

# Лекция 29

## 6. Атомная физика

### 6.2. Атомное ядро

Состав и характеристики атомного ядра. Изотопы. Ядерные силы. Устойчивость атомных ядер. Энергия связи. Деление тяжелых ядер и синтез легких.

Энергия активации. Ядерные реакции. Ядерная энергетика. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Правило смещения.  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -распад. Элементарные частицы. Кварки. Взаимодействие и взаимопревращения частиц.

## Состав и характеристики атомного ядра

Размер атома  $\sim 10^{-10}$  м, размер ядра  $\sim 10^{-15}$  м.

Ядро состоит из нуклонов – протонов и нейтронов.

Нейтрон – частица электрически нейтральная, а протон имеет положительный заряд равный заряду электрона.

Масса протона:  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг  $\approx 1836 m_e \approx 1$  а.е.м.

Масса нейтрона:  $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$  кг  $\approx 1839 m_e \approx 1$  а.е.м.

Атомная единица массы:  $1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} {}^{12}_6\text{C} = 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг

Заряд ядра =  $Ze$ , где  $Z$  – **зарядовое число ядра**, равное количеству протонов в ядре. Также и числу электронов.

Относительная атомная масса  $A$  (массы атома этого элемента выраженная в атомных единицах массы) = числу нуклонов в ядре (числу протонов и нейтронов вместе) – **массовое число  $A$** .

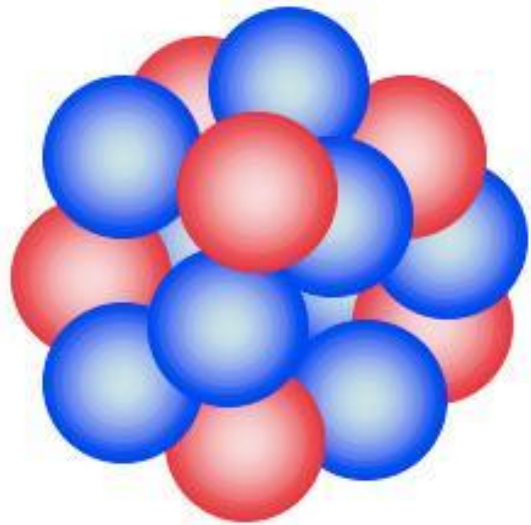
Ядра с одинаковыми зарядовыми числами  $Z$ , но с разными массовыми числами  $A$  (т.е. с разным числом нейтронов  $N = A - Z$ ), называются **изотопами**, а ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  – **изобарами**. В подавляющем большинстве случаев изотопы одного химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами.



Вернер Карл  
Гейзенберг  
1901-1976  
Ноб. лаур.  
1932



# Изотопы



Водород ( $Z = 1$ ) имеет три изотопа, кислород – 3, олово – 10, уран – 2 и т.д.



${}_{1}^1\text{H}$  – протий ( $Z = 1, N = 0$ )

${}_{1}^2\text{H}$  – дейтерий ( $Z = 1, N = 1$ )

${}_{1}^3\text{H}$  – тритий ( $Z = 1, N = 2$ )

Ядра не имеют резких границ. В центре ядра плотность ядерного вещества выше, с увеличением расстояния от центра постепенно уменьшается до нуля. "Радиусом" считается то расстояние, на котором плотность уменьшается в 2 раза. Большинство ядер еще и деформировано в виде вытянутых и сплюснутых эллипсоидов.

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В										Энергетический уровень								
		I		II		III		IV		V			VI		VII		VIII			
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		а	б	а	б	б		а	
1	1	<b>H</b> 1 ВОДОРОД 1,008																<b>He</b> 2 ГЕЛИЙ 4,003	к	
2	2	<b>Li</b> 3 ЛИТИЙ 6,941	<b>Be</b> 4 БЕРИЛЛИЙ 9,0122	<b>B</b> 5 БОР 10,811	<b>C</b> 6 УГЛЕРОД 12,011	<b>N</b> 7 АЗОТ 14,007	<b>O</b> 8 КИСЛОРОД 15,999	<b>F</b> 9 ФТОР 18,998										<b>Ne</b> 10 НЕОН 20,179	лп	
3	3	<b>Na</b> 11 НАТРИЙ 22,99	<b>Mg</b> 12 МАГНИЙ 24,312	<b>Al</b> 13 АЛЮМИНИЙ 26,992	<b>Si</b> 14 КРЕМНИЙ 28,086	<b>P</b> 15 ФОСФОР 30,974	<b>S</b> 16 СЕРА 32,064	<b>Cl</b> 17 ХЛОР 35,453										<b>Ar</b> 18 АРГОН 39,948	лп-е	
4	4	<b>K</b> 19 КАЛИЙ 39,102	<b>Ca</b> 20 КАЛЬЦИЙ 40,08	<b>Sc</b> 21 СКАНДИЙ 44,956	<b>Ti</b> 22 ТИТАН 47,956	<b>V</b> 23 ВАНАДИЙ 50,941	<b>Cr</b> 24 ХРОМ 51,996	<b>Mn</b> 25 МАРГАНЕЦ 54,938	<b>Fe</b> 26 ЖЕЛЕЗО 55,849	<b>Co</b> 27 КОБАЛЬТ 58,933	<b>Ni</b> 28 НИКЕЛЬ 58,7								лп-е-е	
	5	<b>Cu</b> 29 МЕДЬ 63,546	<b>Zn</b> 30 ЦИНК 65,37	<b>Ga</b> 31 ГАЛЛИЙ 69,72	<b>Ge</b> 32 ГЕРМАНИЙ 72,59	<b>As</b> 33 МЫШЬЯК 74,922	<b>Se</b> 34 СЕЛЕН 78,96	<b>Br</b> 35 БРОМ 79,904											<b>Kr</b> 36 КРИПТОН 83,8	лп-е-е
5	6	<b>Rb</b> 37 РУБИДИЙ 85,468	<b>Sr</b> 38 СТРОНЦИЙ 87,62	<b>Y</b> 39 ИТРИЙ 88,906	<b>Zr</b> 40 ЦИРКОНИЙ 91,22	<b>Nb</b> 41 НИОБИЙ 92,906	<b>Mo</b> 42 МОЛИБДЕН 95,94	<b>Tc</b> 43 ТЕХНЕЦИЙ [99]	<b>Ru</b> 44 РУТЕНИЙ 101,07	<b>Rh</b> 45 РОДИЙ 102,906	<b>Pd</b> 46 ПАЛЛАДИЙ 106,4									лп-е-е-е
	7	<b>Ag</b> 47 СЕРЕБРО 107,868	<b>Cd</b> 48 КАДМИЙ 112,41	<b>In</b> 49 ИНДИЙ 114,82	<b>Sn</b> 50 ОЛОВО 118,69	<b>Sb</b> 51 СУРЬМА 121,75	<b>Te</b> 52 ТЕЛЛУР 127,6	<b>I</b> 53 ИОД 126,905											<b>Xe</b> 54 КСЕНОН 131,3	лп-е-е-е
6	8	<b>Cs</b> 55 ЦЕЗИЙ 132,905	<b>Ba</b> 56 БАРИЙ 137,34	<b>57-71</b> ЛАНТАНОИДЫ	<b>Hf</b> 72 ГАФНИЙ 178,49	<b>Ta</b> 73 ТАНТАЛ 180,948	<b>W</b> 74 ВОЛЬФРАМ 183,85	<b>Re</b> 75 РЕНИЙ 186,207	<b>Os</b> 76 ОСМИЙ 190,2	<b>Ir</b> 77 ИРИДИЙ 192,22	<b>Pt</b> 78 ПЛАТИНА 195,09									лп-е-е-е-е
	9	<b>Au</b> 79 ЗОЛОТО 196,967	<b>Hg</b> 80 РУТУТЬ 200,59	<b>Tl</b> 81 ТАЛЛИЙ 204,37	<b>Pb</b> 82 СВИНЕЦ 207,19	<b>Bi</b> 83 ВИСМУТ 208,98	<b>Po</b> 84 ПОЛОНИЙ [210]	<b>At</b> 85 АСТАТ [210]											<b>Rn</b> 86 РАДОН [222]	лп-е-е-е-е-е
7	10	<b>Fr</b> 87 ФРАНЦИЙ [223]	<b>Ra</b> 88 РАДИЙ [226]	<b>89-103</b> АКТИНОИДЫ	<b>Rf</b> 104 РЕЗЕРФОРДИЙ [261]	<b>Db</b> 105 ДУБНИЙ [262]	<b>Sg</b> 106 СИБОРГИЙ [263]	<b>Bh</b> 107 БОРИЙ [262]	<b>Hn</b> 108 ХАНИЙ [265]	<b>Mt</b> 109 МЕЙТНЕРИЙ [266]	110									лп-е-е-е-е-е-е
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		$R_2O$	$RO$	$R_2O_3$	$RO_2$	$R_2O_5$	$RO_3$	$R_2O_7$	$RO_4$											
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ						$RH_4$	$RH_3$	$H_2R$	$HR$											

**Л А Н Т А Н О И Д Ы**

57 <b>La</b> ЛАНТАН 138,906	58 <b>Ce</b> ЦЕРИЙ 140,12	59 <b>Pr</b> ПРАЗЕОДИЙ 140,908	60 <b>Nd</b> НЕОДИМ 144,24	61 <b>Pm</b> ПРОМЕТИЙ [145]	62 <b>Sm</b> САМАРИЙ 150,4	63 <b>Eu</b> ЕВРОПИЙ 151,96	64 <b>Gd</b> ГАДОЛИНИЙ 157,25	65 <b>Tb</b> ТЕРБИЙ 158,926	66 <b>Dy</b> ДИСПРОЗИЙ 162,5	67 <b>Ho</b> ГОЛЬМИЙ 164,93	68 <b>Er</b> ЭРБИЙ 167,26	69 <b>Tm</b> ТУЛИЙ 168,934	70 <b>Yb</b> ИТТЕРБИЙ 173,04	71 <b>Lu</b> ЛЮТЕЦИЙ 174,97
-----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

**А К Т И Н О И Д Ы**

89 <b>Ac</b> АКТИНИЙ [227]	90 <b>Th</b> ТОРИЙ 232,038	91 <b>Pa</b> ПРОТАКТИНИЙ [231]	92 <b>U</b> УРАН 238,29	93 <b>Np</b> НЕПУТНИЙ [237]	94 <b>Pu</b> ПЛУТОНИЙ [244]	95 <b>Am</b> АМЕРИЦИЙ [243]	96 <b>Cm</b> КЮРИЙ [247]	97 <b>Bk</b> БЕРКЛИЙ [247]	98 <b>Cf</b> КАЛИФОРНИЙ [251]	99 <b>Es</b> ЭЙНШТЕЙНИЙ [254]	100 <b>Fm</b> ФЕРМИЙ [257]	101 <b>Md</b> МЕНДЕЛЕВИЙ [258]	102 <b>No</b> НОБЕЛИЙ [259]	103 <b>Lr</b> ЛОУРЕНСИЙ [260]
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

# Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

Group 1 Группа 1	1a 1.00794 1s <sup>1</sup> -259.14 -252.87 2.02/-	
	Hydrogen Водород Hydrogenium	
2 Группа 2	6.941 9.012182 2s <sup>2</sup> 180.54 1347 0.98/0.97	
	Lithium Литий	
3 Группа 3	22.989770 24.3050 [Ne]3s <sup>1</sup> 97.86 883.15 0.93/1.01	
	Sodium Натрий (Natrium)	
4 Группа 4	19.0 20.0 [Ar]4s <sup>1</sup> 63.65 774 0.82/0.91	
	Potassium Калий (Kalium)	
5 Группа 5	37.0 38.0 [Kr]5s <sup>1</sup> 85.4678 87.62 88.90585	
	Rubidium Рубидий	
6 Группа 6	55.0 56.0 [Xe]6s <sup>1</sup> 132.90545 137.327	
	Caesium Цезий (Caesium)	
7 Группа 7	87.0 88.0 [Rn]7s <sup>1</sup> 223 226	
	Francium Франций	

Атомная масса, относительная  
 Атомный номер. Обозначение  
 Распределение электронов  
 Температура плавления (°C)  
 Температура кипения (°C)  
 Электроотрицательность  
 (по Полингу/по Аллреду и Рохову)  
 Название  
 Латинское название

**186.207**  
**75Re**  
 [Xe] 4f<sup>14</sup>5d<sup>5</sup>6s<sup>2</sup>  
**3180**  
**5627**  
 1.9/1.46  
**Rhenium**  
**Рений**  
*Rhenium*

Atomic mass, relative  
 Atomic No. Symbol  
 Electron configuration  
 Melting point (°C)  
 Boiling point (°C)  
 Electronegativity  
 (Pauling/Allred & Rochov)  
 Name  
 Latin name

Groups 1...18 IUPAC 1989  
 Groups IA...VIII...0 IUPAC 1970  
 Группы 1...18 ИЮПАК, 1989  
 Группы IA...VIII...0 ИЮПАК, 1970

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
B	C	N	O	F	Ne			Al	Si	P	S	Cl	Ar
10.811	12.011	14.00674	15.9994	18.9984032	20.1797			26.981538	28.0855	30.973761	32.066	35.4527	39.948
Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon			Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulphur	Chlorine	Argon
Бор	Углерод	Азот	Кислород	Фтор	Неон			Алюминий	Кремний	Фосфор	Сера	Хлор	Аргон

\* Element has no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995)  
 \* Элемент не имеет устойчивых изотопов. Для него в скобках приведено значение массового числа (число нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (ИЮПАК, 1995)  
 ( ) Alternative english name  
 [ ] American spelling of the element's name  
 ( ) Альтернативное английское название  
 [ ] Американское написание названия элемента

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
140.116	140.90765	144.24	(145)	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.04	174.967
Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Hoiumium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
Церий	Прасеодимий	Неодимий	Прометий	Самарий	Европий	Гадолиний	Тербий	Диспрозий	Гольмий	Эрбий	Тулий	Иттербий	Лютеций

© P.S. Сайфуллин, 2004  
 © R.S. Сайфуллин, A.R. Сайфуллин, 2004  
 Мар. 2004

## Ядерные силы, их свойства

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Они называются **ядерными силами**. Ядерные силы не являются гравитационными или электромагнитными, значительно их превышают, поэтому относятся к **сильным взаимодействиям**.

1) Ядерные силы являются силами **притяжения**.

2) **Короткодействующие** – их действие проявляется только на расстояниях  $< 10^{-15}$  м. Тут они  $\sim$  в 100 раз сильнее кулоновских. На больших расстояниях очень быстро уменьшаются до нуля.

3) **Зарядо-независимые** – силы, действующие между 2 протонами, 2 нейтронами или протоном и нейтроном, одинаковы по величине.

4) Им свойственно **насыщение**, т.е. каждый нуклон в ядре может взаимодействовать только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов.

5) **Центральные** – действуют по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.



# Энергия связи атомного ядра

Масса ядер точно измеряется с помощью масс-спектрометров – приборов, разделяющих с помощью магнитных и электрических полей пучки частиц с различным отношением заряда к массе.

**Масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов !**

Т.е. при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия – **энергия связи атомного ядра.**

Для разделения ядра такую же энергию надо затратить.

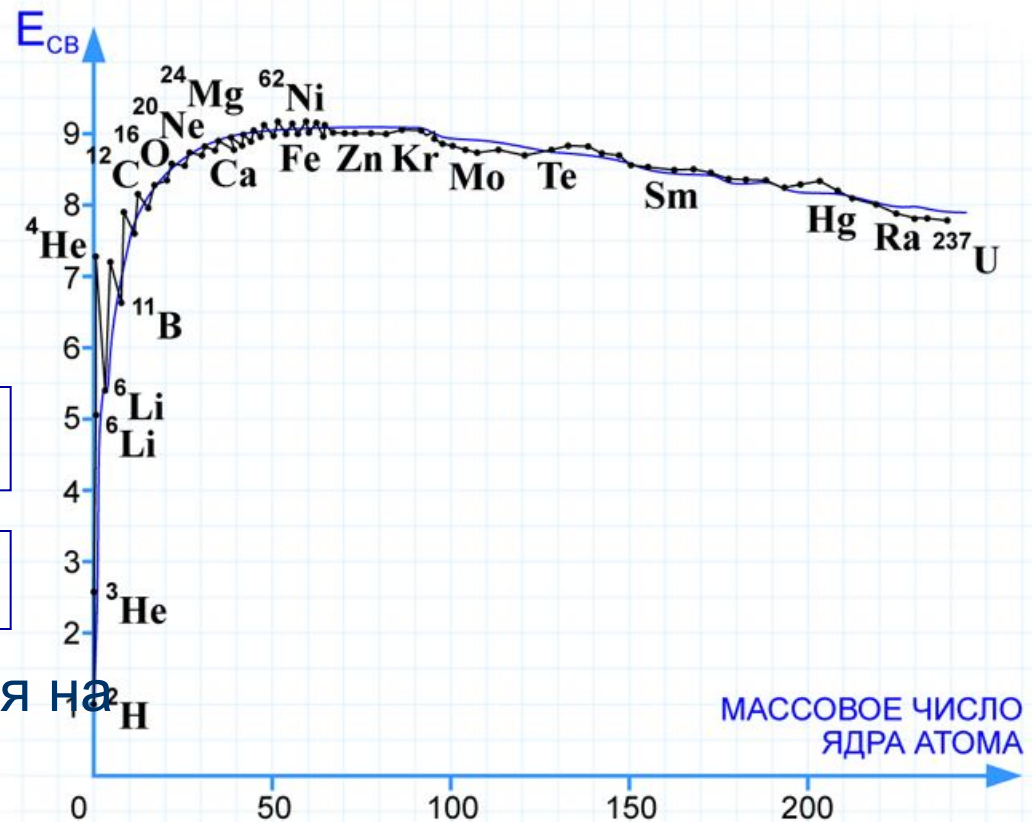
Уравнение Эйнштейна:

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2$$

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{я}$$

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z)m_n - m_{ам}$$

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется **удельной энергией связи.**



## Деление тяжелых ядер и синтез легких

Энергетически возможны (выгодны) оказываются два процесса:

- 1) Деление тяжелых ядер на нескольких более легких.
- 2) Слияние (синтез) нескольких легких ядер в одно ядро.

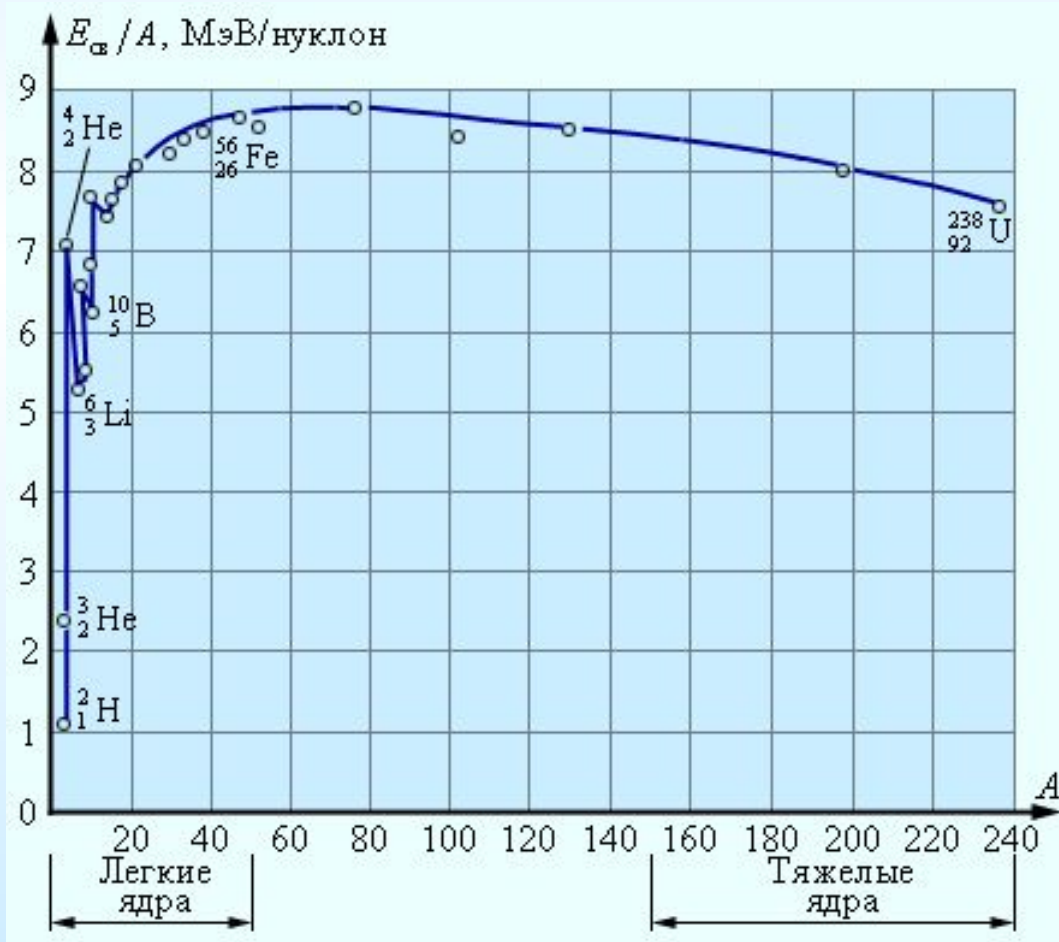
Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии !

Ядра с массовым числом  $A$  от 50 до 60 энергетически наиболее выгодные.

Так, деление ядра с  $A = 240$  (7,5 МэВ) на 2 ядра с  $A = 120$  (8,5 МэВ) дает 240 МэВ.

Слияние 2 ядер тяжелого водорода (дейтерия)  ${}^2_1\text{H}$  в ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$  – 24 МэВ.

Для сравнения: соединение атома углерода с 2 атомами кислорода (сгорание угля) – 5 эВ.





## **Энергия активации**

Для процесса деления ядру необходима дополнительная энергия – **энергия активации**, которая потом вернется обратно, сложившись с энергией, выделяющейся за счет изменения энергии связи.

Так, для синтеза двух легких ядер их необходимо сблизить на расстояние  $\sim 10^{-15}$  м, преодолев кулоновское отталкивание.

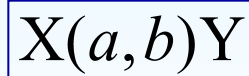
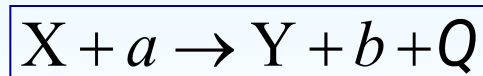
Для этого ядра должны двигаться с огромными скоростями, соответствующими несколько сот миллионов кельвинов.

Такой процесс синтеза легких ядер – **термоядерная реакция**, протекает только в недрах Солнца и звезд. На Земле пока только неуправляемый термоядерные реакции при взрыве **водородных бомб**. Там сначала взрывается обычная атомная бомба.

Для разделения тяжелого ядра урана или плутония тоже сначала нужно затратить энергию (пройти промежуточное состояние, энергия которого превышает энергию основного состояния ядра). Обычно ядру неоткуда взять эту энергию, поэтому спонтанно ядра не делятся. Энергия активации может быть сообщена тяжелому ядру захваченным им дополнительным нейтроном. Такой процесс лежит в основе действия **ядерных реакторов** и **атомной бомбы**.

# Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется процесс взаимодействия ядра с элементарной частицей или другим ядром, приводящий к преобразованиям ядра (ядер). Должны выполняться законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и ряда других квантовых (спина и пр.) физических величин.



$$Q = \left( \sum_i m_i^{\text{нач}} - \sum_i m_i^{\text{кон}} \right) \cdot c^2$$

Реакция называется **экзотермической**, если  $Q > 0$  (с выделением энергии) и **эндотермической** если  $Q < 0$  (с поглощением энергии).

В качестве легких частиц бывают нейтрон ( $n$ ), протон ( $p$ ), дейтрон (ядро дейтерия,  $d$ ),  $\alpha$ -частица (ядро гелия,  $\alpha$ ) и  $\gamma$ -фотон ( $\gamma$ ).

Реакции, вызываемые не очень быстрыми частицами, протекают в два этапа, с образованием промежуточного (**составного**) ядра.



Если испущенная частица тождественна с захваченной, то процесс является просто **рассеянием** частиц. Если не тождественна, то имеет место **ядерная реакция**.

# Классификация ядерных реакций

1) По роду участвующих частиц:

нейтрон, протон, дейтрон и пр.

2) По энергии частиц:

малые энергии  $\sim 1$  эВ

(столкновение с нейтронами),

средние энергии  $\sim 1$  МэВ

( $\gamma$ -кванты,  $\alpha$ -частицы),

высокие энергии  $\sim 10^3$  МэВ

(рождение новых элементарных частиц).

3) По роду участвующих ядер:

на легких ядрах ( $A < 50$ ),

на средних ядрах ( $50 < A < 100$ ),

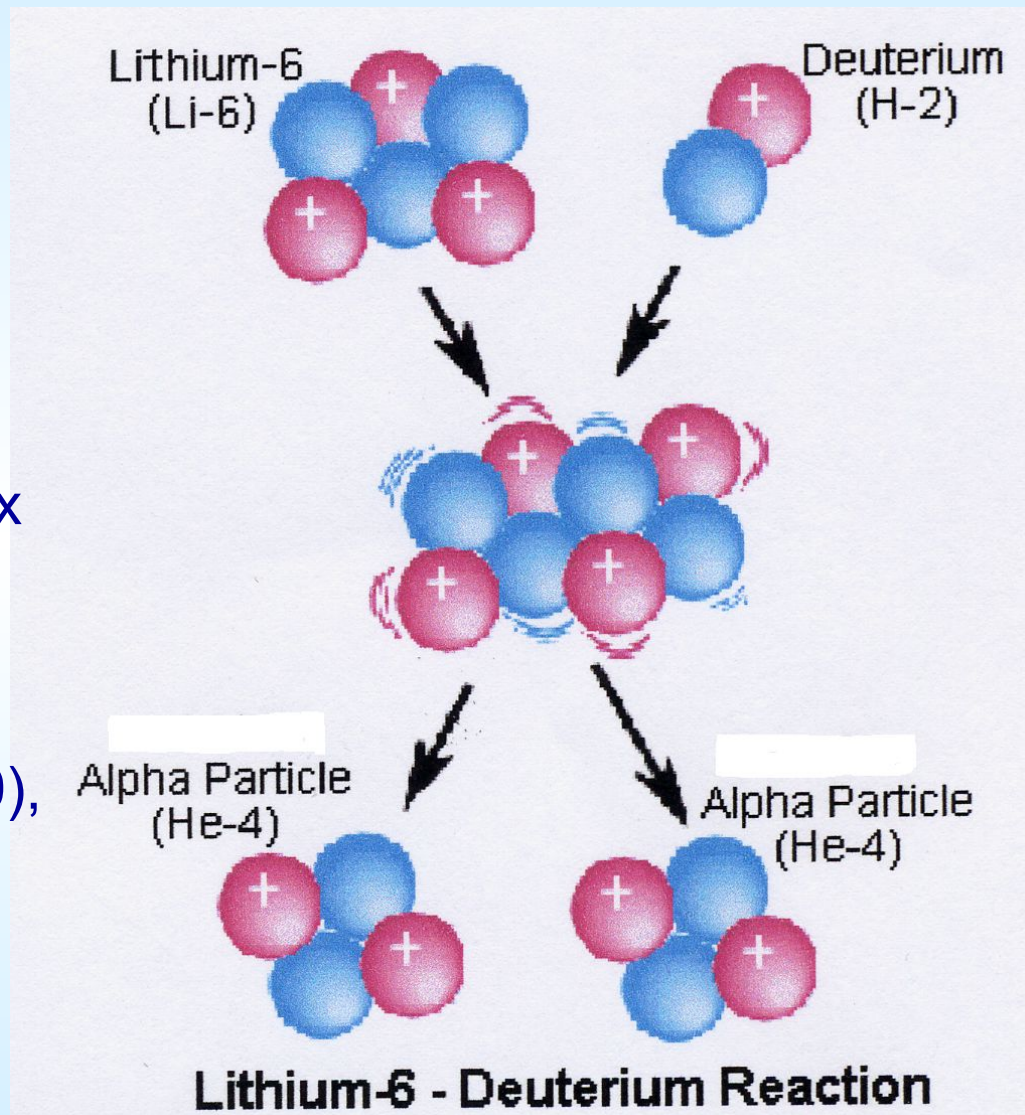
на тяжелых ядрах ( $A > 100$ ).

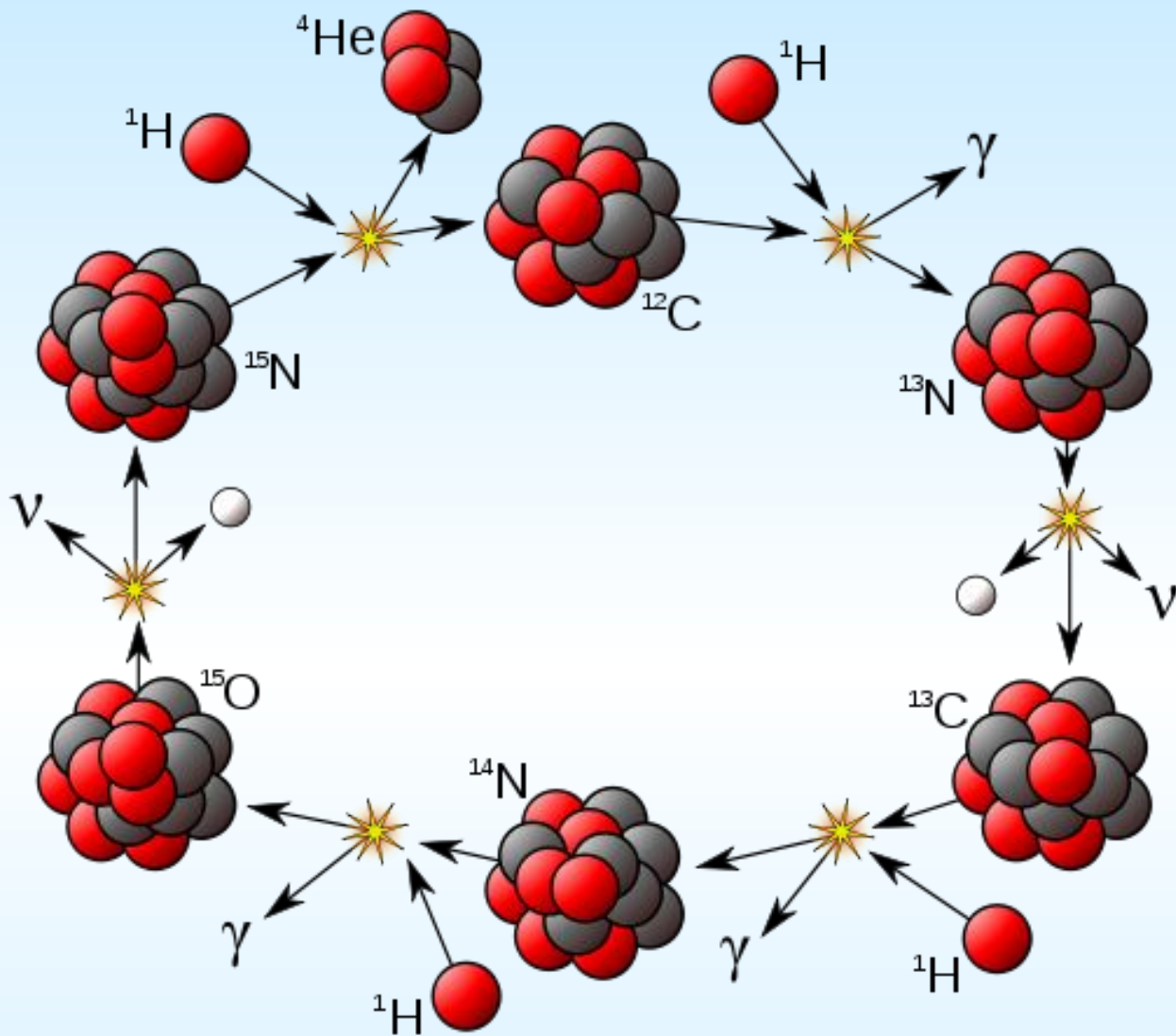
4) По характеру ядерных превращений:




с испусканием нейтронов,

заряженных частиц (ионов),

$\gamma$ -квантов (реакция захвата).



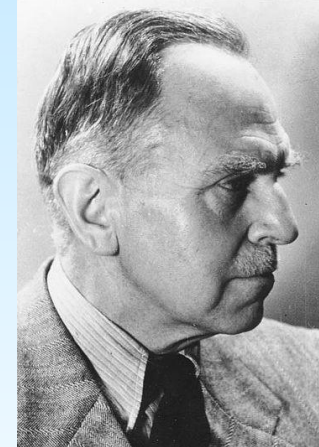
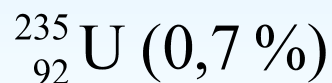
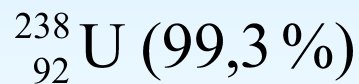


	Proton	$\gamma$	Gamma Ray
	Neutron	$\nu$	Neutrino
	Positron		

## Деление ядер урана (Ган и Штрассман 1939)

При бомбардировке ядра урана нейтронами возникают два осколка – элементы средней части таблицы Менделеева – радиоактивные изотопы бария ( $Z = 56$ ) и криптона ( $Z = 36$ ).

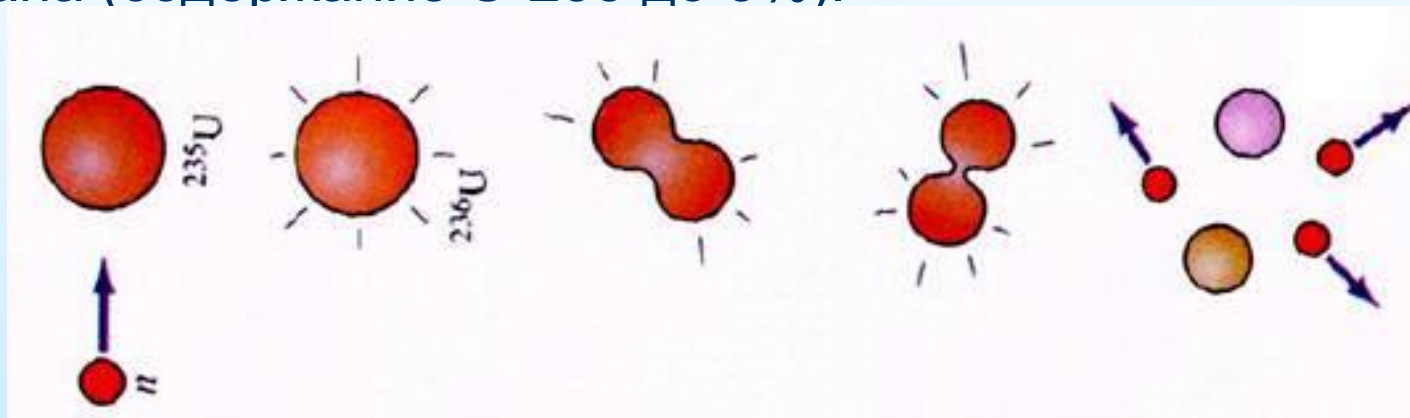
В природной урановой руде:



Отто Ган  
1879-1968  
Ноб. лаур.  
1944

Реакция деления U-235 наиболее интенсивно идет на медленных (тепловых) нейтронах, тогда как для деления U-238 нужны очень быстрые нейтроны с энергией  $\sim 1$  МэВ.

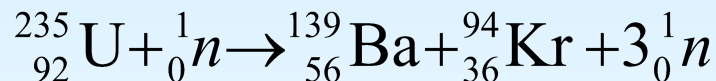
Для реакции требуется обогащенная смесь изотопов урана (содержание U-235 до 3%).



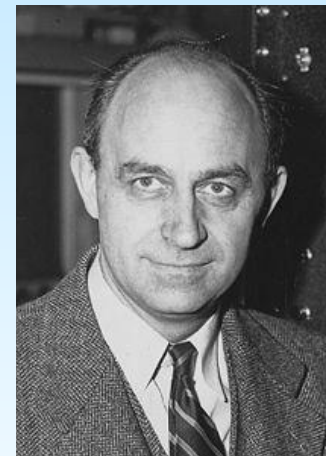
Фридрих  
Вильгельм  
Штрассман  
1902-1980

# Ядерный (атомный) реактор (Ферми 1942)

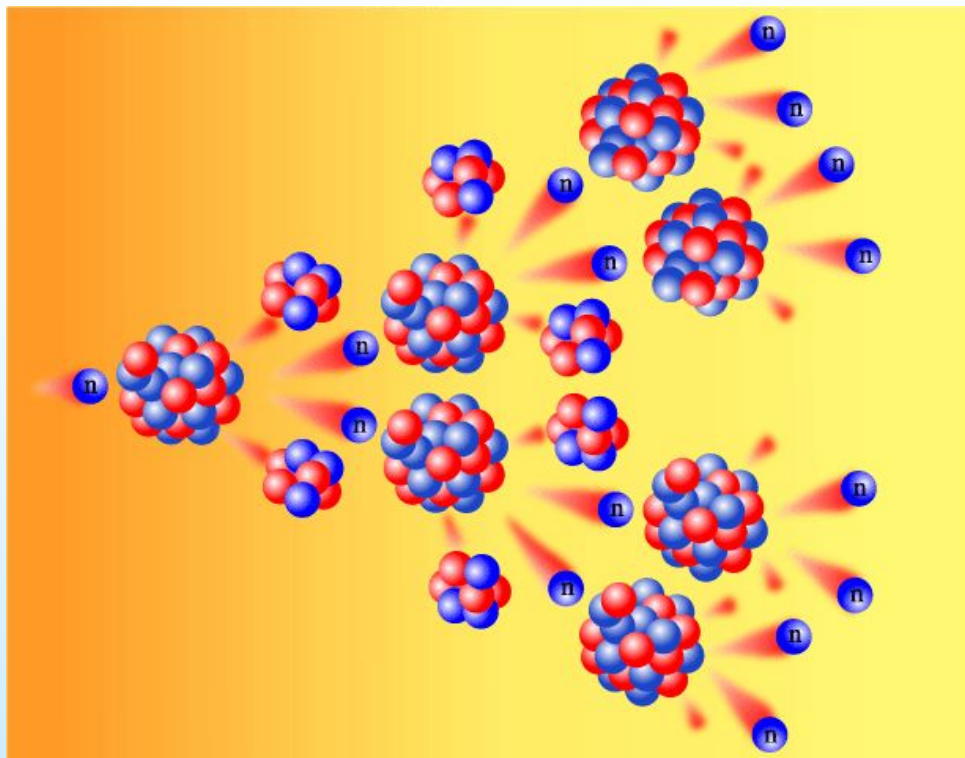
Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется **атомным реактором**.



Энергия, выделяющаяся при делении 1 ядра урана огромна – ~200 МэВ. При полном делении всех ядер из 1 г урана выделится такая же энергия, как при сжигании 3 т угля или 2,5 т нефти.

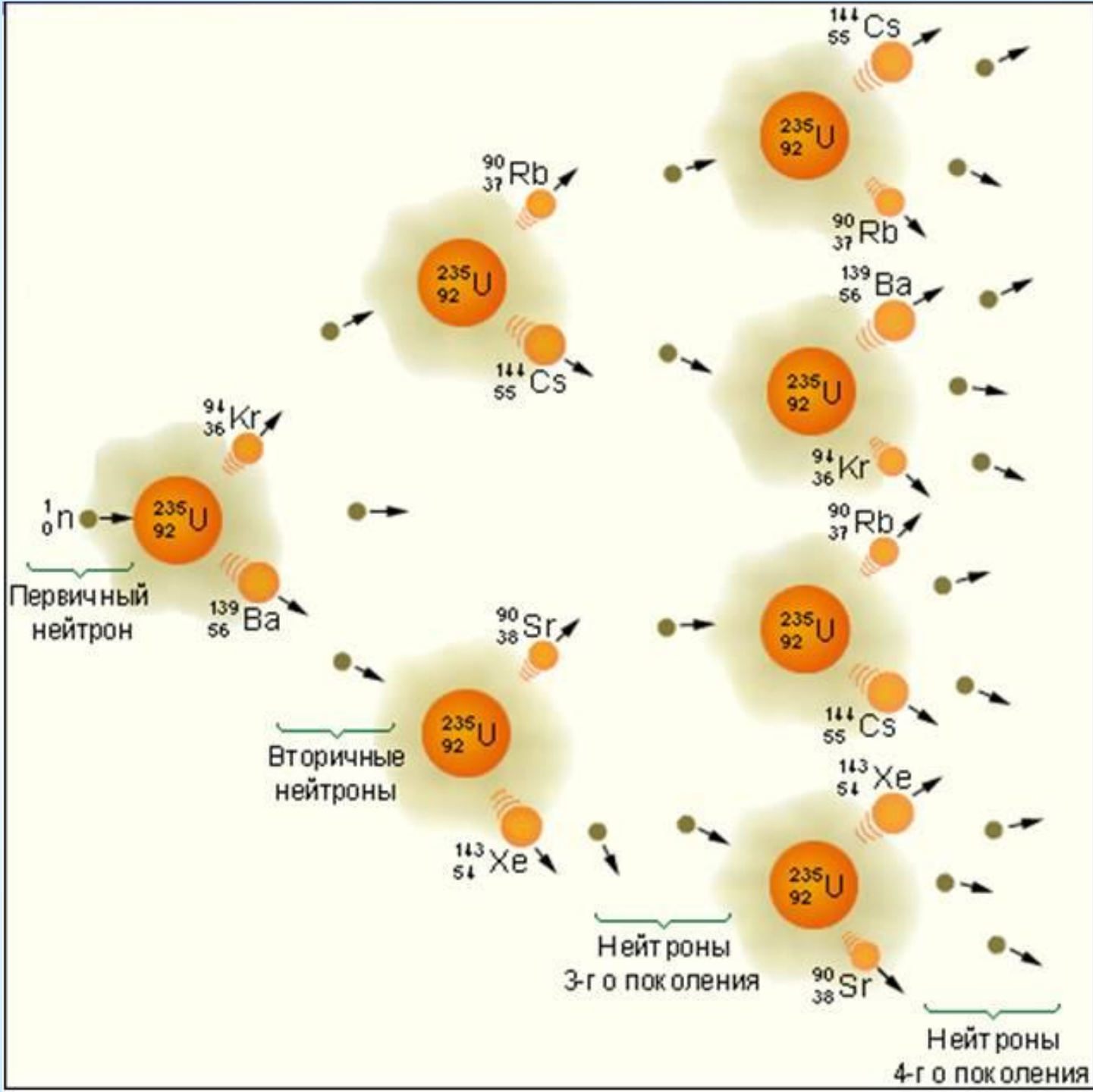


Энрико Ферми  
1901-1954  
Ноб. лаур.  
1938



## Цепная реакция Цепной реакцией

называется лавинообразный процесс деления ядер урана. Необходимо что масса урана превышала **критическую массу** (50 кг). Ее можно многократно уменьшить используя графит или тяжелую воду  $\text{D}_2\text{O}$  – замедлители нейтронов, а также оболочку из бериллия.



## Ядерный (атомный) реактор

В России первый реактор построен в 1946 г. под руководством И.В. Курчатова. Первая электростанция на медленных нейтронах была построена в Обнинске в 1954 г мощностью 5 МВт.

В активную зону вводятся регулирующие стержни, содержащие кадмий или бор, способный интенсивно поглощать нейтроны. Это позволяет управлять скоростью цепной реакции.

Активная зона охлаждается прокачиваемым теплоносителем (вода, жидкий натрий с  $t_{пл} = 98 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), который затем отдает тепло воде, превращая ее в пар высокого давления в парогенераторе.

Для избежания утечки радиации контуры теплоносителя и парогенератора работают по замкнутым циклам.

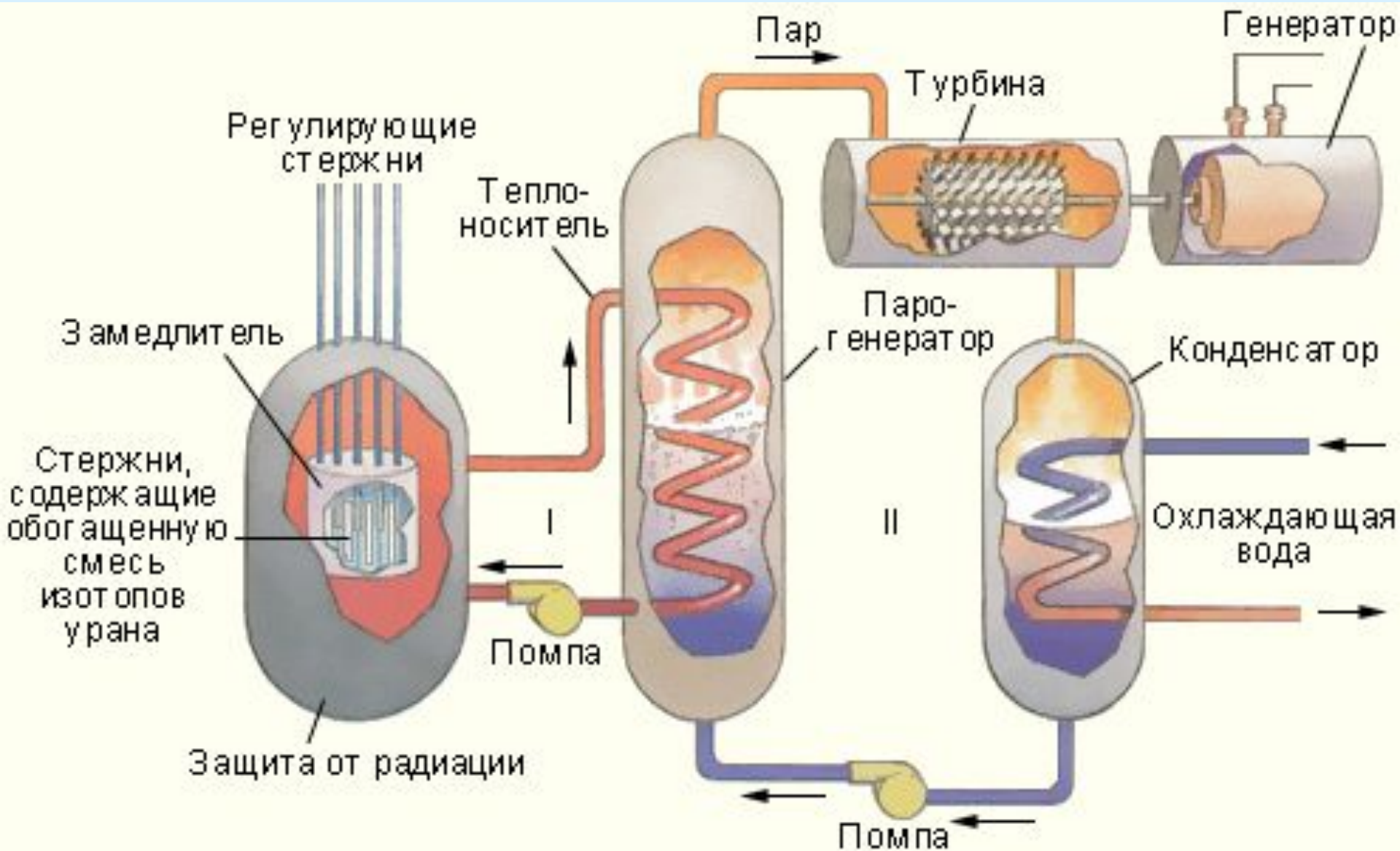
Турбина атомной электростанции является тепловой машиной с КПД  $\sim 30\%$ . Остальное тепло уносится водой, охлаждающей реактор и вызывает локальных перегрев естественных водоемов.

Три главные проблемы атомной энергетики:

- 1) Экологические проблемы перегрева водоемов.
- 2) Проблема радиационной безопасности при авариях.
- 3) Проблема утилизации радиоактивных отходов деления урана.



# Ядерный (атомный) реактор

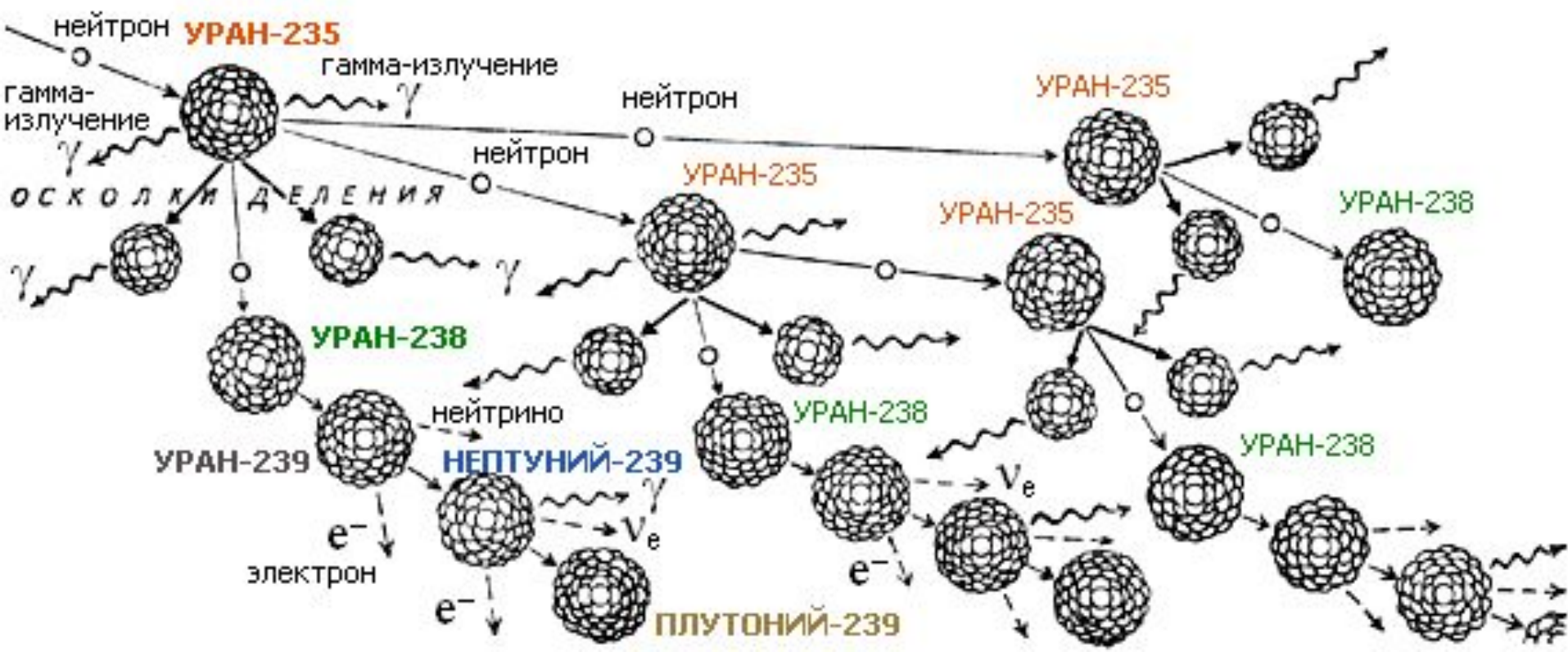


# Реактор на быстрых нейтронах

Ядерным горючим для них служит обогащенная смесь, содержащая не менее 15% изотопа U-235.

Остальной же U-238, поглощая нейтроны, посредством двух последовательных  $\beta$ -распадов превращается в ядра плутония, который потом также можно использовать в качестве ядерного топлива.

На 1 кг U-235 можно одновременно получить до 1,5 кг плутония.



## Термоядерная реакция (1953)

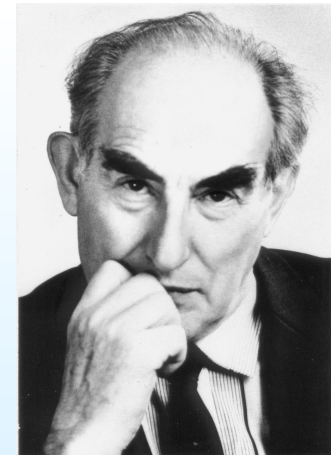
При слиянии двух легких ядер дейтерия и трития образуется наибольшее количество энергии на единицу массы:  $Q = 17,6 \text{ МэВ} = 3,5 \text{ МэВ/нуклон}$ .



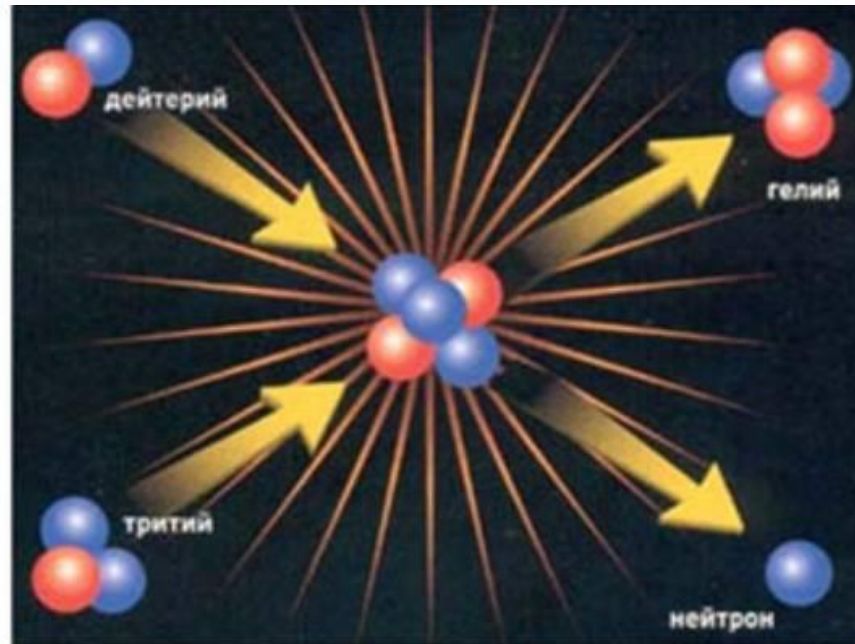
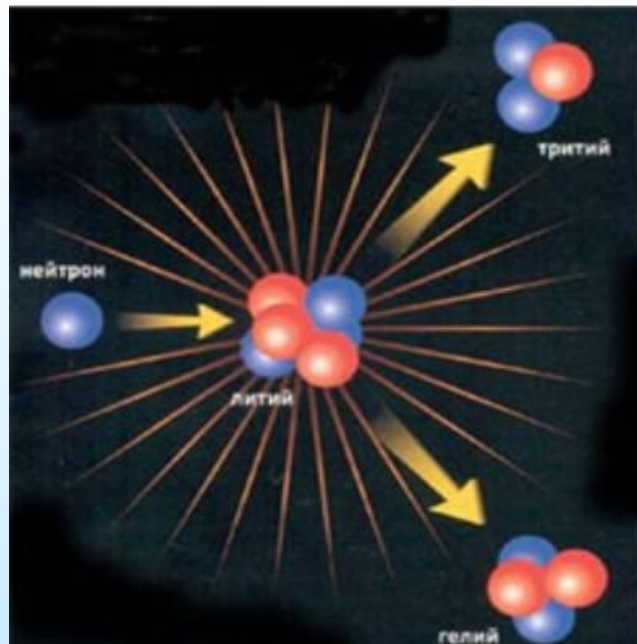
Наперсток, наполненный дейтерием, производит энергию, эквивалентную 20 т угля. Содержание  $\text{D}_2$  в природном водороде 0,012-0,016 %. Получают дейтерий путем электролиза воды (из 100 л воды выделяется 7,5 мл 60%-ного  $\text{D}_2\text{O}$ ).



Андрей  
Дмитриевич  
Сахаров  
1921-1989



Виталий  
Лазаревич  
Гинзбург  
1916-2009



# Радиоактивность (Беккерель 1896)

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение нестабильных ядер изотопов в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц.

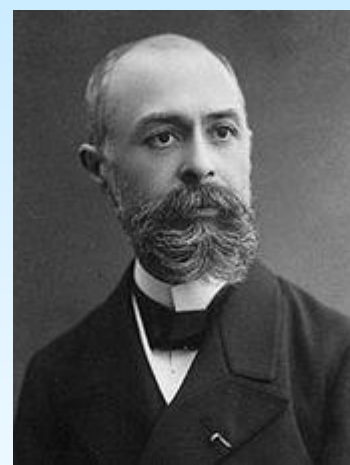
К числу радиоактивных процессов относятся:

- 1)  $\alpha$ -распад;
- 2)  $\beta$ -распад (в том числе электронный захват);
- 3)  $\gamma$ -излучение;
- 4) спонтанное деление тяжелых ядер;
- 5) протонная радиоактивность.

Почти 90% из 2500 известных атомных ядер нестабильны.

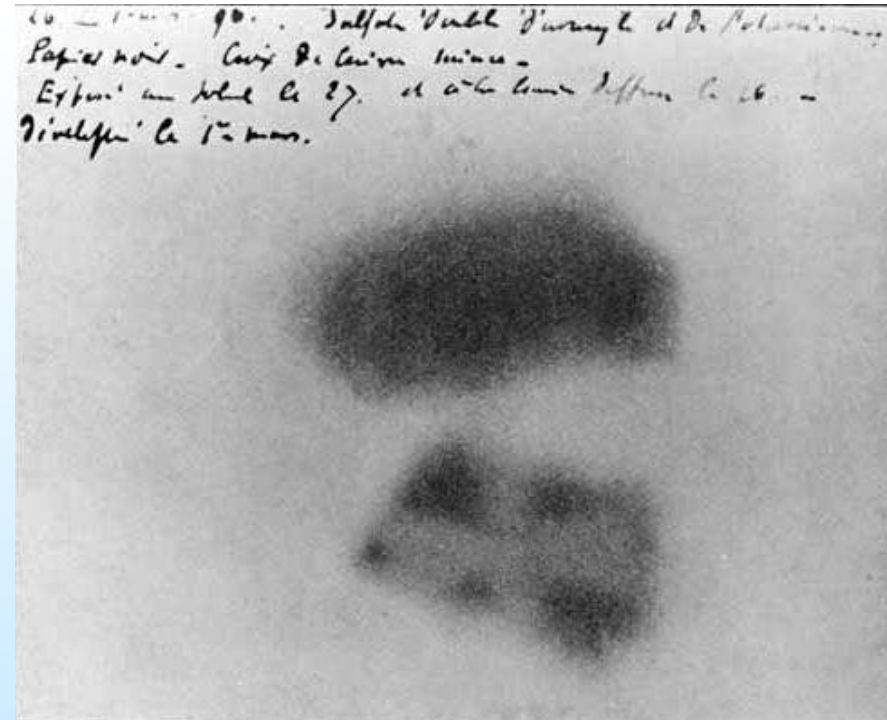
У больших ядер нестабильность возникает из-за конкуренции между притяжением нуклонов ядерными силами и кулоновским отталкиванием протонов.

Стабильных ядер с зарядовым числом  $Z > 83$  и массовым числом  $A > 209$  не существует.



Антуан Анри  
Беккерель  
1852-1908

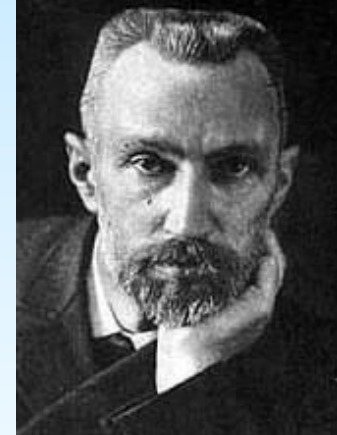
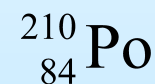
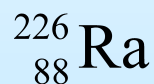
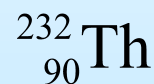
Ноб. лаур. 1903



Но радиоактивными могут оказаться и ядра атомов с существенно меньшими значениями чисел  $Z$  и  $A$ . Если ядро содержит значительно больше протонов, чем нейтронов, то нестабильность обуславливается избытком энергии кулоновского взаимодействия. Ядра, которые содержат избыток нейтронов, оказываются нестабильными вследствие того, что масса нейтрона превышает массу протона.



В 1898 г. М. и П. Кюри обнаружили радиоактивность тория и открыли два новых радиоактивных элемента – радий и полоний. Переработав 8 т урановой руды, они выделили 1/100 г вещества в миллион раз более радиоактивного, чем чистый уран – радий.



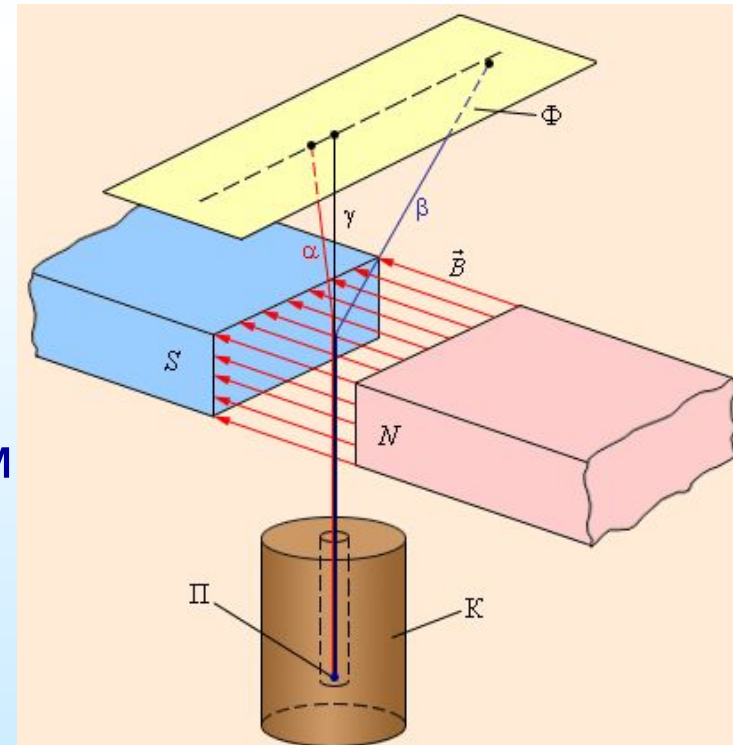
Пьер Кюри  
1859–1906  
Ноб. лаур. 1903



Мария  
Склодовская-  
Кюри  
1867–1934  
Ноб. лаур.  
1903, 1911

# Виды излучения

- $\alpha$ -излучение** – поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$  (заряд  $2e$ , масса  $4 \text{ а.е.м}$ ).  
Обладает высокой ионизирующей и малой проникающей способностью (поглощается слоем алюминия толщиной  $0,05 \text{ мм}$ ).  
Отклоняется электрическим и магнитным полем.
- $\beta$ -излучение** – поток электронов или позитронов (заряд  $= e$ ).  
Обладает меньшей ( $10^{-2}$ ) ионизирующей и большей проникающей способностью (поглощается слоем алюминия толщиной  $2 \text{ мм}$ ).  
Отклоняется электрическим и магнитным полем.
- $\gamma$ -излучение** – электромагнитное излучение (поток фотонов) с малой длиной волны ( $\lambda < 10^{-10} \text{ м}$ ). Обладает очень слабой ионизирующей и очень сильной проникающей способностью (поглощается слоем свинца толщиной  $5\text{-}10 \text{ см}$ ). Не отклоняется электрическим и магнитным полем. При прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.



## Закон радиоактивного распада (1903)

Теория радиоактивного распада полагает, что ядра распадаются спонтанно и независимо друг от друга, подчиняясь законом статистики.

Число ядер  $\Delta N$ , распадающихся в среднем за время  $\Delta t$ , пропорционально этому времени и общему числу еще не распавшихся ядер  $N$ :

$$dN = -\delta N dt \quad N = N_0 e^{-\delta t}$$

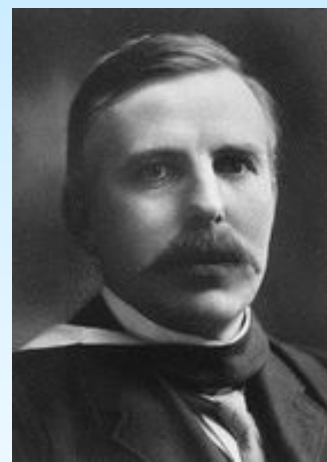
$\delta$  – постоянная радиоактивного распада (знак минус показывает что число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается).

Число не распавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону.

Среднее время жизни ядра  $\tau$  – величина, обратная постоянной радиоактивного распада.

Период полураспада  $T_{1/2}$  – время, за которое исходное число радиоактивных ядер уменьшается в 2 раза:

$$\tau = \frac{1}{\delta} \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\delta T_{1/2}} \quad \rightarrow \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\delta} = \frac{0,693}{\delta}$$



Эрнест  
Резенфорд  
1871-1937  
Ноб. лаур.  
1908



Фредерик Содди  
1877-1956  
Ноб. лаур. 1921

Периоды полураспада для естественных радиоактивных элементов колеблются от 10-миллионных долей секунды до миллиардов лет.

$$N = N_0 e^{-\delta t}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\delta} = \frac{0,693}{\delta} \quad \longrightarrow$$

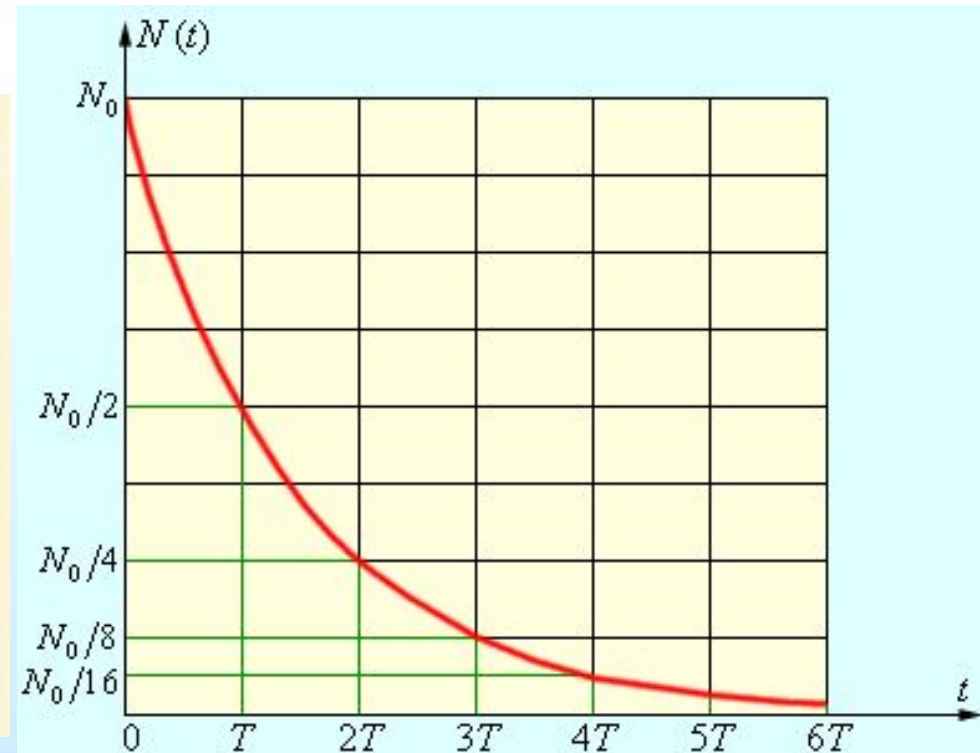
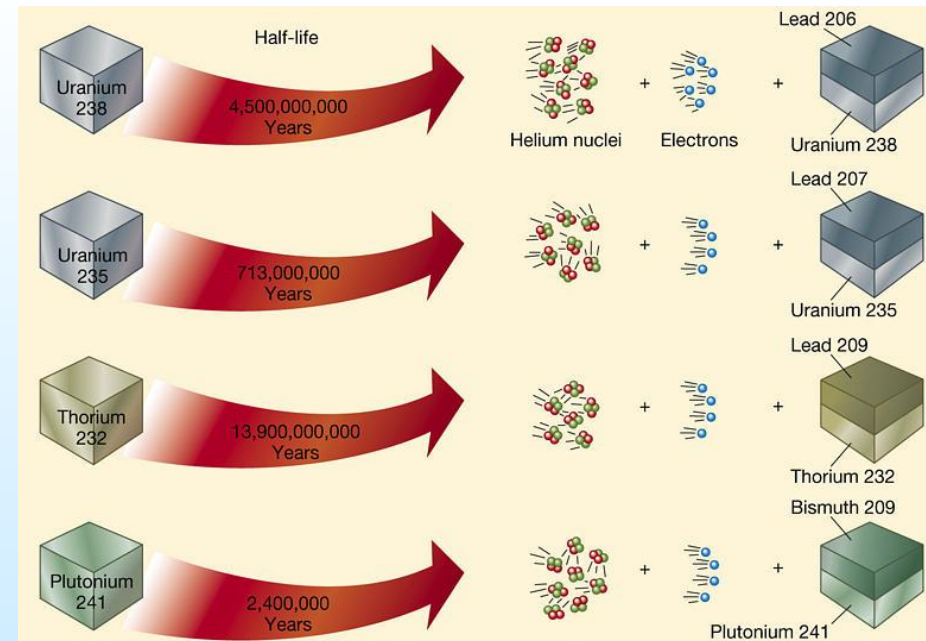
$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Число распадов, происходящих с ядрами вещества в единицу времени, называют **активностью изотопа A**:

$$dN = -\delta N dt$$

$$A = \frac{dN}{dt} = -\delta N = [\text{Бк(беккерель)} = \text{сек}^{-1}]$$

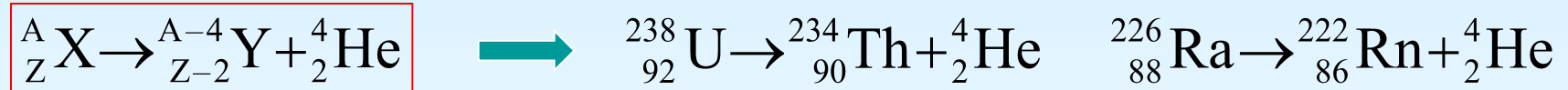
1 Кюри (Ки) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк





# ***α-распад***

**Правило смещения:** в результате α-распада массовое число ядра  $A$  уменьшается на 4, а зарядовое число  $Z$  уменьшается на 2.



# ***β-распад***

В результате β-распада нейтрон в ядре превращается в протон или наоборот – процесс не внутриядерный, а даже внутри-нуклонный. Требование выполнения законов сохранения предполагает образование уникальной элементарной частицы – нейтрино  $\nu$  или антинейтрино  $\bar{\nu}$  (В.Паули 1932, открыта в 1956).

**1) Электронный β-распад** (нейтрон → протон)



**2) Позитронный β-распад** (протон → нейтрон)



**3) Электронный захват** (ядро захватывает электрон)



Вольфганг Эрнест Паули  
1900-1958  
Ноб. лаур. 1945

# ***γ-распад***

В отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -радиоактивности,  $\gamma$ -радиоактивность ядер не связана с изменением внутренней структуры ядра и не сопровождается изменением зарядового или массового чисел.

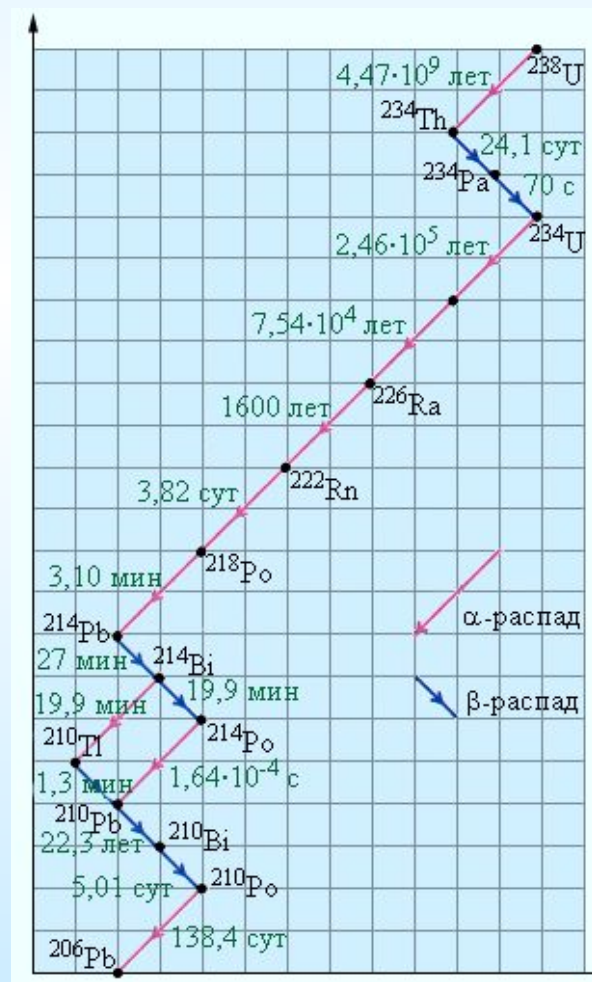
Как при  $\alpha$ -, так и при  $\beta$ -распаде дочернее ядро может оказаться в некотором возбужденном состоянии и иметь избыток энергии.

Переход ядра из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием одного или нескольких  $\gamma$ -квантов.

Дочернее ядро также может оказаться нестабильным. Поэтому возможны серии последовательных радиоактивных распадов, которые заканчиваются образованием стабильных ядер. В природе существует несколько таких серий.

Наиболее длинной является серия  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , состоящая из 14 последовательных распадов (8  $\alpha$ -распадов и 6  $\beta$ -распадов).

Эта серия заканчивается стабильным изотопом свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ .

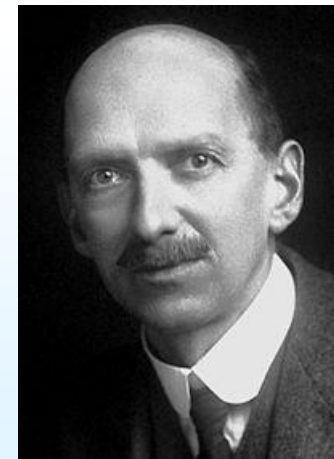
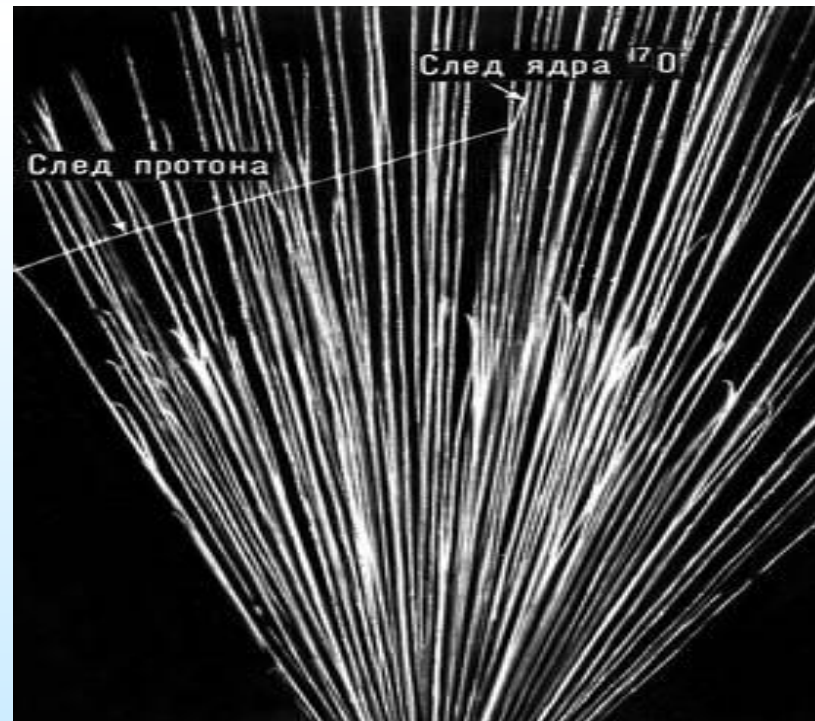
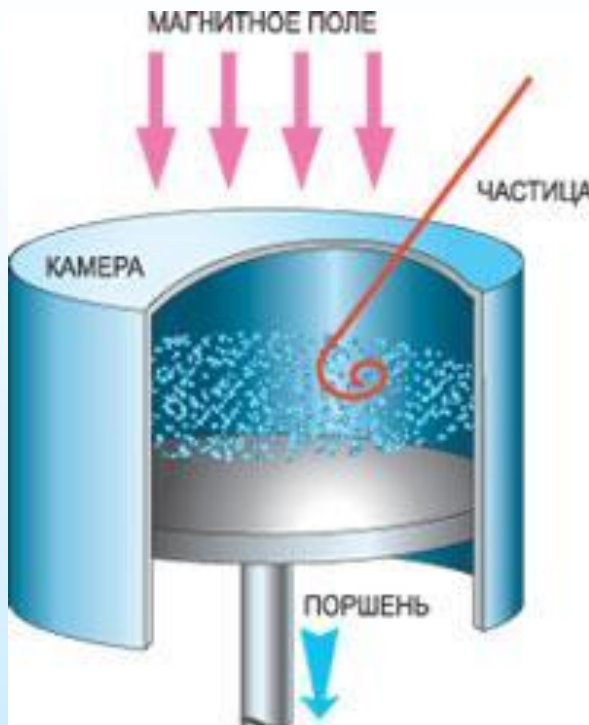


# Элементарные частицы

30 гг. XX в.: нейтрон, протон, электрон, позитрон, нейтрино, фотон.  
Сейчас уже более 300 "элементарных" частиц – мельчайшие частицы материи, которые не являются атомами или ядрами.

- 1) Способны рождаться и уничтожаться (испускаться или поглощаться) при взаимодействии с другими частицами;
- 2) Способны превращаться друг в друга.

Виды взаимодействия: 1) сильное; 2) электромагнитное ( $10^{-2}$ );  
3) слабое – связанное с нейтрино ( $10^{-14}$ ); 4) гравитационное ( $10^{-39}$ ).



Чарльз Томсон  
Риз Вильсон  
1869-1959  
Ноб. лаур. 1927