

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

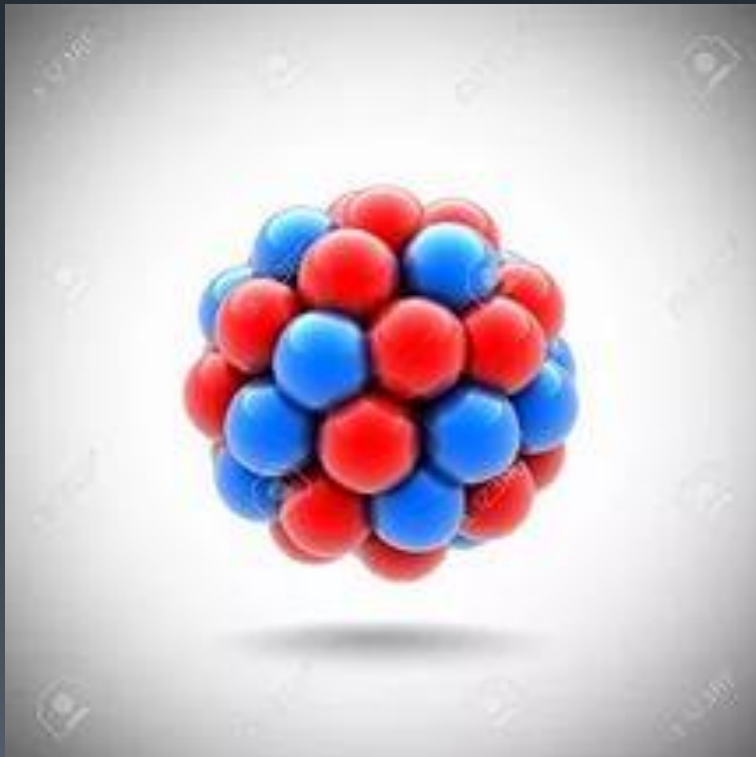
Основные свойства атомных ядер

Абакумов А.М.

АТОМНОЕ ЯДРО – общие сведения

Атом состоит из ядра и электронной оболочки.

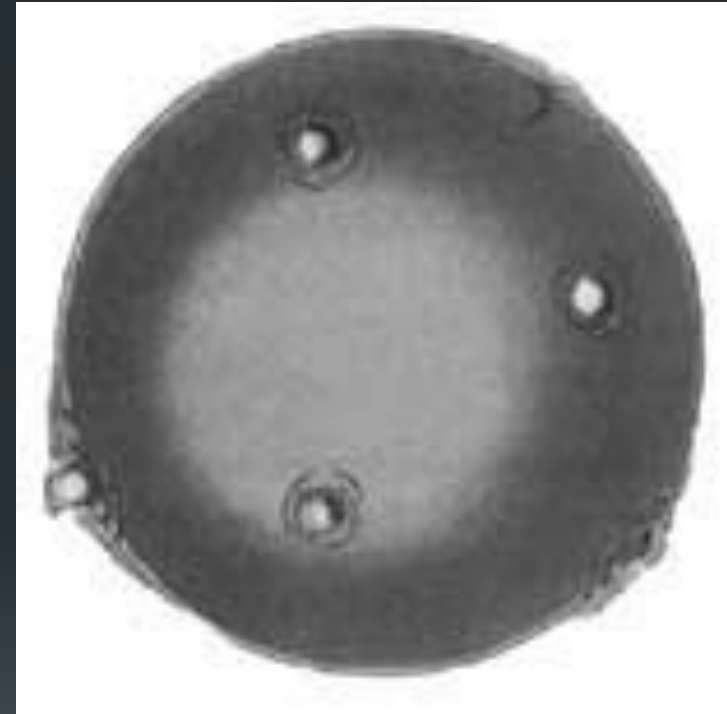
***Атомное ядро** – положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома. Ядро атома состоит из нуклонов(протонов и нейтронов).*



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.

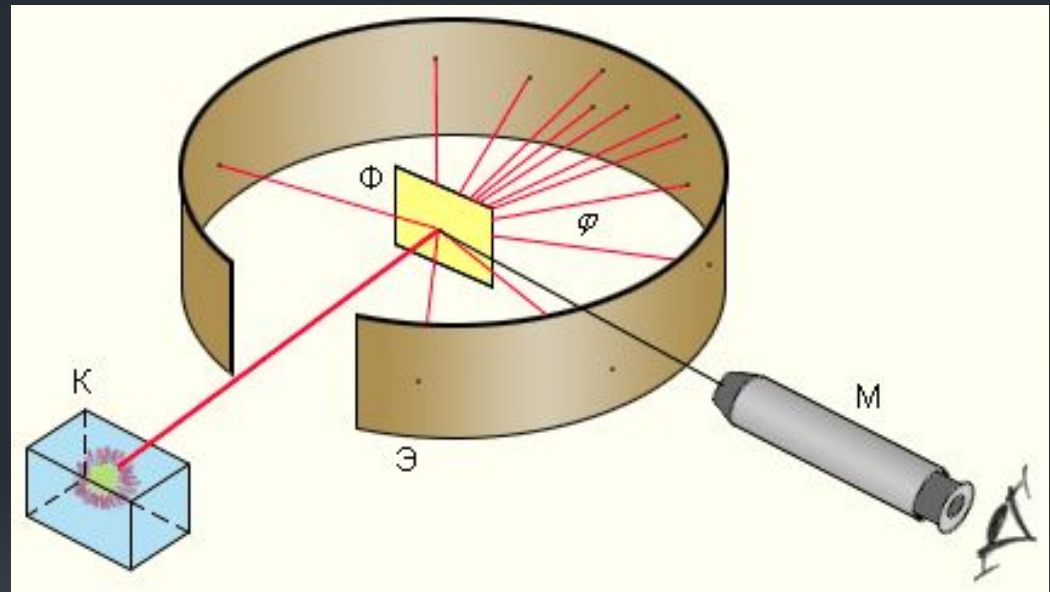
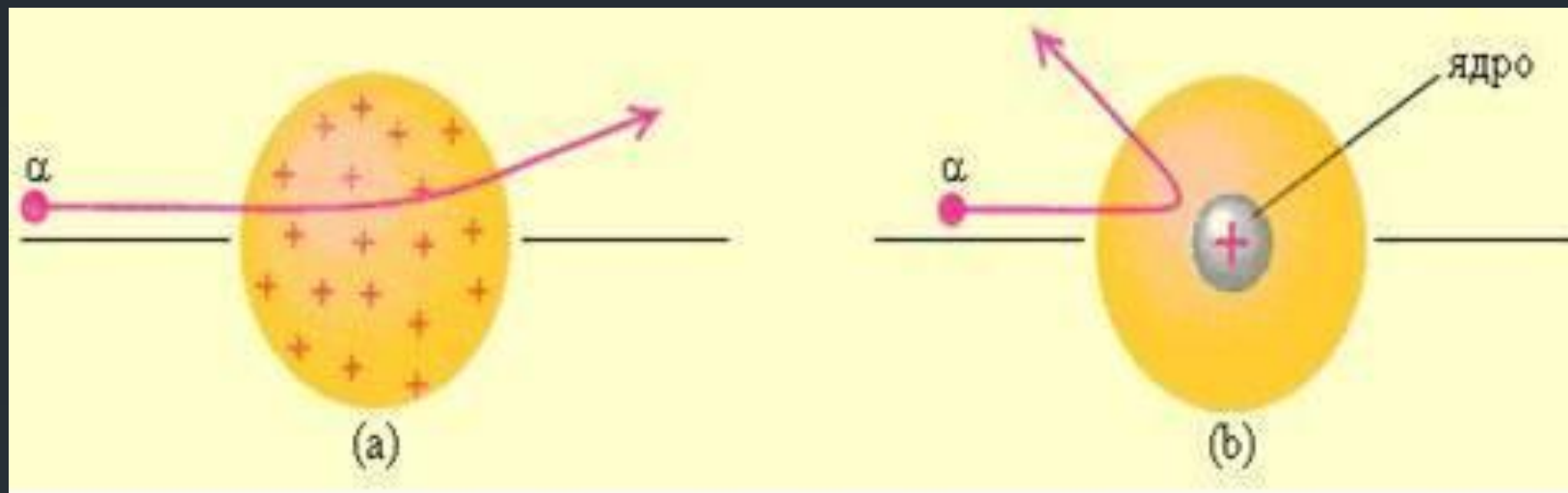


Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц.

К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый сернистым цинком, 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 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 :

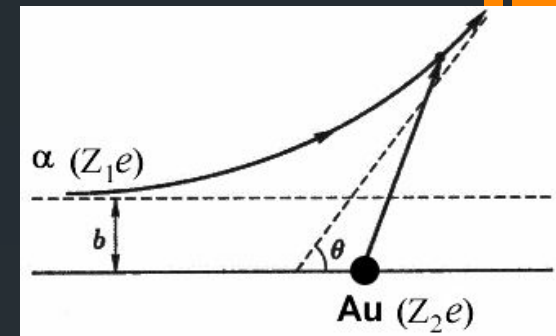
$$\frac{m_{\alpha} v^2}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r_{min}}$$

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 $r_{min} \approx 10^{-14} \text{ м} = 10 \text{ fm}$ (Сивухин т5 «Атомная и ядерная физика» 2-е изд 2002.). Эта величина была принята за верхнюю оценку радиуса ядра.

В современных расчетах пользуются формулой:

$$R = r_0 A^{1/3} , \text{ где } r_0\text{-константа, } A\text{-атомный номер}$$

Для атома золота $R = 1,3 \cdot 197^{1/3} \text{ fm} = 7,54 \text{ fm}$



Рассеяние α -частицы на атомном ядре (Au).

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:

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

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

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

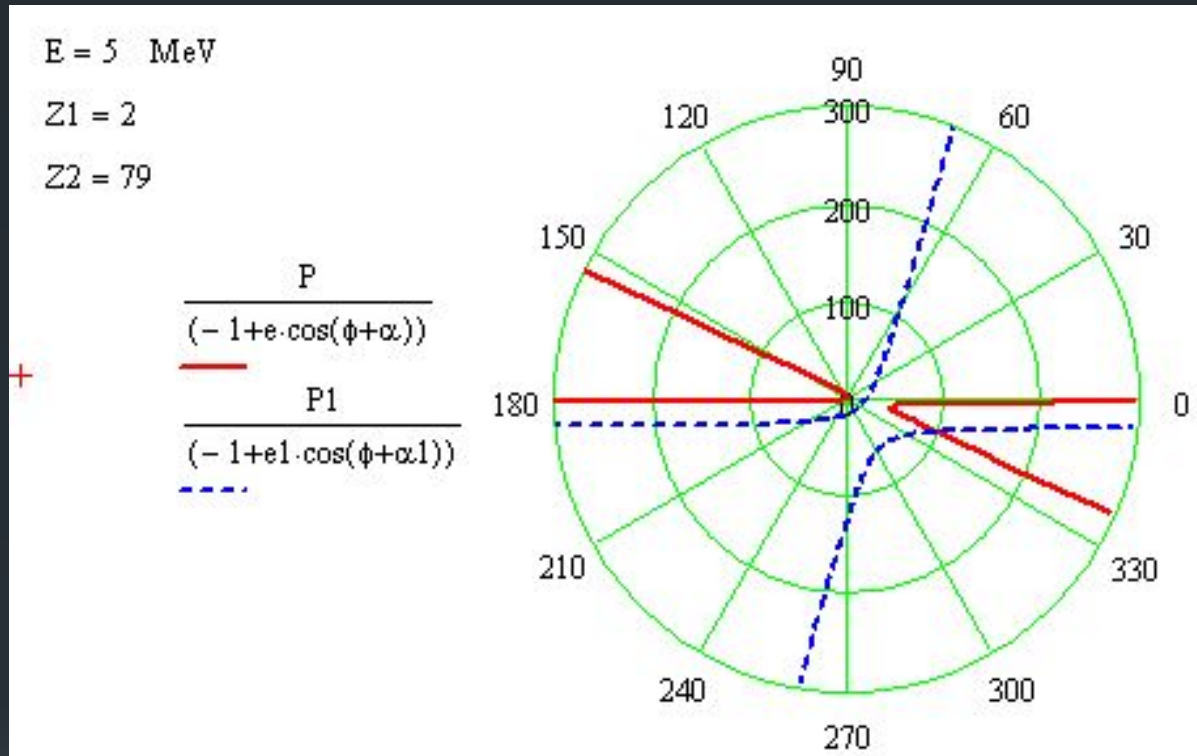
$$f(q^2) = -\frac{2mZ_1Ze^2}{q^2 + (\hbar/a)^2},$$

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

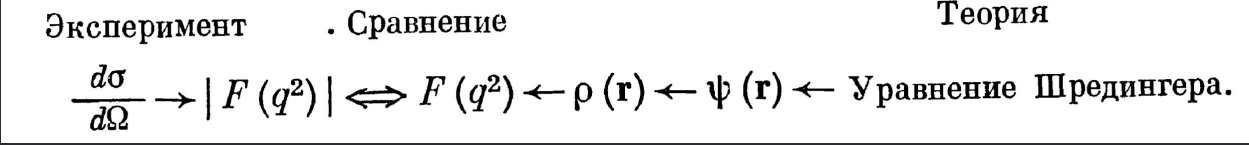
${}^4\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ для энергии $E_{\text{ц.м.}} = 5 \text{ МэВ}$,



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 $F(q^2) = \int \rho(r) e^{\frac{i\vec{q}\vec{r}}{\hbar}} d^3r$ - формфактор



$\rho_m(r), \text{ферми}^{-3}$

Широков, Юдин "ядерная физика"(2-е изд.), 1980 г

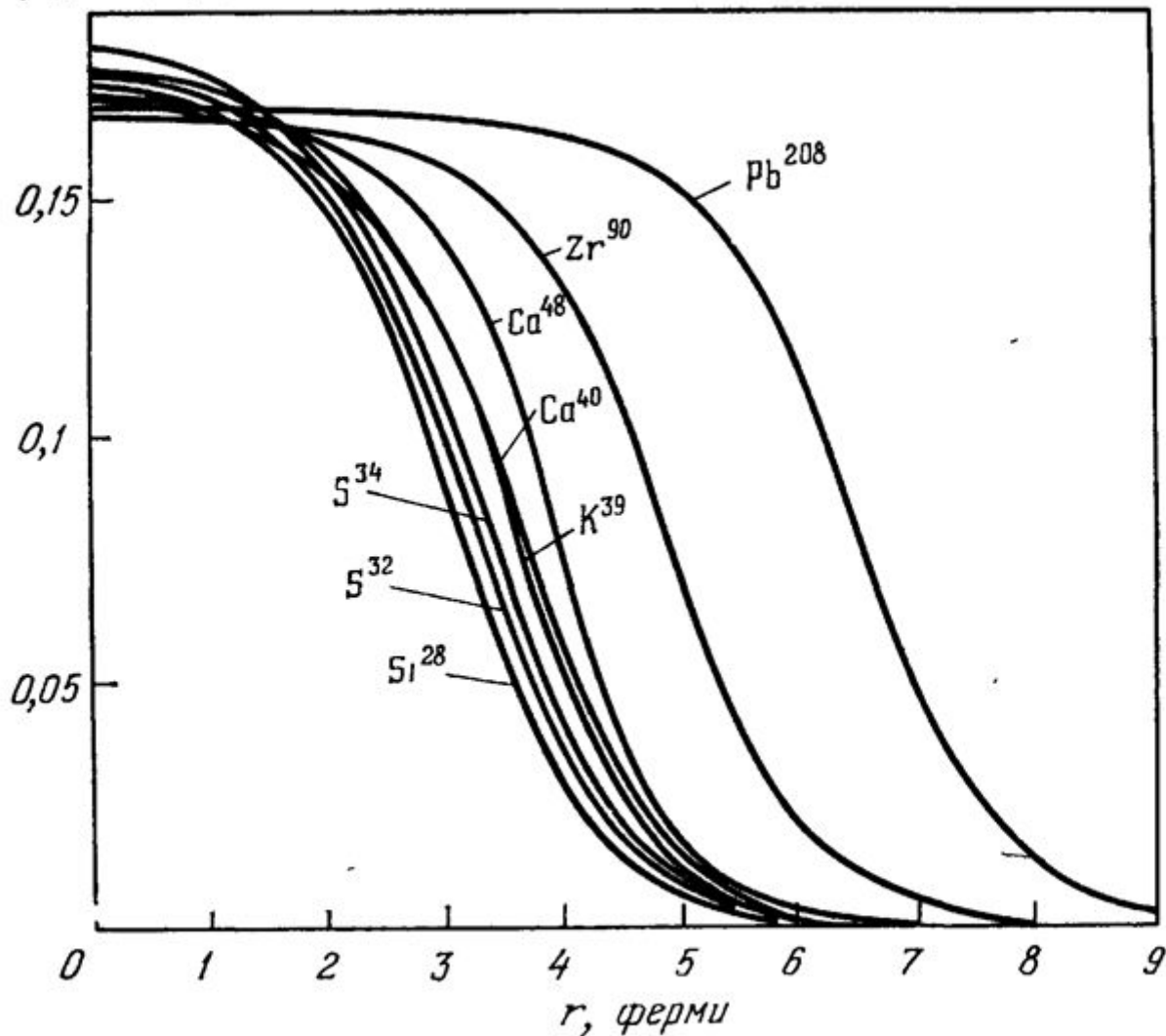


Рис. 2.17 Распределение плотности $\rho_m(r)$ ядерного вещества в атомных ядрах.

Плотность распределения заряда в атомном ядре (пример из NRV)



Южный парк В.Г.Потемкин Remove link kaiser bess Kaiser wind Список функций опыт резерв NRV NRV: Pb208 NRV NRV: Fe56 NRV NRV: O16 NUCLEA

Южный парк В.Г.Потемкин Remove link kaiser bess Kaiser wind Список функций опыт резерв NRV NRV: Pb208 NRV NRV: Fe56 NRV NRV: O16

nrvjnr.ru NRV: O16

Страница на английском Перевести на русский

<<N >>N <<Z >>Z

Nucleus ^[1]	Binding energy (MeV)	g.s. Radius ^[2] & Deformation ^[3]																																																										
¹⁶ ₈ O ₈ Oxygen J ^π =0 ⁺ T _{1/2} =stable Abundance: 99.757% 16	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Experiment [2]</th> <th>Theory [4]</th> <th>sh.com. [4]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-4.73700137 (0.00000016)</td> <td>-5.150</td> <td>2.420</td> </tr> <tr> <td>BE 127.619</td> <td>128.032</td> <td></td> </tr> <tr> <td>BE/A 7.976</td> <td>8.002</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Experiment [2]	Theory [4]	sh.com. [4]	-4.73700137 (0.00000016)	-5.150	2.420	BE 127.619	128.032		BE/A 7.976	8.002		$\langle R^2 \rangle_{g.s.}^{1/2} = 2.6901 \pm 0.0052 \text{ fm}$ [3] Charge-density Distribution [6] $\beta_2 = -0.010$ $\beta_3 = -0.258$ $\beta_4 = -0.122$ $\beta_5 = 0.047$																																														
Experiment [2]	Theory [4]	sh.com. [4]																																																										
-4.73700137 (0.00000016)	-5.150	2.420																																																										
BE 127.619	128.032																																																											
BE/A 7.976	8.002																																																											
Excited States ^[1]	Known and possible Decays ^[1]	Q-values (keV)																																																										
click on a plot to process it 		roman [2], <i>italic</i> [4] α -decay -7161.90 β^- -decay -15417.22 β^+ -decay -11442.94 e -capture -10420.94 $1p$ -sep.en. -12127.44 $2p$ -sep.en. -22334.89 $1n$ -sep.en. -15963.91 $2n$ -sep.en. -28887.06 $2p$ -decay -28723.09 β -n -29615.08 β -2n -52843.98 β -d -25880.12 β -t -42802.21 β -a -24499.94 β -n,a -39539.81 $E.C.p$ -21899.18 $E.C.2p$ -42978.72 $E.C.a$ -20631.36																																																										
Metastable states and Resonances ^[1]	Radiation energies (keV) ^[1]	Thermal neutrons ^[1]	El.-Magn. properties ^[5,7,8]																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>E =</th> <th>J^π</th> <th>α</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9885 keV</td> <td>IT</td> <td>α</td> </tr> <tr> <td>T_{1/2} = 0.420 MeV</td> <td>0.0000087%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>9844.5 keV</td> <td>IT</td> <td>α</td> </tr> <tr> <td>T_{1/2} = 0.001 MeV</td> <td>0.0016%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>10356 keV</td> <td>IT</td> <td>α</td> </tr> <tr> <td>T_{1/2} = 0.028 MeV</td> <td>0.00024%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>11098.7 keV</td> <td>IT</td> <td>α</td> </tr> <tr> <td>T_{1/2} = 0.002 fs</td> <td>0.002%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>11290 keV</td> <td>α</td> <td></td> </tr> <tr> <td>T_{1/2} = 2.500 MeV</td> <td>100%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>11520 keV</td> <td>IT</td> <td>α</td> </tr> <tr> <td>T_{1/2} = 0.071 MeV</td> <td>0.000094%</td> <td>100%</td> </tr> </tbody> </table>	E =	J ^π	α	9885 keV	IT	α	T _{1/2} = 0.420 MeV	0.0000087%	100%	9844.5 keV	IT	α	T _{1/2} = 0.001 MeV	0.0016%	100%	10356 keV	IT	α	T _{1/2} = 0.028 MeV	0.00024%	100%	11098.7 keV	IT	α	T _{1/2} = 0.002 fs	0.002%	100%	11290 keV	α		T _{1/2} = 2.500 MeV	100%		11520 keV	IT	α	T _{1/2} = 0.071 MeV	0.000094%	100%		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Capture</th> <th>σ (b)</th> <th>0.00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Scattering</td> <td>3.76</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Capture	σ (b)	0.00	Scattering	3.76		<table border="1"> <thead> <tr> <th>μ (nm)</th> <th>Q (b)</th> <th>E[†] (keV)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+1.698(12)</td> <td></td> <td>6130</td> </tr> <tr> <td colspan="3">B(E2)_↑ = 0.00371 (39) e²b², β₂⁰ = 0.349 (19)</td> </tr> <tr> <td colspan="3">B(E3)_↑ = 0.00148 (5) e³b³, β₃⁰ = 0.729 (0)</td> </tr> </tbody> </table>	μ (nm)	Q (b)	E [†] (keV)	+1.698(12)		6130	B(E2) _↑ = 0.00371 (39) e ² b ² , β ₂ ⁰ = 0.349 (19)			B(E3) _↑ = 0.00148 (5) e ³ b ³ , β ₃ ⁰ = 0.729 (0)		
E =	J ^π	α																																																										
9885 keV	IT	α																																																										
T _{1/2} = 0.420 MeV	0.0000087%	100%																																																										
9844.5 keV	IT	α																																																										
T _{1/2} = 0.001 MeV	0.0016%	100%																																																										
10356 keV	IT	α																																																										
T _{1/2} = 0.028 MeV	0.00024%	100%																																																										
11098.7 keV	IT	α																																																										
T _{1/2} = 0.002 fs	0.002%	100%																																																										
11290 keV	α																																																											
T _{1/2} = 2.500 MeV	100%																																																											
11520 keV	IT	α																																																										
T _{1/2} = 0.071 MeV	0.000094%	100%																																																										
Capture	σ (b)	0.00																																																										
Scattering	3.76																																																											
μ (nm)	Q (b)	E [†] (keV)																																																										
+1.698(12)		6130																																																										
B(E2) _↑ = 0.00371 (39) e ² b ² , β ₂ ⁰ = 0.349 (19)																																																												
B(E3) _↑ = 0.00148 (5) e ³ b ³ , β ₃ ⁰ = 0.729 (0)																																																												

javascriptvoid(0)

nrvjnr.ru/nrv/webnrv/map/ Monte-Carlo Data


17:30 03.03.2017

17:28 03.03.2017

Плотность распределения заряда в атомном ядре (пример из NRV)

$\langle r_{ch}^2 \rangle^{1/2}$ - среднеквадратичный зарядовый радиус,

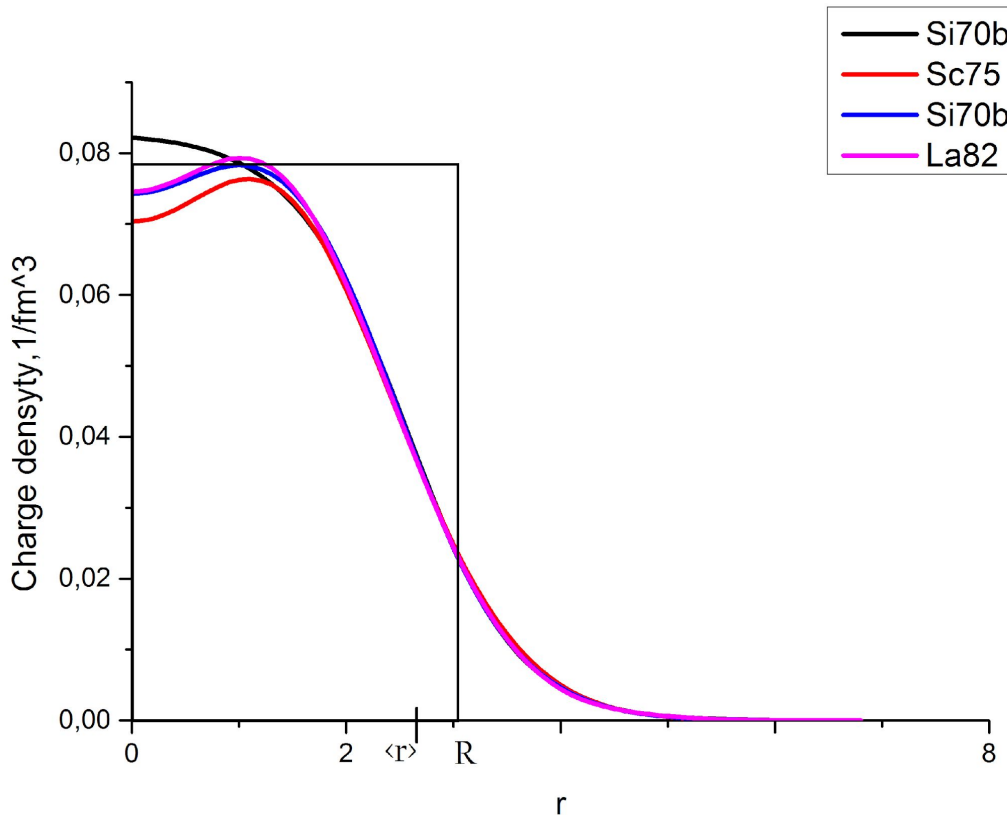
$$\langle r_{ch}^2 \rangle = \int d^3r r^2 \rho(r) = 4\pi \int_0^R \frac{3r^4 dr}{4\pi R^3} = \frac{3}{5} R^2, \text{ где } R \text{ - радиус ядра}$$

			g.s. Radius^[3] & Deformation^[4]
Experiment [2]	Theory [4]	Sh.corr. [4]	$\langle R_{ch}^2 \rangle^{1/2} = 2.6991 \pm 0.0052 \text{ fm}$ [3] Charge-density Distribution [6]
700137 (00016)	-5.150		$\beta_2 = -0.010$ $\beta_3 = -0.258$
27.619	128.032	2.420	$\beta_4 = -0.122$ $\beta_6 = 0.047$
7.976	8.002		
Q-values^[1]			Q-values (keV) roman [2], <i>italic</i> [4]
			α - decay -7161.90
			β^- - decay -15417.22
			β^+ - decay -11442.94
			e-capture -10420.94
			1p - sep.en. -12127.44
			2p - sep.en. -22334.89
			1n - sep.en. -15663.91
2n - sep.en. -28887.06			
2 β^- - decay -28723.09			

Плотность распределения заряда в атомном ядре (пример из NRV)

$\langle r^2_{ch} \rangle^{1/2}$ - среднеквадратичный зарядовый радиус,

$$\langle r^2_{ch} \rangle = \int d^3r r^2 \rho(r) = 4\pi \int_0^R \frac{3r^4 dr}{4\pi R^3} = \frac{3}{5} R^2, \text{ где } R \text{ - радиус ядра}$$



[3] & Deformation [4]

$6991 \pm 0.0052 \text{ fm}$ [3]

ity Distribution [6]

(keV)

talic [4]

-7161.90

-15417.22

-11442.94

-10420.94

-12127.44

-22334.89

-15663.91

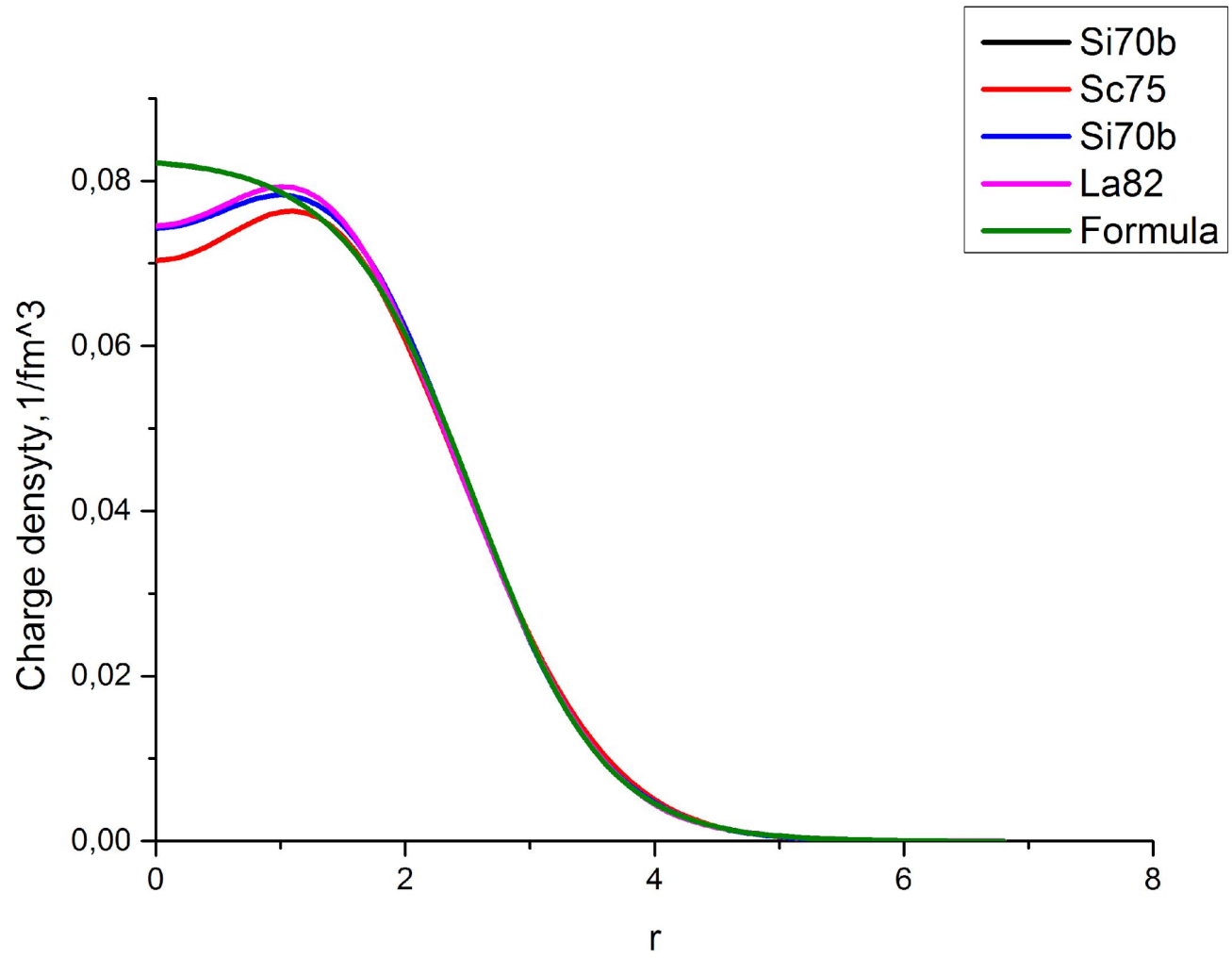
-28887.06

-28723.09

2n - sep.en.

2β⁻ - decay

Плотность распределения заряда в атомном



Яндекс NUCLEAR REACTIONS VID... NRV - Nuclear Map NRV: 016 Новая вкладка file:///C:/Use.../reaction.dat

file:///C:/Users/CD86~1/AppData/Local/Temp/reaction.dat

Чарг
3 par
\rho(
where
Harmc
\rho(
where
Sum-c
\rho(
where
\gamma
R_{1}
R_{2}
R_{3}
R_{4}
R_{5}
R_{6}
R_{7}
R_{8}
R_{9}
R_{10}
R_{11}
R_{12}
Fouri
\rho(
\rho(
here
a_{1}
a_{4}
a_{7}
a_{10}
a_{13}
a_{16}

17:08
06.03.2017
06.03.2017

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
- Сивухин т5 «Атомная и ядерная физика» 2-е изд 2002