

**Elective course  
“Nuclear Physics” for high  
school students – synthesis  
of traditional textbook with  
the modern computer tools**

**Nataliya Vorontsova**

JINR 27th Symposium on Nuclear Electronics and Computing - NEC'2019

Budva, Montenegro

30 September – 4 October, 2019

# Elective Course



**Elective course for high school students is a course which should be chosen by a student from several courses corresponding to their specialization.**



**The purpose of elective courses is to deepen knowledge of basic academic subjects, the development of cognitive interests, skills and professional self-determination.**

# Elective Course “Nuclear Physics”

The authors team from JINR and MEPH

**Delov M.I.**

**Klygina K.V.**

**Kondakov V.V.**

**Panebratsev Yu.A.**

**Sidorov N.E.**

**Struchalin P.G.**

**Tikhomirov G.V.**

**Vorontsova N.I.**



# Elective Course “Nuclear Physics”



Intended for high school students (grades 10–11)



1–2 hours per week



Can be used:

- ✓ as elective profile course
- ✓ in extracurricular activities



# Materials for Course “Nuclear Physics”

## Textbook

- Paragraph materials
- Exercises
- Links to additional digital resources
- Topics for project work



## Additional digital resources

### Electronic application

- Video lectures
- Additional text materials
  - materials for deep studies
  - analysis of problem solving
- Quizzes
- Virtual practicum



### QR codes

- Visualization of complex physical processes
- Visualization of experimental facilities



# Main Idea of the Course

From Nuclear Physics  
to Nuclear Technology...



# Textbook Content

- 01 Chemical Elements. Atoms and Molecules. Isotopes
- 02 Atom and Atomic Nucleus
- 03 Radioactivity
- 04 Mass and Energy
- 05 Nuclear Reactions
- 06 Nuclear Astrophysics
- 07 Synthesis of New Heavy and Superheavy Elements
- 08 Radiation and Life
- 09 Nuclear Technology Applications
- 10 Global Energy Sources
- 11 In Research Institutes and Laboratories
- Conclusion

$m = \frac{m}{N} = \frac{m}{N_A}$ . Масса одной молекулы, масса атома — очень малые величины —  $10^{-26}$  кг,  $10^{-27}$  кг соответственно. С такими числами неудобно работать, поэтому была введена атомная единица массы.

**Атомная единица массы** — единица массы, равная  $1/12$  массы атома изотопа углерода-12:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Массы отдельных атомов и массы отдельных молекул можно вычислять, используя значение атомной единицы массы (а. е. м.). Например, масса молекулы воды — 18 а. е. м. Чтобы получить численное значение массы молекулы, нам необходимо умножить массу молекулы воды в атомных единицах массы на значение одной атомной единицы массы, которая равна  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.



### Свойства химических элементов. Периодическая система Д. И. Менделеева

**Вспомните** • Что вы знаете из курсов физики и химии о таблице Д. И. Менделеева?

#### Химические элементы

Число различных молекул вещества очень велико, и ежедневно учёные синтезируют всё новые и новые вещества. Однако все эти вещества, как из кирпичиков, состоят из ограниченного числа элементов. У любого химического элемента есть название и символ. Наверняка вы знаете многие из них. Например, Cu — медь (*cuprum*) или U — уран (*uranium*) (рис. 1).



Рис. 1

Откуда появилось всё это многообразие химических элементов? Задумавшись над этим вопросом, люди сначала не могли дать чёткий ответ. Отсутствовала систематизация элементов, и учёные просто изучали их и записывали информацию. В книге Джеймса Эмсли «Элементы»<sup>1</sup> приведено много интересных данных об элементах, включая химические, физические, ядерные свой-

<sup>1</sup> Эмсли Дж. Элементы. — М.: Мир, 1993. — 256 с.

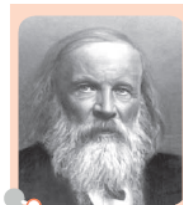
ства и распространённость в природе, описана история их открытия и многое другое.

#### Периодическая таблица Д. И. Менделеева

К середине XIX в. накопилось большое количество информации о химических элементах. Появилась задача упорядочить то многообразие элементов, которые были открыты.

Классификацией химических элементов занимались многие химики, среди них был русский учёный Дмитрий Иванович Менделеев, который, долгое время наблюдая за систематизацией, классификацией других учёных, однажды «увидел» таблицу, которая потом вошла во все учебники физики, химии и носит его имя. В этой таблице все существующие на Земле элементы нашли своё место. Более того, положение химического элемента (или клетки) в таблице Менделеева позволяет практически прогнозировать его свойства.

Выдающиеся научные открытия не только объясняют уже известные факты, но и, самое главное, создают предпосылки для дальнейшего развития науки. На время работы Менделеева над систематизацией элементов насчитывалось всего 63 элемента. Менделеев все существующие элементы расположил в таблицу, оставив пустые клетки, которые предполагали новые, ещё неизвестные элементы. Учёный фактически предсказал новые элементы, предвидя то, какими химическими свойствами должен обладать тот или иной ещё не открытый элемент. С первым рукописным вариантом таблицы Д. И. Менделеева можно познакомиться по QR-коду.



Менделеев  
Дмитрий Иванович  
(1834—1907)



Периодический закон Д. И. Менделеева:

*«Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел стоят в периодической зависимости от атомных весов элементов».*

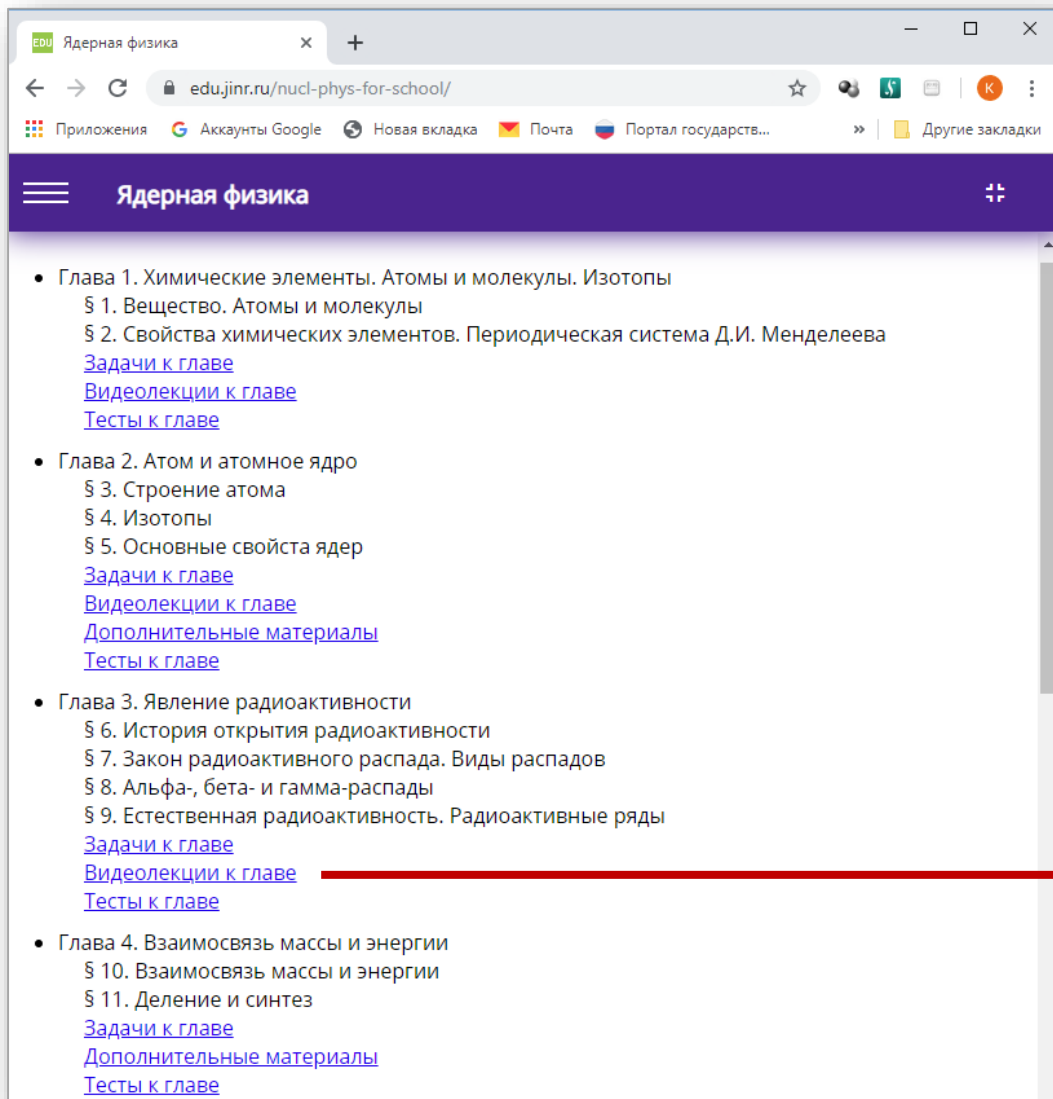
1869 г.

Продолжая изучать элементы, их химические и физические свойства, физики и химики вынуждены были переформулировать данный закон, теперь он звучит иначе, чем первоначальный вариант Д. И. Менделеева.



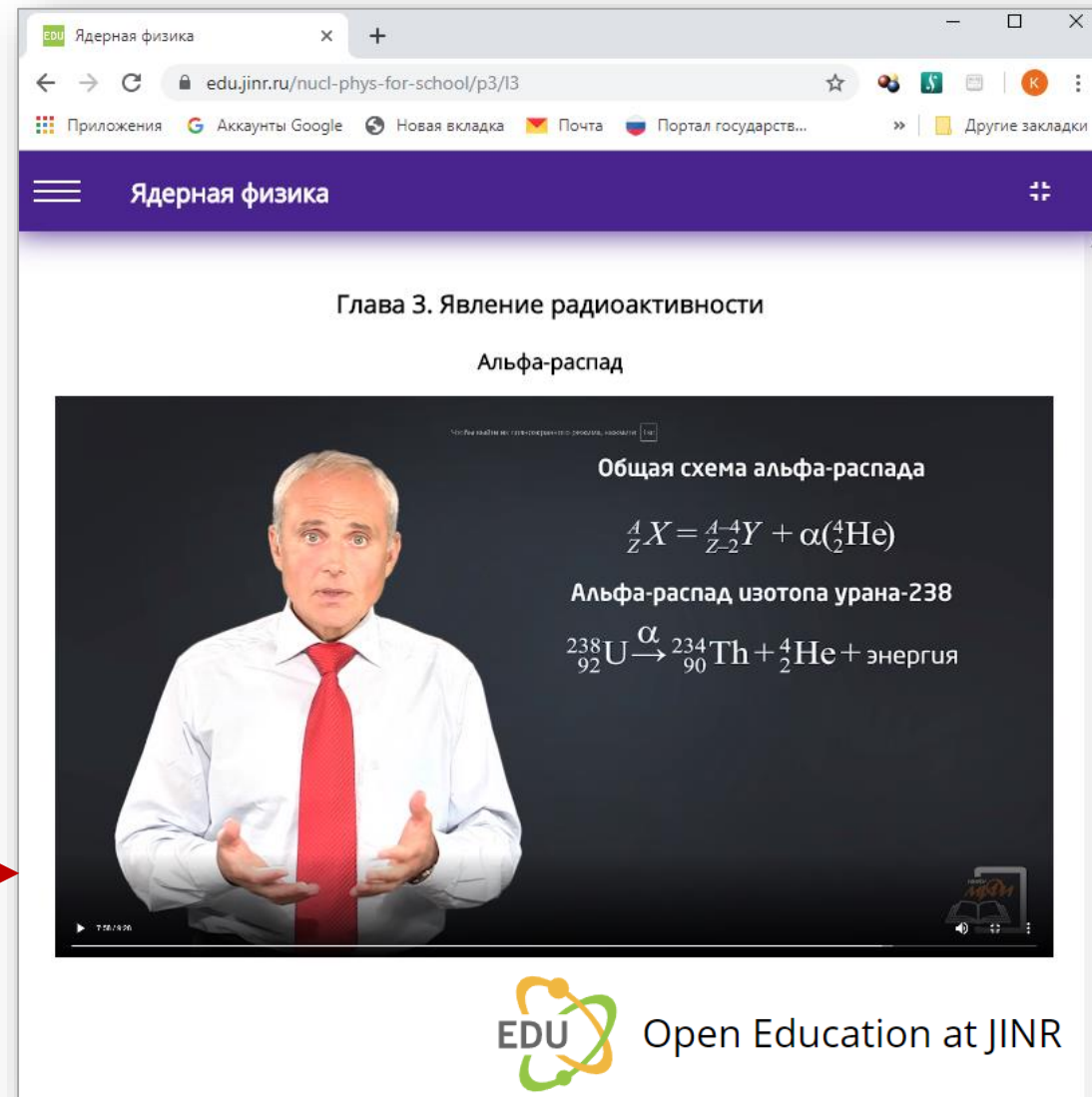


# Electronic Application to the Textbook on the Website [edu.jinr.ru](http://edu.jinr.ru)



Ядерная физика

- Глава 1. Химические элементы. Атомы и молекулы. Изотопы
  - § 1. Вещество. Атомы и молекулы
  - § 2. Свойства химических элементов. Периодическая система Д.И. Менделеева
  - [Задачи к главе](#)
  - [Видеолекции к главе](#)
  - [Тесты к главе](#)
- Глава 2. Атом и атомное ядро
  - § 3. Строение атома
  - § 4. Изотопы
  - § 5. Основные свойства ядер
  - [Задачи к главе](#)
  - [Видеолекции к главе](#)
  - [Дополнительные материалы](#)
  - [Тесты к главе](#)
- Глава 3. Явление радиоактивности
  - § 6. История открытия радиоактивности
  - § 7. Закон радиоактивного распада. Виды распадов
  - § 8. Альфа-, бета- и гамма-распады
  - § 9. Естественная радиоактивность. Радиоактивные ряды
  - [Задачи к главе](#)
  - [Видеолекции к главе](#)
  - [Тесты к главе](#)
- Глава 4. Взаимосвязь массы и энергии
  - § 10. Взаимосвязь массы и энергии
  - § 11. Деление и синтез
  - [Задачи к главе](#)
  - [Дополнительные материалы](#)
  - [Тесты к главе](#)



Ядерная физика

## Глава 3. Явление радиоактивности

### Альфа-распад

Общая схема альфа-распада

$${}^A_Z X = {}^{A-4}_{Z-2} Y + \alpha ({}^4_2 \text{He})$$

Альфа-распад изотопа урана-238

$${}^{238}_{92} \text{U} \xrightarrow{\alpha} {}^{234}_{90} \text{Th} + {}^4_2 \text{He} + \text{энергия}$$

EDU Open Education at JINR

# Chemical Elements. Atoms and Molecules. Isotopes



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

- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/11>
- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/12>
- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/13>
- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p1/14>

### Тесты к главе

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



# Chemical Elements. Atoms and Molecules. Isotopes

**Ptable** [Wikipedia](#) [Properties](#) [Orbitals](#) [Isotopes](#) [Compounds](#)  Oxidation  Names  Electrons  Wide

Search

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

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 3	58 Ce Cerium 3,4	59 Pr Praseodymium 3	60 Nd Neodymium 3	61 Pm Promethium 3	62 Sm Samarium 3	63 Eu Europium 2,3	64 Gd Gadolinium 2,3	65 Tb Terbium 3	66 Dy Dysprosium 3	67 Ho Holmium 3	68 Er Erbium 3	69 Tm Thulium 3	70 Yb Ytterbium 2,3	71 Lu Lutetium 3
89 Ac Actinium 3	90 Th Thorium 4	91 Pa Protactinium 5	92 U Uranium 6	93 Np Neptunium 5	94 Pu Plutonium 4	95 Am Americium 3	96 Cm Curium 2	97 Bk Berkelium 3	98 Cf Californium 3	99 Es Einsteinium 3	100 Fm Fermium 3	101 Md Mendelevium 3	102 No Nobelium 2	103 Lr Lawrencium 3

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

© 2017 MICHAEL DAYAH VINYL BANNERS PRINTED BY PRINTASTIC

распаде нептуния изотопов плутония-241 и америция-241 быть не может. Наоборот, при распаде плутония-241 появляется изотоп нептуний. Но все эти изотопы образуют один ряд, потому что, перетекая, они распадаются друг в друга.

Уран-238 образует свой, третий, ряд, который заканчивается свинцом-206. В этот ряд также входят уран-234, плутоний-242 и другие изотопы.

Четвёртый ряд, который назван рядом актиния, начинается в природе с урана-235 и также содержит различные изотопы.

Когда распадается уран, в конце появляется свинец. Происходит это медленно — в течение миллионов, миллиардов лет. Период полураспада урана составляет 4,5 млрд лет. Поэтому капсулированный уран, содержащийся, например, в метеорите или в минералах земной коры, которые остались с момента образования Земли, будет постоянно превращаться в свинец. И если определить, сколько в данном уране свинца, то, зная период полураспада урана, можно определить возраст данного метеорита или минерала. На этом основан метод оценки возраста Земли. Современные приборы позволяют точно определять содержание изотопов в микрочастице вещества.

В середине XX в. специальные исследования метеоритов, которые содержали уран, позволили оценить возраст Земли в 4,5 млрд лет. Это фактически совпадает с периодом полураспада урана и лишней раз демонстрирует, что изучение нового позволяет нам отвечать на вопросы, которые до этого казались неразрешимыми или на которые у человечества были неверные ответы.

#### Задачи к главе

**Задача 1.** Сколько процентов от первоначального количества радиоактивного вещества остаётся через два периода полураспада?  
 Ответ: 25%.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/t1>

**Задача 2.** Два радиоактивных препарата в начальный момент времени имеют одинаковую активность. Период полураспада первого препарата в два раза больше, чем второго. Чему равно отношение активности второго препарата к активности первого препарата через интервал времени, равный периоду полураспада первого препарата?  
 Ответ: 0,5.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/t2>

**Задача 3.** В кровь человека ввели соль NaCl массой 200 мг, молярная масса которой 58,5 г/моль. Атомная доля радиоактивного изотопа с периодом полураспада 15 ч в натрии составляет  $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-11}$ . Через 30 ч активность пробы крови объёмом 1 мл составила 87,5 Бк. Чему равен объём крови человека?  
 Ответ: 4,5 л.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/t3>

**Задача 4.** Определите период полураспада вещества, если спустя 3 мин распалось 10 % первоначального количества ядер.  
 Ответ: 1184 с.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/t4>

**Задача 5.** Определите массу образца америция-241, если его активность в настоящий момент составляет 216 МБк. Период полураспада равен 432,8 года, молярная масса — 241 г/моль.  
 Ответ: 1,71 мг.

Разбор задачи: <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/t5>

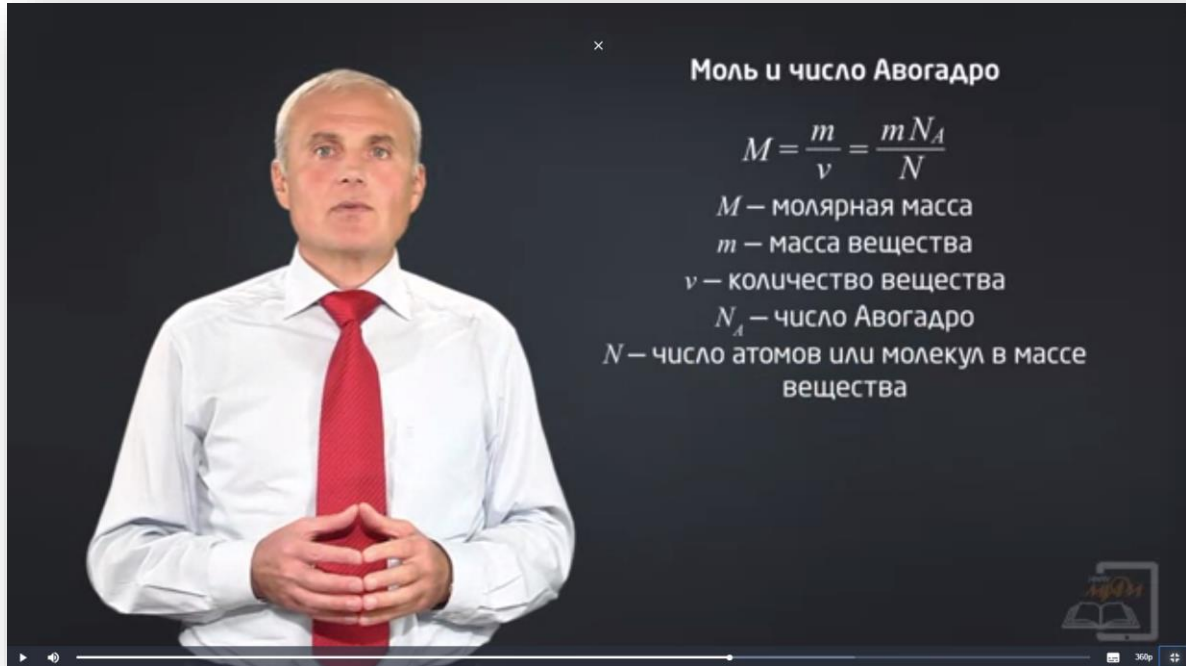
#### Видеолекции к главе

- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/11>
- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/12>
- <http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/13>

#### Тесты к главе

<http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/p3/q1>

# Video Lectures and Problem Solving




×

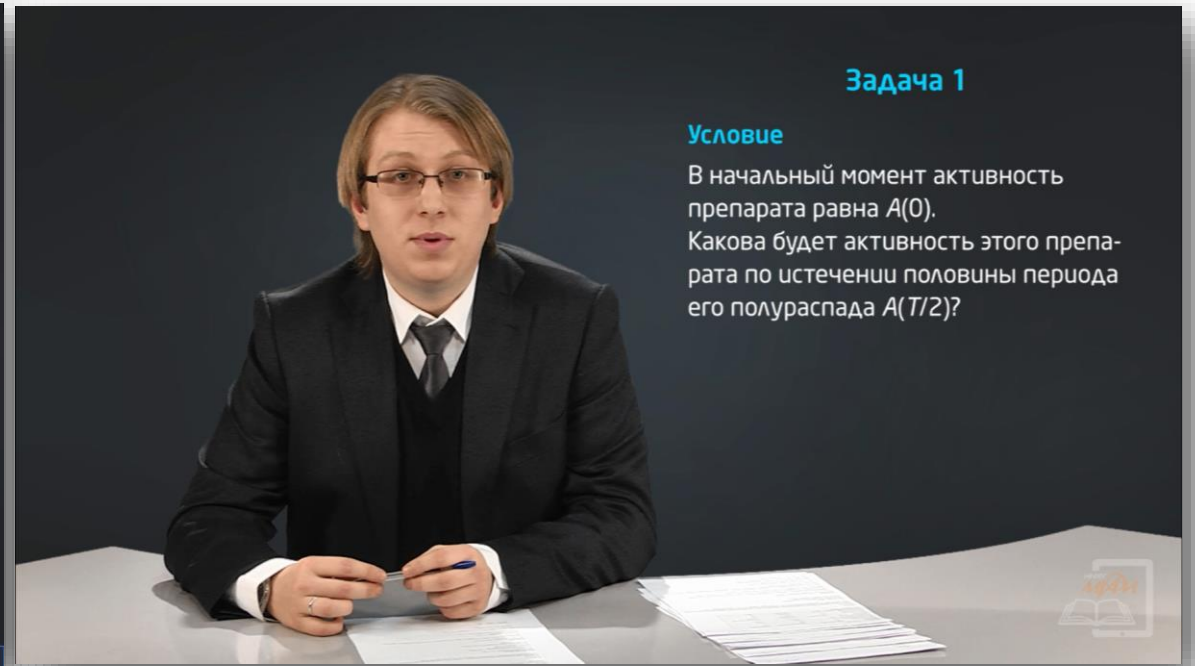
## Моль и число Авогадро

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

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




36:00



## Задача 1

### Условие

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



# Quizzes

Ядерная физика

## Глава 3. Явление радиоактивности

1. Установите соответствие между датами и событиями.

1896 год	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Э. Резерфордом и Ф. Содди сформулировали закон радиоактивного распада.
1898 год	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	М. Склодовская-Кюри и П. Кюри открыли полоний и радий
1903 год	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	А. Беккерель открыл явление радиоактивности солей урана

Ответить

## Nuclear fusion and International project ITER

**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.

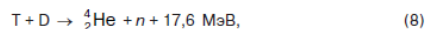
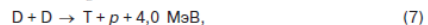
Типичным примером этого процесса является слияние ядра дейтерия ( ${}^2_1\text{H}$ ) с ядром трития ( ${}^3_1\text{H}$ ) (рис. 32). В результате образуется ядро гелия-4 ( ${}^4_2\text{He}$ ), высвобождается один нейтрон и 17,6 МэВ энергии.

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 ( ${}^2_1\text{H}$ ), T — тритий ( ${}^3_1\text{H}$ ).

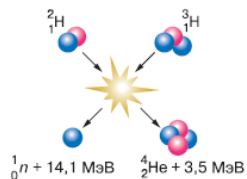


Рис. 32

- 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.

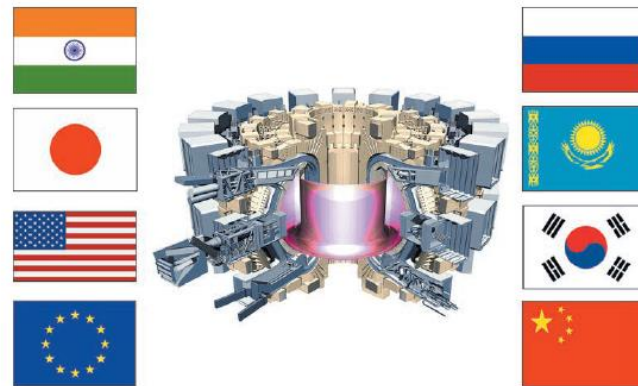


Рис. 33. Страны-участницы проекта ИТЭР

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  $10^{-34}$  с имеется горячий сгусток материи, в котором начинают формироваться несколько типов элементарных частиц материи: кварки, лептоны (электроны,

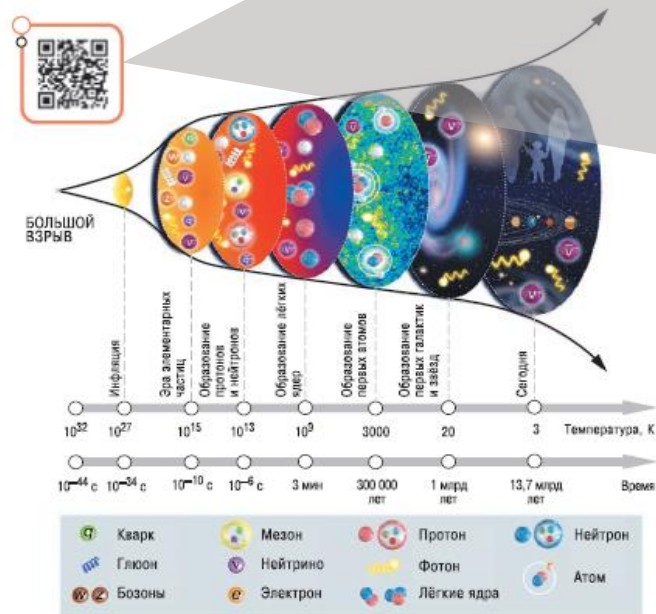


Рис. 49. Хронология эволюции Вселенной от Большого взрыва до наших дней

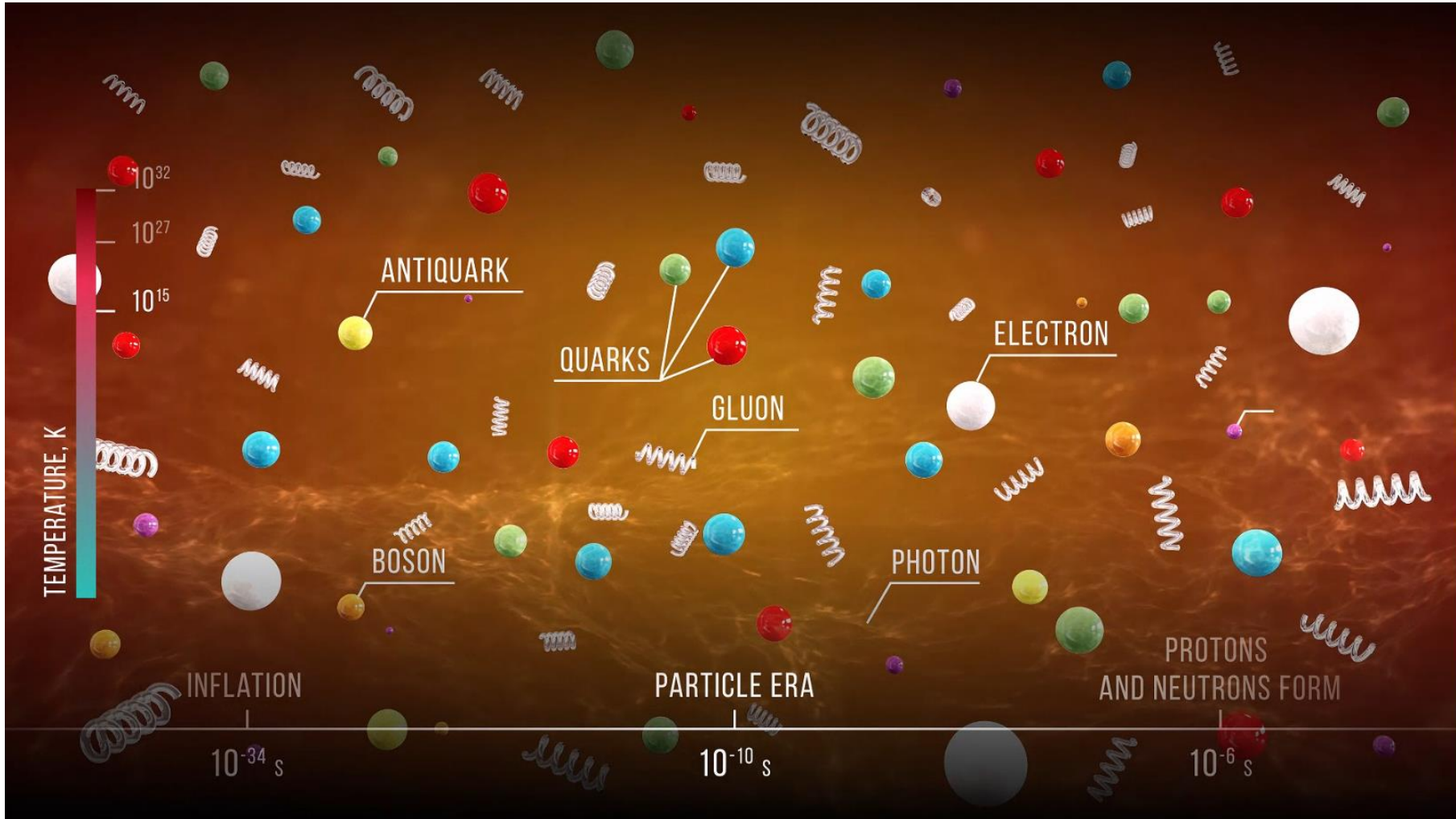




# 06

# Nuclear Astrophysics

The Universe had a beginning



# Synthesis of New Heavy and Superheavy Elements

Reactions and methods of the synthesis of elements heavier than uranium



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  $^{240}\text{Bk}$ , 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 ускоренных частиц обычно характеризуют таким параметром, как интенсивность.

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

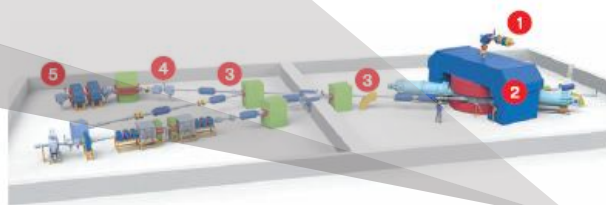


Рис. 64. Экспериментальная установка по синтезу сверхтяжёлых элементов в Лаборатории ядерных реакций в ОИЯИ (г. Дубна, Россия). 1 — инжекционный комплекс (источник  $^{48}\text{Ca}$ ), 2 — циклотрон (циклический ускоритель заряженных частиц), 3 — каналы транспортировки пучка, 4 — мишень (ядра с  $Z =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

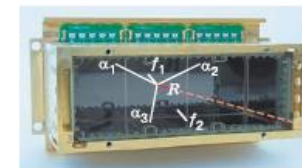


Рис. 65

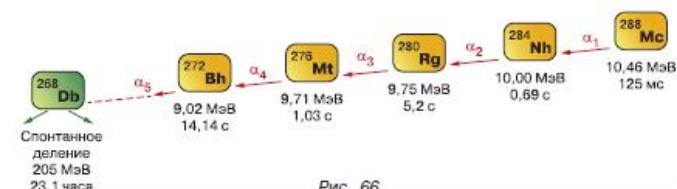
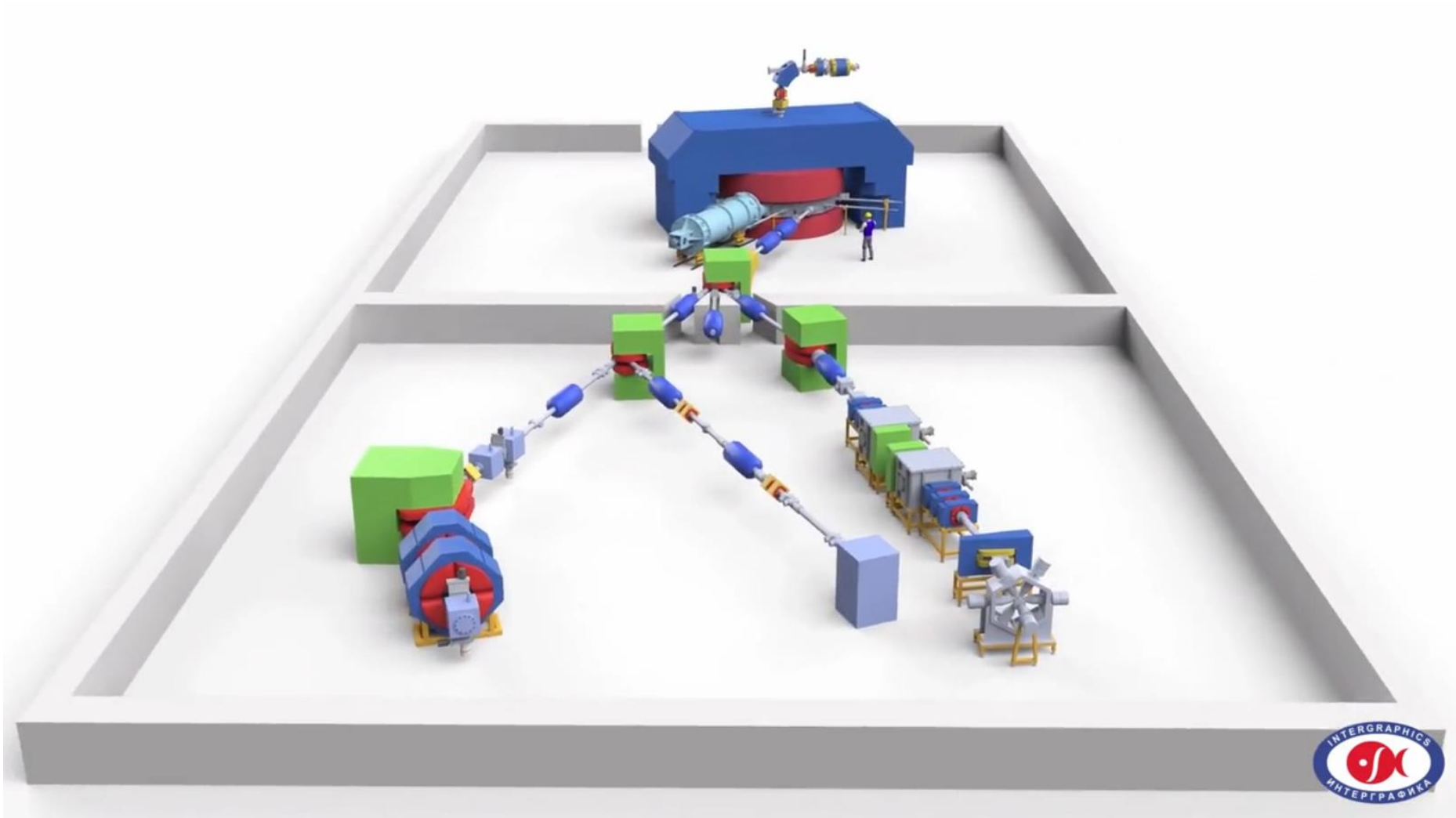


Рис. 66

07

# Synthesis of New Heavy and Superheavy Elements

Experiment on the synthesis of heavy and superheavy elements at the cyclotron in the FLNR JINR



## Nuclear energetics

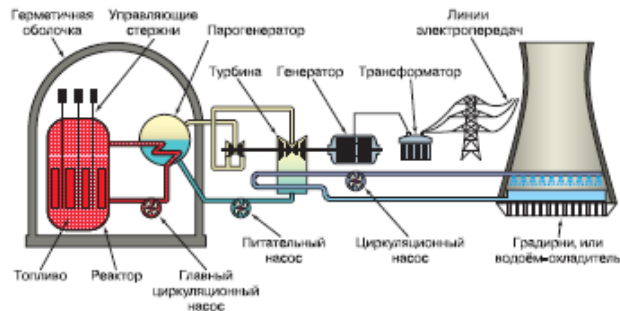


Рис. 71

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 отбегания 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.

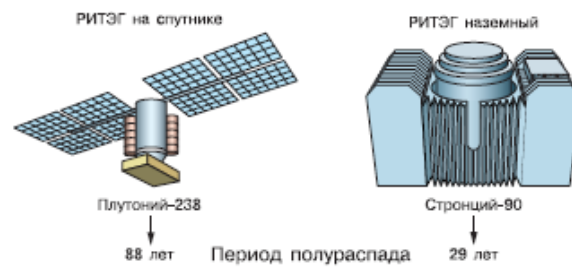


Рис. 82. Применение РИТЭГов в космосе и на Земле

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;

## Nuclear medicine

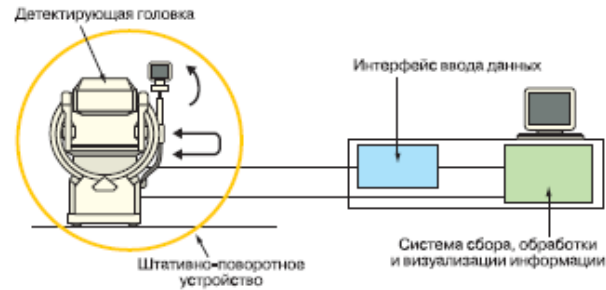


Рис. 77

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

Одним из первых методов радиотерапии была *брахитерапия*. В этом методе источник излучения, например радий-226, иридий-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).

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

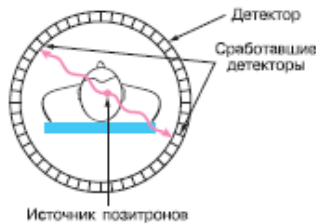


Рис. 78

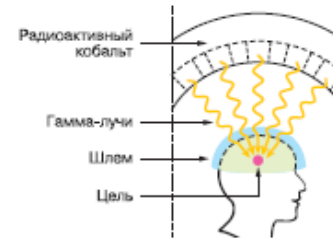


Рис. 80

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.

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.

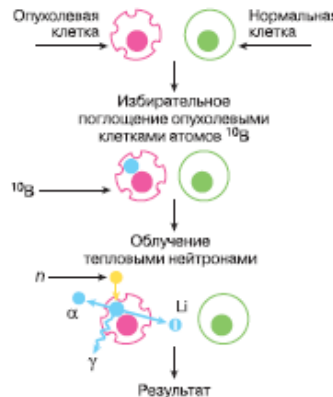


Рис. 81

## Radiocarbon dating

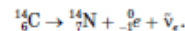
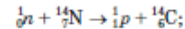


Либли Уиллард Франк  
(1908—1980)

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 Либли 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 Либли был 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:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{{}^{14}\text{C}_0}{{}^{14}\text{C}}, \quad (13)$$

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

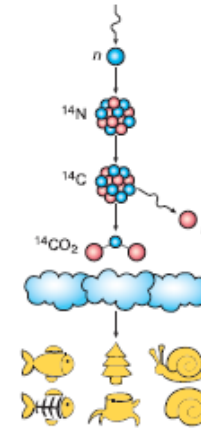


Рис. 84. Круговорот углерода в природе

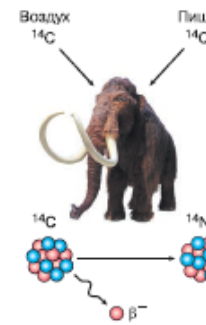


Рис. 85

# Global Energy Sources

Energy in human life.

Energy sources on Earth and their comparative analysis

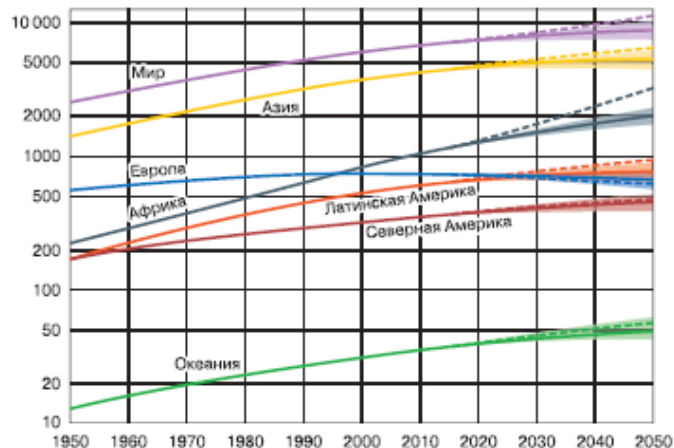


Рис. 86. Рост населения, по данным ООН, с 1950 по 2018 г. и прогноз до 2050 г.

кальна 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 приходится 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.

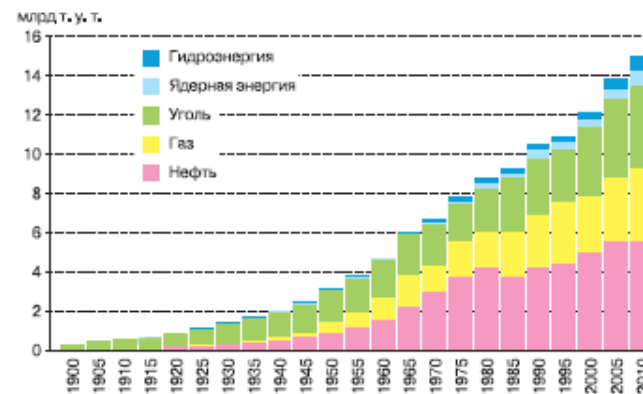


Рис. 88

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



## § 27 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-

## Nuclear Planetology

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.

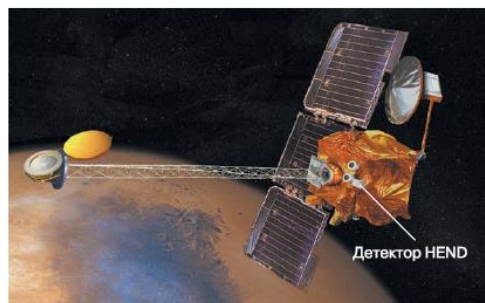


Рис. 98



Рис. 99

В феврале 2002 г. был получен первый яркий результат этого эксперимента: в приполярных районах Красной планеты под тонким слоем грунта прибор обнаружил вечную мерзлоту, богатую льдом.

Нейтрон, обладая массой, практически равной массе протона, чрезвычайно эффективно замедляется водородом. Измеряя изменение энергии нейтронов, испускаемых с поверхности Марса, после их замедления в грунте планеты можно обнаружить наличие областей с повышенной концентрацией водорода, а именно воды или льда.

Эта находка оказала влияние на всю дальнейшую программу космических исследований Марса. Такие же интересные места с признаками воды и льда были обнаружены и на экваторе Марса. Именно сюда в 2012 г. отправилась Марсианская научная лаборатория NASA (марсоход «Кьюриосити») (рис. 99). На марсоходе был установлен российский прибор ДАН (Динамическое альbedo нейтронов), в создании которого принимали участие Институт космических исследований РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и ОИЯИ (Лаборатория нейтронной физики).

В состав прибора входят импульсный источник (генератор) нейтронов и приёмник нейтронного излучения. Генератор выпускает в сторону марсианской поверхности короткие, но мощные импульсы



## Neutrino physics on Baikal lake



Рис. 103

бым взаимодействием и возникает в процессах бета-распада и термоядерных реакциях в звёздах. 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. 104. Фотоумножитель внутри оптической ячейки детекторной системы нейтринного телескопа

(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.

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 ознакомиться 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



# In Research Institutes and Laboratories

Neutrino physics on Baikal lake



# Virtual Practicum on Nuclear Physics



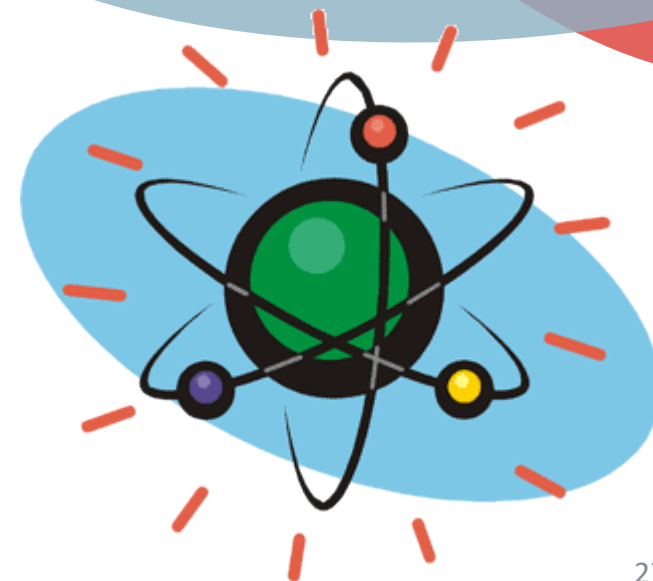
## Виртуальный исследовательский практикум по ядерной физике

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. Комптон-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>



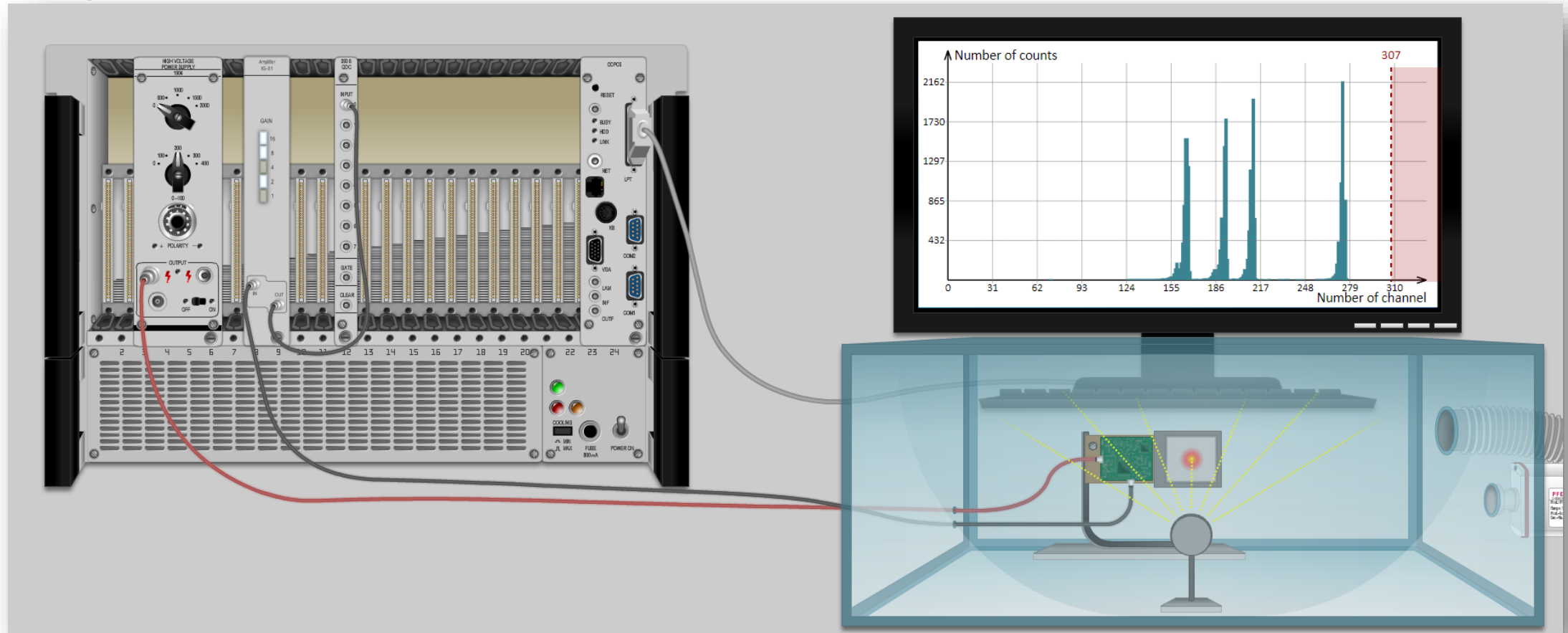
## Методические материалы к практикуму

- [http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/v1\\_manual](http://edu.jinr.ru/nucl-phys-for-school/v1_manual)



# Virtual Practicum on Nuclear Physics

Investigation of the interaction of charged particles with matter. Semiconductor detectors for alpha-particle registration.



# Summing-up

## Final quiz



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

${}_{36}^{95}\text{Kr}$

${}_{38}^{100}\text{Sr}$

${}_{38}^{94}\text{Sr}$

Назад      Ответить

# Summing-up

Topics for individual research projects



## 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

# Textbook presentation for physics teachers



**Thank You!**

