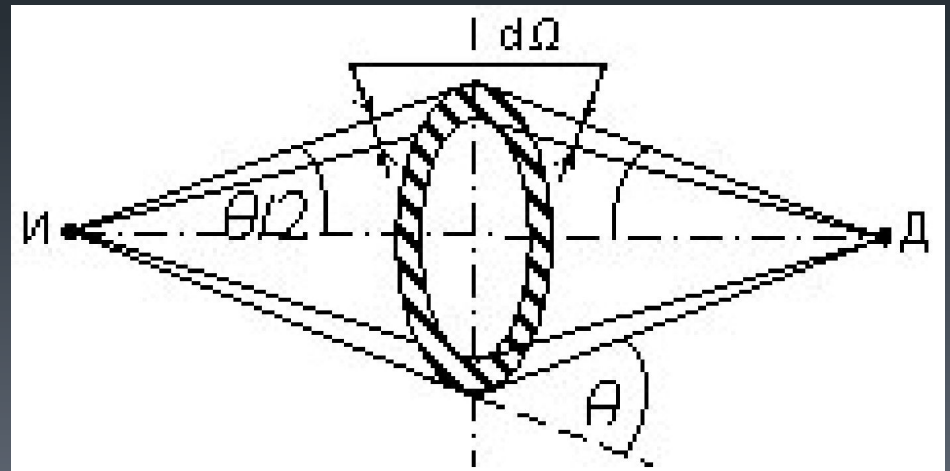
$$\frac{dN}{n} = n \left( \frac{Ze}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4(\theta/2)}$$

где  $N$  – количество  $\alpha$ -частиц, падающих в единицу времени на рассеиватель;

$dN$  – количество рассеянных в единицу времени  $\alpha$ -частиц в телесный угол  $d\Omega$  под углом  $\theta$ ;

$Ze$  и  $n$  – заряд ядер рассеивателя и их концентрация;  $v$  и  $m$  – скорость и масса  $\alpha$ -частиц

Схема опыта Чедвика по прямому измерению заряда ядра



# Упругое рассеяние электронов

Всякое дифференциальное эффективное сечение рассеяния можно записать в виде:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(q)|^2, \text{ где } f(\theta) -$$

амплитуда рассеяния,

$q = 2p \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$  передаваемый при рассеянии импульс.

Амплитуду рассеяния в таком случае можно записать в виде:

$$f(q) = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int V(x) \exp\left\{i \frac{qx}{\hbar}\right\} dx, \quad V(x) - \text{ потенциал, на котором происходит рассеяние}$$

$$f(q^2) = -\frac{2m}{\hbar q} \int V(x) \sin(qx/\hbar) dx$$

$$V(x) = \frac{ZZe^2}{x} \exp(-x/a), \quad a - \text{ длина порядка атомных размеров}$$

$$f(q^2) = -\frac{2mZ_1Ze^2}{q^2 + (\hbar/a)^2},$$

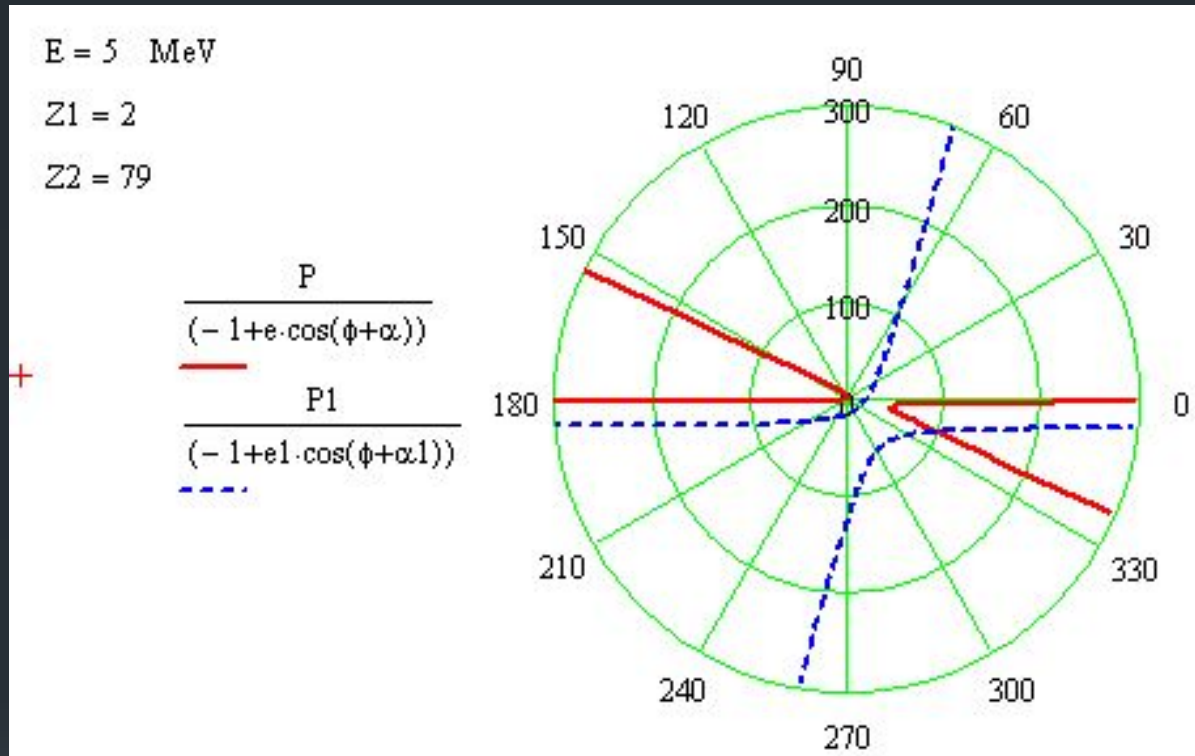
если  $q \gg \hbar/a$ , то  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{4m^2}{q^4} (Ze^2)^2$





# Упругое рассеяние электронов

Пример расчетов в MathCAD:



Классическая картина столкновения ядер

${}^4\text{He} + {}^{197}\text{Au}$  для энергии  $E_{\text{ц.м.}} = 5 \text{ МэВ}$ ,

# Формула Мотта

Формула Мотта:  $\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Мотт}}} = 4(Ze^2)^2 \frac{E^2}{(qc)^4} (1 - \beta^2 \sin^2(\theta/2))$ , где E-энергия падающего электрона,  $\beta = \frac{v}{c}$

$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{Мотт}}} |F(q^2)|^2$ , где  $F(q^2) = \int \rho(r) e^{\frac{iqr}{\hbar}} d^3r$  - формфактор

Эксперимент . Сравнение

Теория

$\frac{d\sigma}{d\Omega} \rightarrow |F(q^2)| \Leftrightarrow F(q^2) \leftarrow \rho(\mathbf{r}) \leftarrow \psi(\mathbf{r}) \leftarrow$  Уравнение Шредингера.

# Плотность распределения в атомном ядре

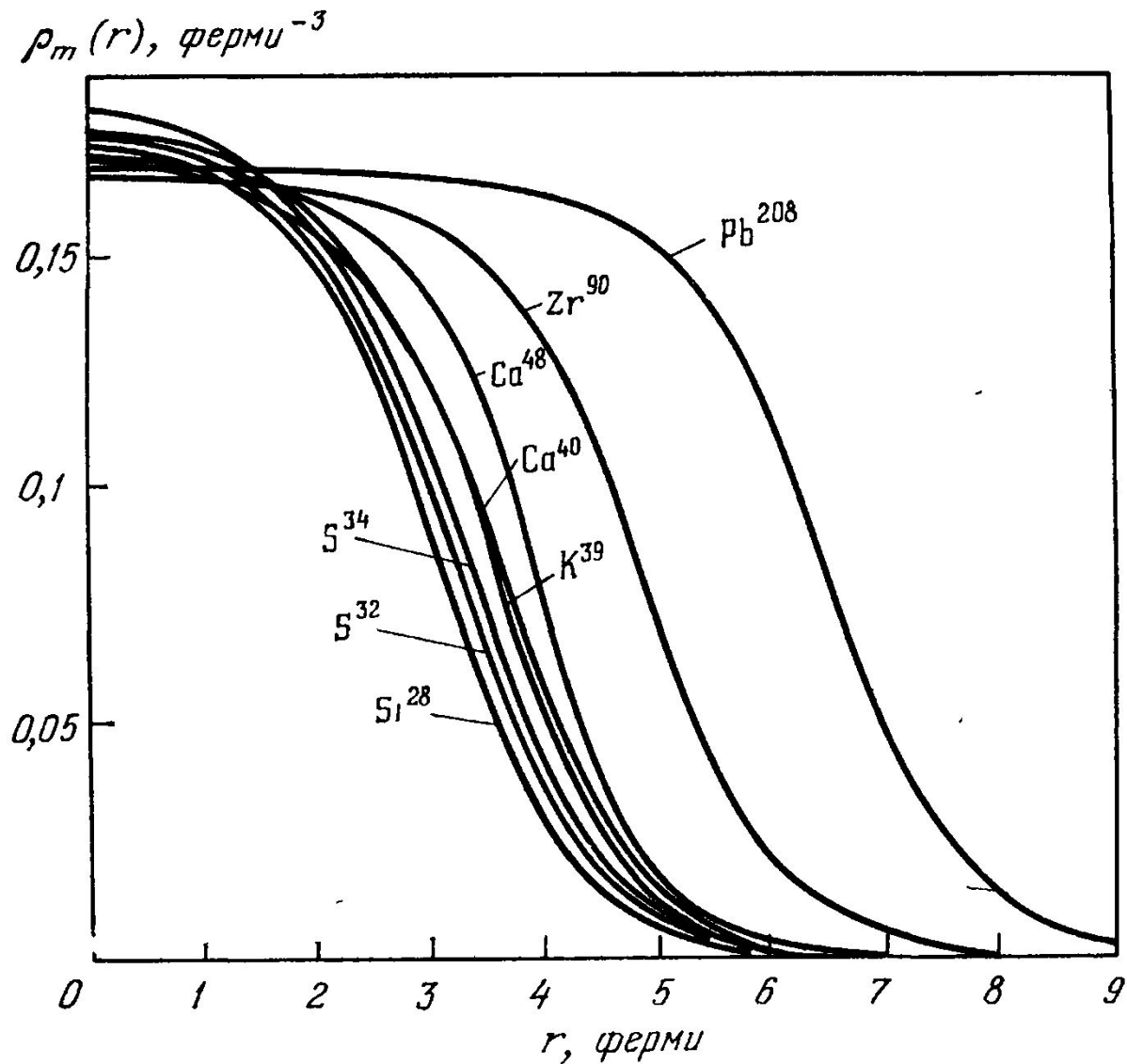
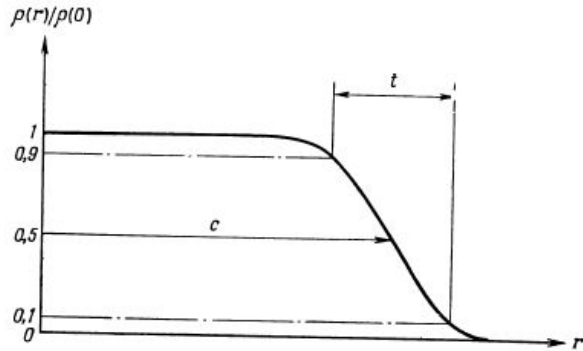


Рис. 2.17 Распределение плотности  $\rho_m(r)$  ядерного вещества в атомных ядрах.

# Пример (теоретическое вычисление размера ядра) в Maple

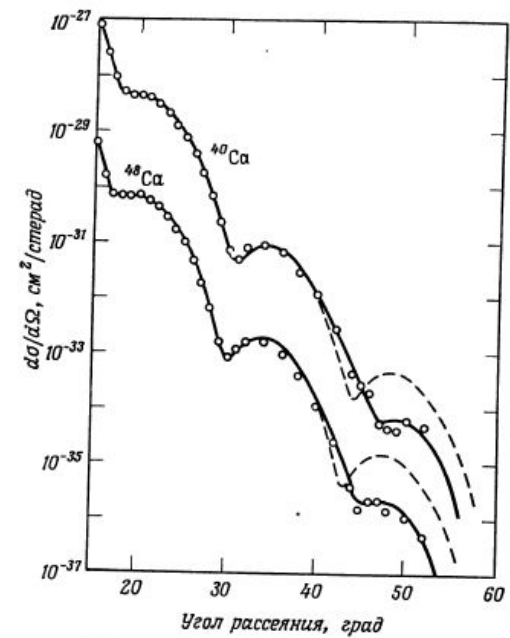


г. 6.6. Функция распределения Ферми для плотности электрического заряда в ядре.  $c$  — радиус на половине плотности,  $t$  — толщина поверхности.

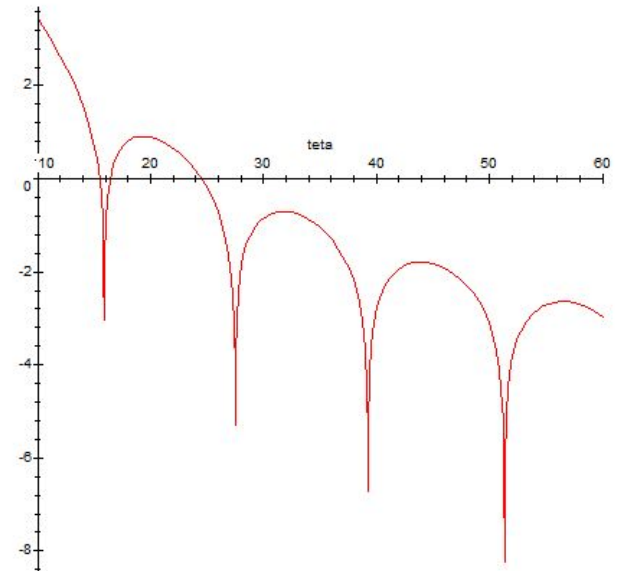
$$\rho(r) = \frac{N}{r-c} \frac{1}{1+e^{\frac{r-c}{a}}}, \quad t=(4\ln 3)a, \quad c=1,18A^{1/3} - 0,48$$

```
> E:=750;r0:=1.25;A:=40.;kR(teta):=4*Pi*r0*A^0.33333*E/1241*sin(teta/2*Pi/180);
y(teta):=(3*(sin(kR(teta))-kR(teta)*cos(kR(teta)))/kR(teta)^3)^2;
E:=750
r0:=1.25
A:=40.
kR(teta):=10.33413530*pi*sin(1/360*teta*pi)
y(teta):=.7389203886*10^-5*(sin(10.33413530*pi%1)-10.33413530*pi%1*cos(10.33413530*pi%1))^2
%1:=sin(1/360*teta*pi)
> plot(log10((y(teta)*(1-1*(sin(teta/2*Pi/180))^2)/(sin(teta/2*Pi/180))^4)),teta=10..60);
```

$$R(^{40}\text{Ca}) = r_0 A^{1/3} = 1.25 \text{ fm} * 40^{1/3} = 4.275 \text{ fm}$$



Фиг. 6.5. Зависимость дифференциального эффективного сечения рассеяния пучка электронов с энергией 750 МэВ на ядрах изотопов Ca от угла рассеяния [9]. Эффективное сечение для  $^{40}\text{Ca}$  увеличено в 10 раз, а для  $^{48}\text{Ca}$  уменьшено в 10 раз.



# задача

Широков Ю.М., Юдин М.П. «ядерная физика»  
(изд.2е)-1980, стр. 58, рис.2.14

$$R(\text{Au}) = r_0 A^{1/3} = ? \text{ fm}, \quad E = 153 \text{ Mev}$$

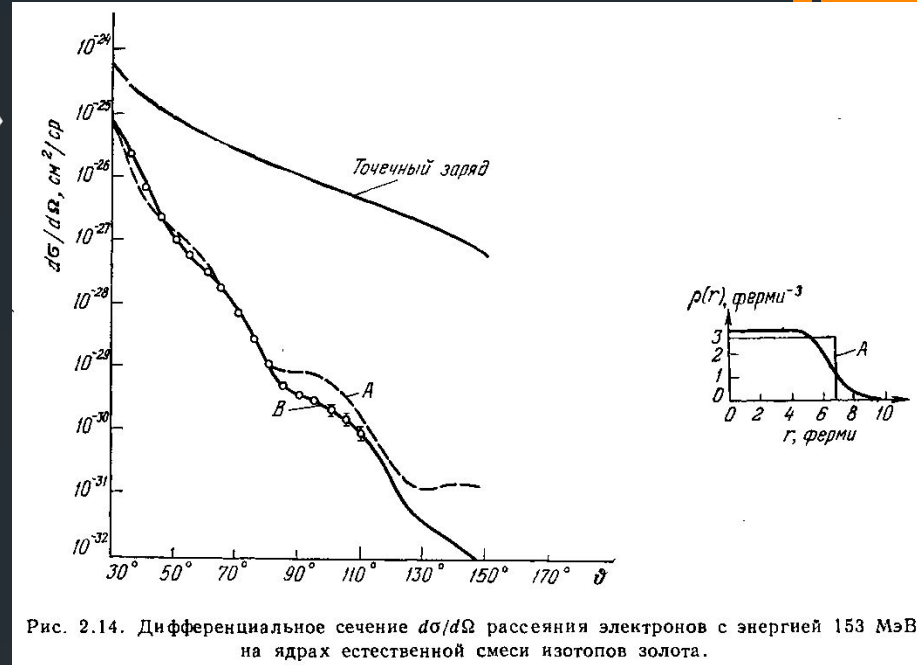


Рис. 2.14. Дифференциальное сечение  $d\sigma/d\Omega$  рассеяния электронов с энергией 153 МэВ на ядрах естественной смеси изотопов золота.

# Список литературы:

- Б.С.Ишханов ,И.М.Капитонов, Н.П.Юдин «Частицы и атомные ядра» ,с.197-203.
- И.Н.Бекман «Ядерная физика, лекция 4, атомное ядро» ,с. 1-24.
- Г.Фраунфельдер, Э.Хенли «Субатомная физика» , с 162-180.
- Широков Ю.М. ,Юдин М.П. «ядерная физика» (изд.2е)-1980