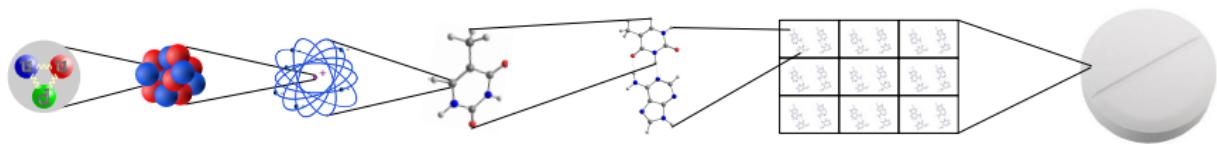


## Строение атомов и радиоактивность

Иван Федягин

ВХК РАН

Уровни описания вещества





## Стандартная модель

масса →	$\approx 2,16 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1,27 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 172,7 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 125,25 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд →	2/3	2/3	2/3	0	0
спин →	1/2	1/2	1/2	0	0
	у верхний	с очарованный	т истинный	глюон	Н бозон Хиггса
КВАРКИ					
	$\approx 4,67 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 93,4 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4,18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 125,25 \text{ ГэВ}/c^2$
	-1/3	-1/3	-1/3	0	0
	1/2	1/2	1/2	0	0
	d нижний	s странный	b прелестный	фотон	
ЛЕПТОНЫ					
	$0,511 \text{ МэВ}/c^2$	$105,7 \text{ МэВ}/c^2$	$1,777 \text{ ГэВ}/c^2$	91,19 ГэВ/c <sup>2</sup>	$\approx 125,25 \text{ ГэВ}/c^2$
	-1	-1	-1	0	0
	1/2	1/2	1/2	1	1
	e электрон	μ мюон	τ тау-лептон	Z-бозон	
	$<1,1 \text{ эВ}/c^2$	$<0,19 \text{ МэВ}/c^2$	$<18,2 \text{ МэВ}/c^2$	$80,38 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 125,25 \text{ ГэВ}/c^2$
	0	0	0	$\pm 1$	0
	1/2	1/2	1/2	1	1
	ν <sub>e</sub> электронное нейтрино	ν <sub>μ</sub> мюонное нейтрино	ν <sub>τ</sub> тау-нейтрино	W-бозон	
СКАЛЯРНЫЕ БОЗОНЫ (ВЕКТОРНЫЕ)					

## Взаимодействия и силы

гравитационные      ?      (гравитон)

электромагнитные       $\gamma$       (фотон)

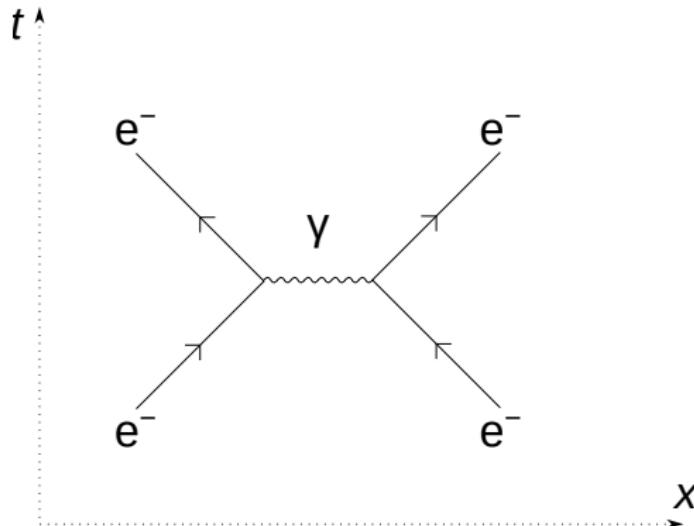
---

сильные      g      (глюон)

слабые       $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$       (W,Z-бозоны)

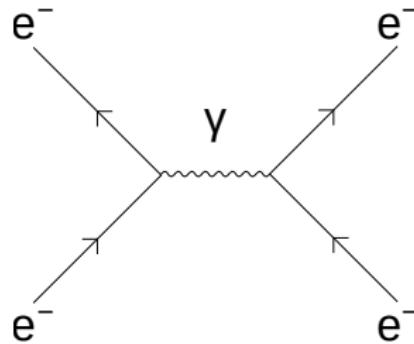
## Взаимодействия частиц: диаграммы Феймана

электромагнитное взаимодействие

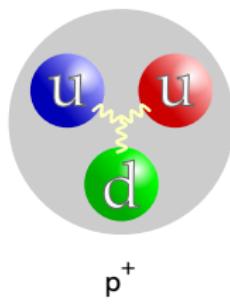
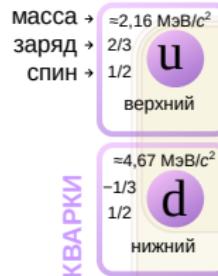


## Взаимодействия частиц: диаграммы Феймана

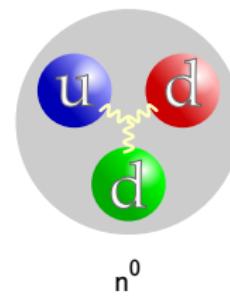
электромагнитное взаимодействие



## Нуклоны

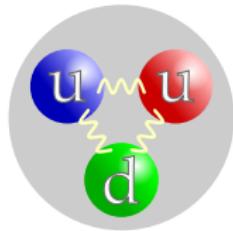


протон  
 $\approx 938.3 \text{ МэВ}/c^2$   
 $+1$   
 $1/2$

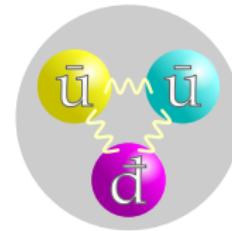


нейтрон  
 $\approx 939.6 \text{ МэВ}/c^2$   
 $0$   
 $1/2$

## Нуклоны и антинуклоны

 $p^+$ 

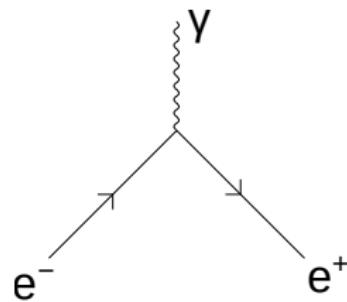
протон

 $\approx 938.3 \text{ МэВ/}c^2$ 
 $+1$ 
 $1/2$ 
 $p^-$ 

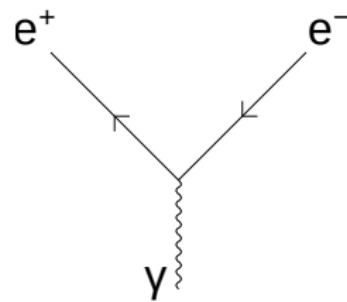
антипротон

 $\approx 938.3 \text{ МэВ/}c^2$ 
 $-1$ 
 $1/2$

Аннигиляция



Рождение частиц



## Сильное взаимодействие в нуклонах

$$d_R \cdots d_G \cdots u_B$$

$$d_G \cdots g_{\{\bar{g}r\}} \cdots d_G \cdots u_B$$

$$d_G \cdots d_R \cdots u_B$$

Сильное взаимодействие между нуклонами: потенциал Юкавы

$$V = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-kr}}{r} \quad (1)$$

где

$$k = \frac{mc}{\hbar}$$

$g, k$  — константы взаимодействия,  $m$  — масса частицы-переносчика взаимодействия

Сильное взаимодействие между нуклонами: потенциал Юкавы

$$V = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-kr}}{r} \quad (1)$$

где

$$k = \frac{mc}{\hbar}$$

$g, k$  — константы взаимодействия,  $m$  — масса частицы-переносчика взаимодействия

Что, если представить  $m = 0$ ?

$$V = -g^2 \frac{1}{r}$$

Сильное взаимодействие между нуклонами: потенциал Юкавы

$$V = -\frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-kr}}{r} \quad (1)$$

где

$$k = \frac{mc}{\hbar}$$

$g, k$  — константы взаимодействия,  $m$  — масса частицы-переносчика взаимодействия

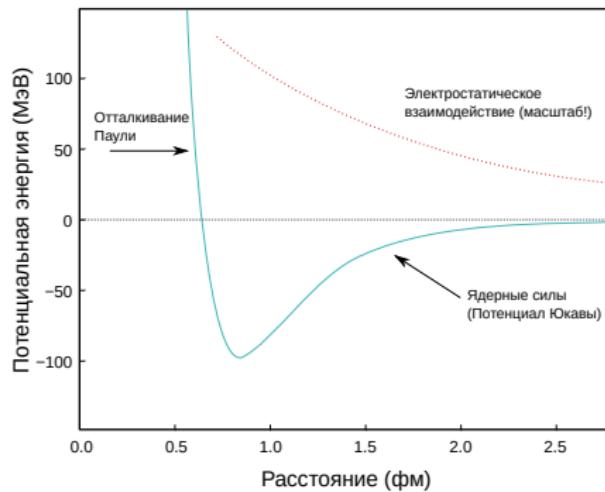
Что, если представить  $m = 0$ ?

$$V = -g^2 \frac{1}{r}$$

Потенциал Юкавы - обобщённый, “экранированный” кулоновский потенциал на расстояниях порядка размера протона в тех же единицах измерения сильное ядерное взаимодействие в  $\approx 137$  раз сильнее

Но: спадает сильно быстрее

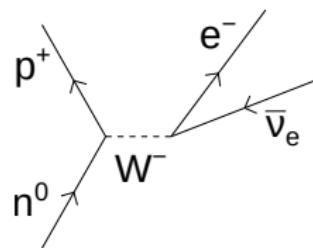
## Потенциал Рейда



Также зависит от:

- Ориентации спина взаимодействующих частиц: ( $\uparrow\uparrow$  выгоднее  $\uparrow\downarrow$ )
- (Типа взаимодействующих частиц)
- (Массы ядра)

## Слабое взаимодействие



$$n_0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

FIXME IMAGE WITH QUARKS

$$T_{1/2} \approx 611 \text{ c}$$

$$t \approx 879.4 \text{ c}$$

## Количественное описание кинетики ядерных реакций

$T_{1/2}$ : период полураспада — за сколько распадётся половина ядер.

Доля выживших частиц (вероятность распада в момент времени  $t$ ):

$$\frac{N(t)}{N(0)} = 2^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

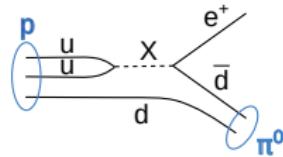
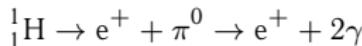
Среднее время жизни  $\tau$ :

$$T_{1/2} = \tau \ln 2; \quad \ln 2 \approx 0.69$$

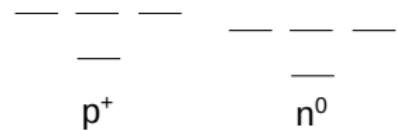
$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}; \quad \frac{1}{\ln 2} \approx 1.45$$

## Изотопы водорода

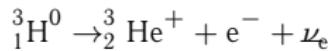
- $^1\text{H}$ : Протий. Крайне стабилен.



- $^2\text{H}$ : Дейтерий. Стабилен.



- ${}^3\text{H}$ : Тритий.  $\beta^-$ -распад,  $T_{1/2} = 12.32(2)$  года,  $E = 18.591(1)$  кэВ.

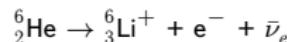


- ${}^4\text{H}_1$ ,

$^5\text{H}$ : экстремально нестабильны,  
 $T_{1/2} \approx 10^{-22}$  с и ниже; Распадаются с испусканием  $n^0$ .

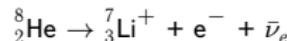
## Изотопы гелия

- $^2\text{He}$  : крайне нестабилен
- $^3\text{He}$  : стабилен.
- $^4\text{He}$  : очень стабилен – самое стабильное после  $^1\text{H}$  ядро;
- $^5\text{He}$  – очень нестабилен ( $T_{1/2} \approx 10^{-22} \text{ с}$ ),  
В процессе  $\beta$ -распада превратился бы в  $^5\text{Li}$ , который нестабилен;
- $^6\text{He}$  – нестабилен ( $T_{1/2} = 0.8 \text{ с}$ ),  $\beta$ -распад:



- ...

- $^8\text{He}$  – нестабилен ( $T_{1/2} = 0.1 \text{ с}$ ):



## Изотопы лития

- ${}^4_3\text{Li}$  :

- ${}^5_3\text{Li}$  :

- ${}^6_3\text{Li}$  :

- ${}^7_3\text{Li}$  :

- ${}^8_3\text{Li}$  :

- ${}^9_3\text{Li}$  :

- ${}^{10}_3\text{Li}$  :

- ${}^{11}_3\text{Li}$  :



## Изотопы лития

- $^4_3\text{Li}$  :  $T_{1/2} \approx 10^{-24}$  с, испускает  $\text{p}^+$  ( $\rightarrow ^3\text{He}$ );

- $^5_3\text{Li}$  :  $T_{1/2} \approx 10^{-22}$  с, испускает  $\text{p}^+$  ( $\rightarrow ^4\text{He}$ );

- $^6_3\text{Li}$  : стабилен

- $^7_3\text{Li}$  : стабилен

- $^8_3\text{Li}$  :  $T_{1/2} = 0.8$  с,  $\beta^-$ -распад ( $\rightarrow ^8\text{Be}$ );



- $^9_3\text{Li}$  :  $T_{1/2} = 0.2$  с,  $\beta^-$ -распад ( $\rightarrow ^9\text{Be}$ );

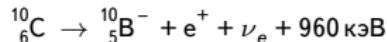
- $^{10}_3\text{Li}$  :  $T_{1/2} \approx 10^{-21}$  с, испускает  $\text{n}^0$  ( $\rightarrow ^9\text{Li}$ );

- $^{11}_3\text{Li}$  :  $T_{1/2} = 0.009$  с,  $\beta^-$ ,  $\text{n}^0$  ( $\rightarrow ^{10}\text{Be}$ ).

## Изотопы углерода

- $^{10}_6\text{C}$  :  $T_{1/2} \approx 19.3$  с,  $\beta^+$ :

- $^{11}\text{C}$  :  $T_{1/2} \approx 20.3$  мин



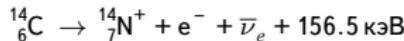
- $^{12}\text{C}$  : стабильный. Спин ядра 0, и это печально.

— — — — —

- $^{13}\text{C}$  : стабильный. Спин ядра  $\frac{1}{2}$ , и это замечательно!  
Но его  $\approx 1\%$  и это (немного) печально

— — — — —  
p<sup>+</sup> n<sup>0</sup>

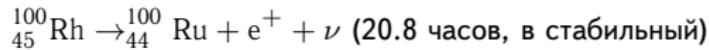
- $^{14}\text{C}$  :  $T_{1/2} = 5700$  лет;  $\tau = 8261$  год



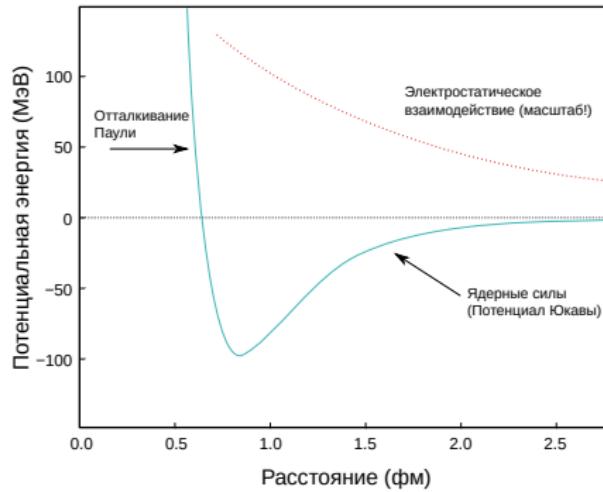
- ... экзотика

Тяжёлые ядра - много изотопов

Ru ... Rh ... Pd ... Ag



## Альфа-распад

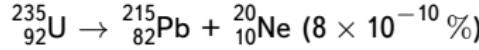
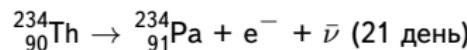
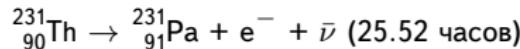
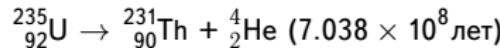


С  $Z = 83$  начинается  $\alpha$ -распад, не характерный для лёгких элементов.

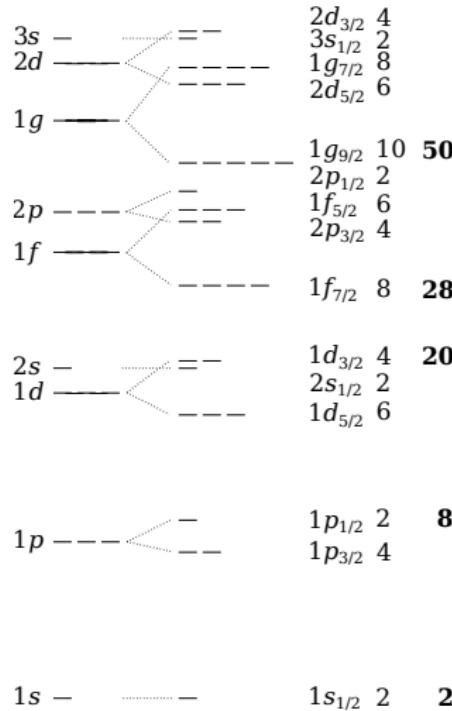
## Границы альфа-распада

Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева

Примеры  $\alpha$ ,  $\beta^-$  и кластерного распада трансурановых элементов



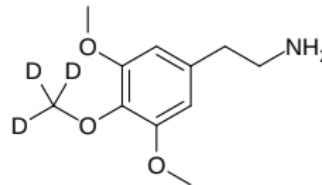
## Уровни энергии в теории оболочечного строения ядра



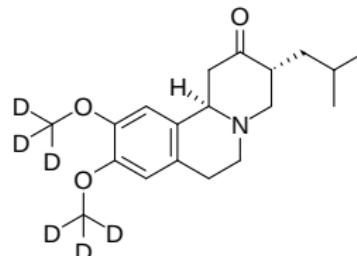
Проявления в (био) химии

В основном — дейтерированные производные

- $D_2O$  :  $T_m = 3.82^\circ C$ ;  $T_b = 101.42^\circ C$
- 4-D



- АУСТЕДО<sup>TM</sup> (деутетрабеназин)



... и порядка 10 других лекарственных средств