

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



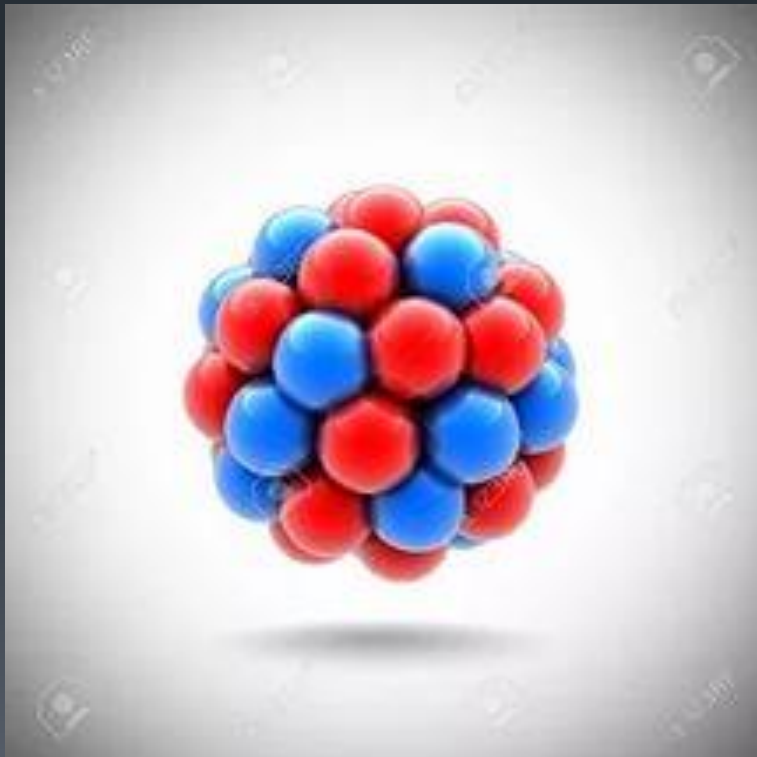
Основные свойства атомных ядер

Абакумов А.М.

АТОМНОЕ ЯДРО – общие сведения

Атом состоит из ядра и электронной оболочки.

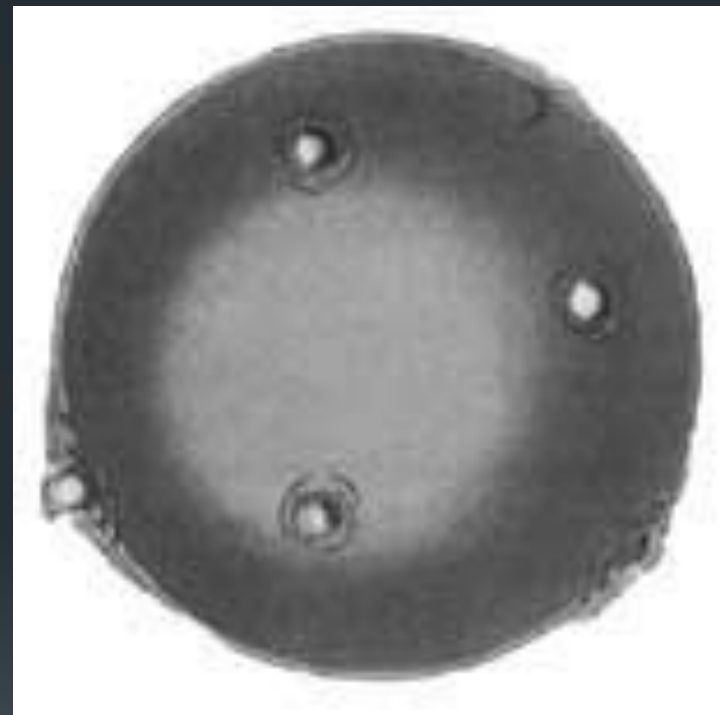
Атомное ядро – положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома. Ядро атома состоит из нуклонов(протонов и нейтронов).



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.

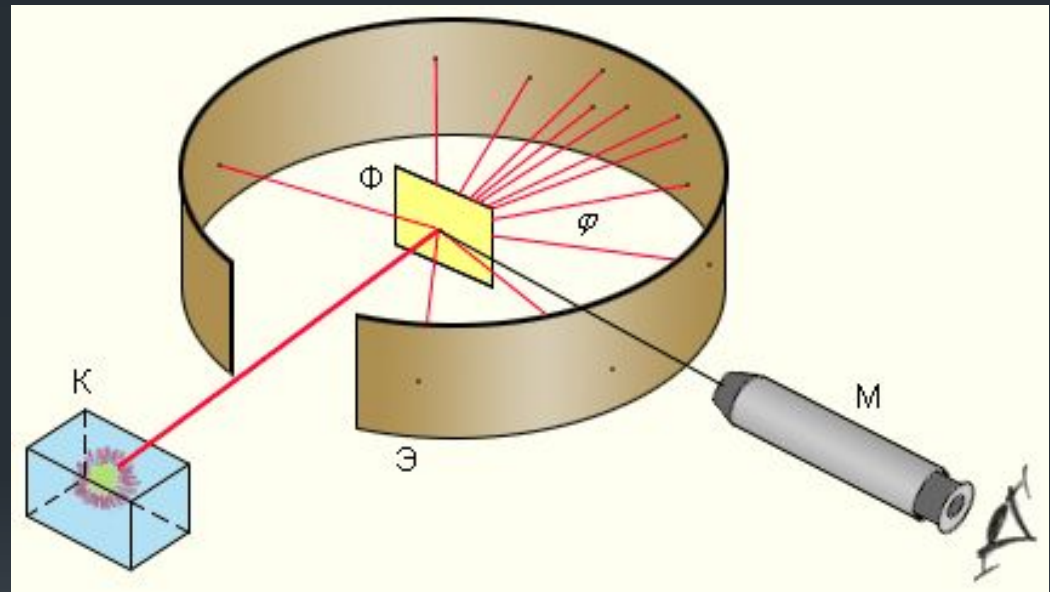
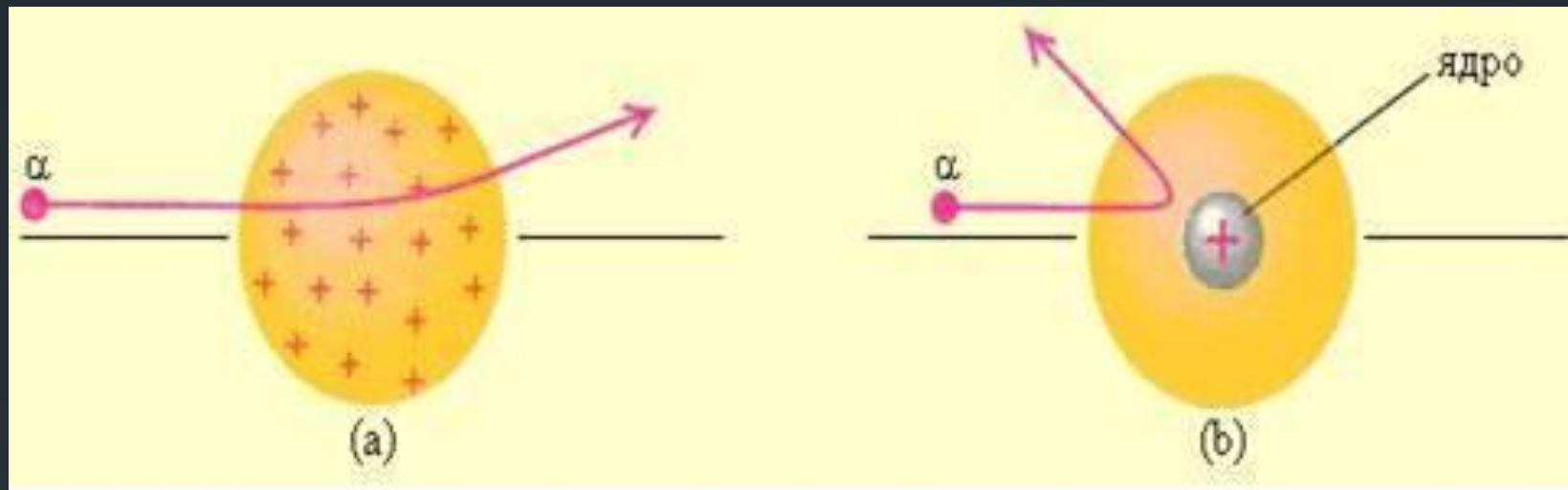


Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц.

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

опыт Резерфорда

Рассеяние альфа-частиц в модели : Томсона (a), 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.

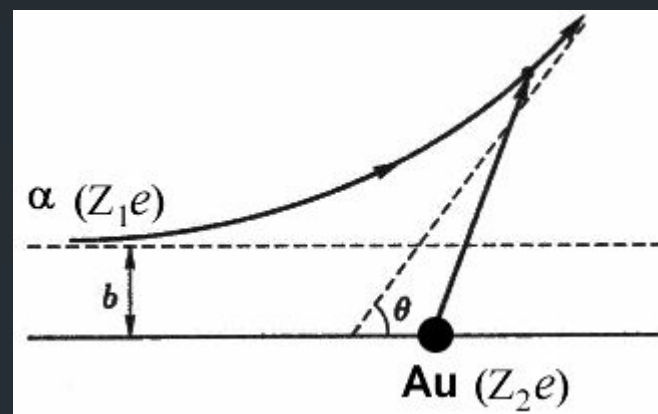
размер ядра



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

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

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



Рассеяние α -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.

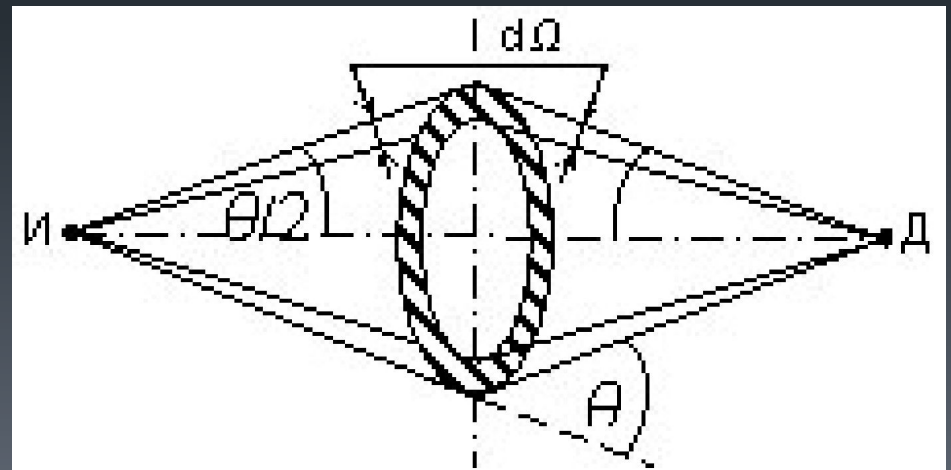
Прямые опыты по измерению заряда ядер на основе закона Кулона были выполнены Чедвиком в 1920. В 1911 Резерфорд, используя закон Кулона, получил формулу :

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

где N – количество α -частиц, падающих в единицу времени на рассеиватель;

dN – количество рассеянных в единицу времени α -частиц в телесный угол $d\Omega$ под углом θ ;
 Ze и n – заряд ядер рассеивателя и их концентрация; v и m – скорость и масса α -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:

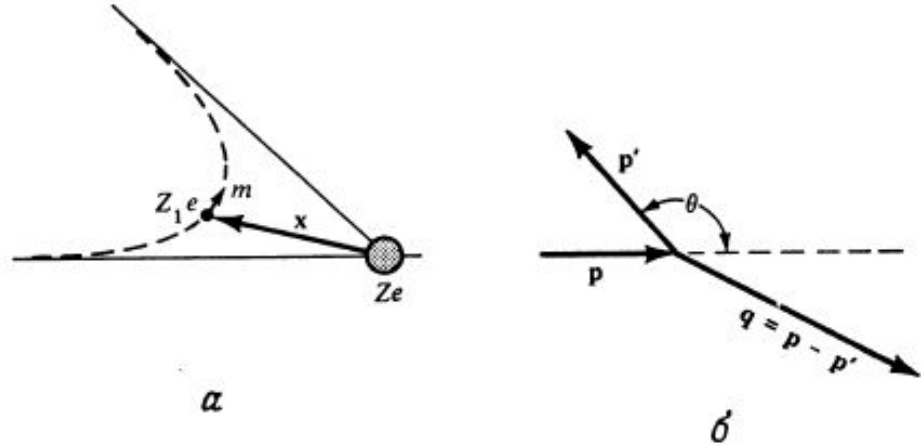
$$f(q) = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int V(x) \exp\left\{i \frac{qx}{\hbar}\right\} dx, \quad V(x) - \text{потенциал, на котором происходит рассеяние}$$

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

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

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

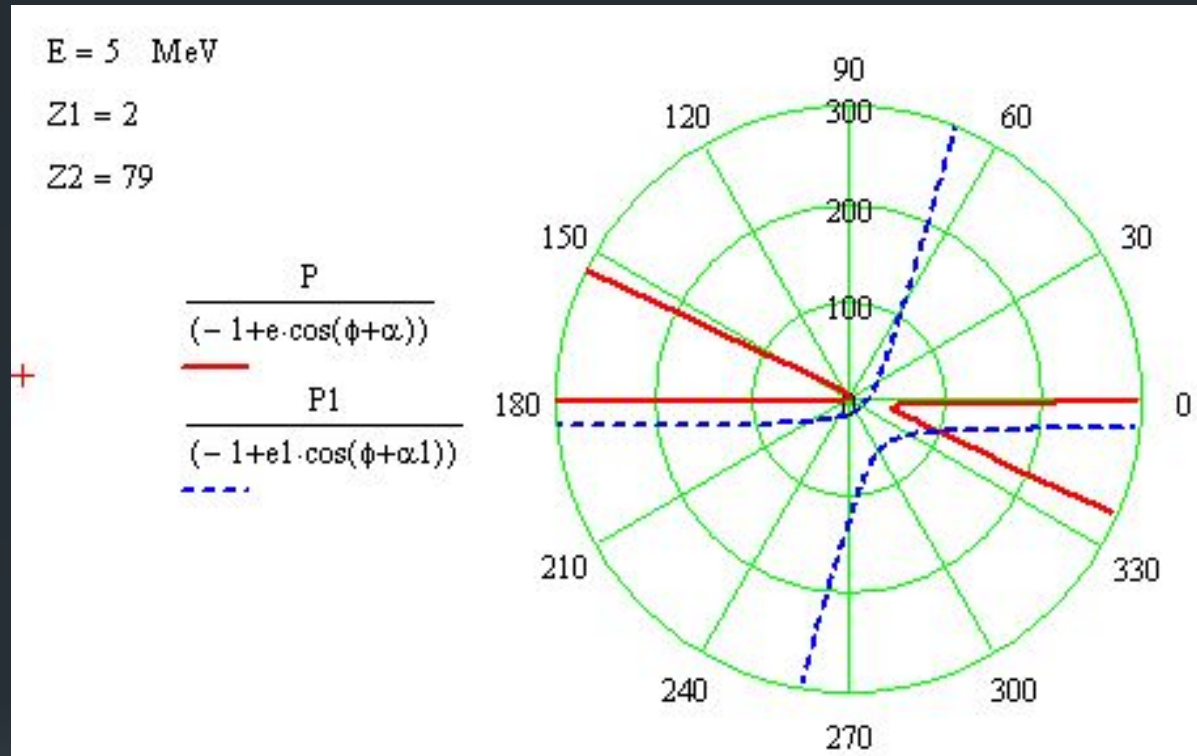
если $q \gg \hbar/a$, то
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{4m^2}{q^4} (Ze^2)^2$$



Фиг. 6.3. Резерфордское рассеяние. *a* — классическая траектория частицы с зарядом Z_1e , рассеивающейся в поле тяжелого ядра с зарядом Ze ; *b* — представление акта рассеяния в импульсном пространстве.

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

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

Плотность распределения в атомном ядре

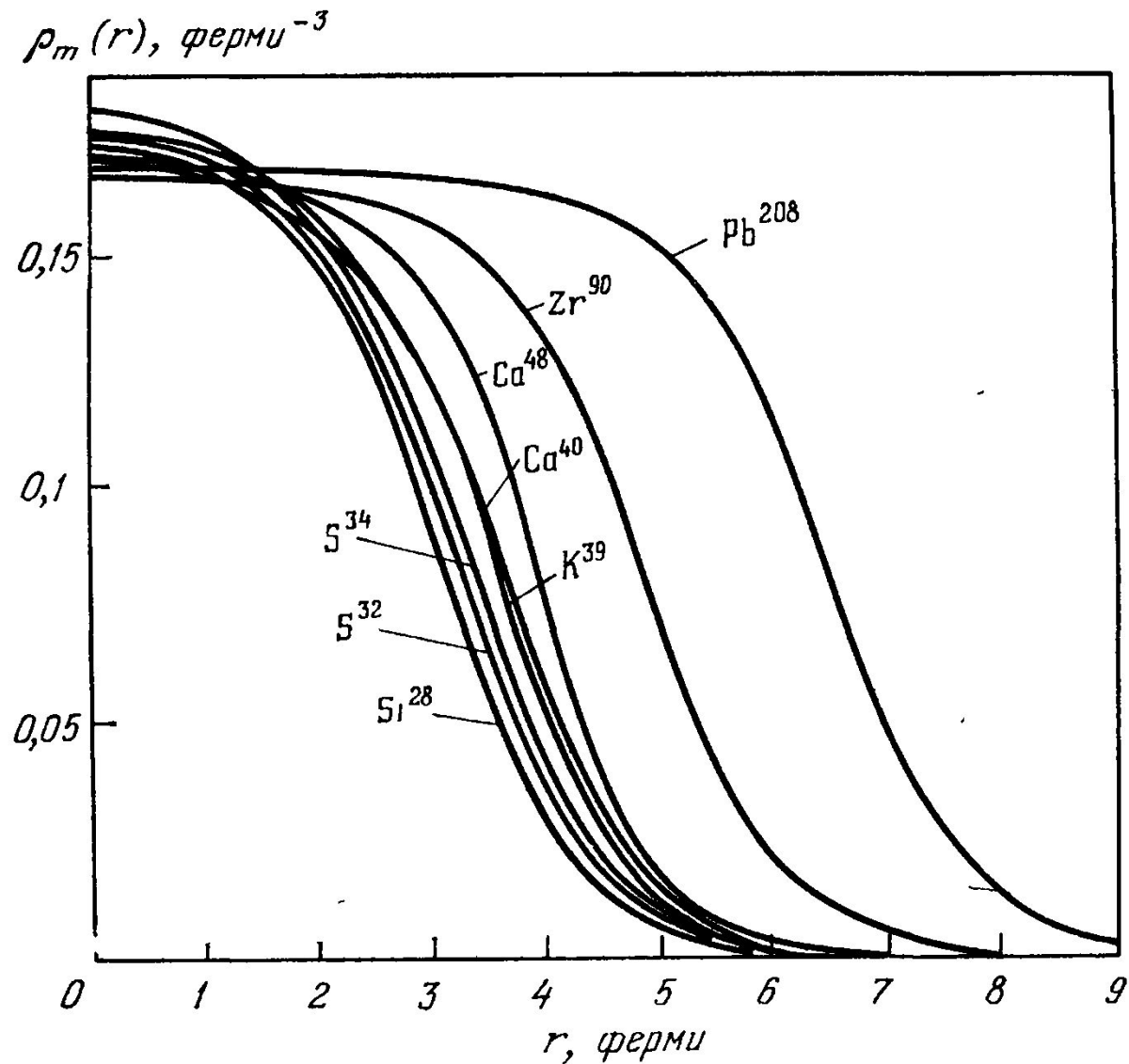
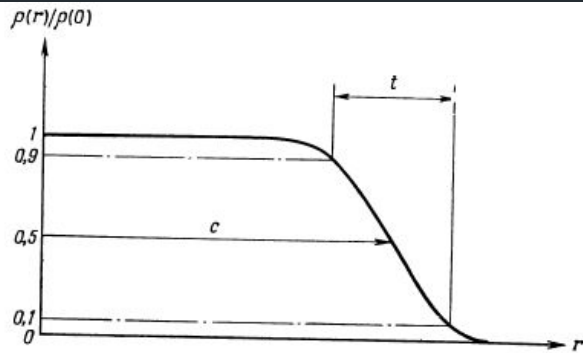


Рис. 2.17 Распределение плотности $\rho_m(r)$ ядерного вещества в атомных ядрах.

Пример (теоретическое вычисление размера ядра) в maple

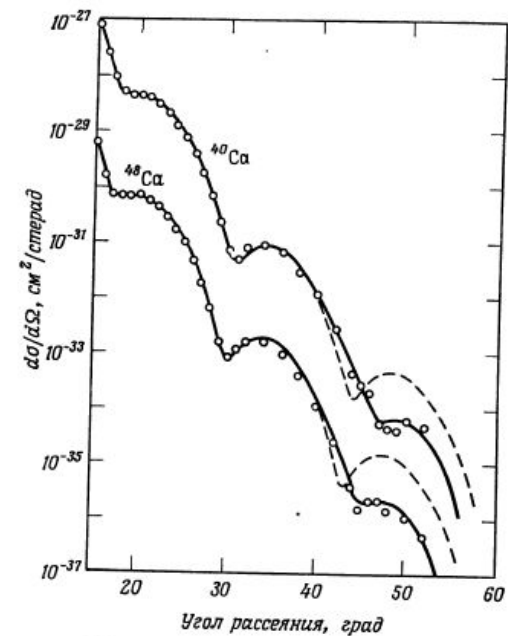


г. 6.6. Функция распределения Ферми для плотности электрического заряда в ядре. c — радиус на половине плотности, t — толщина поверхности.

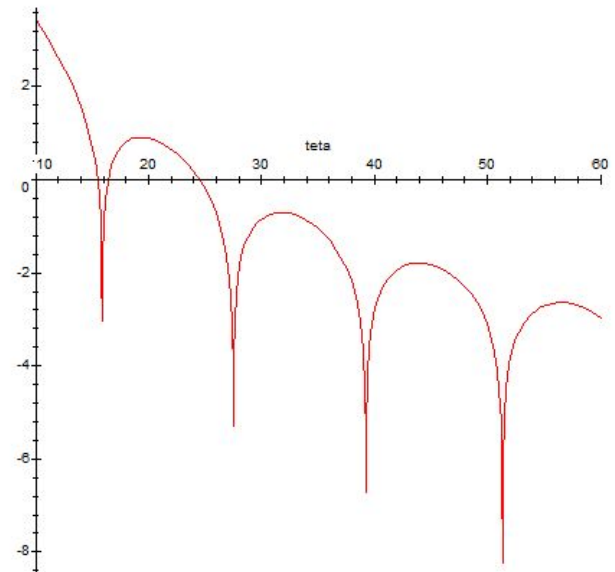
$$\rho(r) = \frac{N}{1 + e^{\frac{r-c}{a}}} , \quad t = (4 \ln 3)a , \quad c = 1,18A^{1/3} - 0,48$$

```
> 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)-10.33413530*Pi*cos(10.33413530*Pi))^2/
Pi^6*10^6
%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);
```

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



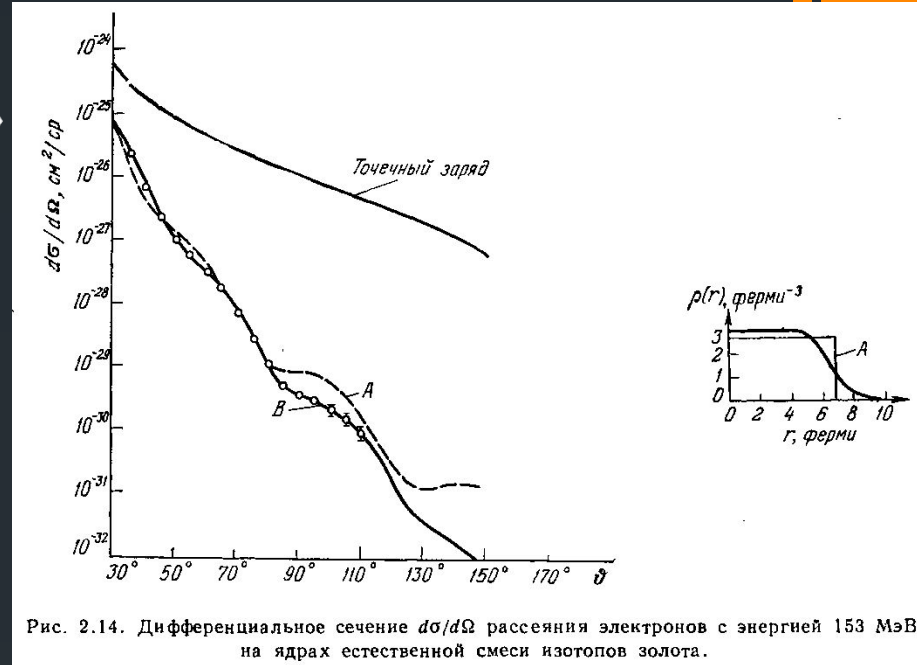
Фиг. 6.5. Зависимость дифференциального эффективного сечения рассеяния пучка электронов с энергией 750 МэВ на ядрах изотопов Са от угла рассеяния [9]. Эффективное сечение для ^{40}Ca увеличено в 10 раз, а для ^{48}Ca уменьшено в 10 раз.



задача

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

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



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