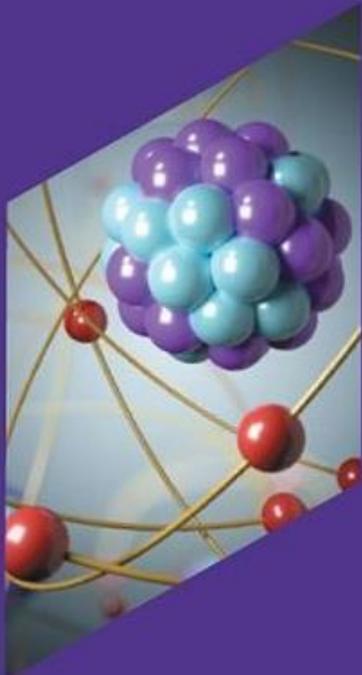




**ЯДЕРНАЯ  
ФИЗИКА**

ПРОФИЛЬНАЯ  
ШКОЛА



**10-11  
КЛАССЫ**

# Элективный курс «Ядерная физика» для профильной школы

Ю.А. Панебратцев

12 научная Школа для учителей физики из стран-участниц ОИЯИ  
ЦЕРН, Женева, Швейцария  
8 ноября 2019 г.

# Открытия, кардинально изменившие представления человечества о строении вещества

- 1895 г. – Рентген – открытие рентгеновского излучения
- 1896 – Беккерель – открытие радиоактивности
- 1897 г. – Томпсон – открытие электрона
- 1900 г. – гипотеза Планка о квантовой природе света
- 1911 г. – Резерфорд – открытие атомного ядра
- 1913 г. – Бор – квантовая модель атома Бора
- 1919 г. – Резерфорд – первая ядерная реакция
- Развитие квантовой механики – Гейзенберг, Борн, Шрёдингер, Паули, Дирак, Ландау, Фок и др.
- Развитие специальной (1905 г.) и общей теории относительности (1915 г.) – Эйнштейн
- 1932 – Чедвик – открытие нейтрона
- 1939 г. – Ган и Штрассман – деление ядер урана
- 1940 г. – Флёров и Петржак – спонтанное деление урана

**Формула Эйнштейна  $E_0 = mc^2$  стала символом XX в.**

# Материалы к курсу «Ядерная физика»

## Бумажный учебник

- Материалы параграфов
- Задачи
- Ссылки на дополнительные цифровые ресурсы
- Темы проектных работ



## Дополнительные цифровые ресурсы

### Электронное приложение

- Видеолекции
- Дополнительные текстовые материалы – материалы для дополнительного изучения – разбор решения задач
- Тесты
- Виртуальные лабораторные работы



### QR-коды

- Визуализация сложных физических процессов
- Визуализация экспериментальных установок



# Содержание учебника

Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы

Глава 2. Атом и атомное ядро

Глава 3. Явление радиоактивности

Глава 4. Масса и энергия

Глава 5. Ядерные реакции

Глава 6. Ядерная астрофизика

Глава 7. Синтез новых тяжёлых и сверхтяжёлых элементов

Глава 8. Радиация и жизнь

Глава 9. Использование ядерных технологий

Глава 10. Глобальные источники энергии

Глава 11. В лабораториях учёных

Заключение

# Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы

## § 1. Вещество. Атомы и молекулы

- Агрегатные состояния вещества
- Атомная гипотеза
- Атомы и молекулы
- Моль, число Авогадро

## § 2. Свойства химических элементов.

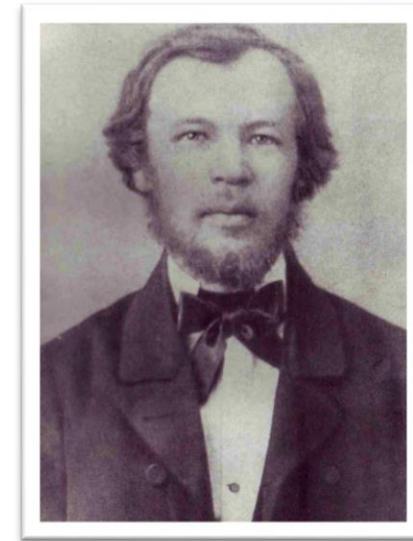
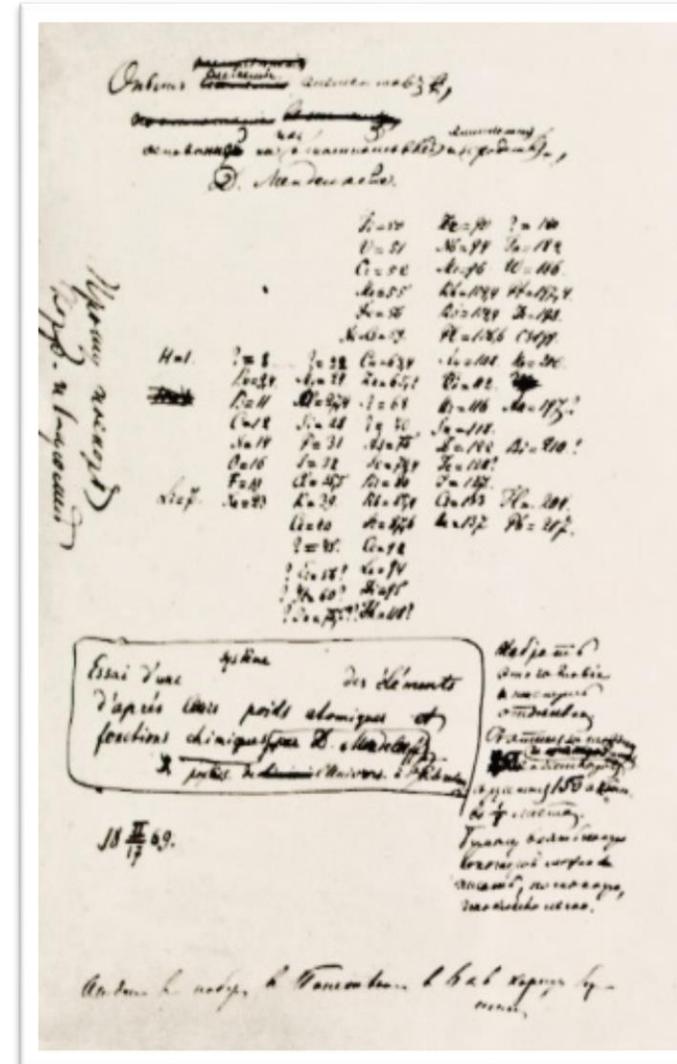
### Периодическая система Д.И. Менделеева

- Химические элементы
- Периодическая таблица Менделеева

Задачи к главе

Видеолекции к главе

Тесты к главе



# Масса атома. Моль. Молярная масса. Число Авогадро

- **Масса атома** чрезвычайно мала и составляет величину порядка  $10^{-27}$  кг.
- **Моль** — количество вещества, содержащего столько же атомов (молекул), сколько атомов содержится в 12 г углерода.
- **Число Авогадро** — константа, равная числу атомов или молекул в одном моле любого вещества:

$$N_A = 6,02214078(18) \cdot 10^{23} \text{ 1/моль.}$$

- **Молярная масса** — масса вещества, взятого в количестве 1 моль.

1 моль воды – 18 граммов – 1 столовая ложка  
Число молекул: 6·100 000 000 000 000 000 000 000



# Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы

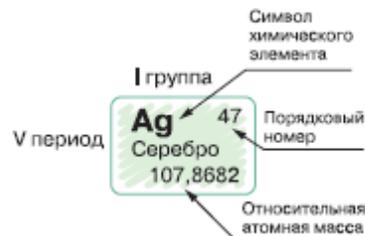


Рис. 2

В 1922 г. Нильс Бор, зная современную модель атома, состоящего из атомного ядра и электронной оболочки, заново проанализировал таблицу Менделеева и переформулировал периодический закон следующим образом: «Свойства элементов находятся в периодической зависимости от зарядов ядер их атомов».

В приложении 1 данного пособия вы можете найти современную таблицу Менделеева (динамическую таблицу Менделеева можно открыть по QR-коду на этой странице и по ссылке: <https://www.ptable.com/#Writeup/Wikipedia>). В каждой клетке таблицы расположена краткая информация об элементе (рис. 2).



В XX в. учёные научились создавать новые элементы (некоторые из них накоплены в большом количестве, например нептуний, плутоний) — это элементы, которые сейчас активно используются людьми.

В настоящее время таблица Менделеева содержит 118 различных элементов. Из них 92 синтезировала сама природа в процессе эволюции, а остальные 26 были синтезированы в экспериментах учёных на ядерных реакторах и ускорителях тяжёлых ионов. Об этом мы расскажем в одной из тем нашего курса.

## ЭТО ИНТЕРЕСНО!



Флёров  
Георгий Николаевич  
(1913—1990)

Из 118 элементов таблицы Менделеева семь названий связаны с Россией.

Рутений  $^{44}\text{Ru}$  (от лат. *Ruthenia* — Россия) был открыт в 1844 г. профессором Карлом Клаусом.

Самарий  $^{62}\text{Sm}$  назван в честь русского горного инженера, полковника В. Е. Самарского-Быховца.

Менделевий  $^{101}\text{Md}$  назван в честь Д. И. Менделеева.

В г. Дубне Московской области находится международный научный центр — Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ). В этом институте в Лаборатории ядерных реакций имени академика Г. Н. Флёрова было открыто одиннадцать новых сверхтяжёлых элементов, два из которых назвали в честь научных лабораторий и географических мест, где они были открыты:  $^{105}\text{Db}$  — дубний и  $^{115}\text{Ms}$  — московий. Ещё два элемента носят имена выдающихся учёных нашей страны Г. Н. Флёрова и Ю. Ц. Оганесяна. Это  $^{114}\text{Fl}$  — флеровий и  $^{118}\text{Og}$  — оганесон.



Оганесян  
Юрий Цолакович  
(р. 1933)



## Задачи к главе

**Задача 1.** Определите количество атомов водорода в литре воды.  
Ответ:  $0,67 \cdot 10^{26}$  атомов.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/t1>

**Задача 2.** Сколько молей вещества содержится в углекислом газе массой 88 кг?

Ответ: 2000 моль.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/t2>

**Задача 3.** Определите молярную массу газовой смеси, в которой содержится 25% аргона и 75% кислорода.

Ответ: 33,68 г/моль.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/t3>

## Видеолекции к главе

- [1. http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/11](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/11)
- [2. http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/12](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/12)
- [3. http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/13](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/13)
- [4. http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/14](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/14)

## Тесты к главе

<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/q1>

# Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы

**Ptable** Wikipedia Properties Orbitals Isotopes Compounds Search

Oxidation  Names  Electrons  Wide

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1 H Hydrogen -1,1	2 He Helium	105 Db Dubnium (268)										Practogens		Chalcogens		Halogens	
1	3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
2	11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
3	19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
4	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
5	55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
6	87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson

Common oxidation states are shown in bold beneath the element closeup.

Periodic Table Design & Interface Copyright © 1997 Michael Dayah Ptable.com Last updated Jun 16, 2017

57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

DEMO ABOUT CONTACT POSTER PRINT IMAGE REMOVE ADS LESSON PLANS DISCORD English

© 2017 MICHAEL DAYAH VINYL BANNERS PRINTED BY PRINTASTIC

# Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы



×

## Моль и число Авогадро

$$M = \frac{m}{\nu} = \frac{m N_A}{N}$$

$M$  – молярная масса  
 $m$  – масса вещества  
 $\nu$  – количество вещества  
 $N_A$  – число Авогадро  
 $N$  – число атомов или молекул в массе вещества



▶ 🔊 \_\_\_\_\_ 360p 🗄

# Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы



# Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы

1  
Баллы

1. Характерный размер атома равен

- микрон
- 0,1 нанометра
- нанометр
- 0,1 микрона

1  
Баллы

2. Если атомы разместить вдоль прямой линии друг за другом, то в микрометре будет \_\_\_\_ атомов.

- 10
- 10 000
- 1000
- 100

1  
Баллы

3. В космосе больше всего атомов

- гелия
- водорода
- кислорода
- углерода

# Глава 2. Атом и атомное ядро

## § 3. Строение атома

- Открытие электрона
- Атом как сложная структура
- Открытие протона
- Открытие нейтрона

## § 4. Изотопы

## § 5. Основные свойства ядер

*Задачи к главе*

*Видеолекции к главе*

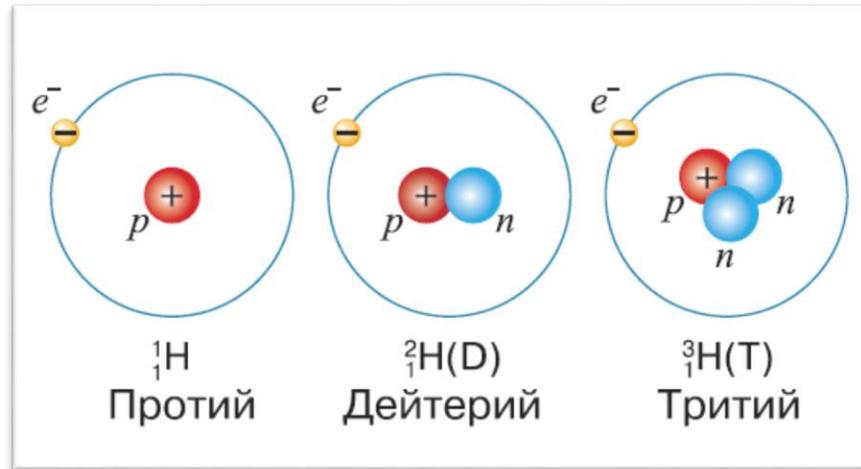
*Дополнительные материалы*

*Тесты к главе*



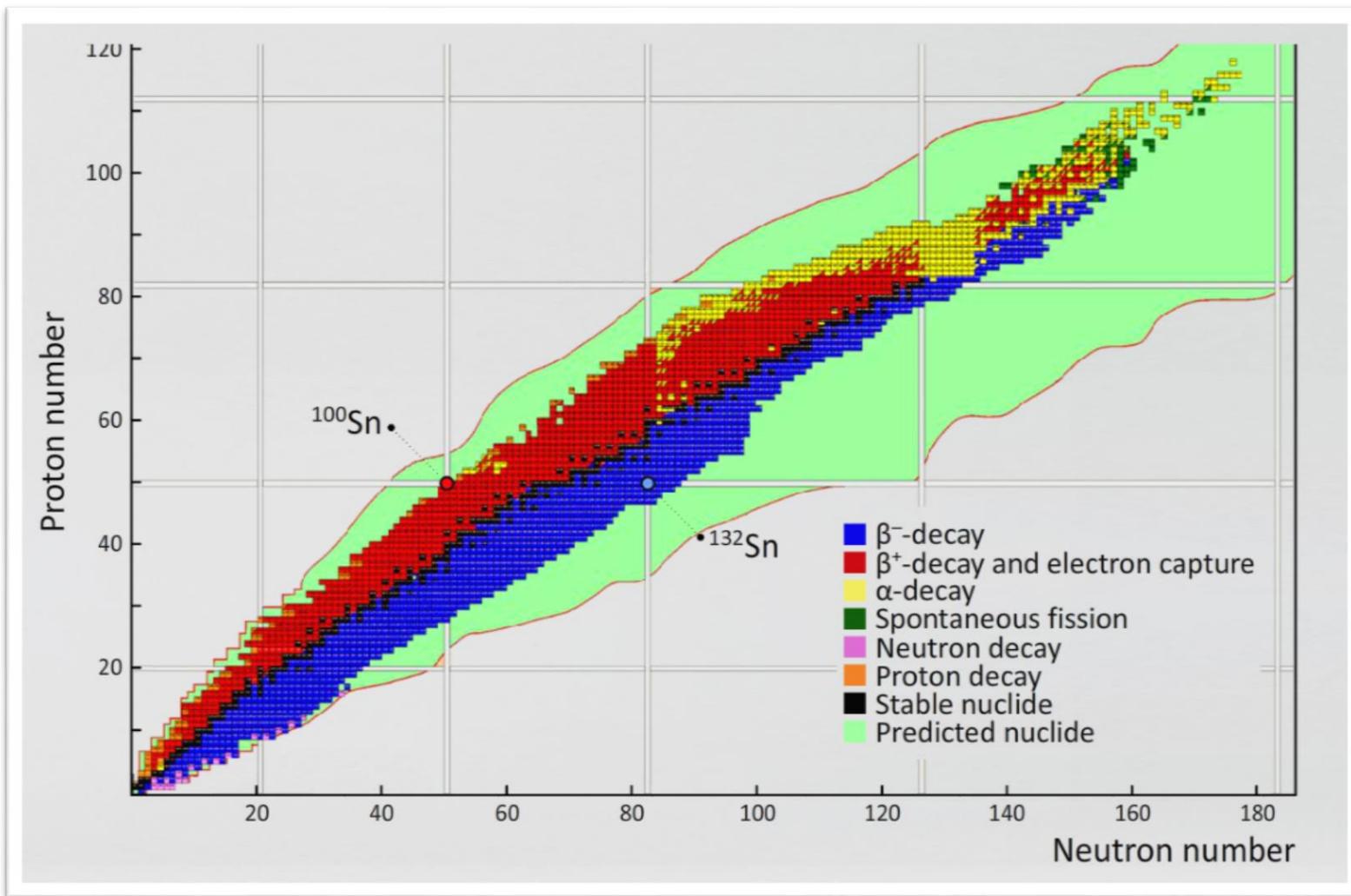
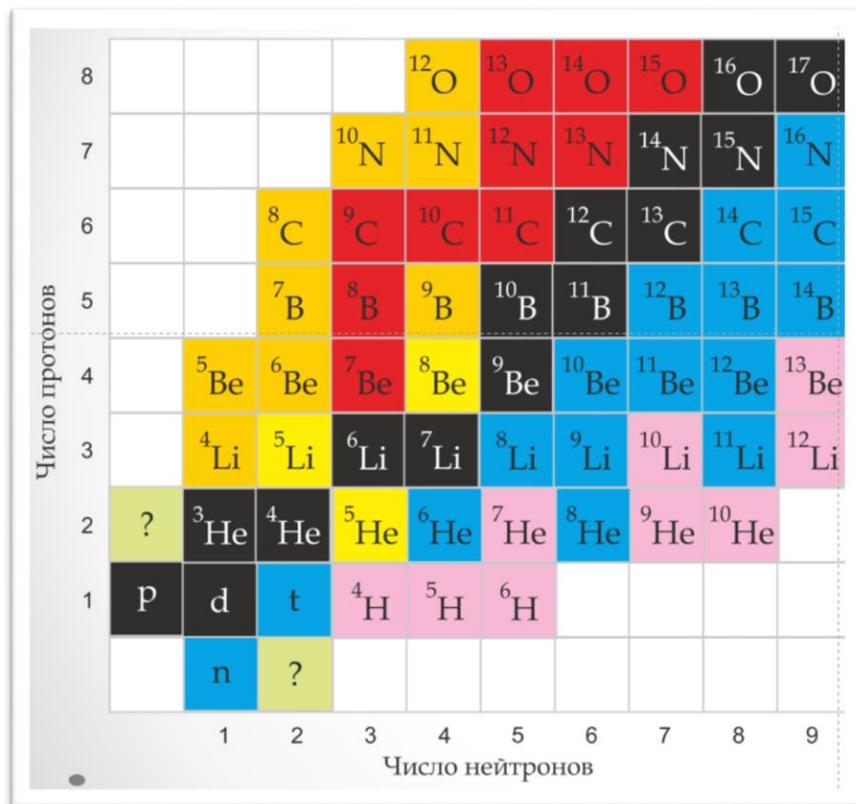
# Изотопы

- **Изотопы** — разновидности атомов (и ядер) какого-либо химического элемента, которые имеют одинаковый атомный (порядковый) номер, но при этом разные массовые числа.



- Ядра с одинаковыми  $N$  и разными  $Z$  называются **изотонами**.
- Ядра с одинаковыми  $A$  и разными  $Z$  называются **изобарами**.

# Карта ядер



# Глава 2. Атом и атомное ядро

Наука не стоит на месте, и уже известно, что протон и нейтрон не элементарные частицы. Они состоят из кварков. Однако для решения задач лучше представлять протоны и нейтроны такими устойчивыми «кирпичиками», которые могут составлять в сумме устойчивые образования под названием *атомные ядра*.

Информация о составе атома и его ядра очень важна в современном мире. В результате ядерных реакций можно получить энергию в огромном количестве и решить множество проблем, стоящих перед человечеством.

## § 4 Изотопы

Вспомните

- Из чего состоит атомное ядро?
- Как определить количество протонов и нейтронов у элемента с помощью таблицы Менделеева?
- Сколько различных химических элементов в таблице Д. И. Менделеева?

Ранее мы с вами выяснили, что электрически нейтральный атом имеет равное количество протонов и электронов. При этом различное число протонов относит тот или иной атом к определённому элементу. Но сколько может быть нейтронов в ядре? Должно ли их число быть равно числу протонов или электронов? Совсем нет. Более того, атомы одного и того же химического элемента могут обладать разным числом нейтронов и, как следствие, разной массой. В этом случае речь идёт о различных изотопах одного и того же химического элемента.

**Изотопы** — разновидности атомов (и ядер) какого-либо химического элемента, которые имеют одинаковый атомный (порядковый) номер, но при этом разные массовые числа.

Ядра с одинаковыми  $N$  и разными  $Z$  называются *изотонами*. Ядра с одинаковыми  $A$  и разными  $Z$  называются *изобарами*.

Простейший пример изотопов — изотопы водорода (рис. 13). Ядро атома водорода — протон, этот изотоп назвали протием ( ${}^1_1\text{H}$ ). У атома водорода есть ещё два изотопа. Ядро дейтерия ( ${}^2_1\text{H}$ , или D)

содержит один протон и один нейтрон. Ядро трития ( ${}^3_1\text{H}$ , или T) — один протон и два нейтрона.

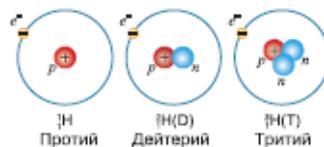


Рис. 13

Важно знать, что различные изотопы химического элемента имеют приблизительно одинаковые химические свойства, но принципиально разные ядерные свойства. Одни изотопы стабильны, а другие радиоактивны. Чуть позже вы узнаете о разных типах радиоактивных распадов.

К настоящему моменту известно около 270 стабильных и более 2000 радиоактивных изотопов. При этом общее число химических элементов в настоящее время — 118. Чтобы окунуться в мир изотопов, нам следует познакомиться с картой нуклидов (нуклид — вид атомов с определённым значением атомного номера и массового числа) (рис. 14). Примеры карты нуклидов можно посмотреть по QR-коду и по ссылке: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>.

Карта (или таблица) нуклидов содержит все известные науке изотопы, которые расположены по осям  $Z$  и  $N$ :  $Z$  — число протонов в ядре,  $N$  — число нейтронов.  $Z$  растёт по вертикальной оси

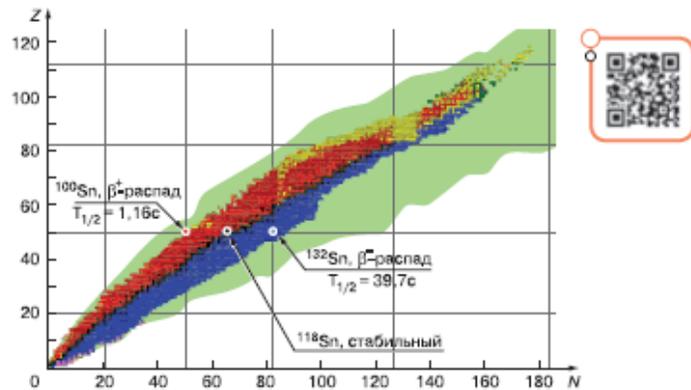


Рис. 14. Общий вид карты нуклидов



# Глава 2. Атом и атомное ядро

## § 5

### Основные свойства ядер

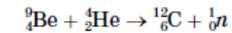
Вспомните

- Что вы знаете из школьного курса физики о длине волны?
- Что такое дифракция?
- Что представляет собой модель атома Бора?

- Протон-нейтронная модель ядра
- Заряд ядра
- Измерение массы ядра
- Размер ядра
- Форма ядра
- Капельная модель ядра

стреливают бор и некоторые другие химические элементы. Сравнивая химические элементы, полученные в результате такого рода реакций, учёные установили, что данные лучи не являются гамма-лучами.

В 1932 г. английский учёный Джеймс Чедвик изучал излучение, возникающее при облучении бериллия альфа-частицами (рис. 11):



Чедвик определил, что это излучение состоит из электрически нейтральных частиц массой, которая близка к массе протона (табл. 3). Это стало экспериментальным доказательством существования нейтрона.

Таблица 3. Масса и заряд нейтрона

Масса нейтрона	$1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг 1,0086 а. е. м.
Заряд нейтрона	0

Сегодня мы знаем, что в ядро входят протоны и нейтроны, вокруг ядра по орбитальям вращаются электроны (рис. 12). Количество протонов равно заряду атомного ядра, которое определяется порядковым номером расположения элемента атома в таблице Менделеева. Оно обозначается буквой  $Z$ . Количество протонов равно количеству электронов, которые вращаются вокруг нейтрального атома. Число нейтронов обозначается буквой  $N$ .

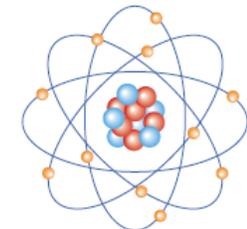
Общее число нуклонов в ядре называется *массовым числом* и обозначается буквой  $A$ . Массовое число обычно выражается в единицах атомной массы, округлённых до целых чисел. Разница между массой и атомным числом равна числу нейтронов  $N$ :

$$N = A - Z.$$

Ядра химических элементов обозначаются символом  ${}^A_Z\text{X}$ .



Чедвик Джеймс  
(1891—1974)

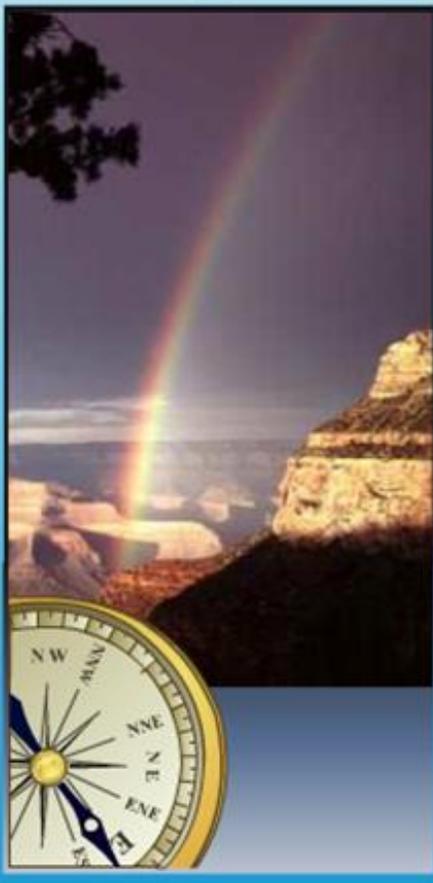
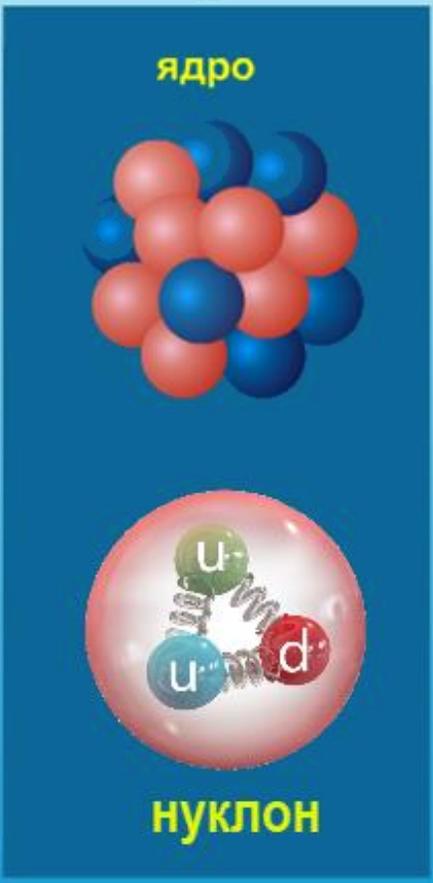
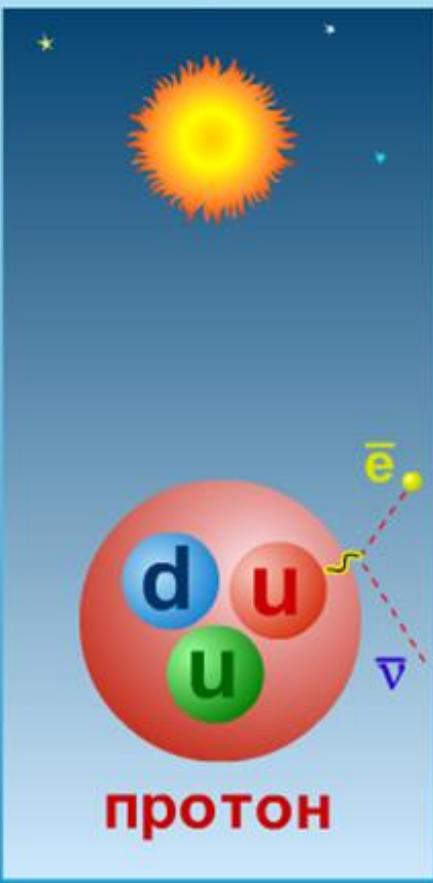


- — электроны,
  - — нейтроны, • — протоны
- $Z$  = количество протонов  
= заряд ядра  
= номер элемента

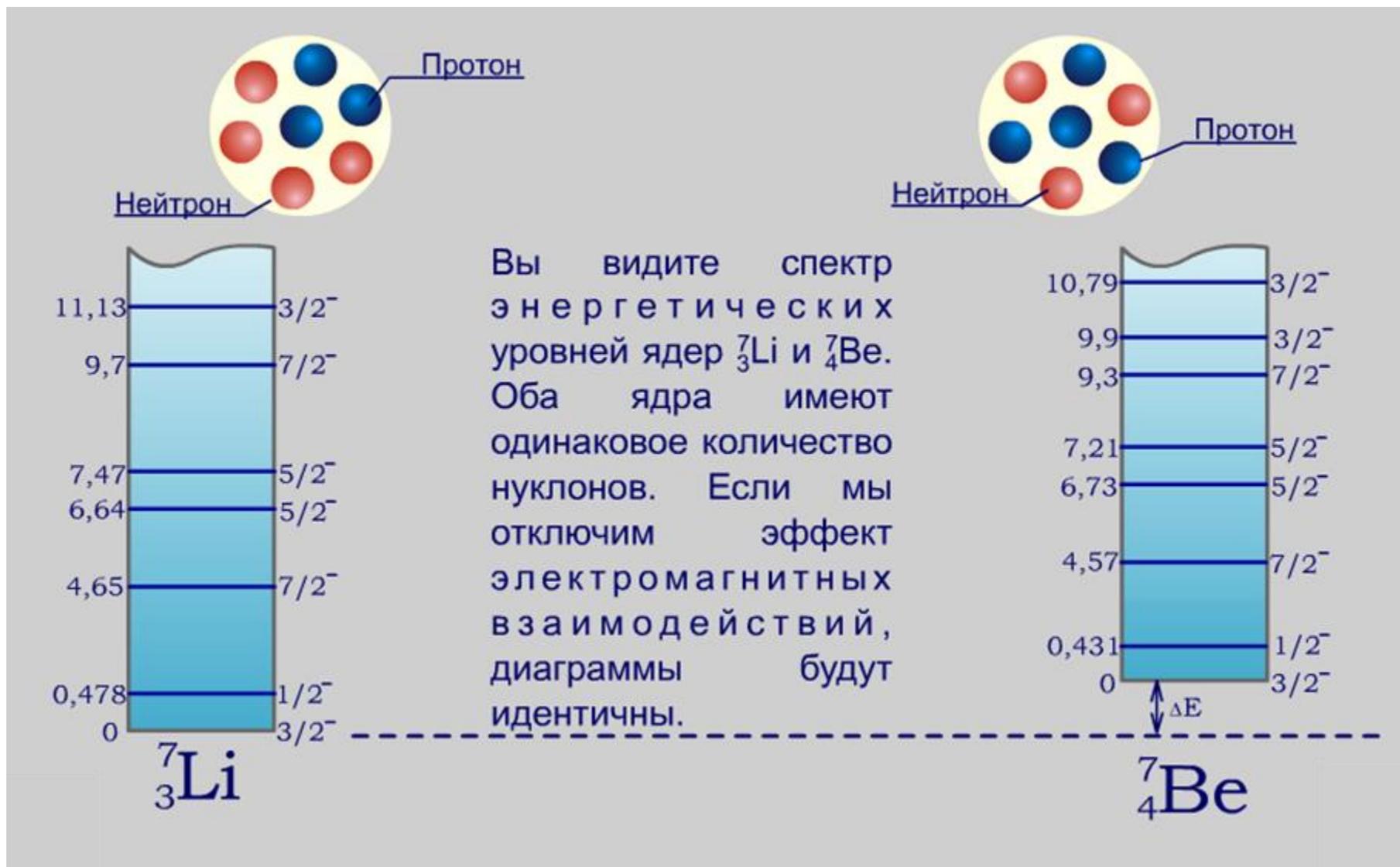
Рис. 12

# Силы и взаимодействия в ядерной физике

В природе существует 4 типа фундаментальных взаимодействий:

1	2	3	4
		<p>ядро</p>  <p>нуклон</p>	 <p>протон</p>
гравитационные	электромагнитные	сильные	слабые

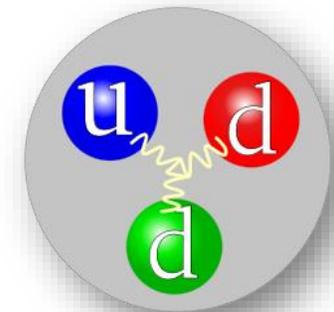
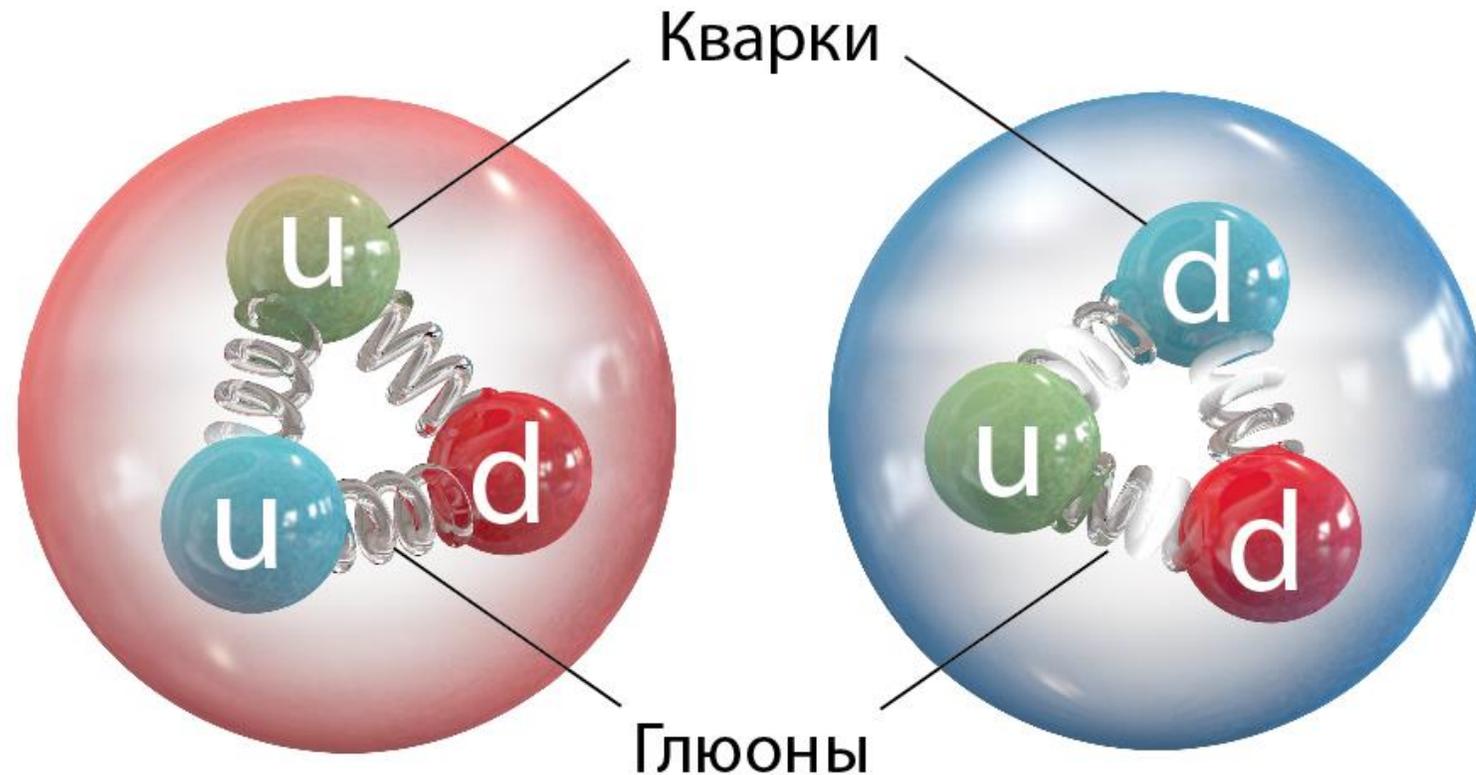
# Зарядовая независимость ядерных сил



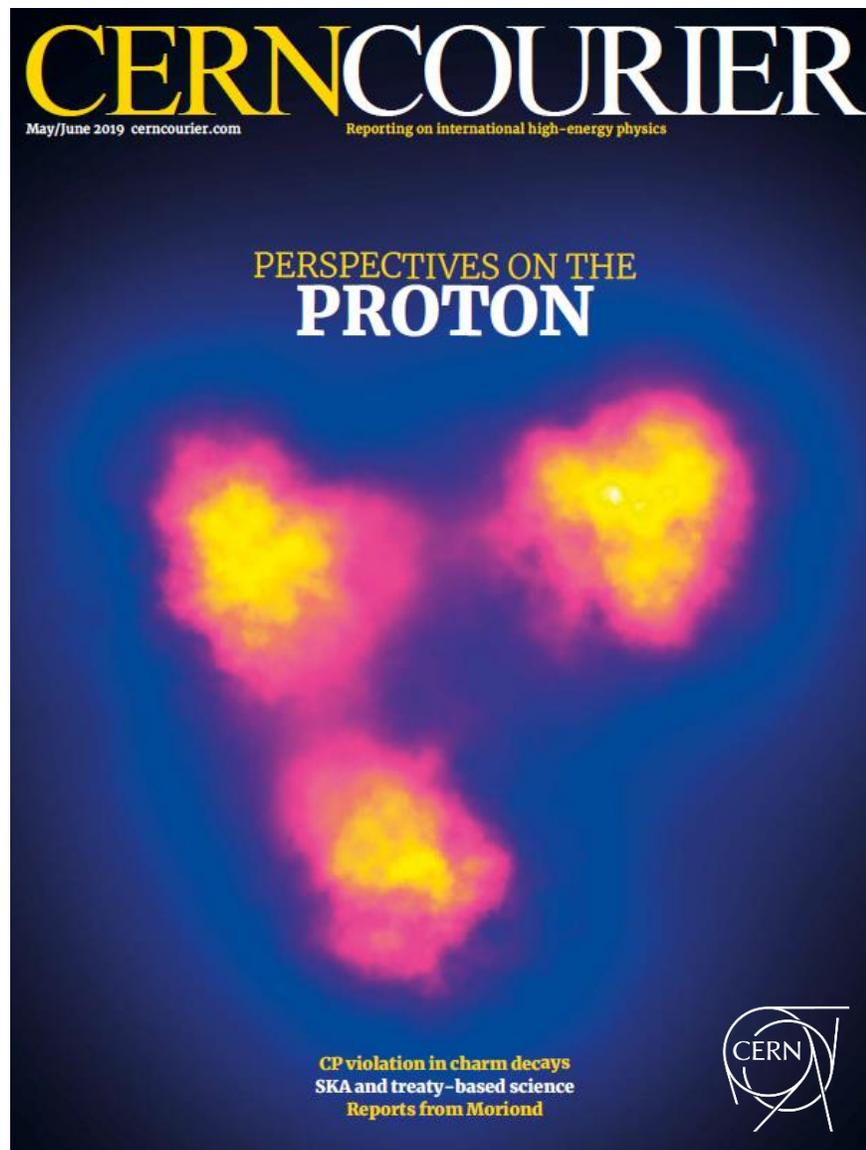
# Структура протона и нейтрона

ПРОТОН

НЕЙТРОН



# Современная картина строения протона



*Впечатление художника о хаосе кварков и глюонов внутри протона*



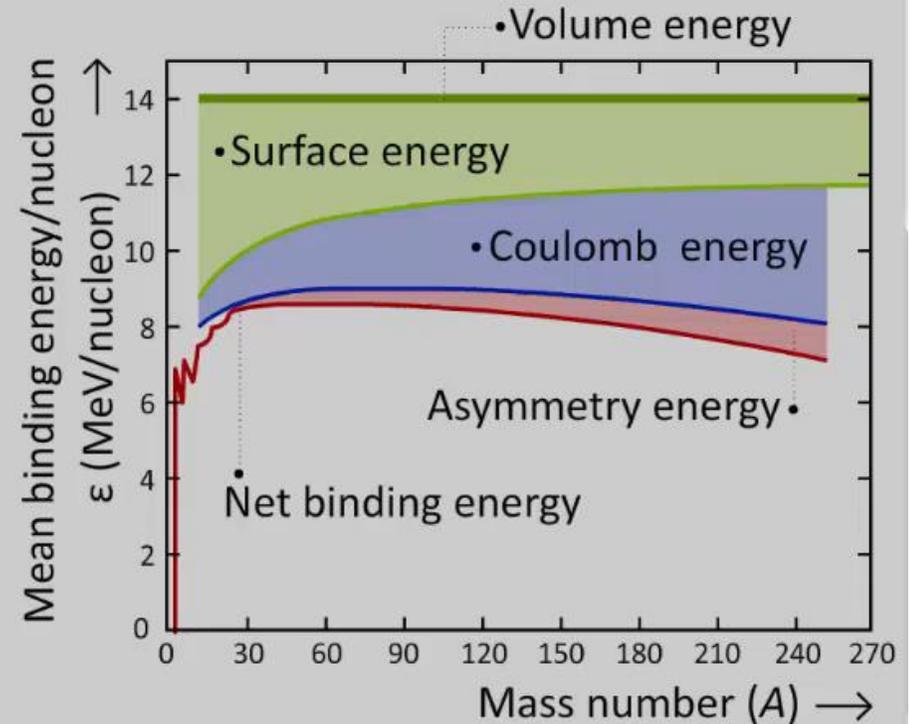
# Глава 2. Атом и атомное ядро

## Weizsäcker's formula

$$E_b = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \epsilon \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta$$

- Binding energy

The binding energy  $E_b$  of any nucleus of mass number  $A$  and atomic number  $Z$  is given by the Weizsäcker's formula. In nuclear physics formula is used to approximate the mass and various other properties of an atomic nucleus from its number of protons and neutrons. It is based partly on theory and partly on empirical measurements.



Behavior of different terms

# Глава 3. Явление радиоактивности

§ 6. История открытия радиоактивности

§ 7. Закон радиоактивного распада. Виды распадов

- Закон радиоактивного распада
- Виды распадов

§ 8. Альфа, бета и гамма-распады

- Альфа-распад. Источники альфа-частиц
- Бета-распад. Источники-бета-частиц
- Бета-минус-распад
- Бета-плюс-распад
- Электронный захват
- Гамма-излучение. Источники гамма-излучения

§ 9. Естественная радиоактивность. Радиоактивные ряды

- Естественная радиоактивность
- Радиоактивные ряды

*Задачи к главе*

*Видеолекции к главе*

*Тесты к главе*



# Глава 3. Явление радиоактивности

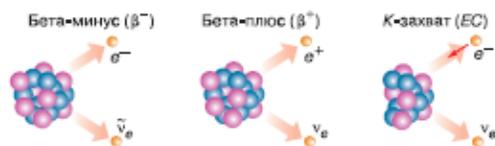


Рис. 20

## Бета-распад. Источники бета-частиц

Бета-распад существует в трёх видах (рис. 20): бета-минус-распад ( $\beta^-$ ), бета-плюс-распад ( $\beta^+$ ) и  $K$ -захват ( $EC$ ).

### Бета-минус-распад

Ниже представлена схема бета-минус-распада:



где  $X$  — обозначение исходного химического элемента, который будет распадаться;  $Z$  — его зарядовое число;  $A$  — массовое число.

При бета-минус-распаде испускается электрон  ${}^0_{-1} e$ , у которого  $Z = -1$  и  $A = 0$  (барионный заряд электрона, в отличие от протона и нейтрона, равен нулю). В результате распада появляется новый изотоп с зарядовым числом  $(Z + 1)$  и тем же массовым числом  $A$ . При этом при бета-распаде появляется ещё одна частица, которая называется *электронное антинейтрино* ( $\bar{\nu}_e$ ).



Паули Вольфганг  
(1900—1958)

При изучении бета-распада было обнаружено, что энергия электронов и энергия, заключённая в дочернем ядре, не равна энергии, которая теоретически должна выделяться в бета-распаде. Значит, в бета-распаде не выполняется фундаментальный закон сохранения энергии? Швейцарский физик Вольфганг Паули предсказал, что в бета-распаде испускается ещё одна частица, которая не имеет электрического заряда и которую нельзя зарегистрировать. В таком случае фундаментальный закон сохранения энергии сохраняет свою силу. Эта частица была названа

нейтрино (от итал. *neutrino* — маленький нейтрон). Поиски нейтрино продолжались не одно десятилетие, и только в 50-е гг. XX в. нейтрино удалось зарегистрировать, и теория бета-распада получила полное подтверждение.

### ЭТО ИНТЕРЕСНО!

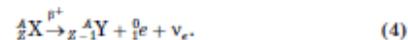
В бета-минус-распаде появляется электронное антинейтрино. Каждой элементарной частице соответствует античастица. Несмотря на то что современная физика не считает протон и нейтрон элементарными частицами, потому что они состоят из кварков, у них тоже есть античастицы — антипротон и антинейтрон.

На Большом адронном коллайдере совсем недавно был открыт бозон Хиггса, который фактически занял последнее свободное место в стандартной модели элементарных частиц.

Стандартная модель включает в себя и нейтрино, и антинейтрино, и электрон, и кварки, но в ней нет протона и нейтрона, потому что в рамках этой модели протон и нейтрон — частицы, состоящие из кварков.

### Бета-плюс-распад

При бета-плюс-распаде радиоактивное ядро испускает нейтрино и позитрон. Позитрон — это античастица электрона (заряд положительный, равный заряду электрона). В результате распада появляется новый изотоп с зарядовым числом  $(Z - 1)$  и тем же массовым числом  $A$ :



Масса нейтрино очень мала и до сих пор изучается в физических экспериментах.

### ЭТО ИНТЕРЕСНО!

В природе позитронов очень мало. В случае если электрон и позитрон находятся близко друг от друга, происходит очень интересное явление — аннигиляция материи (рис. 21). Две материальные частицы, соединившись, превращаются в два гамма-кванта фиксированной энергии, которые разлетаются стро-



Рис. 21

# Глава 3. Явление радиоактивности

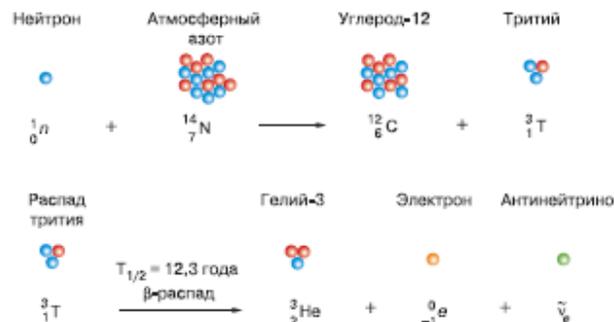


Рис. 26

В таблице 4 размещены все радиоактивные изотопы, которые изначально присутствовали на Земле. Здесь представлены как тяжёлые элементы, например уран-238 и торий-232, так и достаточно лёгкие — калий-40, ванадий-50 и пр. Большинство из них распространены и имеют довольно большой процент содержания в земной коре — к примеру, уран-238 в весовом соотношении составляет  $3 \cdot 10^{-6} \%$ , что достаточно много. Период полураспада урана — 4,5 млрд лет, что сопоставимо с возрастом Земли.

## ЭТО ИНТЕРЕСНО!

### Сколько лет планете Земля?

Возраст Земли (рис. 27) — 4,5 млрд лет. Откуда люди знают этот возраст? История оценки возраста Земли довольно интересная. До XVIII в. все оценки не имели научного подтверждения, у людей не было ничего, кроме умозрительных рассуждений и библейских историй. В XIX в., изучая геологические породы, люди пришли к выводу, что Земля имеет большой возраст, исчисляемый миллионами, сотнями миллионов лет. В результате развития геологии был установлен возраст континентов, возраст суши, который оценивался в сотни миллионов лет.

Чарлз Дарвин в своей книге оценил возраст Англии в 300 млн лет. Однако в тот момент другой великий учёный — лорд Кельвин, оценивая возраст нашей Земли, со своих позиций давал гораздо меньшие оценки, всего в 24 млн лет. Он опирался на знания того времени об источниках энергии, в том

числе энергии Солнца. Чарлз Дарвин вынужден был убрать из третьего издания своей книги свои оценки возраста Земли, так как авторитет лорда Кельвина был очень высок.

Проблема возраста Земли разрешилась позже.



Дарвин  
Чарлз Роберт  
(1809—1882)



Рис. 27. Планета Земля



Томсон Уильям  
(лорд Кельвин)  
(1824—1907)

Таблица 4. Природные радионуклиды и периоды их полураспада

Радионуклид	Период полураспада, лет
Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$
Торий-232	$1,4 \cdot 10^{10}$
Калий-40	$1,3 \cdot 10^9$
Ванадий-50	$5 \cdot 10^{14}$
Рубидий-87	$4,7 \cdot 10^{10}$
Индий-115	$6 \cdot 10^{14}$
Лантан-138	$1,1 \cdot 10^{11}$
Самарий-147	$1,2 \cdot 10^{11}$
Лютеций-176	$2,1 \cdot 10^{10}$

Большинство ядерных реакторов в качестве неотделимой части ядерного топлива содержат именно уран-238. Также существуют проекты и работающие ядерные стэнды, в которых в качестве делящегося элемента используется торий.

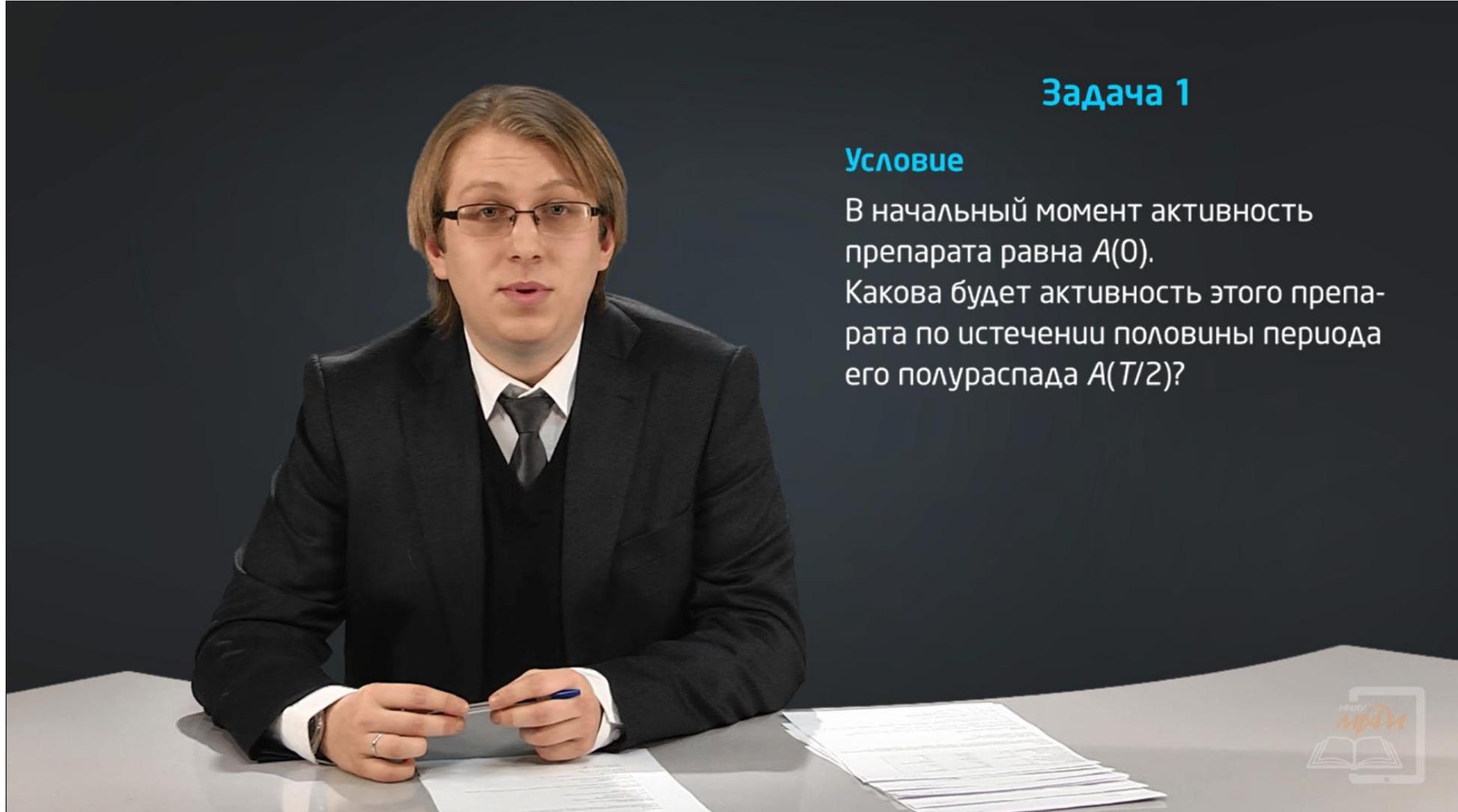
Уран-238 является альфа-активным. Рано или поздно ядро урана распадётся с образованием тория-234. Дальше торий, как до-

# Глава 3. Явление радиоактивности

## Задача 1

### Условие

В начальный момент активность препарата равна  $A(0)$ .  
Какова будет активность этого препарата по истечении половины периода его полураспада  $A(T/2)$ ?



# Глава 3. Явление радиоактивности



# Глава 4. Масса и энергия

## § 10. Взаимосвязь массы и энергии

- Формула Эйнштейна
- Энергия связи ядра
- Удельная энергия связи
- Решение задачи о переходе массы в энергию

## § 11. Деление и синтез

- Деление ядер
- Ядерный синтез
- Термоядерные реакции

*Задачи к главе*

*Дополнительные материалы*

*Тесты к главе*



# Из лекций на Школе прошлых лет

## Масса, энергия, импульс

### Масса в механике Ньютона

1. Масса является мерой количества вещества, количества материи.
2. Масса составного тела равна сумме масс составляющих его тел.
3. Масса изолированной системы тел сохраняется, не меняется со временем.
4. Масса тела не меняется при переходе от одной системы отсчета к другой, в частности, она одинакова в различных инерциальных системах координат.
5. Масса тела является мерой его инертности (или инерции, или инерционности, как пишут некоторые авторы).
6. Массы тел являются источником их гравитационного притяжения друг к другу.



В «Математических началах натуральной философии» Ньютон писал, что «количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему её...»

### Связь между энергией, импульсом и массой в классической механике

$$p = mv,$$

$$F = ma.$$

$$E_{\text{кин}} = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}$$

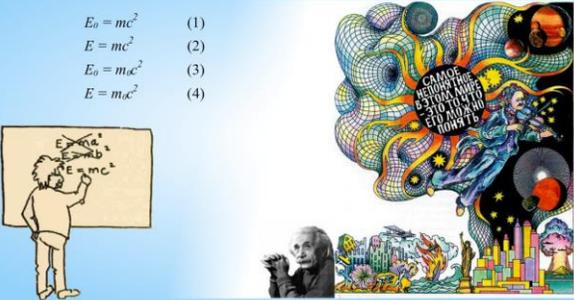
#### Измерение массы пули



$$m = \frac{p^2}{2E_{\text{кин}}}$$

### Главная формула XX века

- (1)  $E_0 = mc^2$
- (2)  $E = mc^2$
- (3)  $E_0 = m_0 c^2$
- (4)  $E = m c^2$



### Масса, энергия, импульс в релятивистской механике



Герман Минковский

В пространстве Минковского каждому событию соответствует точка, три координаты которой представляют собой декартовы координаты трёхмерного евклидова пространства, а четвёртая — координату  $ct$ , где  $c$  — скорость света,  $t$  — время события.

$$p = \frac{E}{c^2} v$$

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4.$$

**Пространство-время**

 $(ct, \mathbf{r}) = (ct, r_x, r_y, r_z).$ 
 $s^2 = c^2 t^2 - r^2.$

**Энергия-импульс**

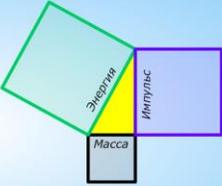
 $(E, \mathbf{pc}) = (E, p_x c, p_y c, p_z c).$ 
 $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2.$

### Теорема Пифагора и связь между энергией, импульсом и массой в релятивистской механике

$$p = m\gamma v = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2}} \quad E = m\gamma c^2 = \frac{m c^2}{\sqrt{1-v^2}}$$

$$T = m(\gamma - 1) \quad p^2 = \frac{m^2 v^2}{1-v^2} \quad E^2 = \frac{m^2 c^4}{1-v^2}$$

$$E^2 - p^2 c^2 = \frac{m^2 c^4}{1-v^2} - \frac{m^2 v^2 c^4}{1-v^2} = \frac{m^2 c^4 (1-v^2)}{1-v^2} = m^2 c^4$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$


### Масса тела и внутренняя энергия

$$m = \left[ \left( \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{c^2} \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{c} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Нагревание сосуда с газом —  $\sum p_i = 0; \quad \sum E_i \neq 0$

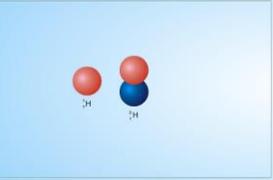
Утюг (нагревание на 200°) —  $\frac{\Delta m}{m} = 10^{-12}$

Таяние льда —  $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$

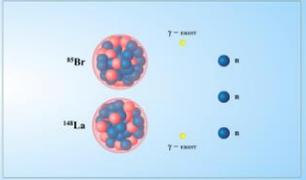


### Деление и синтез

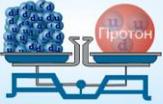
Слабые взаимодействия

 ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + \text{энергия}$ 

 $\frac{\Delta m}{m} = 0,8 \cdot 10^{-2}$

Сильные — ядерные взаимодействия

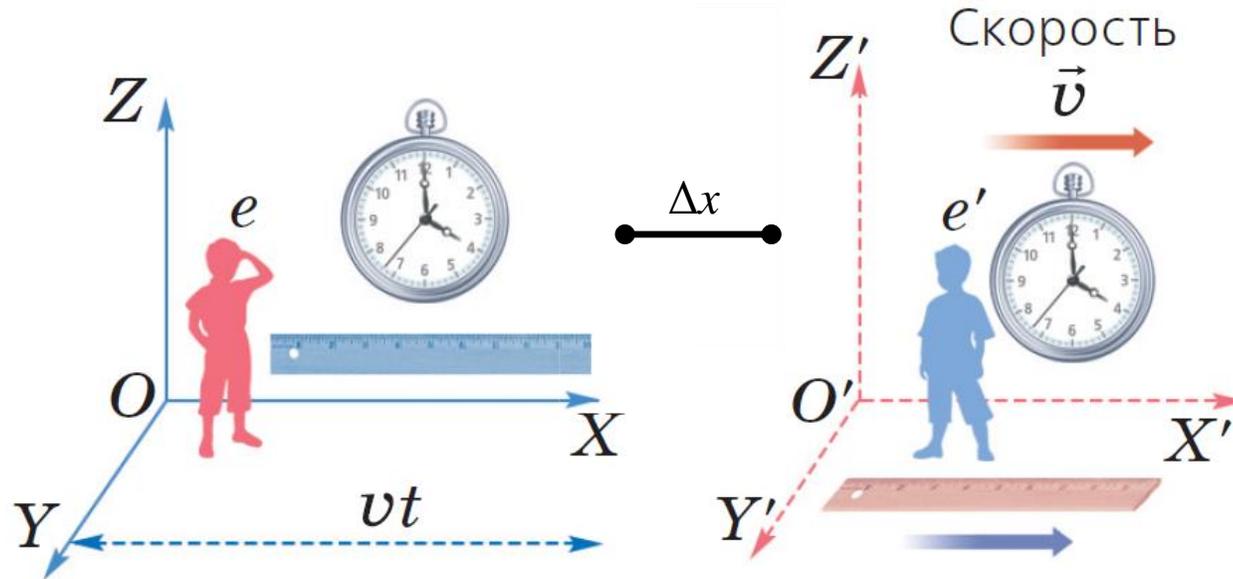

 $\frac{\Delta m}{m} = 0,9 \cdot 10^{-3}$

### Массы адронов



Масса не зависит от скорости, с которой движется тело. Но масса зависит от скоростей частиц, составляющих это тело.

# Инварианты при преобразованиях Галилея



$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= t.\end{aligned}$$

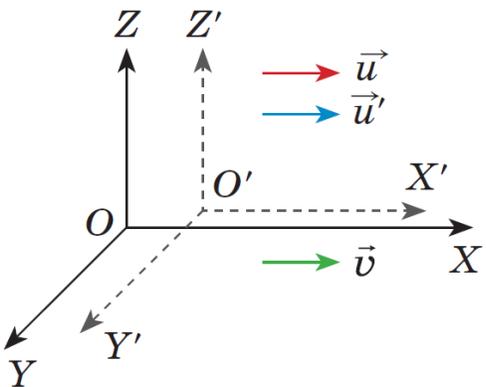
$u' = u - v$ , где  $v$  – скорость, с которой система отсчёта  $X'Y'Z'$  движется относительно системы отсчёта  $XYZ$ . Это классический закон сложения скоростей.

Расстояние между двумя точками:  $\Delta x = x_2 - x_1 = x'_2 + vt - x'_1 - vt = x'_2 - x'_1$  не меняется при преобразовании Галилея, т. е. является инвариантным.

Изменение скорости – тоже инвариантная величина при преобразованиях Галилея:  $\Delta v = u_2 - u_1 = u'_2 + v - u'_1 - v = u'_2 - u'_1$ . Поскольку в классической механике  $\Delta t$  инвариантно в любых инерциальных системах отсчёта, то из инвариантности изменения скорости следует и инвариантность величины ускорения:  $a = \Delta v / \Delta t$ .

Следовательно, установив справедливость закона Ньютона  $F=ma$  хотя бы в одной системе, можно утверждать, что он справедлив и в любой другой инерциальной системе.

# Инварианты при преобразованиях Лоренца



$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad y' = y$$
$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

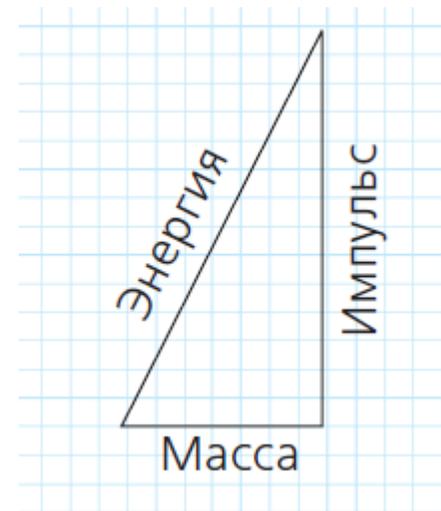
Релятивистский интервал:

$$s^2 = (t_2 - t_1)^2 c^2 - (x_2 - x_1)^2$$

$$s^2 = \Delta t^2 c^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$$

Релятивистские масса, энергия, импульс:

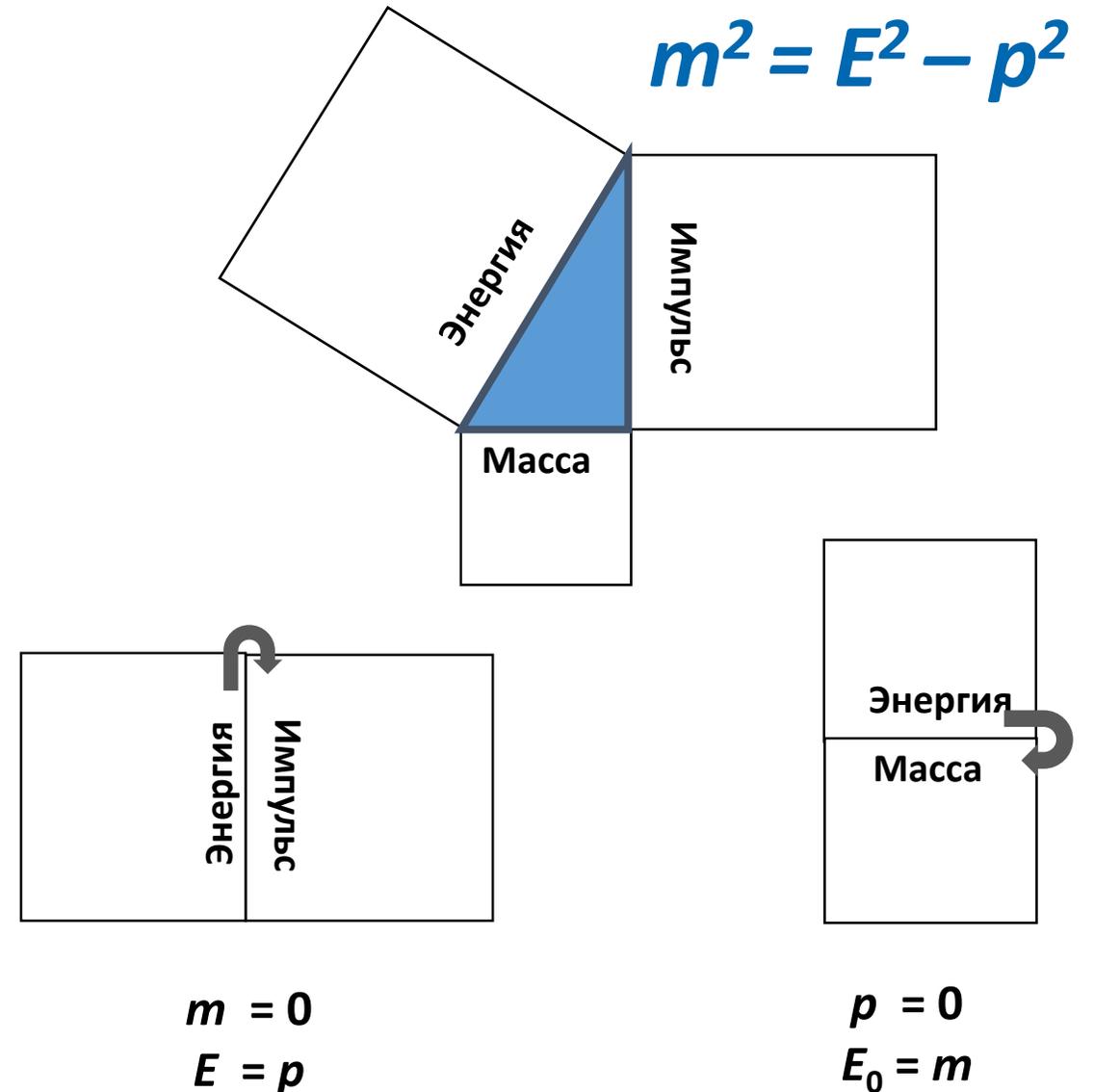
$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$



$$E^2 = p^2 + m^2$$

# Взаимосвязь массы и энергии

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$



# Глава 4. Масса и энергия

## Глава 4

### ВЗАИМОСВЯЗЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ

И в классической, и в релятивистской физике энергия — это самая общая мера всех процессов в природе, а импульс — это самая общая мера всех движений. Энергия — скалярная физическая величина, а импульс — векторная. Величины энергии и импульса относительны, они зависят от системы отсчёта.

Эйнштейну удалось не только связать между собой пространство и время, но и понять глубинную физическую сущность связи энергии и массы и получить релятивистские соотношения между энергией, импульсом и массой.

Открытие того, что покоящееся тело обладает огромной энергией, было великим открытием Эйнштейна, кардинально изменившим представления об окружающем мире.

#### §10

#### Взаимосвязь массы и энергии

Вспомните

- Что вы знаете из школьного курса физики о взаимосвязи массы и энергии?
- Какая формула выражает связь между массой и энергией и кто в истории физики впервые вывел эту формулу?

#### Формула Эйнштейна

В 1905 г. великий физик Альберт Эйнштейн вывел своё знаменитое уравнение

$$E_0 = mc^2,$$

которое фактически стало символом XX в. Это уравнение показывает, что полная энергия находящейся в покое системы ( $E_0$ ), состоящей из протона, нейтрона, атомного ядра, молекулы, связана с её массой ( $m$ ) и скоростью света ( $c$ ). Это соотношение описывает эквивалентность массы и энергии.

Например, если мы знаем массу протона ( $m_p$ ) и скорость света ( $c$ ), то мы можем вычислить полную энергию протонов  $E_0$  в их системе покоя, используя данное уравнение:

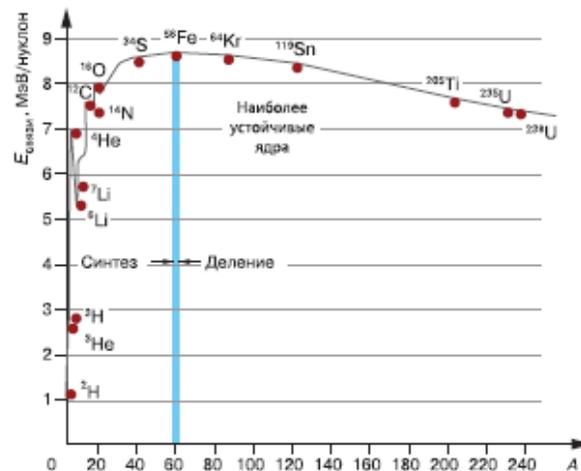


Рис. 29. Зависимость удельной энергии связи ( $E_{\text{связи}}$ ) от массового числа ( $A$ )

#### Решение:

В настоящее время в ядерной медицине активно используется данный эффект аннигиляции. Приборы, работающие на основе данного эффекта, используются для диагностики и называются *позитрон-электронными томографами*.

Для того чтобы успешно решить данную задачу, требуется знать следующие соотношения: во-первых, формулу для расчёта энергии  $\gamma$ -квантов; во-вторых, формулу для взаимосвязи массы и энергии. И последнее, необходимо знать значения постоянной Планка и скорости света.

Перейдём к решению. Массу электрона и позитрона обозначим  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. По условию массы этих двух элементарных частиц равны. Постоянная Планка равна  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж/с, скорость света в вакууме  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

# Глава 4. Масса и энергия

**Ядерный синтез (термоядерный синтез)** — это процесс, в котором два или более атомных ядра сближаются на расстояние, достаточное, чтобы образовать одно или несколько других атомных ядер, а также субатомные частицы (нейтроны и/или протоны). Разница в массе между продуктами и исходными составляющими обеспечивает высвобождение большого количества энергии.

В 1929 г. Роберт Аткинсон и Фридрих Хоутерманс на основе теории Гамова показали, что в соответствии с уравнением Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии в процессе слияния лёгких ядер образуются тяжёлые ядра путём последовательных слияний, а также выделяется энергия. В 1932 г. австралийский физик Марк Олифант на ускорителе для разгона ядер тяжёлого водорода (дейтронов) впервые осуществил процесс термоядерного синтеза в лаборатории: он обнаружил ядра трития и гелия-3.

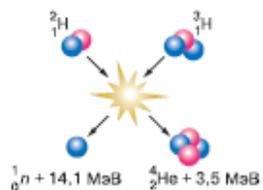


Рис. 32

Типичным примером этого процесса является слияние ядра дейтерия ( ${}^2\text{H}$ ) с ядром трития ( ${}^3\text{H}$ ) (рис. 32). В результате образуется ядро гелия-4 ( ${}^4\text{He}$ ), высвобождается один нейтрон и 17,6 МэВ энергии.

Следует отметить, что реакции синтеза происходят в природе при очень высоких температурах — около 100 млн К.

## Термоядерные реакции

Рассмотрим ещё один тип ядерных реакций — *термоядерные реакции*. Это реакции слияния ядер лёгких элементов с получением более тяжёлых. Все термоядерные реакции идут с выделением энергии.

Рассмотрим четыре такие реакции:



где D — дейтерий ( ${}^2\text{H}$ ), T — тритий ( ${}^3\text{H}$ ).

- 1) взаимодействие ядра дейтерия с другим ядром дейтерия с образованием гелия-3 (6);
- 2) взаимодействие ядер дейтерия с образованием трития (7);
- 3) взаимодействие трития с дейтерием с образованием гелия-4 (8);
- 4) взаимодействие гелия-3 с дейтерием с образованием гелия с более высоким массовым числом (9).

После открытия этих реакций появилась идея создать не ядерный, а термоядерный реактор, т. е. получать тепловую и электроэнергию путём слияния лёгких элементов. Энергия, выделяющаяся в процессе термоядерных реакций, в разы больше, чем энергия, выделяющаяся в процессе деления урана. В настоящее время человечество объединилось в попытках решить проблему управляемых термоядерных реакций. Сейчас во французском г. Кадараше усилиями целого ряда государств создаётся новая установка — международный термоядерный реактор ИТЭР (рис. 33), это прообраз термоядерной электрической станции будущего.

Российские учёные предложили технологию такого реактора, так называемый реактор типа Токамак (рис. 34), который был создан в Москве в Курчатовском институте.

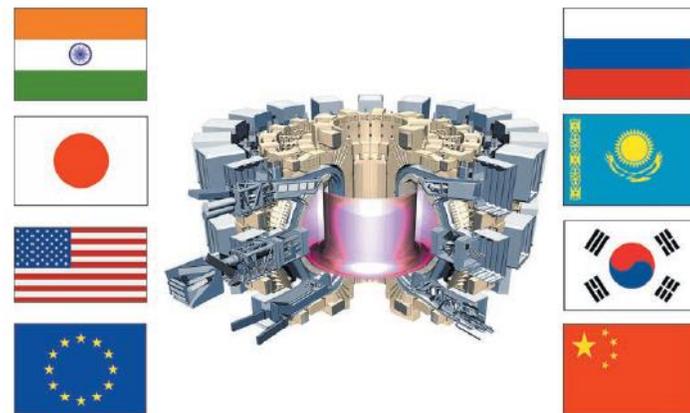


Рис. 33. Страны-участницы проекта ИТЭР

# Глава 5. Ядерные реакции

§ 12. Ядерные реакции — путь к получению новых элементов

- Определение ядерной реакции
- Формы записи ядерных реакций
- Приборы для изучения ядерных реакций

§ 13. Законы сохранения в ядерных реакциях

- Законы сохранения энергии, заряда и числа нуклонов
- Виды ядерных реакций

§ 14. Ядерные реакции под действием заряженных и нейтральных частиц

- Ядерные реакции под действием заряженных частиц
- Взаимодействие нейтронов с ядрами
- Фотоядерные реакции

§ 15. Характеристики ядерной реакции

- Сечение ядерной реакции
- Каналы ядерной реакции

*Задачи к главе*

*Видеолекции к главе*

*Дополнительные материалы*

*Тесты к главе*

# Глава 5. Ядерные реакции

## Глава 5

### ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

В этой главе мы поговорим о понятии ядерной реакции; о законах сохранения, которые выполняются в процессе ядерной реакции; проведём классификацию ядерных реакций по типу взаимодействующих частиц; разберём такие понятия, как «сечение» и «каналы ядерной реакции». Кроме того, мы познакомимся с историей развития ядерной физики и рассмотрим ряд некоторых очень важных специфических реакций, которые определяют в настоящее время развитие земной цивилизации.

#### §12 Ядерные реакции — путь к получению новых элементов

- Вспомните**
- Из чего состоит атомное ядро?
  - Что такое альфа-частицы, гамма-кванты и бета-частицы?
  - Какие приборы для регистрации частиц вы знаете из школьного курса физики?

#### Определение ядерной реакции

Что же такое ядерная реакция? Например, химическая реакция — это взаимодействие химических элементов, в результате которого получается новое вещество. Если следовать формальной логике, то при ядерной реакции должны взаимодействовать ядра элементов, и в процессе этой реакции должны образоваться новые ядра.

В действительности, помимо ядер, в ядерных реакциях могут участвовать нейтроны, протоны, частицы, которые получаются в результате ядерных распадов: альфа-частицы, гамма-кванты, бета-частицы и ряд других частиц.

**Ядерная реакция** — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или какой-либо частицей (например, протоном, нейтроном, фотоном, электроном), сопровождающийся изменением состава, структуры ядра и выделением энергии.

Первую искусственную ядерную реакцию осуществил в 1919 г. Эрнест Резерфорд. Он облучал азот-14 альфа-частицами, в результате чего получились атом кислорода с массовым числом 17 и неизвестная ранее частица, названная позже протоном:  ${}^1_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^{14}_8\text{O}$ .

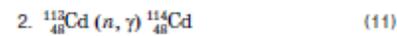
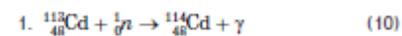
#### Формы записи ядерных реакций

Существует особая форма записи ядерных реакций. Ядро каждого атомного элемента обозначается в соответствии с его латинским названием, причём записываем его так же, как он представлен в таблице Менделеева.

Нейтрон обозначают латинской буквой *n*. Гамма-кванты — греческой буквой  $\gamma$  (гамма). Протон можно обозначать двумя способами: либо буквой *p*, либо символом ядра атома водорода  ${}^1_1\text{H}$ . Альфа-частица, как вы знаете, представляет собой ядро атома гелия, и её обозначают либо греческой буквой  $\alpha$  (альфа), либо  ${}^4_2\text{He}$ .

Ядерные реакции имеют две формы записи. Первая форма — химическая, т. е. ядерная реакция может записываться точно так же, как и химическая реакция (10).

#### Два способа записи ядерных реакций:



Вторая форма записи специфическая, она применяется именно для ядерных реакций. Когда ядро взаимодействует с лёгкой частицей, в результате реакции получается другое ядро и другая лёгкая частица. Форма записи такова: слева ставится символ ядра тяжёлого элемента, вступившего в реакцию, справа — символ ядра тяжёлого элемента, получившегося в результате реакции, а между ними в скобках через запятую перечисляются лёгкие частицы. Первая — это частица, которая участвует в процессе взаимодействия, вторая — это продукт реакции. Часто реакцию называют по совокупности частиц: той, которая участвует в реакции, и той, которая получается в результате реакции. В рамке приведён пример записи взаимодействия кадмия-113 с нейтроном, в результате которого получаются кадмий-114 и гамма-квант. Эта реакция является примером (*n, γ*)-реакции (11).

# Глава 5. Ядерные реакции

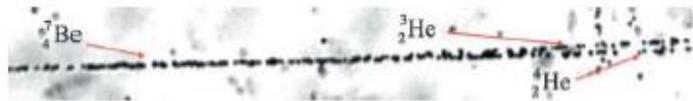


Рис. 37. Фотография фрагментации ядра бериллия-7 в фотозумлусии

встречающиеся на их пути. В результате после проявления фотопластинки на ней появляются следы частиц в виде треков, хорошо различимых под микроскопом (рис. 37).

## §13 Законы сохранения в ядерных реакциях

- Вспомните
- Что такое закон сохранения механической энергии?
  - Что такое закон сохранения импульса?
  - Что такое закон сохранения заряда?

### Законы сохранения энергии, заряда и числа нуклонов

Ядерная реакция — это проявление фундаментальных сил природы, часть физики. Поэтому в ядерных реакциях выполняются неизбежные законы сохранения — те, которые были известны ещё при изучении механики и электричества, и появляются новые законы квантовой механики, связанные с тем, что ядерные реакции осуществляются в микромире.

В процессе ядерных реакций выполняется *закон сохранения энергии*: кинетической, внутренней (энергии возбуждения ядра), энергии покоя элементарных частиц и ядер ( $E_0 = mc^2$  — формула Эйнштейна), несмотря на то что может изменяться совокупная масса частиц, участвующих в реакции, и частиц, образовавшихся в результате взаимодействия. Также во всех ядерных реакциях выполняются *закон сохранения импульса*, *закон сохранения электрического заряда*, *закон сохранения момента количества движения* и появляется новый закон — *закон сохранения числа нуклонов* (протонов и нейтронов). В ядерных реакциях число нуклонов сохраняется. В ядерной физике вводится понятие *барионного заряда*. Барионный заряд для протона равен +1 и для антипротона равен -1. В реакциях с рождением антипротонов барионный заряд сохраняется.

Рассмотрим подробнее эти законы.

Существует атомное ядро, которое в своём составе имеет положительно заряженные протоны, есть элементарная частица, которая взаимодействует с этим ядром и тоже может иметь заряд. В результате ядерной реакции мы получаем некое ядро со своим положительным зарядом и заряженную (возможно нейтральную) частицу.

**Закон сохранения электрического заряда:** суммарная алгебраическая сумма элементарных зарядов до реакции должна быть равна алгебраической сумме зарядов после реакции:

$$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2.$$

Примерно так же действует закон сохранения числа нуклонов.

**Закон сохранения числа нуклонов:** число протонов и нейтронов у элементов, вступивших в реакцию, и у продуктов ядерной реакции должно быть одинаковым.

Используя закон сохранения числа нуклонов и закон сохранения электрического заряда, можно легко определить неизвестный продукт ядерной реакции.

Рассмотрим для примера реакцию взаимодействия лития с протоном:  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + X$ . В результате получается ядро атома гелия и неизвестный продукт этой реакции, который обозначим X. Если посчитать число нуклонов, которые принимали участие в реакции, число протонов, т. е. заряд ядра, то неизвестным продуктом является альфа-частица ( $\alpha$ ) — второе ядро атома гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ).

Рассмотрим, как работает закон сохранения энергии в ядерных реакциях на следующем примере. Есть некое ядро A, оно взаимодействует с частицей a. В результате ядерной реакции получается ядро B и вылетает некоторая частица b:  $a + A \rightarrow b + B$ .

**Закон сохранения энергии:** полная энергия частицы равна сумме её энергии покоя  $Mc^2$  и кинетической энергии E.

Запишем закон сохранения энергии для рассматриваемой реакции:

$$M_a c^2 + M_A c^2 + E_a + E_A = M_b c^2 + M_B c^2 + E_b + E_B.$$

В выражении слева — полная энергия взаимодействующих частиц, справа — полная энергия частиц и ядер, которые получились в результате взаимодействия.

# Глава 5. Ядерные реакции

Разница между кинетическими энергиями взаимодействующих частиц и кинетическими энергиями частиц, получившихся в результате ядерной реакции, называется *энергией реакции*:  $Q = (E_x + E_A) - (E_b + E_B)$ . Эта энергия может быть как положительной, так и отрицательной. Если энергия выделяется ( $Q > 0$ ), то мы говорим об экзотермической реакции. Если энергия поглощается ( $Q < 0$ ), то речь идёт об эндотермической реакции. Нехитрая математическая операция:  $Q = (M_x + M_A - M_b - M_B)c^2$  показывает, что энергия реакции равна произведению разности масс до взаимодействия и масс после взаимодействия и квадрата скорости света. Соответственно, если энергия реакции отрицательна ( $Q < 0$ ), то такая реакция возможна только при условии, что кинетическая энергия частиц, которые взаимодействуют в процессе этой реакции, будет положительна ( $E < 0$ ) и больше определённого порога  $E > (M_x + M_A - M_b - M_B)c^2$ . Такие реакции, которые обязательно требуют затрат дополнительной энергии для своего протекания, называются *пороговыми реакциями*.

## Виды ядерных реакций

Датский учёный Нильс Бор предложил гипотезу, которая имела большое значение в развитии физики атомного ядра. Эта гипотеза о том, что любая ядерная реакция протекает в две стадии (рис. 38).

На *первой стадии* ядро элемента захватывает частицу, взаимодействующую с ним, и эта частица приближается на расстояние действия ядерных сил ( $\sim 10^{-15}$  м), в результате они образуют *составное ядро*. Это ядро оказывается в возбуждённом состоянии, потому что ему сообщили некую дополнительную энергию.

В результате взаимодействия частиц — нуклонов — внутри этого ядра возможна *вторая стадия* ядерной реакции — распад составного ядра на новое ядро и новую частицу.

Все ядерные реакции классифицируются по типу взаимодействующих частиц. Один тип классификации ядерных реакций — по роду участвующих в них частиц. Выделяют реакции, протекающие под действием нейтронов, заряженных частиц (например, протонов,

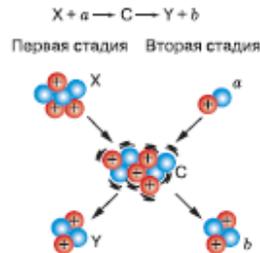


Рис. 38

дейтронов, альфа-частиц), гамма-квантов (которые называются фотоядерными реакциями). Каждая из этих реакций имеет разные свойства.

Другой тип классификации ядерных реакций — по энергиям частиц, которые вызывают данную реакцию. Есть реакции при малых энергиях (порядка электронвольт), но такие реакции происходят в основном с участием нейтронов, потому что у нейтрона нет электрического заряда и он не отталкивается от ядра; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектронвольт), которые происходят с участием гамма-квантов и заряженных частиц; реакции при высоких энергиях (до сотен и тысяч мегаэлектронвольт).

Ещё один тип классификации ядерных реакций — по роду участвующих в них ядер: реакции на лёгких ядрах; реакции на средних ядрах; реакции на тяжёлых ядрах.

И наконец, классификация по характеру происходящих ядерных превращений: реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата. В реакциях захвата составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько гамма-квантов.



## §14 Ядерные реакции под действием заряженных и нейтральных частиц

Вспомните

- Какие законы сохранения выполняются в ядерных реакциях?
- Что предполагает гипотеза Бора о стадиях ядерной реакции?
- Какие виды классификаций ядерных реакций вы знаете?

## Ядерные реакции под действием заряженных частиц

Особым классом ядерных реакций являются реакции, которые протекают под действием заряженных частиц. При проведении таких реакций возникает определённое ограничение. Оно связано с тем, что ядро имеет положительный заряд и большинство взаимодействующих с ядром частиц также имеют положительный заряд. Между одноимёнными электрическими зарядами возникает кулоновская сила отталкивания. Причём эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между частицами.

# Глава 5. Ядерные реакции

цах площади. Но поскольку значения этих сечений очень малы, то для их измерений ввели новую внесистемную единицу площади — *барн* (1 барн =  $10^{-24}$  см<sup>2</sup>).

## Каналы ядерной реакции

Ядерные реакции с одними и теми же начальными данными могут протекать по-разному, и в результате этих реакций могут образовываться различные частицы. В таком случае начальный этап реакции называется *входным каналом реакции*, а то, что мы получаем в результате протекания реакции на втором этапе, называется *выходным каналом реакции*. Выходных каналов может быть несколько (рис. 43).

Рассмотрим пример взаимодействия протона с азотом-14. Возможны четыре различных варианта протекания этой реакции:



Рис. 43

- 1) рассеяние, т. е. появляется азот-14 в другом энергетическом состоянии и протон;
- 2) захват протона азотом, при этом элемент превращается в кислород-15 и испускается гамма-квант;
- 3) образование кислорода-14 с испусканием нейтрона;
- 4) образование азота-13 с испусканием протона и нейтрона.

Вероятность реализации каждого из этих каналов реакции описывается своим сечением. Эти сечения называются *парциальными, частичными сечениями* ( $\sigma_p$ ).

*Полное сечение* взаимодействия протона с азотом есть сумма парциальных сечений по каждому каналу такой реакции:  $\sigma = \sum \sigma_p$ .

## Задачи к главе

**Задача 1.** Определите неизвестный продукт X ядерной реакции  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1p \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + X + {}^1_0n$ .

Ответ:  ${}^1_1p$ .

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/t1>

**Задача 2.** Определите неизвестный продукт X ядерной реакции  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_1p \rightarrow X + {}^1_1p$ .

Ответ:  ${}^{14}_6\text{C}$ .

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/t2>

**Задача 3.** Определите неизвестный продукт X ядерной реакции  ${}^{16}_8\text{O} + {}^1_1p \rightarrow X + {}^1_0n$ .

Ответ:  ${}^{16}_9\text{F}$ .

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/t3>

**Задача 4.** Ядро  ${}^7_3\text{Li}$ , захватив протон, распадается на две альфа-частицы. Определите сумму кинетических энергий этих частиц. Кинетической энергией протона пренебречь.

Ответ: 15 МэВ.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/t4>

**Задача 5.** Определите, какое ядро образовалось в результате протекания ядерной реакции  ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^A_Z\text{X} + {}^1_0n$ .

Ответ:  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/t5>

## Видеолекции к главе

1. <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/11>
2. <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/12>
3. <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/13>
4. <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/14>

## Дополнительные материалы

Ядерные и кулоновские силы. Понятие туннельного эффекта

- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/a1>

Ядерные реакции с рождением антипротонов

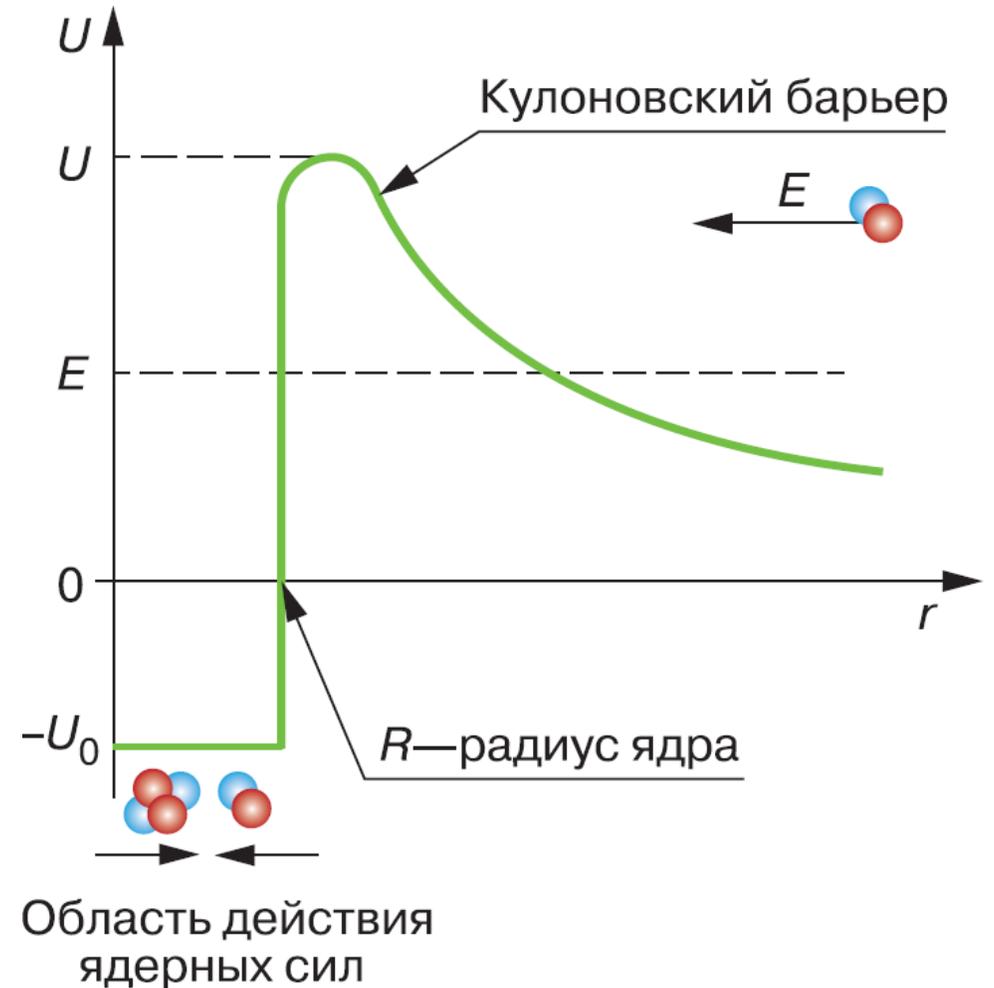
- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/a2>

## Тесты к главе

<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p5/q1>

# Глава 5. Ядерные реакции. Дополнительные материалы

- Ядерные и кулоновские силы.  
Понятие туннельного эффекта
- Ядерные реакции с рождением антипротона



Журнал «Квант» – 1999, № 5

Соросовский образовательный журнал, т. 6, № 1, 2000



# Глава 6. Ядерная астрофизика

## У Вселенной было начало

Поэтому на вопросы: «Где произошёл Большой взрыв?» и «Что было до Большого взрыва?» — современная наука отвечает следующим образом: «Большой взрыв — это та отправная точка, с которой начинается наша Вселенная, а значит, и пространство, и время».

Всё, что нас окружает на планете Земля, мы сами и все живые организмы состоят из мельчайших частичек — атомов. Современная наука знает, что атомы состоят из атомного ядра и электронов, а атомное ядро — из протонов и нейтронов.

То, что атом состоит из протонов и нейтронов, мы узнали всего сто лет назад. Более того, сегодня нам известно, что протоны и нейтроны — это тоже составные частицы. Они состоят из кварков и глюонов. На рисунке 48 показано строение протона и нейтрона.

Символом  $u$  обозначены верхние кварки с зарядом  $+\frac{2}{3}$ , символом  $d$  обозначены нижние кварки с зарядом  $-\frac{1}{3}$ . Посчитав сумму зарядов кварков в нуклоне, можно убедиться, что заряд протона равен  $+1$ , а заряд нейтрона равен  $0$ . Несмотря на то что кварки и глюоны называют «кирпичиками» материи, в свободном состоянии их никто никогда не видел. При увеличении расстояния между кварками удерживающие их силы становятся настолько большими, что кварк не может покинуть протон или нейтрон.

Но так было не всегда. В ранней Вселенной в первые доли секунды после Большого взрыва существовали такие огромные температуры и плотности материи, что кварки и глюоны представляли собой особое состояние вещества, которое называется кварк-глюонной плазмой. Ответы на вопросы, как из кварков и глюонов образовались протоны и нейтроны, а затем и известные нам атомы ищет современная физика.

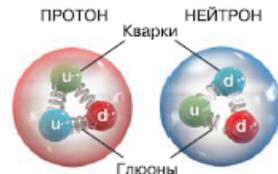


Рис. 48

Причина Большого взрыва до сих пор окончательно не выяснена. Но известно, что Большой взрыв — это явление, которое произошло на невообразимо малых расстояниях ( $10^{-33}$  см) за очень короткое время ( $10^{-44}$  с), и плотность вещества, которое образовалось в результате Большого взрыва, т. е. плотность нашей самой ранней Вселенной, была

эквивалентна  $10^{94}$  г/см<sup>3</sup>. Если говорить о температуре этого сверхплотного и сверхгорячего вещества, то она составляла  $10^{32}$  К.

Через очень короткое время после Большого взрыва, примерно через  $10^{-34}$  с, Вселенная в результате инфляции (так называют очень быстрое экспоненциальное расширение) увеличилась от «точечных» до «макроскопических» размеров — примерно до 10 см.

Когда закончился процесс инфляции, температура во Вселенной упала от  $10^{32}$  К до  $10^{27}$  К. И так, через  $10^{-24}$  с имеется горячий сгусток материи, в котором начинают формироваться несколько типов элементарных частиц материи: кварки, лептоны (электроны,

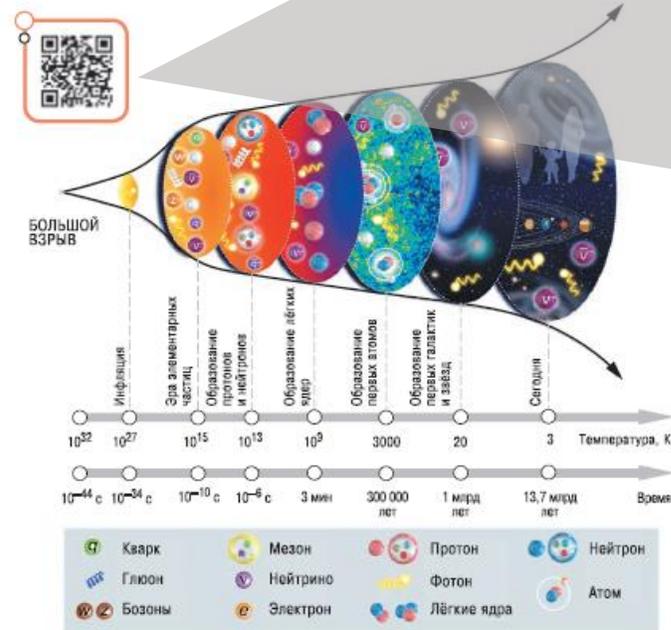


Рис. 49. Хронология эволюции Вселенной от Большого взрыва до наших дней





# Глава 6. Ядерная астрофизика

## Термоядерные реакции в звёздах

### Происхождение элементов тяжелее железа

Рассмотрим стадии жизни звезды (рис. 51).

После Большого взрыва Вселенная представляла собой высокооднородную и изотропную среду, как мы уже говорили, в основном состоящую из ядер водорода и гелия. Через достаточно большое время после Большого взрыва (около миллиарда лет) из высокооднородной и изотропной среды стали образовываться локальные сгустки плотности этой среды, и, как следствие, возникли области с более высокой гравитацией. Стали образовываться зародыши звёзд — так называемые протозвёзды. Протозвезда является массивным газовым облаком. В результате гравитационного взаимодействия частичек газа и пыли протозвезда начинает расти.

Когда температура и давление в центре протозвезды возрастают настолько, что становятся возможными термоядерные реакции, начинается самый долгий этап эволюции звезды — термоядерный. Часть энергии, выделяющейся в центре звезды при синтезе гелия из водорода, уносится в мировое пространство всепроникающими нейтрино, а основная доля переносится к поверхности светила гамма-квантами и частицами сильно ионизованного газа. Этот истекающий от центра поток энергии противостоит давлению внешних слоёв и препятствует дальнейшему сжатию звезды.

При рождении звезды в ней начинает протекать сложная термоядерная реакция, носящая название *протон-протонная реакция* (рис. 52), в результате которой появляется новый элемент — гелий. Она протекает в три стадии.

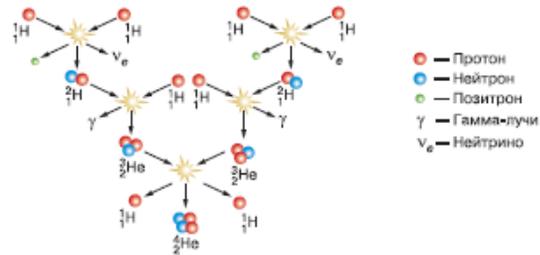
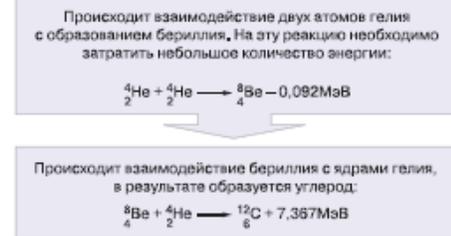


Рис. 52



От центра звезды к поверхности движется слой, в котором на первом этапе продолжает сгорать водород, а затем гелий и более тяжёлые элементы. Несмотря на то что ядро звезды сжимается, её внешняя газовая оболочка растёт, и звезда превращается в красный гигант.

В процессе эволюции звезды элементы вещества в ядре занимают всё новые клетки в таблице Менделеева. Когда температура достигает примерно 4 млрд К, происходит нуклеосинтез ядер железа и близких к нему по массе ядер (никеля и кобальта). У этих элементов энергия связи в ядрах наибольшая. Последующее выделение энергии за счёт реакций синтеза невозможно. Термоядерный период звезды заканчивается. Следующий ход эволюции светила определяется гравитационными силами, сжимающими звезду.

Затем у красного гиганта есть два дальнейших пути существования. Если масса звезды мала и сопоставима с массой Солнца, то после истощения топлива (т. е. выгорания водорода и гелия) звезда вступает в окончательную стадию коллапса. Она может сжаться до состояния белого карлика. Белые карлики — это компактные объекты размером, сравнимым с размером Земли, с малой светимостью и большой плотностью,  $10^8$ – $10^9$  г/см<sup>3</sup> (для сравнения, плотность атомного ядра примерно  $10^{13}$ – $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>).

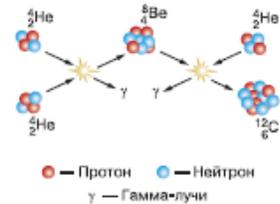


Рис. 53

# Глава 7. Синтез новых тяжёлых и сверхтяжёлых элементов

## § 18. Реакции синтеза новых элементов тяжелее урана

- Синтез в реакциях последовательного захвата нейтронов
- Эксперименты на ускорителях. «Горячее» слияние
- Метод «холодного» слияния

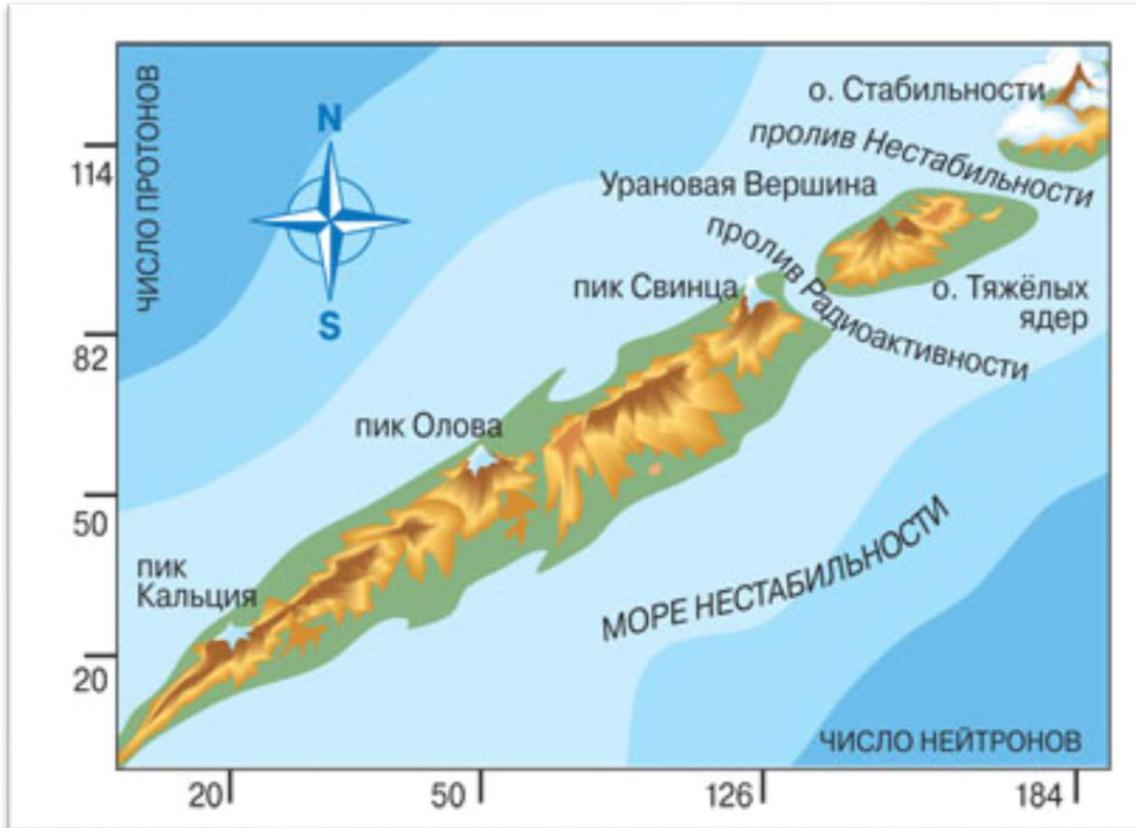
## § 19. Опыты по поиску «острова стабильности»

- Ожидаемые свойства сверхтяжёлых ядер
- Постановка эксперимента
- Экспериментальные результаты

*Дополнительные материалы*



# Поиск «острова стабильности»



- Некоторые ядра встречаются в природе чаще других. Это магические и дважды магические ядра. Например, кальций, олово и свинец.
- Существует теоретическое предсказание, что следующее сверхтяжелое стабильное ядро будет иметь элемент с числом протонов 114 и числом нейтронов 184.
- Ученые проверяют гипотезу о существовании некой области стабильных сверхтяжелых ядер, которая получила название «острова стабильности».

# Глава 7. Синтез новых тяжёлых и сверхтяжёлых элементов

## Синтез элементов тяжелее урана

ным элементом был технеций ( $Z = 43$ ), который был ранее предсказан Менделеевым как «экамарганец».

### Синтез в реакциях последовательного захвата нейтронов

Элементы тяжелее урана с зарядовым числом  $Z = 93, 94, \dots, 100$  были синтезированы в реакциях последовательного захвата нейтронов ядрами урана при длительных облучениях на мощных ядерных реакторах (пример такой реакции на рисунке 56). При захвате нейтронов происходит бета-минус-распад. Нейтрон превращался в протон, и полученное ядро с зарядовым числом, на единицу большее первоначального, занимало следующую клетку таблицы Менделеева.

Этот метод позволял в некоторых случаях получать новые элементы в больших количествах. Например, неизвестный ранее изотоп плутония  $^{239}\text{Pu}$  с периодом полураспада  $10^4$  лет теперь производится в количествах, равных сотням тонн, и используется в ядерной энергетике и ядерном вооружении.



Рис. 55. Уникальный снимок, где запечатлены творцы новых элементов, имена которых увековечены в таблице Менделеева (слева направо: Г. Н. Флёрв, Ю. Ц. Оганесян, Г. Сиборг)

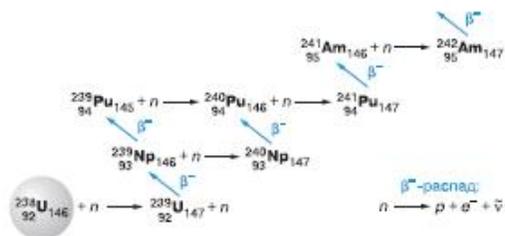


Рис. 56. Пример получения нептуния, плутония и амерция из урана-238

### ЭТО ИНТЕРЕСНО!

#### Получение трансураниевых элементов

Элементы с зарядовым числом  $Z = 93, 94, \dots, 100$  (нептуний, плутоний, амерций, юрий, берклий, калифорний, эйнштейний, фермий) (рис. 57) были открыты американским профессором Гленном Сиборгом и его коллегами в 1940–1953 гг. Они работали в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США). В дальнейшем один из элементов периодической системы был назван в честь Сиборга (Sg — сиборгий,  $Z = 106$ ), и ещё два элемента — в честь лаборатории, в которой были открыты новые трансураниевые элементы (Bk — берклий,  $Z = 97$ ), и географического места (Cf — калифорний,  $Z = 98$ ), где расположена эта лаборатория (штат Калифорния, США).

Наиболее тяжёлый изотоп, который был получен в этих экспериментах,  $^{257}\text{Fm}$  (фермий,  $Z = 100$ ), имел период полураспада 100 сут. Но следующий изотоп  $^{258}\text{Fm}$  имел период полураспада уже только 0,3 мс. Поэтому метод последовательного захвата нейтронов не позволил продвинуться в синтезе новых элементов дальше фермия (Fm,  $Z = 100$ ).



Рис. 57. Элементы, открытые в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США)



# Глава 7. Синтез новых тяжёлых и сверхтяжёлых элементов

## Синтез элементов тяжелее урана

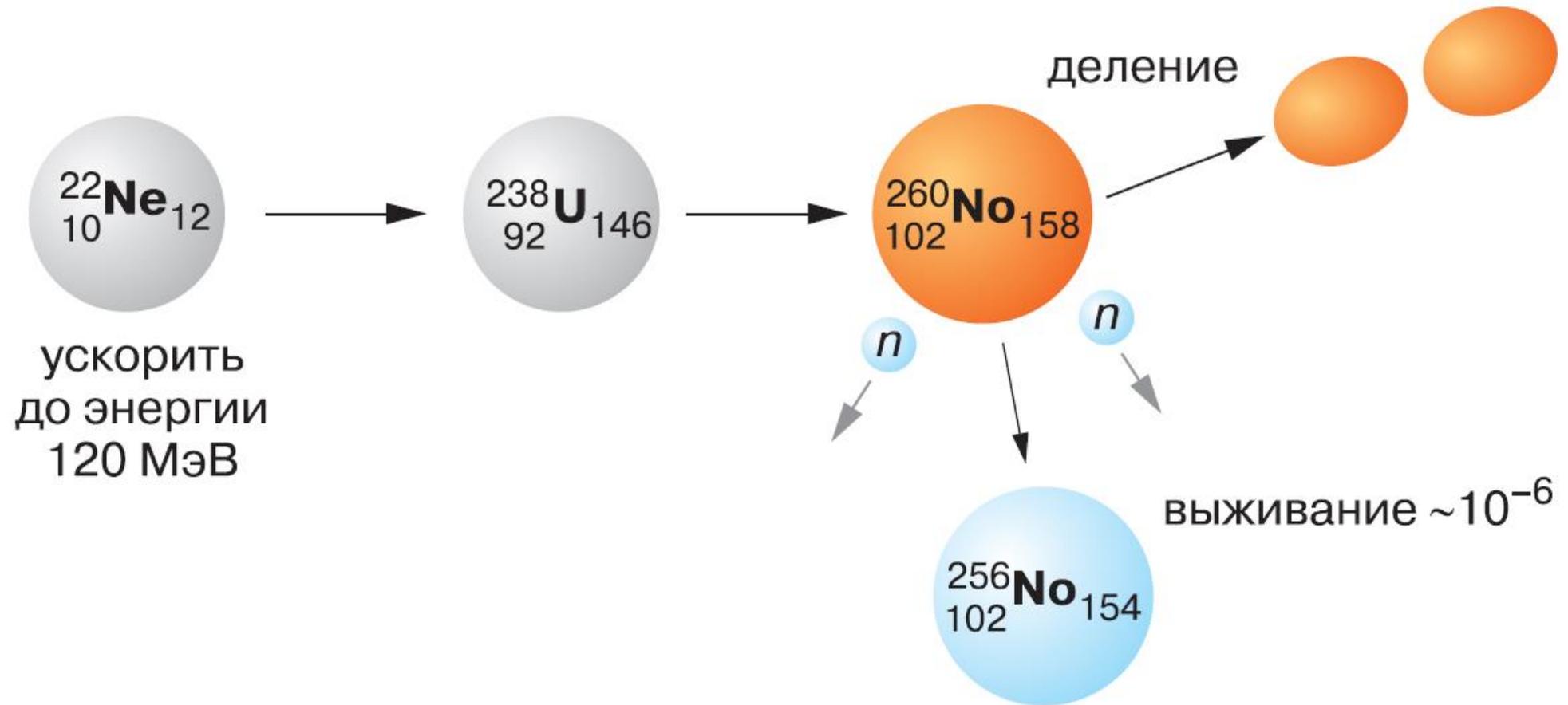


Рис. 60. Схема реакции синтеза нобелия методом «горячего» слияния

# Глава 7. Синтез новых тяжёлых и сверхтяжёлых элементов



митровграде (Россия) и затем обогащались на специальных установках, которые называются масс-сепараторами. Эту работу выполняли специалисты из Всероссийского института экспериментальной физики в Сарове. Отметим, что период полураспада наработанного вещества, например радиоактивного изотопа  $^{249}\text{Bk}$ , составляет 300 сут. Этот изотоп был необходим для эксперимента по синтезу теннессина, Ts (117-го элемента).

Реакции слияния ядер  $^{48}\text{Ca}$  с ядрами этих изотопов были выбраны для синтеза элементов с зарядовым числом  $Z = 114, 115, \dots, 118$ . Для осуществления реакции слияния необходимо ускорить ионы кальция в **циклотроне** до скорости, примерно равной  $1/10$  скорости света, или, другими словами, до скорости 30 000 км/с. Это необходимо для того, чтобы ядра кальция преодолели кулоновский барьер. При приближении ядер снаряда, летящих с большой скоростью, к неподвижным ядрам мишени силы кулоновского отталкивания совершают работу, в результате скорость ядра снаряда уменьшается. Это имеет важное значение, поскольку процесс слияния двух ядер происходит при малых относительных скоростях.

Пучок ускоряемых частиц обычно характеризуют таким параметром, как интенсивность.

**Интенсивность пучка** — это количество частиц пучка, проходящих через его поперечное сечение в единицу времени.



Рис. 64. Экспериментальная установка по синтезу сверхтяжёлых элементов в Лаборатории ядерных реакций в ОИЯИ (г. Дубна, Россия). 1 — инжекционный комплекс (источник  $^{48}\text{Ca}$ ), 2 — циклотрон (циклический ускоритель заряженных частиц), 3 — каналы транспортировки пучка, 4 — мишень (ядра с  $Z = 92, 93, \dots, 98$ ), 5 — детекторная система



Интенсивность пучка ядер кальция-48 составляет до  $10^{13}$  ядер/с. Это очень большая интенсивность. Мы рассматриваем редкие процессы образования сверхтяжёлых элементов. Когда миллиарды ядер снаряда проходят мишень без взаимодействия, такая высокая интенсивность пучка имеет важное значение. Даже при образовании полного слияния ядра, как правило, оно сразу распадается на два или несколько фрагментов. Полное слияние ядер снаряда и мишени происходит крайне редко. За 5 лет экспериментов общее число ядер кальция, которое было ускорено и прошло через слои мишени, составило около  $2 \cdot 10^{20}$  ионов. Это около 16 мг кальция-48.

На рисунке 64 приведена схема эксперимента. Воспользовавшись QR-кодом, вы можете познакомиться с 3D-моделью эксперимента по поиску сверхтяжёлых элементов.

## ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Детекторная система состоит из времяпролётных детекторов и полупроводниковых детекторов, регистрирующих сверхтяжёлые ядра и их радиоактивный распад. Времяпролётные детекторы измеряют скорость ядра, а полупроводниковые стриповые детекторы (рис. 65) предназначены для регистрации и определения энергии синтезированных тяжёлых ядер и продуктов их распада. На рисунке 66 показана цепочка распада синтезированного 115-го элемента (московия). Синтезированный элемент попадает в один из фронтальных детекторов, где он регистрируется и испытывает цепочку распадов. Вылетающие из материнского ядра альфа-частицы ( $\alpha_1 - \alpha_5$ ), которые образуются при распаде синтезированного ядра, регистрируются боковыми стенками детекторной сборки. Очень важно засвидетельствовать, что зарегистрировано рождение нового элемента, что все испущенные альфа-частицы и спонтанное деление ядра произошли в одной точке.

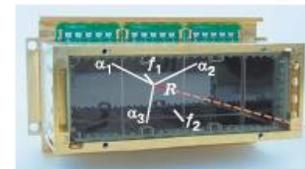


Рис. 65

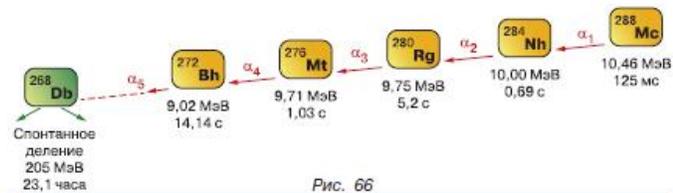


Рис. 66

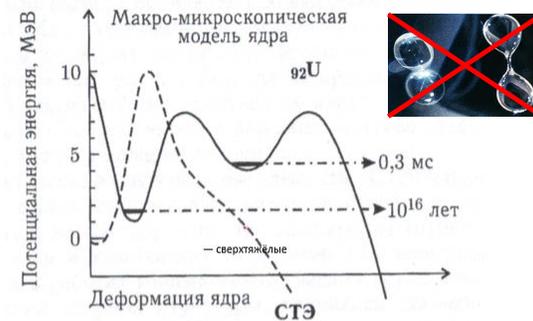


# Глава 7. Синтез новых тяжёлых и сверхтяжёлых элементов

## Дополнительные материалы к главе 7:

### «Сколько может быть химических элементов?»

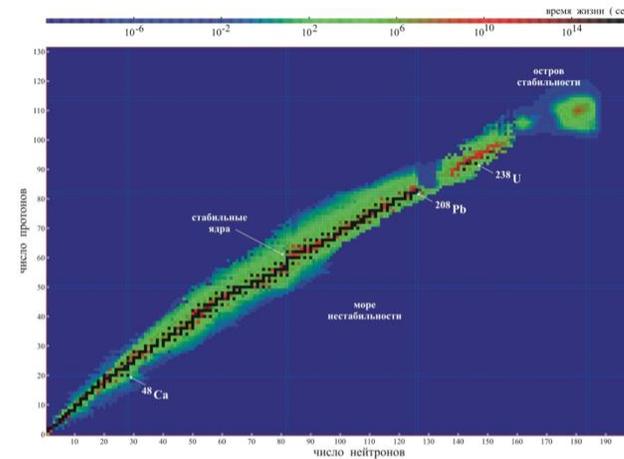
больше 100, то есть в той области, где, согласно капельной модели, ядра уже не могут существовать.



Качественный вид зависимости энергии ядра (урана, сверхтяжёлых элементов) от деформации согласно макро-микроскопической модели ядра

Расчёты привели к неожиданным результатам. Оказалось, что в атомном ядре с массой 270 ( $Z = 108$ ,  $N = 162$ ) также возникают ядерные оболочки. По этой причине повышается барьер деления, что обеспечивает для этого ядра и соседних с ним ядер достаточно продолжительное время жизни, измеряемое секундами (напомним, что в капельной модели предсказывалось время  $10^{-19}$  с). Но ещё более неожиданным оказалось теоретическое предсказание стабильных сверхтяжёлых ядер с числом протонов  $Z = 114$  и большим числом нейтронов  $N = 184$ . Это ядро, наподобие ядра свинца-208, является дважды магическим. Это позволяет предсказать, что это ядро и соседние с ним ядра образуют неизвестную ещё науке область,

где периоды полураспада ядер могут достигать тысячи и даже миллионы лет! Эта область на карте нуклидов называется «остров стабильности».



Карта нуклидов, на которой показан «остров стабильности» сверхтяжёлых элементов

# Глава 8. Радиация и жизнь

## Космическая радиация

### Влияние радиации и способы защиты от неё

Первые работы по его изучению были проведены астрономом Юджином Паркером и были посвящены как изучению самого солнечного ветра, так и взаимодействию его с геомагнитным полем Земли.

Попробуем разобраться, что собой представляет солнечный ветер. В таблице 6 представлен относительный химический состав солнечного ветра. Как видно из таблицы, наиболее часто встречающиеся элементы в солнечном ветре — это лёгкие элементы: водород, гелий и т. п.

Таблица 6. Относительный химический состав солнечного ветра

Элемент	Относительное содержание, %
H	0,96
<sup>3</sup> He	$1,7 \cdot 10^{-5}$
<sup>4</sup> He	0,04
O	$5 \cdot 10^{-4}$
Ne	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Si	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Ar	$3 \cdot 10^{-6}$
Fe	$4,7 \cdot 10^{-5}$

Так почему мы не подвергаемся прямому воздействию такого огромного количества частиц, которое идёт от Солнца напрямую к Земле? У Земли существует магнитное поле (рис. 68), благодаря которому часть частиц солнечного ветра обтекает поверхность Земли, а другая его часть концентрируется в областях магнитных полюсов и проникает в атмосферу, в результате чего мы наблюдаем полярное сияние. Именно поэтому мы не подвергаемся губительному воздействию космической радиации, в отличие от космонавтов в открытом космосе.



Рис. 68

Ионизирующее излучение может оказывать воздействие на живой организм двумя способами:

- 1) внешнее облучение от источника, расположенного вне организма, которое в основном зависит от радиационного фона местности, где проживает или работает человек, или от других внешних факторов;
- 2) внутреннее облучение, обусловленное поступлением внутрь организма радиационного вещества, главным образом с продуктами питания.

От внешнего облучения можно защититься специальными экранами (рис. 70) или другими способами. С внутренним облучением это невозможно. Существует три возможных пути, по которым радионуклиды способны попасть внутрь организма: с пищей, через дыхательные пути вместе с воздухом, через повреждения на коже.

Излучения разных видов оказывают неодинаковое воздействие на организм, что объясняется разной ионизирующей способностью. Так, альфа-излучение не способно проникнуть через наружный слой кожи и не представляет опасности до тех пор, пока вещества, испускающие альфа-частицы, не попадут внутрь организма. Для защиты от альфа-излучений нет необходимости рассчитывать толщину экрана, поскольку проникающая способность этого излучения крайне мала и достигает в воздухе всего несколько сантиметров. Резиновые перчатки уже обеспечивают достаточный уровень защиты от альфа-излучений.

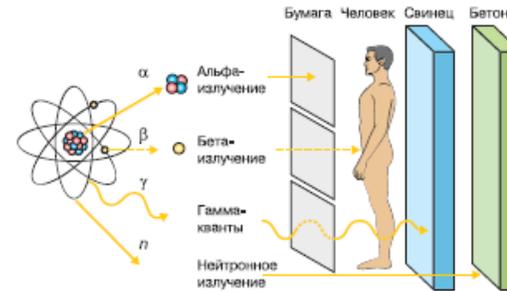


Рис. 70

# Глава 9. Использование ядерных технологий

§ 22. Атомная энергетика

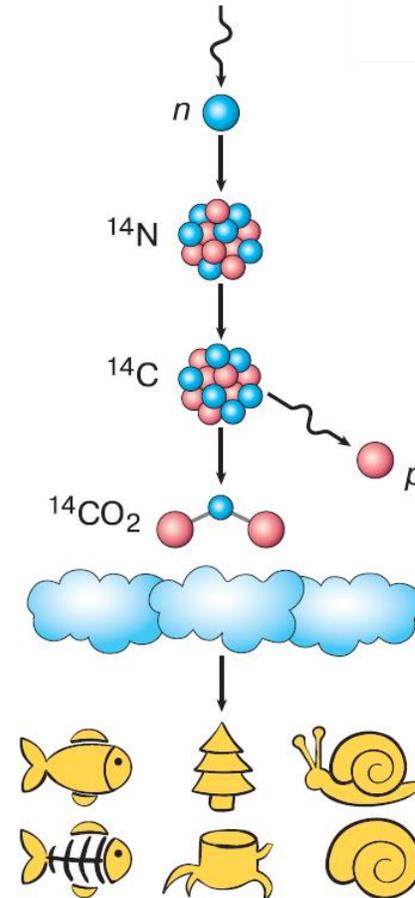
§ 23. Ядерная медицина

§ 24. Ядерные технологии в промышленности

§ 25. Радиоуглеродное датирование

*Задачи к главе*

*Видеолекции к главе*



# Глава 9. Использование ядерных технологий

## Ядерная энергетика

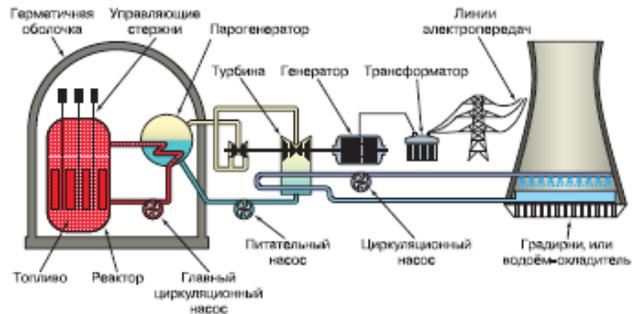


Рис. 71

ядро урана распадается на несколько осколков, которые сразу после деления обладают кинетической энергией, а значит, и скоростью. Осколки, образованные в массе топлива, мгновенно начинают замедляться, испытывая соударения с соседними ядрами и тем самым вызывая нагрев топлива. Отвод образующегося тепла осуществляется за счёт обтекания массы топлива теплоносителем. Наиболее популярным теплоносителем сегодня является вода. Нагретая вода поступает в парогенератор и, протекая внутри теплообменных трубок, заставляет кипеть воду, омывающую трубки снаружи. Образующийся пар поступает на турбину и, вращая её, осуществляет выработку электроэнергии.

### ЭТО ИНТЕРЕСНО!

Первая в мире АЭС, которая дала промышленное электричество, была построена в СССР в Обнинске, и решение о строительстве первой в мире промышленной АЭС было принято в 1950 г. В 1951 г. был разработан технический проект, и тогда же в 1951 г. началось строительство. Физический пуск первой АЭС был осуществлён в 1954 г. За четыре года был построен полноценный энергоблок и осуществлён его физический пуск. В июне 1954 г. была осуществлена подача пара на турбину (для того чтобы производить электричество). И уже 29 октября 1954 г. была достигнута проектная мощность 5 МВт.

На сегодняшний день в мире существует свыше 440 реакторов, которые находятся в эксплуатации и производят электричество.

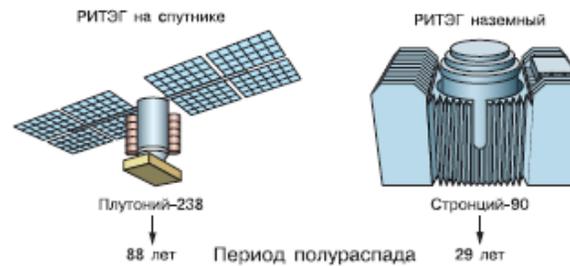


Рис. 82. Применение РИТЭГов в космосе и на Земле

ходящихся в отдалённых местах, где по техническим или экономическим причинам нет возможности использовать другие источники. Однако из-за риска утечки радиации и радиоактивных материалов в последнее время РИТЭГи не используются.

Чаще всего в качестве топлива в РИТЭГах используется плутоний-238 или стронций-90 (рис. 82). Плутоний-238 применяется в качестве топлива в космических аппаратах и является незаменимым изотопом при космических полётах. Период его полураспада 88 лет. Это означает, что потери составляют всего лишь 0,78 % мощности в течение года. Стронций-90 используется в наземных РИТЭГах. Период полураспада — 29 лет. Он дешёв, получается из отходов ядерных реакторов и может производиться в больших количествах. Это и определило его использование в наземных РИТЭГах.

На сегодняшний день более чем в 30 странах мира применяется так называемая радиационная обработка пищевых продуктов. Чтобы продлить срок хранения, облучают картофель, зерно, чеснок, лук, сухофрукты, клубнику, другие овощи и фрукты. Технологический эффект от дозы облучения зависит от условий облучения и дозы поглощённой энергии. Различают три уровня дозы поглощённой энергии:

- первый уровень — низкие дозы, до 1 кГр. При этих дозах тормозят прорастание овощей и фруктов в процессе их хранения, уничтожают насекомых, амбарных вредителей;
- второй уровень — средние дозы (1–10 кГр). Этот уровень, губительный для многих видов вегетативных форм микробов, обеспечивает «холодную стерилизацию» продукции;

# Глава 9. Использование ядерных технологий

## Ядерная медицина

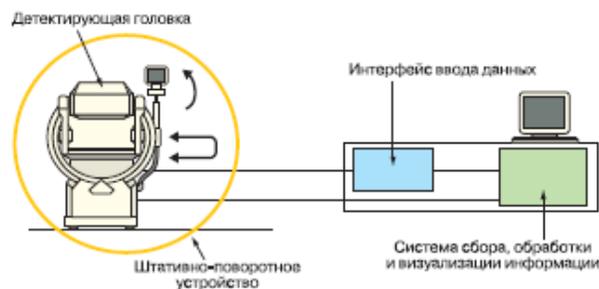


Рис. 77

частиц, испускаемых из медицинского ускорителя). Применяется для лечения онкологических заболеваний.

Одним из первых методов радиотерапии была *брахитерапия*. В этом методе источник ионизирующего излучения, например радий-226, протий-192, иод-125 или кобальт-60, вводится внутрь поражённого органа. Преимущество метода заключается в возможности подведения максимальных доз лучевой терапии непосредственно в опухолевый очаг при минимальном воздействии на критические органы или смежные ткани. Этот метод широко используется при лечении опухоли шейки матки, тела матки, предстательной железы, пищевода, прямой кишки, языка и многих других органов.

*Протонная и углеродная терапия* — это метод, который использует тяжёлые заряженные частицы для облучения больной ткани при онкологических заболеваниях (рис. 79).

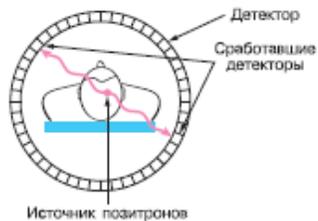


Рис. 78

Протоны, а также ускоренные ионы углерода имеют сравнительно большую массу, поэтому при прохождении ткани они испытывают лишь очень малое поперечное рассеяние. Поэтому пучок можно сфокусировать на опухоль, не внося существенных повреждений в окружающие здоровые ткани. Все протоны и ионы

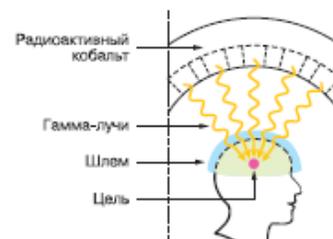


Рис. 80

лютно безболезненный. Время процедуры может составлять от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от остроты заболевания. После окончания облучения пациент может идти домой.

*Нейтронзахватная терапия* — метод лечения рака с использованием реакций, возникающих между радиоактивными медикаментами и нейтронами.

Принцип действия нейтронзахватной терапии показан на рисунке 81. Сначала в кровь человека вводится радиоизотоп: либо бор-10, либо гадолиний-150, либо кадмий. Клетки опухоли начинают поглощать и концентрировать в себе молекулы вводимого в организм человека радиоизотопа.

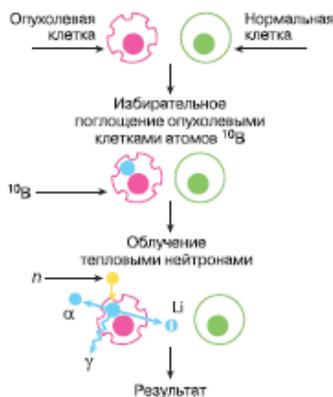


Рис. 81

При облучении организма тепловыми медленными нейтронами происходит захват этих нейтронов ядрами изотопа и деление этих ядер с последующим излучением. В результате раковые клетки разрушаются.

В 1995 г. группа учёных из МИФИ, а также из ГНЦ (Государственного научного центра) Института биофизики провели на реакторе ИРТ в МИФИ первый эксперимент по нейтронзахватной терапии с использованием препарата, содержащего гадолиний. Для этого был специально смонтирован стенд для облучения мелких лабораторных животных в пучке нейтронов реактора.

# Глава 9. Использование ядерных технологий

## Радиоуглеродное датирование

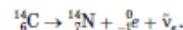
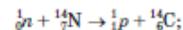


Либби Уиллард Франк  
(1908–1980)

ческих материалов путём измерения содержания радиоактивного изотопа углерода-14 в этих материалах.

Углерод-14 появляется, как мы уже разобрались, в результате реакции взаимодействия нейтрона и ядра азота в атмосфере. Данный элемент имеется абсолютно во всех органических соединениях на Земле, и именно с помощью этого элемента можно определить их возраст. Впервые данный метод был предложен Уиллардом Либби в 1950 г. К 1960-м гг. датирование с помощью этого метода получило абсолютно всеобщее признание и по всему миру были созданы радиоуглеродные лаборатории. Сам Либби удостоен Нобелевской премии по химии.

При взаимодействии нейтрона с ядром изотопа азота с атомной массой 14 получаем один протон и радиоуглерод — изотоп углерод-14. Теперь рассмотрим обратную реакцию: углерод распадается на азот-14, электрон и электронное антинейтрино. Итак, у нас есть две реакции: первая — появление углерода; вторая — его исчезновение:



Рассмотрим процесс, который можно назвать круговоротом углерода в природе. Нейтроны космического излучения доходят до поверхности Земли, и там в результате столкновения с азотом образуется радиоактивный изотоп углерод-14, который поступает в атмосферу в виде углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). В атмосфере поддерживается практически постоянная концентрация данного изотопа. У углерода известно более 10 изотопов, два из которых стабильны: это углерод-12 и углерод-13. Наиболее распространён стабильный изотоп с атомной массой 12 а. е. м. В виде углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) углерод проникает в океан, на сушу, накапливается в тканях растений, животных, рыб, образуя так называемые карбонатные соединения — раковины и минералы (рис. 84), т. е. полностью участвует во всех биологических процессах в природе. Так, радиоуглерод накапливается в живых организмах.

Любой организм с воздухом, с пищей получает радиоуглерод, и одновременно этот радиоуглерод в нём распадается (рис. 85). Та-

ким образом, концентрация углерода-14 внутри организма во время его жизни постоянна.

Как только живой организм прекращает своё существование, процесс поглощения нового углерода останавливается, но при этом распад углерода в его останках продолжается. То есть во время жизни в существе было два изотопа углерода: в основном углерод-12 (стабильный) и углерод-14 (распадается). Со временем углерода-14 становится всё меньше и отношение количества этого изотопа ко всему углероду (концентрация) уменьшается. Если мы измерим, какова эта концентрация в данный момент времени, и спрогнозируем, какова она была в момент времени, когда исследуемый организм ещё жил, мы сможем определить, какое время назад углерод перестал накапливаться, т. е. определим возраст останков.

Давайте попробуем выразить это с помощью некоторых формул. Воспользуемся законом радиоактивного распада:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N}, \quad (12)$$

где  $t$  — время;  $\lambda$  — постоянная распада;  $N_0$  — количество атомов в начальный момент;  $N$  — количество атомов в настоящий момент времени.

Если мы переищем выражение (12), заменив количество атомов на концентрацию изотопа углерода-14 по отношению ко всему углероду (т. е. заменим  $N$  на  $C$ ), получим формулу, позволяющую определить возраст органических останков:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (13)$$

где  $t$  — время;  $\lambda$  — постоянная распада  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5768$  лет);  $C_0$  — концентрация

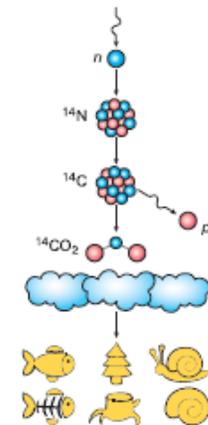


Рис. 84. Круговорот углерода в природе

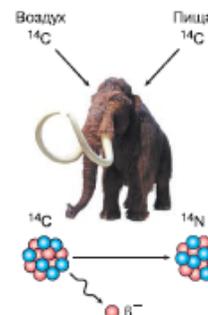
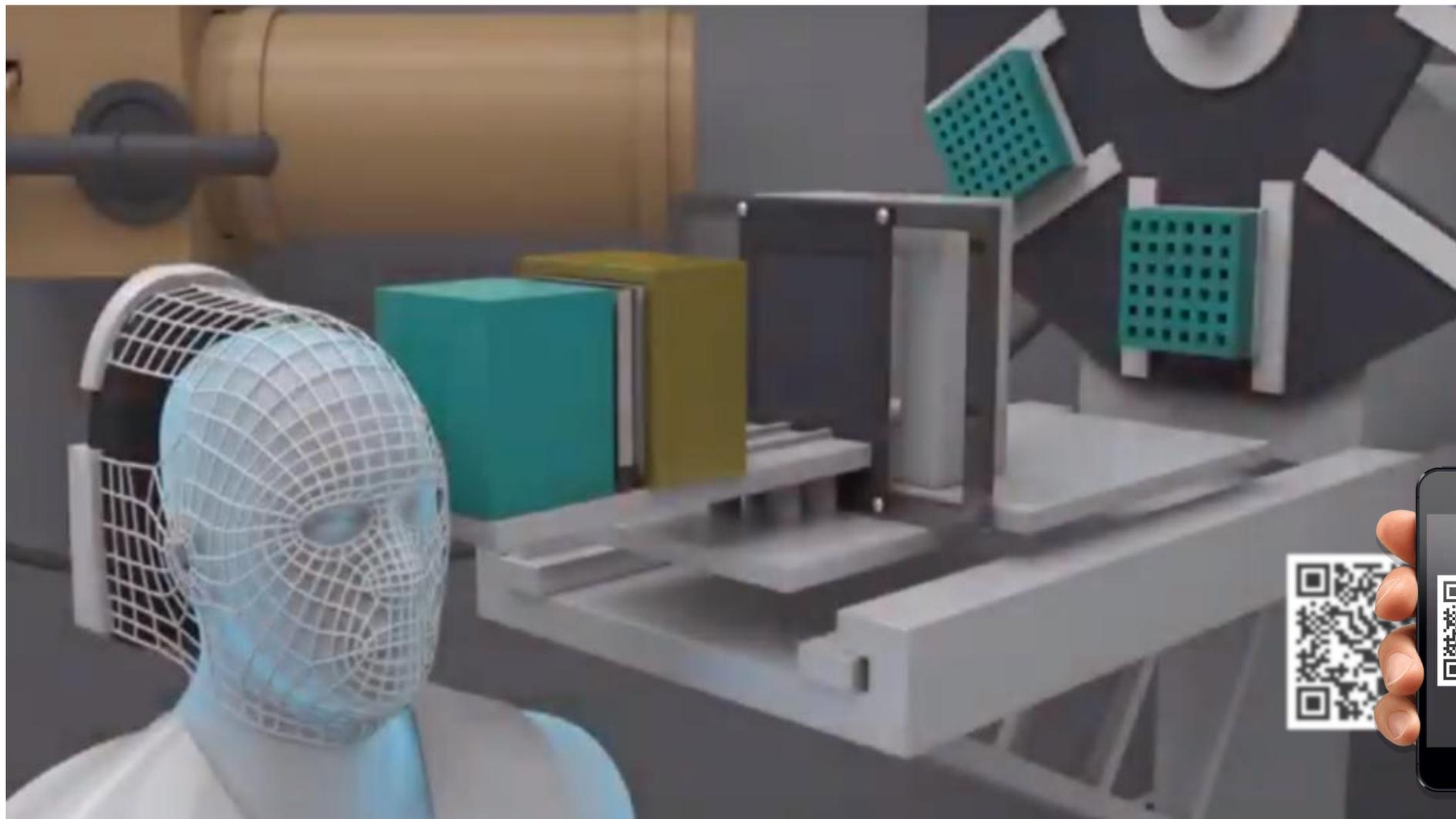


Рис. 85

# Глава 9. Использование ядерных технологий

## Медицинский комплекс протонной терапии





# Глава 10. Глобальные источники энергии

## Энергетика в жизни человека

### Источники энергии на Земле и их сравнительный анализ

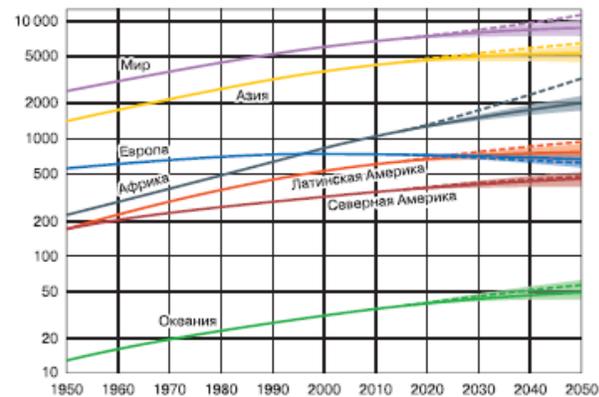


Рис. 86. Рост населения, по данным ООН, с 1950 по 2018 г. и прогноз до 2050 г.

кальня и единична. Хотелось бы подчеркнуть, что в целом в течение последних столетий рост населения Земли положительный.

В среднем в год численность людей на Земле увеличивается примерно на 70 млн человек. Несомненно, необходимо обеспечить потребности этих людей в электроэнергии. Это приводит к тому, что необходимо иметь в достаточном количестве источники энергии, которые возможно использовать правильно, не загрязняя при этом окружающую среду. Очевидно, что с ростом населения неизбежно придется увеличивать мощность самих источников энергии.

Люди живут в разных условиях. Из 7 млрд человек треть населения живёт, испытывая дефицит питьевой воды и не имея доступа к электричеству (рис. 87). Для того чтобы эти люди могли лучше жить, необходимы новые источники энергии. Одна из альтернатив, которую люди могут реализовать, — это использование ядерной энергии.

Ядерная энергетика стоит особняком от других источников энергии. Рассмотрим, с чем это связано.

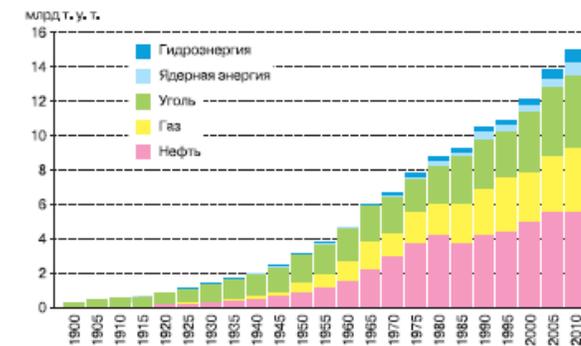


Рис. 88

гидроэнергия. Обратите внимание на то, что рост потребления энергии будет продолжаться, и этот рост необходимо компенсировать строительством новых электростанций.



#### Источники энергии на Земле и их сравнительный анализ

Вспомните

- Какие бывают источники энергии?
- Что такое возобновляемые и невозобновляемые источники энергии?

Перечислим источники энергии на Земле. Существуют ископаемые источники, к которым относятся уголь, нефть, природный газ, уран. Природный уран является ископаемым источником энергии. И основное топливо ядерной энергетики тоже находится в земле. Существуют, помимо этого, возобновляемые источники энергии, такие, например, как древесина. Долгое время наши предки использовали в качестве источников энергии деревья, сжигая их в кострах, в печах, пока не освоили более сложную техно-

# Глава 11. В лабораториях учёных

§ 28. Коллайдеры и загадки Вселенной

§ 29. Нейтрон как инструмент научных исследований

- Ядерная физика и экология
- Ядерная планетология

§ 30. Тяжёлые ионы и безопасность полёта человека на Марс

§ 31. Нейтринная физика на озере Байкал

*Дополнительные материалы*



# Глава 11. В лабораториях учёных

## Коллайдеры и загадки Вселенной

ранее неизвестные звёзды. В середине XVII в. Роберт Гук публикует свой труд «Микрография» — собрание биологических гравюр микромира. Он впервые увидел клетку. Немного позже Антони ван Левенгук улучшает микроскоп и при увеличении 275 раз видит одноклеточные организмы, эритроциты в крови, бактерии, клетки глаза насекомых и мышечные волокна. С тех пор каждый прорыв в экспериментальном изучении строения вещества или структуры Вселенной был связан с созданием новых приборов. Например, создание мощного радиотелескопа позволило Пензиасу и Вилсону зарегистрировать реликтовое излучение во Вселенной.



**Лоуренс**  
Эрнест Орландо  
(1901—1958)



Рис. 91

Начиная с 30-х гг. XX в. основным прибором для исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц становится ускоритель. В 1928 г. норвежский физик и инженер Рольф Видероз создал первый линейный ускоритель. В 1931 г. Эрнестом Орландо Лоуренсом был создан первый в мире циклотрон (рис. 91), который имел диаметр всего 10 см и энергию ускоренных частиц 80 кэВ.

Современные ускорительные комплексы — это гигантские сооружения, цель которых — разогнать частицу до энергий, сравнимых с теми, которые были на самых ранних этапах развития Вселенной. Например, в коллайдере LHC (от англ. *Large Hadron Collider* — ускоритель заряженных частиц) в ЦЕРНе сталкиваются два пучка протонов, каждый с энергией по 7 ТэВ —  $7 \cdot 10^{12}$  эВ. Таким образом, при столкновении выделяется энергия 14 ТэВ. Длина ускорительного кольца этого коллайдера составляет около 28 км.

Когда мы говорим об ускорителях, необходимо понимать два следующих обстоятельства.

1. Для того чтобы изучить какой-либо объект (например, протон или ядро), необходимо (иметь частицу-образец с длиной волны много меньше линейных

размеров этого объекта. Известно, что и электрон, и протон обладают как свойствами волны, так и свойствами частицы. Длина волны частицы  $\lambda$  зависит от её импульса  $p$  (энергии  $E$ ) и задаётся формулой де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{2\pi h}{E} \approx \frac{6,28 \cdot 200 (\text{МэВ})}{E(\text{МэВ})} \text{Фм},$$

где  $h$  — постоянная Планка, 1 Фм —  $10^{-15}$  см.

Эта формула удобна для численных расчётов, если необходимо получить связь между длиной волны релятивистской частицы и её энергией, выраженной в электронвольтах.

Например, для того чтобы «заглянуть внутрь» ядра, энергия электрона должна превышать 100 МэВ, а для того чтобы «заглянуть внутрь» протона и увидеть кварки, электроны следует ускорять до энергии в несколько десятков ГэВ.

2. Современные ускорители позволяют достичь энергий протонов свыше 7 ТэВ —  $7 \cdot 10^{12}$  эВ —  $7 \cdot 10^{12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж  $\approx 1,1 \cdot 10^{-6}$  Дж.

Сравним эту величину с энергией маленькой углеродной пылинки массой 0,01 мг при скорости 10 см/с. Пылинка обладает кинетической энергией  $E = \frac{mv^2}{2} = 5 \cdot 10^{-11}$  Дж.

Легко вычислить число атомов углерода в этой пылинке. Оно составляет  $5 \cdot 10^{18}$ . Значит, кинетическая энергия одного атома этой движущейся пылинки примерно равна  $10^{-39}$  Дж, т. е. на 35 порядков меньше энергии протона, ускоренного в LHC.

Большой вклад в создание современных ускорителей и коллайдеров внесли выдающиеся советские учёные Владимир Иосифович Векслер и Герш Ицкович Будкер. В.И. Векслер открыл принцип автофазировки, который лежит в основе работы всех современных ускорителей высоких энергий, и построил в Дубне синхрофазотрон — первый в мире ускоритель на энергию 10 млрд эВ. Г.И. Будкер разработал метод электронного охлаждения и создал в Новосибирском Академическом городке первые накопительные кольца, ставшие прообразом современных коллайдеров.

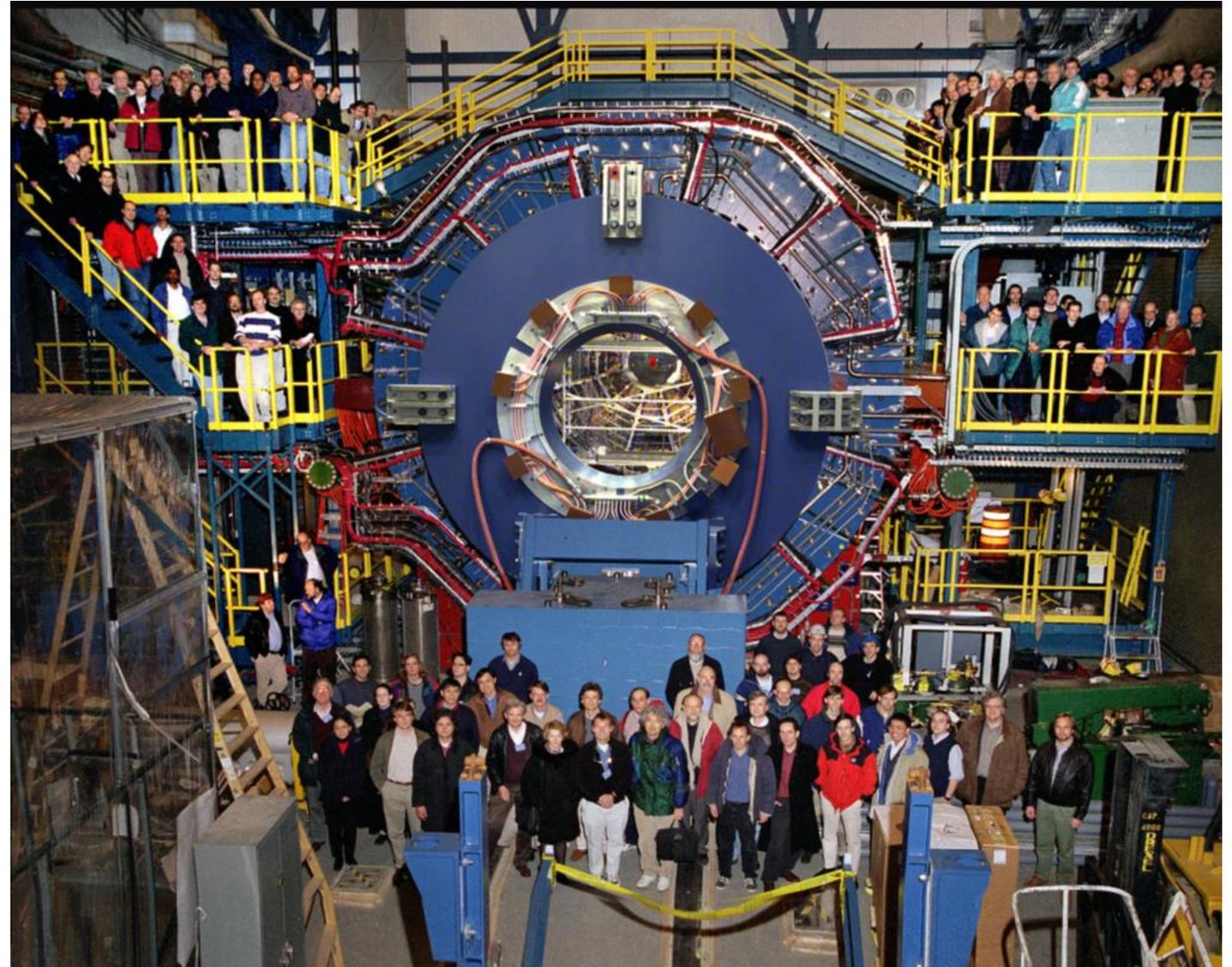
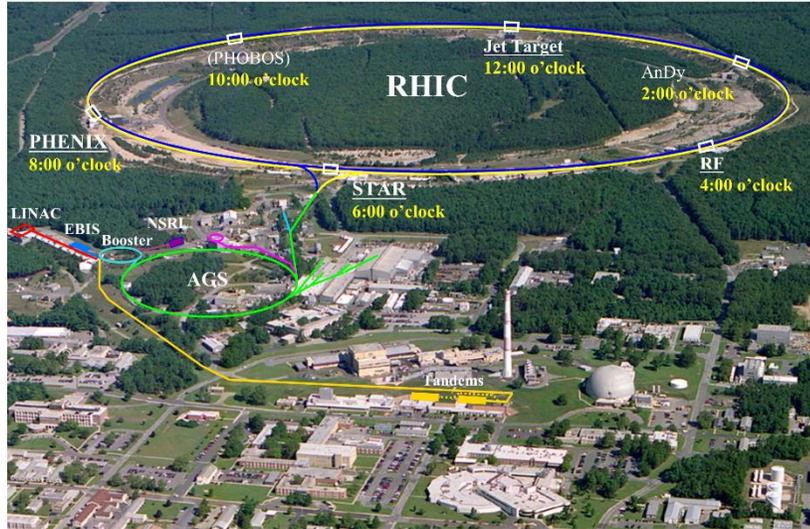


**Векслер** Владимир  
Иосифович  
(1907—1966)



**Будкер** Герш Ицкович  
(1918—1977)

# Релятивистский ядерный коллайдер RHIC

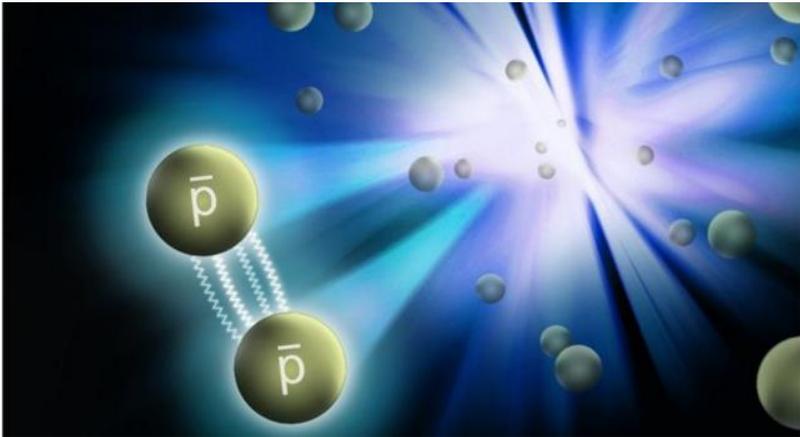


# Исследование антиматерии в ранней Вселенной

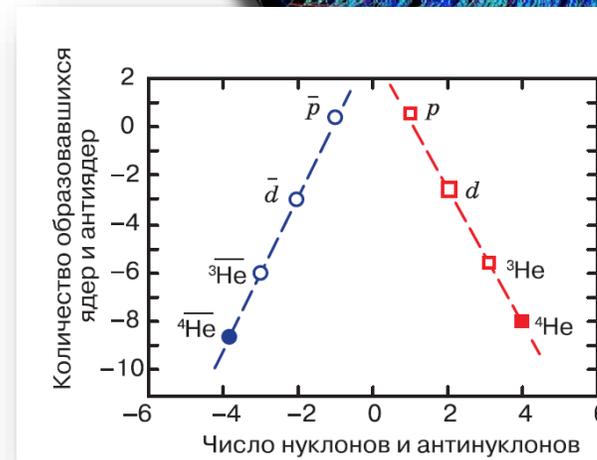
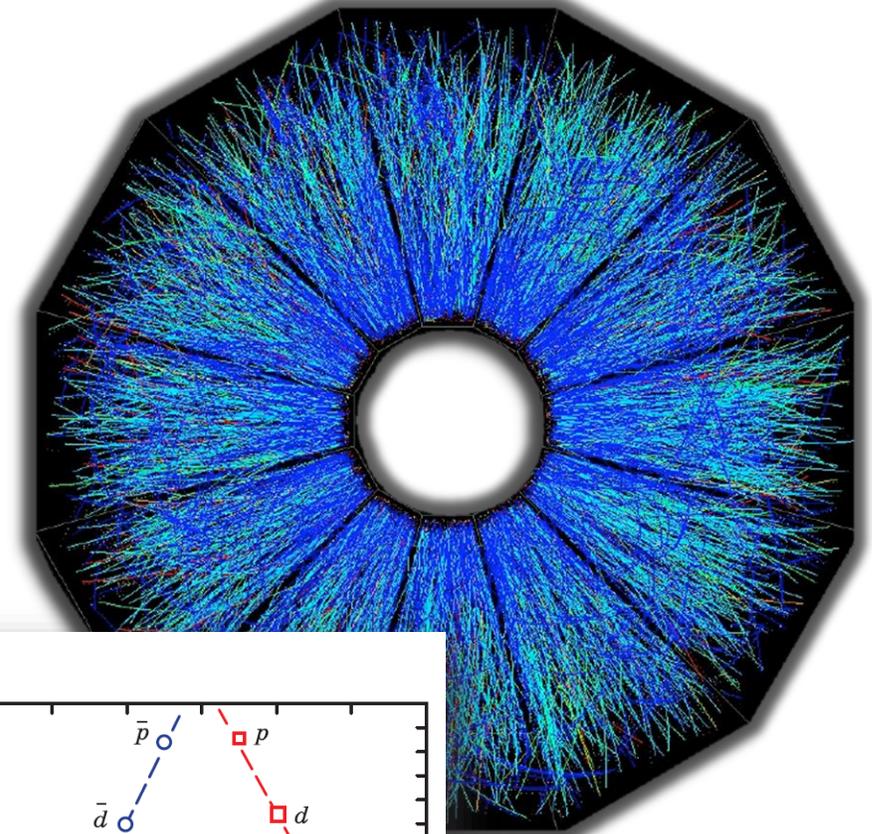
**nature** International weekly journal of science

Home | News & Comment | Research | Careers & Jobs | Current Issue | Archive | Audio & Video | For Authors

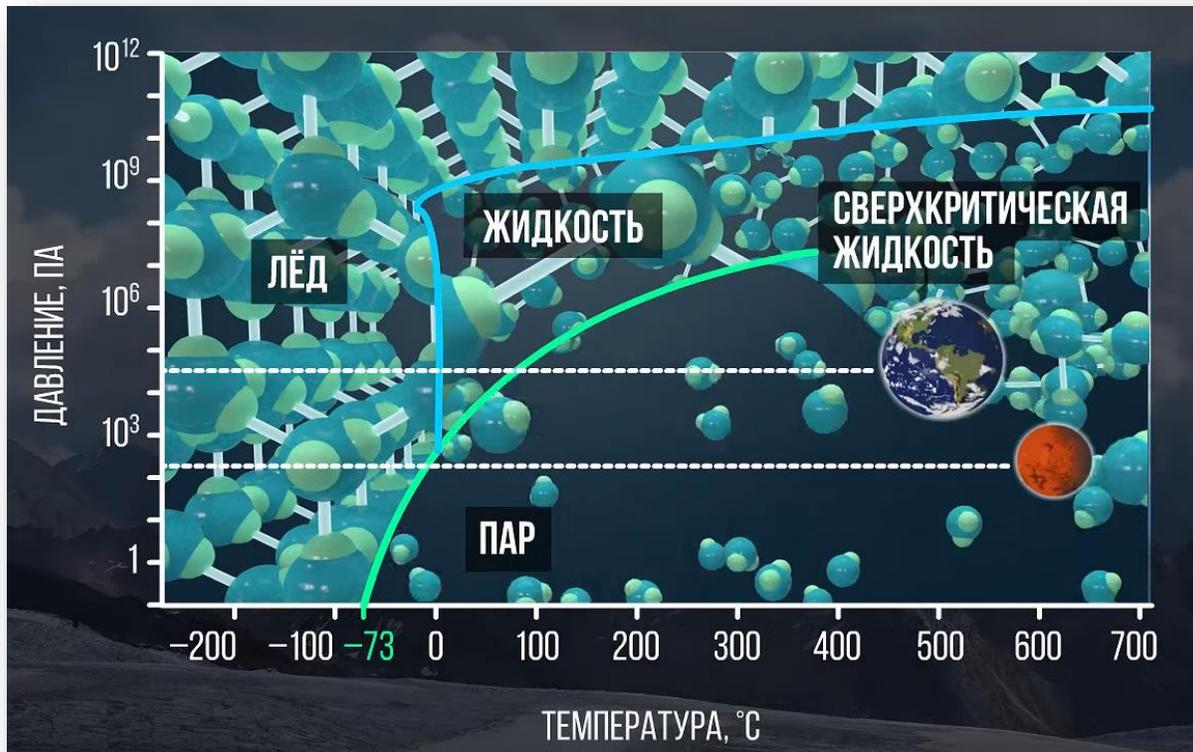
Archive | Volume 527 | Issue 7578 | Letters | Article



One of the primary goals of nuclear physics is to understand the force between nucleons, which is a necessary step for understanding the structure of nuclei and how nuclei interact with each other. Rutherford discovered the atomic nucleus in 1911, and the large body of knowledge about the nuclear force that has since been acquired was derived from studies made on nucleons or nuclei. Although antinuclei up to antihelium-4 have been discovered<sup>1</sup> and their masses measured, little is known directly about the nuclear force between antinucleons. Here, we study antiproton pair correlations among data collected by the STAR experiment<sup>2</sup> at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)<sup>3</sup>, where gold ions are collided with a centre-of-mass energy of 200 gigaelectronvolts per nucleon pair. Antiprotons are abundantly produced in such collisions, thus making it feasible to study details of the antiproton-antiproton interaction. By applying a technique similar to Hanbury Brown and Twiss intensity interferometry<sup>4</sup>, we show that the force between two antiprotons is attractive. In addition, we report two key parameters that characterize the corresponding strong interaction: the scattering length and the effective range of the



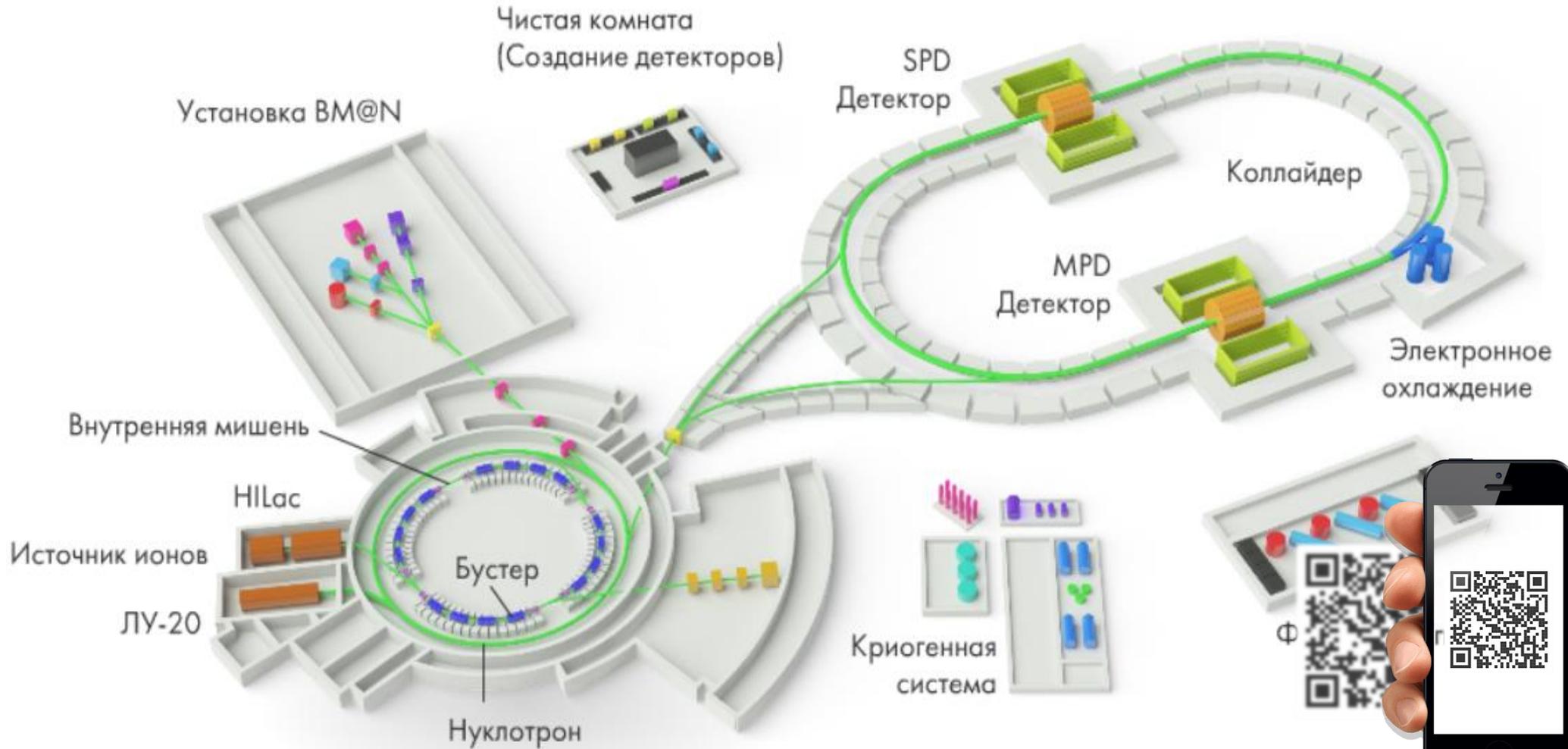
# Исследование материи в ранней Вселенной





# Глава 11. В лабораториях учёных

## Ускорительный комплекс NICA



# Глава 11. В лабораториях учёных

## Ядерная физика и экология

Одной из установок, позволяющих изучать экологическую обстановку на разных континентах, является установка «РЕГАТА» для нейтронного активационного анализа.

**Нейтронный активационный анализ (НАА)** — ядерно-физический метод определения состава вещества, основанный на активации атомных ядер с помощью нейтронов и исследовании радиоактивного излучения, возникающего вследствие возбуждения атомных ядер.

Поскольку в основе нейтронного активационного анализа лежат ядерные процессы (рис. 96), то метод позволяет определять концентрацию элементов в образце независимо от того, в какое химическое соединение входят атомы определяемых элементов. Образуясь после облучения радионуклиды излучают гамма-кванты с энергиями, характерными только для данного радионуклида.

Количественное определение состава вещества при активационном анализе основано на том, что активность образовавшегося радионуклида пропорциональна количеству ядер исходного нуклида определяемого элемента, и может быть рассчитано с использованием ядерных констант («абсолютный метод НАА»).

С помощью НАА на реакторе ИБР-2М проводятся следующие исследования:

- контроль качества воздуха (исследования аэрозольных фильтров, биомониторинг с использованием мхов, лишайников, коры деревьев и др.);
- оценка состояния наземных и водных экосистем (почвы, донных отложений, биот);

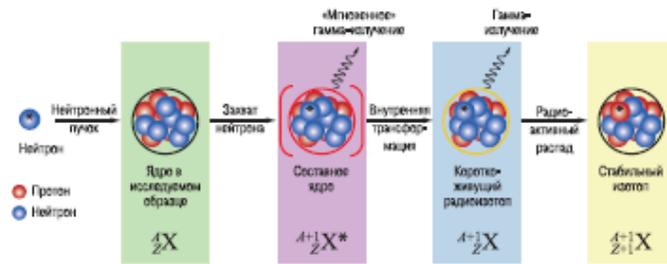


Рис. 96

Экологическими исследованиями на установке «РЕГАТА» занимаются специалисты со всего мира. Они производят картирование загрязнённых районов для международных организаций, осуществляющих контроль за загрязнениями воздуха.

## Ядерная планетология

С середины 90-х гг. XX в. было подготовлено и проведено в космосе около десятка научно-исследовательских миссий, посвящённых исследованию планет и малых тел Солнечной системы. На борту космических аппаратов были установлены ядерно-физические приборы. В основном это нейтронные и гамма-спектрометры, применяемые для исследования поверхности планет и определения их элементного состава.

Учёные из Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ совместно с Институтом космических исследований РАН разработали детектор нейтронов высоких энергий ХЕНД (HEND) для исследования поверхности Марса. 7 апреля 2001 г. Национальное космическое агентство (NASA, США) направило к Марсу космический аппарат «2001 MARS ODYSSEY» (рис. 98), на борту которого, помимо прочего исследовательского оборудования, был установлен детектор ХЕНД, который и по сей день ведёт исследование поверхности Марса на наличие запасов воды.



Рис. 98

# Глава 11. В лабораториях учёных

## § 30 Тяжёлые ионы и безопасность полёта человека на Марс

- Вспомните
- Что вы знаете о действии радиации?
  - Что такое космическое излучение?

Как связаны космическое излучение и магнитное поле Земли?

Более полувека тяжёлые заряженные частицы привлекают внимание специалистов-радиобиологов как эффективный инструмент при решении фундаментальных вопросов, связанных с выяснением механизмов биологического действия ионизирующей радиации. Последние десятилетия учёными был выдвинут ряд практических задач. Одна из них связана с проблемами космической радиобиологии. Увеличение дальности и длительности космических полётов выдвинуло на первый план проблему оценки опасности биологического действия высокоэнергетичных тяжёлых ионов на живые организмы и разработки мер радиационной безопасности экипажей кораблей. Благодаря созданию ускорителей многозарядных ионов, способных ускорять ядра тяжёлых элементов, стало возможным моделировать биологическое действие галактического космического излучения в наземных условиях.



Рис. 102. Влияние космической радиации на космонавта

## § 31 Нейтринная физика на озере Байкал

- Вспомните
- Что вы знаете о Стандартной модели?
  - Что вы знаете о нейтринно?

В процессе эволюции Вселенной в ней происходят процессы, сопровождающиеся огромными энерговыделениями, выбросами вещества и элементарных частиц, среди которых и потоки нейтрино, в космическое пространство.

Нейтрино — это одна из элементарных частиц, фундаментальных кирпичиков Стандартной модели. Нейтрино связана со сла-

Зарегистрировать нейтрино довольно сложно, но физики справились и с этой задачей. В кристально чистой воде озера Байкал

(рис. 103) на глубине 1300 м строится гигантский нейтринный телескоп объёмом  $1 \text{ км}^3$ , который представляет собой гирлянды стеклянных шаров-фотодетекторов с регистрирующей аппаратурой внутри (рис. 104). В создании этого нейтринного телескопа принимают участие Институт ядерных исследований РАН, ОИЯИ, Московский государственный университет, НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета. Байкальский нейтринный телескоп — это проект не только российского, но и мирового уровня. Сегодня три таких телескопа находятся в Антарктиде, на Байкале и в Средиземном море и объединены в единую нейтринную исследовательскую сеть.



Рис. 104. Фотоумножитель внутри оптической ячейки детекторной системы нейтринного телескопа



Рис. 105. Спуск новой оптической ячейки на дно озера Байкал

# Глубоководный эксперимент на озере Байкал



Рис. 103

бым взаимодействием и возникает в процессах бета-распада и термоядерных реакциях в звездах. Большие потоки нейтрино возникают и при взрывах сверхновых. Можно предположить, что в природе есть и нейтрино, родившиеся на самых ранних стадиях эволюции Вселенной, т. е. при Большом взрыве. Нейтрино и антинейтрино имеют очень маленькую массу (не более 0,28 эВ). Нейтрино не имеет электрического

заряда и, самое главное, имеет очень маленькое сечение взаимодействия с веществом и способно преодолевать огромные расстояния во Вселенной. Поэтому нейтрино может рассказать, что происходило миллиарды лет назад.

Зарегистрировать нейтрино довольно сложно, но физики справились и с этой задачей. В кристально чистой воде озера Байкал (рис. 103) на глубине 1300 м строится гигантский нейтринный телескоп объёмом 1 км<sup>3</sup>, который представляет собой гирлянды стеклянных шаров-фотодетекторов с регистрирующей аппаратурой внутри (рис. 104). В создании этого нейтринного телескопа принимают участие Институт ядерных исследований РАН, ОИ-ЯИ, Московский государственный университет, НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета. Байкальский нейтринный телескоп — это проект не только российского, но и мирового уровня. Сегодня три таких телескопа находятся в Антарктиде, на Байкале и в Средиземном море и объединены в единую нейтринную исследовательскую сеть.



Рис. 104. Фотоумножитель внутри оптической ячейки детекторной системы нейтринного телескопа

На озере Байкал регистрируются нейтрино, которые проходят сквозь нашу планету со стороны Южного полюса, а в Антарктиде регистрируются нейтрино, которые проходят сквозь Землю со стороны Северного полюса.

Проходя через толщу воды озера Байкал, нейтрино порождают ливни вторичных частиц. Они оставляют светящийся след от так называемого излучения Вавилова—Черенкова, которое может быть зарегистрировано фотоумножителями (с общей схемой эксперимента можно познакомиться по QR-коду).

Только представьте себе: через 1 см<sup>2</sup> за 1 с пролетает около  $6 \cdot 10^{10}$  нейтрино! При этом мы этого абсолютно не ощущаем.

Сотрудники лаборатории работают над развитием нейтринной обсерватории. В зимних условиях, когда возможны работы на льду, они занимаются ремонтом детекторов, а также добавлением новых кластеров (рис. 105). Каждый кластер содержит около двухсот фотоумножителей. Чем больше будет обсерватория, тем больше будет получено информации о возникновении нашей Вселенной и о структуре космического пространства.

Перед погружением каждый модуль проходит серьёзные испытания, чтобы надёжно регистрировать свет в течение многих лет, испытывая давление до 130 атмосфер!

## Дополнительные материалы

Приборы, помогающие заглянуть вглубь материи:

- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p11/a1>



Рис. 105. Спуск новой оптической ячейки на дно озера Байкал





# Виртуальный исследовательский практикум по ядерной физике



## Виртуальный исследовательский практикум по ядерной физике

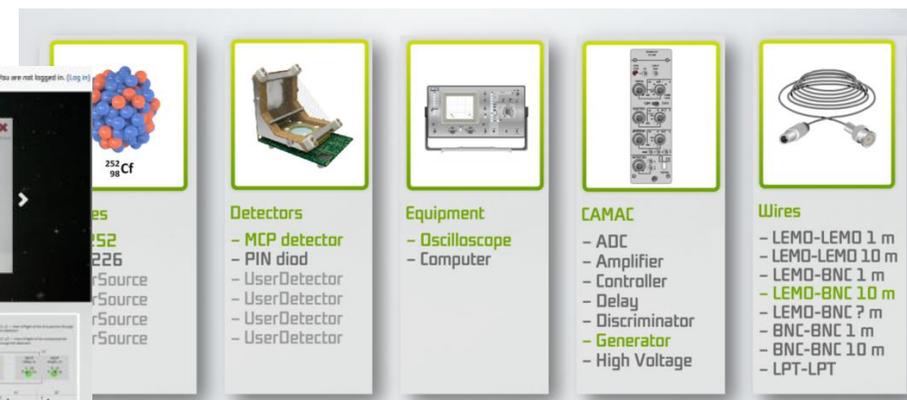
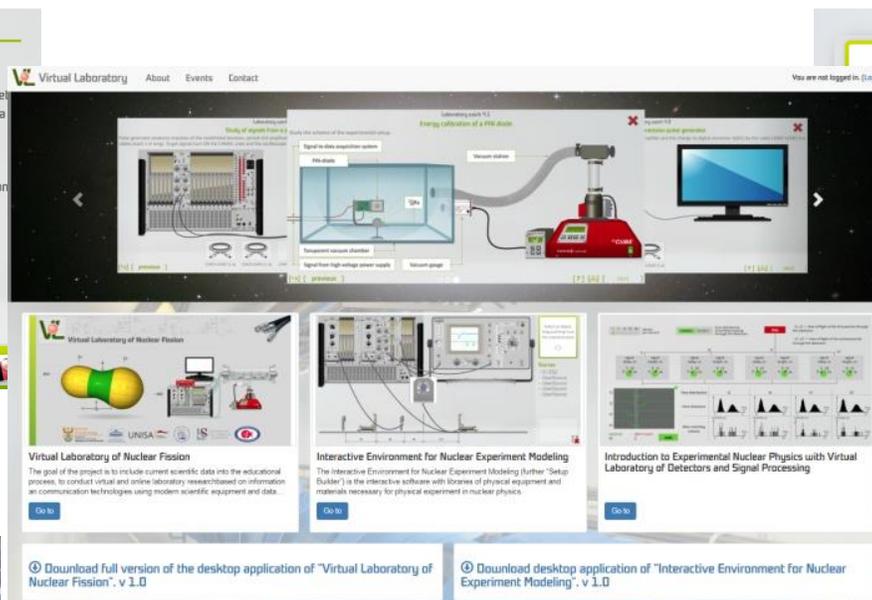
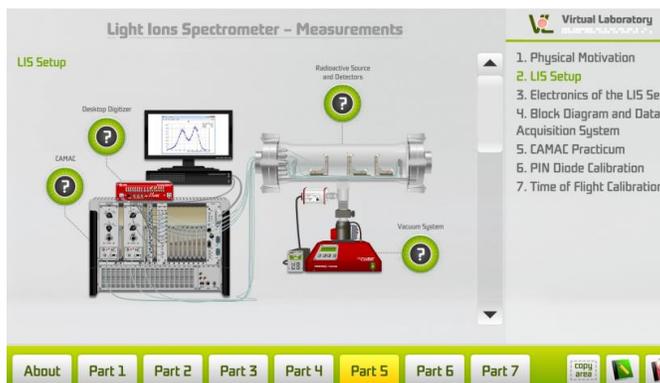
1. Основы измерений в ядерной физике. Виртуальная лабораторная работа с осциллографом и генератором сигналов:  
<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl1>
2. Основы измерений в ядерной физике. Виртуальная лабораторная работа с радиоактивным источником:  
<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl2>
3. Взаимодействие заряженных частиц с веществом. Виртуальная лабораторная работа по измерению спектра альфа-частиц:  
<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl3>
4. Взаимодействие гамма-квантов с веществом. Комpton-эффект. Рождение электрон-позитронных пар. Виртуальная лабораторная работа по измерению спектра гамма-квантов:  
<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl4>
5. Характеристическое рентгеновское излучение. Закон Мозли. Виртуальная лабораторная работа по измерению заряда ядра:  
<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl5>
6. Виртуальная лабораторная работа по исследованию процесса спонтанного деления калифорния-252 с помощью двухплечевого времяпролётного спектрометра:  
<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl6>



## Методические материалы к практикуму

- [http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl\\_manual](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/vl_manual)

# Проект «Виртуальная лаборатория»



Виртуальная лаборатория  
ядерного деления

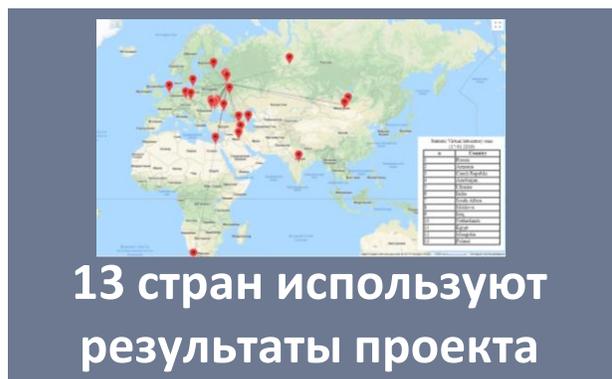


Практикум по экспериментальной  
ядерной физике для студентов

Интерактивная среда моделирования  
ядерно-физического эксперимента

**Результаты:**

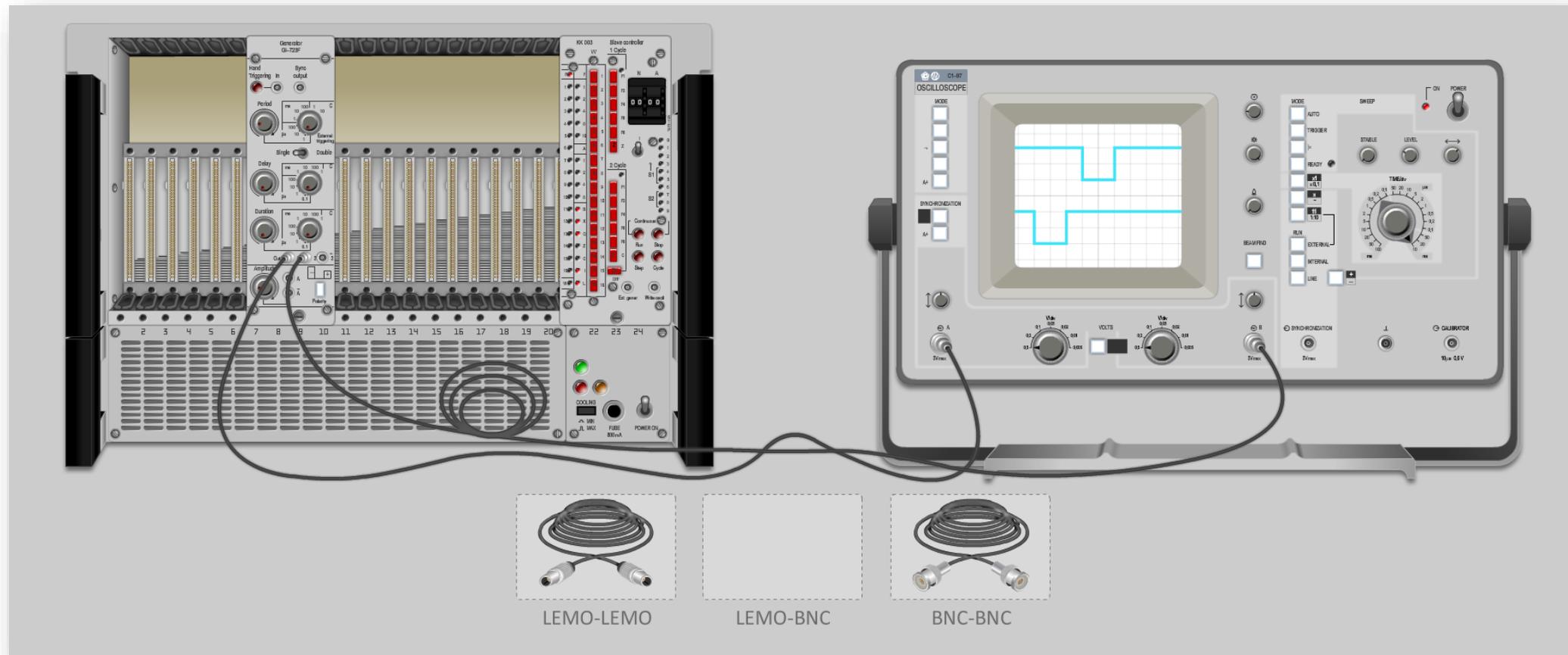
- Экспериментальная ядерная физика для начинающих
- Программно-аппаратный комплекс «Лаборатория ядерного деления»
- Программно-аппаратный комплекс «Лаборатория гамма-спектроскопии»
- Практикум по экспериментальной ядерной физике



<http://edu.jinr.ru/vlabs>

# Виртуальный исследовательский практикум по ядерной физике

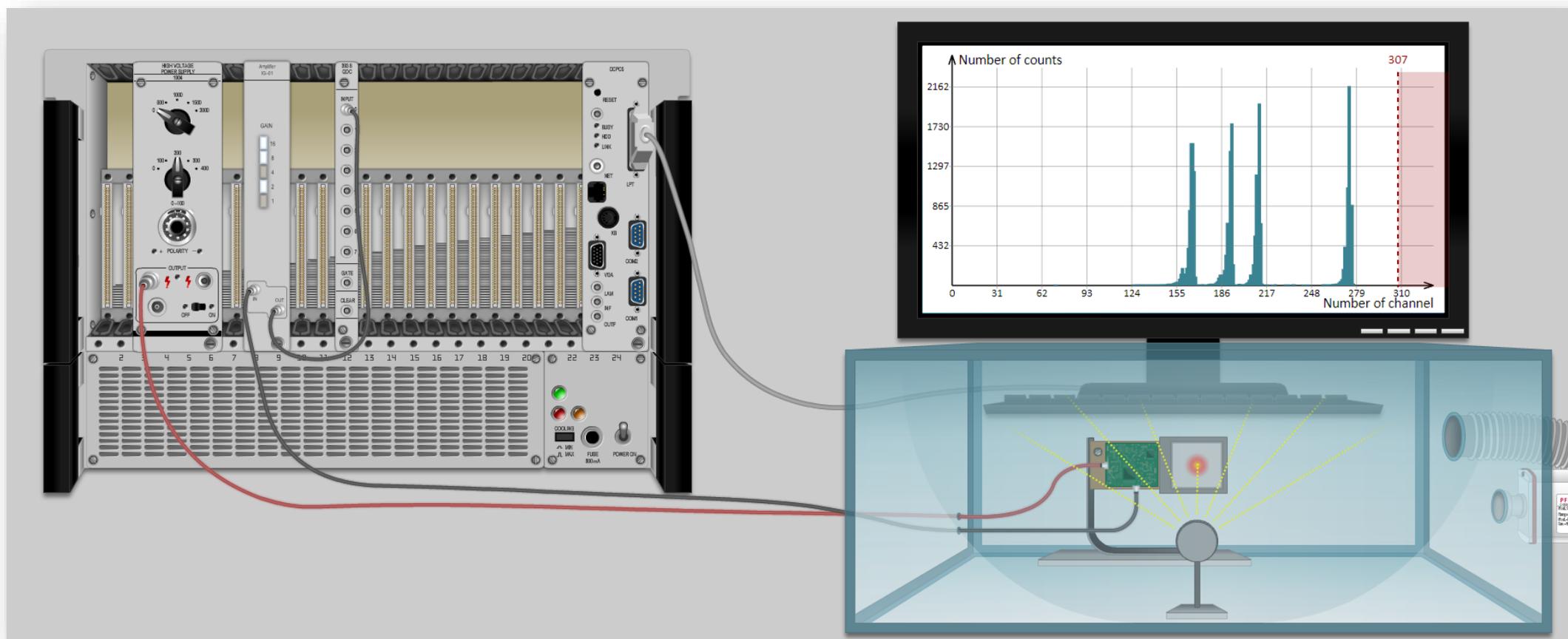
Основы работы с цифровыми сигналами. Виртуальная лабораторная работа с осциллографом и генератором сигналов.



# Виртуальный исследовательский практикум по ядерной физике

Исследование взаимодействия заряженных частиц с веществом.

Полупроводниковый детектор для регистрации спектров альфа-частиц.





# Практикум по ядерной физике





# Образовательный портал ОИЯИ: <https://edu.jinr.ru>

EDU Open Education at JINR [Go to Courses](#)

Online courses Virtual Lab For School Children

## Joint Institute for Nuclear Research

**8 lectures**

**6 hours**

**58 chapters**

### New video course: Megascience project NICA

We are pleased to present you **the first video course about megascience project NICA and collider technology!** This course consists of 8 sections and talks about scientific mega-projects, particle accelerators at JINR, structure and tasks of the NICA complex, factory of superconducting magnets and cryogenic complex.

The staff of the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics (Anatoly Sidorin, Sergey Kostromin, Anton Konstantinov, Sidorov Nikita, Marina Osmachko) and the Development and creation of educational programs department (Anna Komarova, Caren Rossouw, Oleg Smirnov) prepared this online course.

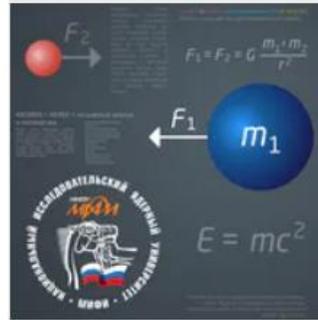
The course is available in both [English](#) and [Russian](#).

# Онлайн-курсы, рекомендованные для учителей

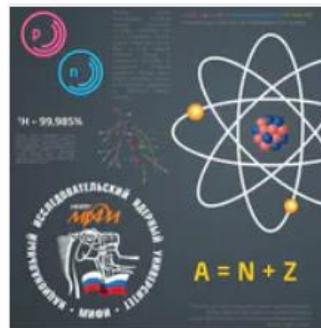
**coursera**



Изобретения, изменившие мир



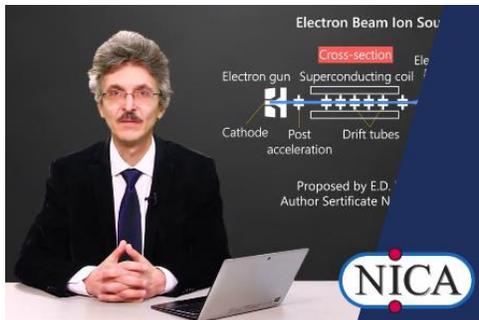
Физика как глобальный проект



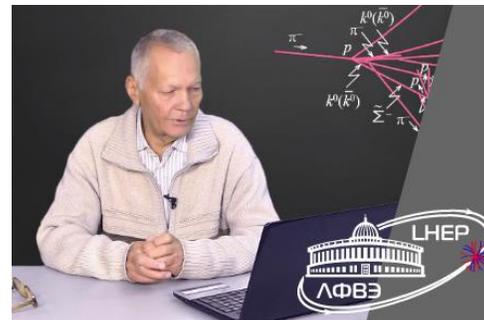
Элементы атомной и ядерной физики



Видеоурок для школьников «NICA — Вселенная в лаборатории»



Проекты класса мегасайенс: NICA



Экспериментальная физика высоких энергий



Детекторы в ядерной физике и физике высоких энергий



Тяжёлые ионы и синтез тяжёлых элементов

# Подведем итоги



## Итоговый тест

- [http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/q\\_final](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/q_final)

Ядерная физика

Заключение

7. Установите соответствие между частицей и его энергией покоя. Правильные ответы:

Протон		0,512 МэВ
Нейтрон		939,57 МэВ
Электрон		938,27 МэВ

Назад Ответить

Ядерная физика

Заключение

8. Какая ещё частица образуется в результате деления ядра урана?

$^{100}_{38}\text{Sr}$   
  $^{94}_{38}\text{Sr}$   
  $^{95}_{36}\text{Kr}$

Верно

Назад Ответить Далее

# Подведем итоги



## Примерные темы для индивидуальных проектов

1. Детектирование излучений, виды детекторов и принципы их работы
2. От атомной гипотезы Демокрита до Периодической системы Менделеева
3. Движение частиц в электрическом и магнитном полях. Физические принципы работы ускорителей
4. Физические эксперименты в ядерной физике, изменившие картину мира
5. Радиоуглеродное датирование и его применение в геологии и археологии
6. Применение ядерных технологий в науках о жизни
7. Современные международные эксперименты на реакторах и коллайдерах
8. Современное представление о строении вещества. Стандартная модель
9. Физические принципы работы термоядерных энергетических установок.
10. Ядерные силы и сильные взаимодействия

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**