



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»*

Институт ядерной физики и технологий


*Лаборатория экспериментальной ядерной физики
<http://enpl.mephi.ru/>*

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №1

Введение



Лектор:
Болоздыня Александр Иванович
aibolozdynya@mephi.ru

Проф.каф.№7

Зам завлаб Межкафедральной
лаборатории экспериментальной
ядерной физики

<http://enpl.mephi.ru/>

Лекция №1

Введение

- 1. Краткая история ядерной физики**
- 2. Масштабы физических величин**
- 3. Радиоактивность**
- 4. Релятивистские свойства частиц**
- 5. Квантовые свойства частиц**
- 6. Измерения в микромире**

1. Краткая история ядерной физики



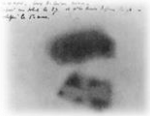
Менделеев
(1834-1907)



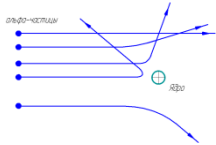
Почти каждая 2-я
Нобелевская премия
по физике
присуждалась
за открытие
в области
физики частиц
и атомного ядра



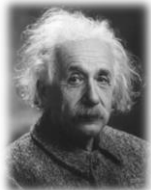
Беккерель
(1852-1908)



Резерфорд
(1871-1937)



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \left(\frac{ZZ'e^2}{4E}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$



Эйнштейн
(1879-1955)

$$E=mc^2$$



Шредингер
(1887-1961)

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi.$$



Чедвик
(1891-1974)

$$\left(mc^2 \alpha_0 + c \sum_{j=1}^3 \alpha_j p_j \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t)$$



Дирак
(1902-1984)



$$E=h\nu$$

Планк
(1858-1947)



$$E_1 - E_2 = h\nu$$

Бор
(1885-1962)



$$\Delta x \Delta p_x \gtrsim \hbar$$

Гейзенберг
(1901-1976)

A CHRONOLOGY OF SOME OF THE MAJOR EVENTS IN NUCLEAR PHYSICS

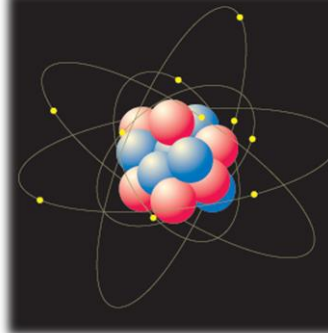
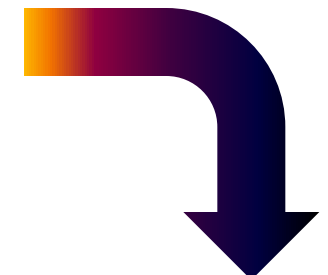
* Получена Нобелевская премия

1896	Discovery of radioactivity (Becquerel*)	1945	First fission bomb tested
1898	Isolation of radium (M. Curie* and P. Curie*)	1946	Big Bang cosmology (Gamow)
1905	Special theory of relativity (Einstein*)	1946	Development of nuclear magnetic resonance (Bloch* and Purcell*)
1909	α particle shown to be He nucleus (Rutherford* and Royds)	1947	Development of radiocarbon dating (Libby*)
1911	Nuclear atom (Rutherford*)	1947	First proton synchrocyclotron, 350 MeV (Berkeley)
1912	Development of cloud chamber (Wilson*)	1947	Discovery of π meson (Powell*)
1913	Discovery of stable isotopes (Thomson*)	1948	First linear proton accelerator, 32 MeV (Alvarez*)
1913	Planetary atomic model (N. Bohr*)	1949	Shell model of nuclear structure (Mayer*, Jensen*, Haxel, Suess)
1914	Nuclear charge determined from X rays (Moseley)	1949	Development of scintillation counter (Kallmann, Coltman, Marshall)
1919	Artificial transmutation by nuclear reactions (Rutherford*)	1952	First proton synchrotron, 2.3 GeV (Brookhaven)
1919	Development of mass spectrometer (Aston*)	1952	First thermonuclear bomb tested
1925	Intrinsic spin proposed (Goudsmit and Uhlenbeck)	1953	Strangeness hypothesis (Gell-Mann*, Nishijima)
1926	Quantum mechanics developed (Schrödinger*)	1953	Collective model of nuclear structure (A. Bohr*, Mottelson*, Rainwater*)
1928	Theory of α radioactivity (Gamow, Gurney, Condon)	1953	First production of strange particles (Brookhaven)
1930	Neutrino hypothesis (Pauli*)	1955	Discovery of antiproton (Chamberlain* and Segrè*)
1931	First electrostatic accelerator (Van de Graaff)	1956	Experimental detection of neutrino (Reines and Cowan)
1931	First linear accelerator (Sloan* and Lawrence*)	1956	Parity violation in weak interactions (Lee*, Yang*, Wu et al.)
1932	First cyclotron (Lawrence*, Livingston)	1958	Recoilless emission of gamma rays (Mössbauer*)
1932	Discovery of deuterium (Urey*, Brickwedde, Murphy)	1959	26-GeV proton synchrotron (CERN)
1932	Discovery of positron (Anderson*)	1964	Observation of CP violation in K^0 decay (Cronin* and Fitch*)
1932	Discovery of neutron (Chadwick*)	1964	Quark model of hadrons (Gell-Mann*, Zweig)
1932	Proton-neutron nuclear model (Heisenberg*)	1967	Initial operation of SLAC accelerator for 20-GeV electrons (Stanford)
1932	First nuclear reaction using accelerator (Cockcroft* and Walton*)	1967	Electroweak model proposed (Weinberg*, Salam*)
1934	Discovery of artificial radioactivity (I. Curie*, F. Joliot*)	1970	Charm hypothesis (Glashow*)
1934	Theory of β radioactivity (E. Fermi*)	1971	Proton-proton collider (CERN)
1935	Meson hypothesis (Yukawa*)	1972	500-GeV proton synchrotron (Fermilab)
1935	Development of coincidence technique (Bothe*)	1974	J/ψ particle discovered and charmed quark confirmed (Richter*, Ting*)
1936	Compound nucleus theory proposed (N. Bohr*)	1975	Discovery of τ lepton (Perl)
1937	Discovery of μ lepton in cosmic rays (Neddermeyer, Anderson*)	1977	T particle discovered and bottom quark inferred (Lederman)
1938	Discovery of nuclear fission (Hahn* and Strassmann)	1983	Operation of proton-antiproton collider at 300 GeV (CERN)
1938	Thermonuclear fusion proposed as source of energy in stars (Bethe*)	1983	Discovery of weak bosons W^\pm and Z^0 (Rubbia*)
1939	Liquid-drop model of fission (N. Bohr* and Wheeler)		
1940	Production of first transuranium element (McMillan* and Seaborg*)		
1941	First betatron, magnetic induction electron accelerator (Kerst)		
1942	First controlled fission reactor (Fermi*)		
1944	Phase stability developed for synchrotron (McMillan*, Veksler)		

Таблица Менделеева (1869)

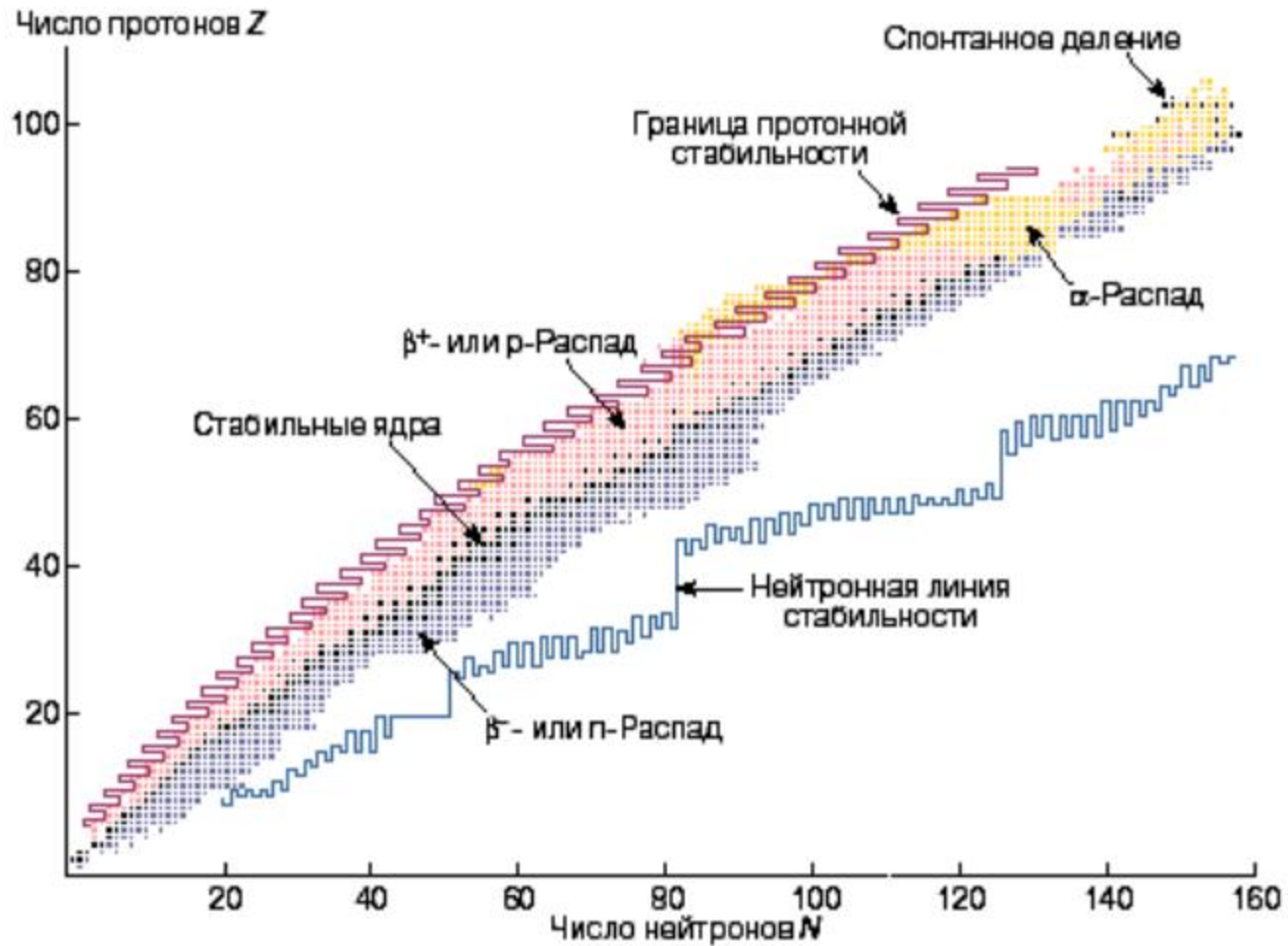
Современная периодическая система элементов Д.И.Менделеева

Group	1	2	Groups 1...18 IUPAC 1989										13	14	15	16	17	18
Period	1	2	Groups IA...VIII...0 IUPAC 1970										IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1	1, 00794 1 H 1s ¹ -259.14 -252.87 2.02/- Hydrogen Водород Hydrogenium																	18 0 4.002602 2 He 1s ² <-272.2 -268.93 12.3 eV Helium Гелий
2	6.941 3 Li (He)2s ¹ 180.54 1347 0.98/0.97 Lithium Литий	9.012182 4 Be 2s ² 1278 2970 1.57/1.47 Beryllium Бериллий											10.811 5 B 2s ² 2p ¹ 2210 -2600 2.04/2.01 Boron Бор Borium	12.011 6 C 2s ² 2p ² -3550 -209.86 -195.8 3.04/3.07 Carbon Углерод Carboneum	14.00674 7 N 2s ² 2p ³ -209.86 -195.8 3.04/3.07 Nitrogen Азот Nitrogenium	15.9994 8 O 2s ² 2p ⁴ -218.4 -182.96 3.44/3.50 Oxygen Кислород Oxygenium	16.9994032 9 F 2s ² 2p ⁵ -219.62 -188.11 3.98/4.10 Fluorine Фтор Fluorium	20.1797 10 Ne 2s ² 2p ⁶ -248.7 -246.05 10.6 eV Neon Неон
3	22.989770 11 Na (Ne)3s ¹ 97.86 883.15 0.93/1.01 Sodium Натрий Natrium	24.3050 12 Mg 3s ² 648.8 1107 1.31/1.23 Magnesium Магний	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	26.981538 13 Al 3s ² 3p ¹ 600.37 2467 1.61/1.47 Aluminium [Aluminium] Алюминий	28.0855 14 Si 3s ² 3p ² 1412 2355 1.90/1.74 Silicon Кремний Silicium	30.973761 15 P 3s ² 3p ³ 44.14 280 2.19/2.06 Phosphorus Фосфор	32.066 16 S 3s ² 3p ⁴ 112.8 444.674 2.58/2.44 Sulphur Сера Sulfur	35.4527 17 Cl 3s ² 3p ⁵ -100.98 -34.6 3.16/2.83 Chlorine Хлор Chlorum	39.948 18 Ar 3s ² 3p ⁶ -189.2 -185.7 7.7 eV Argon Аргон
4	39.0983 19 K [Ar]4s ¹ 63.65 774 0.82/0.91 Potassium Калий (Kalium)	40.078 20 Ca 4s ² 839 1487 1.00/1.04 Calcium Кальций	44.955910 21 Sc 3d ¹ 4s ² 1541 2831 1.36/1.20 Scandium Скандий	47.867 22 Ti 3d ² 4s ² 1670 3287 1.54/1.32 Titanium Титан	50.9415 23 V 3d ³ 4s ² 1890 3380 1.63/1.45 Vanadium Ванадий	51.9961 24 Cr 3d ⁵ 4s ¹ 1857 2672 1.66/1.52 Chromium Хром	54.938046 25 Mn 3d ⁵ 4s ² 1244 1962 1.55/1.60 Manganese Марганец Manganum	55.845 26 Fe 3d ⁶ 4s ² 1535 2732 1.83/1.64 Iron Железо Ferrum	58.933200 27 Co 3d ⁷ 4s ² 1495 2732 1.88/1.70 Cobalt Кобальт Cobaltum	58.6934 28 Ni 3d ⁸ 4s ² 1453 2732 1.91/1.75 Nickel Никель Niccolum	63.546 29 Cu 3d ¹⁰ 4s ¹ 1083.4 2567 1.90/1.75 Copper Медь Cuprum	65.39 30 Zn 3d ¹⁰ 4s ² 149.88 907 1.65/1.56 Zinc Цинк Zincum	69.723 31 Ga 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹ 29.78 2403 1.81/1.82 Gallium Галлий	72.61 32 Ge 3d ¹⁰ 4s ² 4p ² 937.4 2830 2.01/2.02 Germanium Германий	72.64 33 As 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³ 75.912 (3.76MPa) 617 616 2.18/2.20 Arsenic Мышьяк Arsenicum	78.96 34 Se 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴ 217 684.9 2.55/2.48 Selenium Селен	79.904 35 Br 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵ -7.25 58.78 2.96/2.74 Bromine Бром Bromum	83.80 36 Kr 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ -156.6 -152.3 6.8 eV Krypton Криптон
5	85.4678 37 Rb [Kr]5s ¹ 39.89 887.2 0.82/0.89 Rubidium Рубидий	87.62 38 Sr 5s ² 769 1384 0.95/0.99 Strontium Стронций	88.9058 39 Y 4d ¹ 5s ² 1522 4377 1.22/1.11 Yttrium Иттрий	91.224 40 Zr 4d ² 5s ² 1852 4377 1.33/1.22 Zirconium Цирконий	92.90638 41 Nb 4d ⁴ 5s ¹ 2468 4742 1.6/1.23 Niobium Нобий	95.94 42 Mo 4d ⁵ 5s ¹ 2617 4612 2.16/1.30 Molybdenum Молибден Molybdaenum	(97) 43 Tc 4d ⁵ 5s ² 2172 4877 1.9/1.36 Technetium Технеций	101.07 44 Ru 4d ⁸ 5s ¹ 2310 4877 2.2/1.42 Ruthenium Рутений	102.90550 45 Rh 4d ⁸ 5s ¹ 1966 3727 2.2/1.5 Rhodium Родий	106.42 46 Pd 4d ¹⁰ 1552 3212 2.2/1.4 Palladium Палладий	107.8682 47 Ag 4d ¹⁰ 5s ¹ 196.96655 200.59 204.3833 207.2 208.98038 Tin Олово Stannum	112.411 48 Cd 4d ¹⁰ 5s ² 166.78 2086 1.78/1.6 Cadmium Кадмий	114.818 49 In 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹ 156.78 2086 1.78/1.6 Indium Индий	118.710 50 Sn 4d ¹⁰ 5s ² 5p ² 162.50 2086 1.78/1.6 Tin Олово Stannum	121.760 51 Sb 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³ 630.5 1750 2.05/1.6 Antimony Сурьма (Sibium)	127.60 52 Te 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴ 449.5 989.8 2.1/2.0 Tellurium Теллур	126.90447 53 I 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵ -119.5 184.35 2.66/2.2 Iodine Иод Iodum	131.29 54 Xe 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ -117.9 -107.1 5.85 eV Xenon Ксенон
6	132.90545 55 Cs [Xe]6s ¹ 28.5 678.4 0.79/0.86 Caesium Цезий (Caesium)	137.327 56 Ba 6s ² 725 920 0.89/0.97 Barium Барий	138.9055 57 La 5d ¹ 6s ² 920 3454 1.10/1.08 Lanthanum Лантан	178.46 72 Hf 4f ¹⁴ 5d ² 6s ² 2227 4602 1.3/1.23 Hafnium Гафний	180.9479 73 Ta 4f ¹⁴ 5d ³ 6s ² 2998 5425 1.5/1.33 Tantalum Тантал	183.84 74 W 4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² 3410 5960 1.7/1.40 Tungsten (Wolfram)	186.207 75 Re 4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ² 3180 5627 1.9/1.46 Rhenium Рений	190.23 76 Os 4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ² 3045 5027 2.2/1.52 Osmium Осмий	192.227 77 Ir 4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ² 2410 4130 2.2/1.6 Iridium Иридий	195.078 78 Pt 4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹ 1773.5 2807 2.54/1.42 Platinum Платина	196.96655 79 Au 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹ 1773.5 2807 2.54/1.42 Gold Золото Aurum	200.59 80 Hg 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 1773.5 2807 2.54/1.42 Mercury Ртуть (Hydrargyrum)	204.3833 81 Tl 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹ 303.5 327.5 1.62/1.44 Thallium Таллий	207.2 82 Pb 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² 303.5 327.5 1.62/1.44 Lead Свинец (Plumbum)	208.98038 83 Bi 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³ 271.3 1564 2.02/1.67 Bismuth Висмут	208.98038 84 Po 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴ 271.3 1564 2.0/1.76 Polonium Полоний	(210) 85 At 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵ 254 962 2.2/1.86 Astatine Астат	(210) 86 Rn 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶ 302 337 5.1 eV Radon Радон
7	(223) 87 Fr [Rn]7s ¹ 27 677 0.7/0.86 Francium Франций	(226) 88 Ra 7s ² 970 1140 0.89/0.97 Radium Радий	(227) 89 Ac 6d ¹ 7s ² 1050 (-3250) 1.1/1.0 Actinium Актиний	(261) 104 Rf 5f ¹⁴ 6d ² 7s ² 140.116 140.90765 144.24 (145) 150.36 151.964 157.25 158.92534 162.50 164.93032 167.26 168.93421 173.04 174.967 798 3426 -1.2/1.1 Cernium Церий	(262) 105 Db 5f ¹⁴ 6d ³ 7s ² 1021 3068 -1.2/1.1 Dubnium Дубний	(263) 106 Sg 5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ² 1068 3260 -1.2/1.1 Seaborgium Сиборгий	(264) 107 Bh 5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ² 1168 3450 -1.2/1.1 Bohrium Борий	(265) 108 Hs 5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ² 1077 3606 -1.2/1.0 Hassium Хассий	(268) 109 Mt 5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ² 1077 3606 -1.2/1.0 Meitnerium Мейтнерий	(269) 110 Uu 5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s ² 1077 3606 -1.2/1.0 Ununnilium Унунний	(269) 111 Uu 5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ² 1077 3606 -1.2/1.0 Unununium Унунний	(277) 112 Uub 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 1077 3606 -1.2/1.0 Unbibium Унубий	(289) 113 Uut 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹ 1077 3606 -1.2/1.0 Ununtrium Унунтрий	(289) 114 Uuq 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ² 1077 3606 -1.2/1.0 Ununquadium Унунквадий	© P.C.Сайфуллин, 2004 A.P.Сайфуллин, 2004 © R.S.Saifullin, 2004 A.R.Saifullin, 2004			
* Element has no stable nuclides. For radioactive elements the value in parentheses refers to the number of nucleons (mass number) of the most stable isotope (IUPAC, 1995) * Элемент не имеет устойчивых изотопов. Для него в скобках приведено значение массового числа (число нуклонов в ядре) наиболее долгоживущего изотопа (ИЮПАК, 1995). () Alternative english name () American spelling of the element's name () Альтернативное английское название () Американское написание названия элемента																		
			140.116 58 Ce 4f ⁶ 6s ² 798 3426 -1.2/1.1 Cernium Церий	140.90765 59 Pr 4f ⁶ 6s ² 931 3068 -1.2/1.1 Praseodymium Прозимий	144.24 60 Nd 4f ⁶ 6s ² 1021 3068 -1.2/1.1 Neodymium Неодим	(145) 61 Pm 4f ⁶ 6s ² 1168 3260 -1.2/1.1 Promethium Прометий	150.36 62 Sm 4f ⁶ 6s ² 1077 3450 -1.2/1.1 Samarium Самарий	151.964 63 Eu 4f ⁶ 6s ² 822 3123 -1.2/1.1 Europium Европий	157.25 64 Gd 4f ⁷ 6s ² 1312 3123 -1.2/1.1 Gadolinium Гадолий	158.92534 65 Tb 4f ⁷ 6s ² 1356 3123 -1.2/1.1 Terbium Тербий	162.50 66 Dy 4f ⁷ 6s ² 1409 2662 -1.2/1.1 Dysprosium Диспрозий	164.93032 67 Ho 4f ⁷ 6s ² 1474 2662 -1.2/1.1 Holmium Гольмий	167.26 68 Er 4f ⁷ 6s ² 1529 2662 -1.2/1.1 Erbium Эрбий	168.93421 69 Tm 4f ⁷ 6s ² 1545 1947 -1.2/1.1 Thulium Тулий	173.04 70 Yb 4f ⁷ 6s ² 819 1193 -1.2/1.1 Ytterbium Иттербий	174.967 71 Lu 4f ⁷ 6s ² 1663 3302 -1.2/1.1 Lutetium Лютеций		
			(232) 90 Th 6d ² 7s ² 1572 (-3800) 1.11/1.1 Thorium Торий	(231) 91 Pa 5f ⁶ 6d ¹ 7s ² 1572 4230-4500 1.14/1.1 Protactinium Протактиний	(238) 92 U 5f ⁶ 6d ¹ 7s ² 1132 3818 -1.2/1.2 Uranium Уран	(239) 93 Np 5f ⁶ 6d ² 7s ² 639 3902 1.22/1.2 Neptunium Нептуний	(239) 94 Pu 5f ⁷ 7s ² 641 3340 1.2/1.2 Plutonium Плутоний	(243) 95 Am 5f ⁷ 7s ² 998 2607 -1.1/1.2 Americium Америций	(243) 96 Cm 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² 1340 3110 1.2/1.2 Curium Кюри	(247) 97 Bk 5f ⁷ 7s ² 1050 2630 -1.1/1.2 Berkelium Берклий	(252) 98 Cf 5f ⁷ 7s ² 900 1227 1.3/- Californium Калифорний	(251) 99 Es 5f ⁷ 7s ² 860 - 1.3/- Einsteinium Эйнштейний	(257) 100 Fm 5f ⁷ 7s ² - 1.3/1.2 Fermium Фермий	(257) 101 Md 5f ⁷ 7s ² - 1.2/1.2 Mendelevium Менделеев	(258) 102 No 5f ⁷ 7s ² - 1.3/- Nobelium Нобелий	(259) 103 Lr 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² - 1.3/- Lawrencium Лоуренсий		

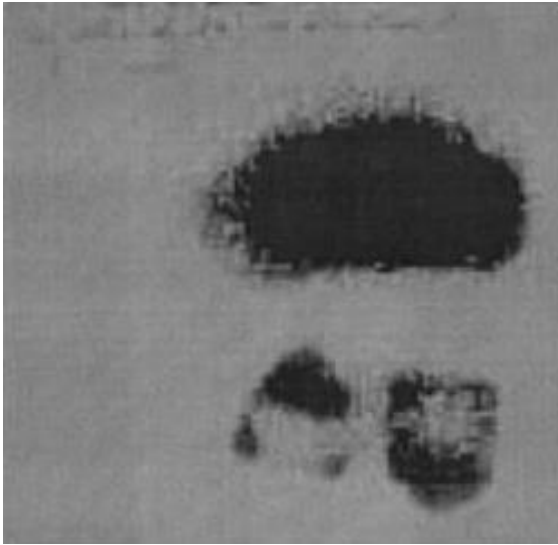


Атомы построены из протонов, нейтронов и электронов

Карта известных изотопов: заметим, что большинство из них радиоактивные!



2. Радиоактивность



Первое свидетельство радиоактивного распада атомных ядер, обнаруженное *А. Беккерелем в 1896 г.* На фотопластинке отчетливо видны потемнения, образовавшиеся в результате того, что *А. Беккерель* положил на неё образцы урановой соли.

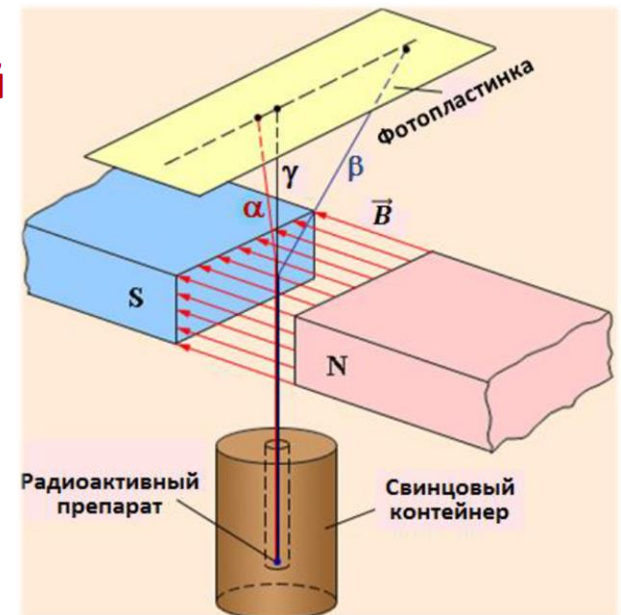
Радиоактивность – самопроизвольное испускание атомными ядрами различных частиц и излучений

К 1900 г. наблюдались

основные виды радиоактивности:

- Альфа (α) распад (испускание ядер гелия)
– 1898 г. Э. Резерфорд,
- Бета (β) распад (испускание электронов)
– 1898 г. Э. Резерфорд,
- Гамма (γ) распад (испускание гамма-квантов)
– 1900 г. П. Виллард.

Все эти распады обусловлены внутриядерными процессами. Но сами ядра были открыты лишь в 1911 г. Э. Резерфордом.



Радиоактивный распад – спонтанный (случайный) процесс, характерный для событий, происходящих в микромире, т.е. на квантовом уровне.

Результат каждого отдельного события нельзя предсказать, а лишь его вероятность.

Это не связано с несовершенством наблюдательных приборов, а является отражением природной случайности самого квантового явления.

Пусть в момент времени t имеется $N(t)$ одинаковых радиоактивных ядер или нестабильных частиц и вероятность распада отдельного ядра (частицы) в единицу времени равна λ .

Тогда за промежуток dt число радиоактивных ядер (частиц) уменьшится на dN ,

где
$$dN = -\lambda \cdot N(t)dt,$$

откуда

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} = N(0)e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $N(0)$ – число радиоактивных ядер (частиц) в момент $t = 0$.

Наряду с λ используют

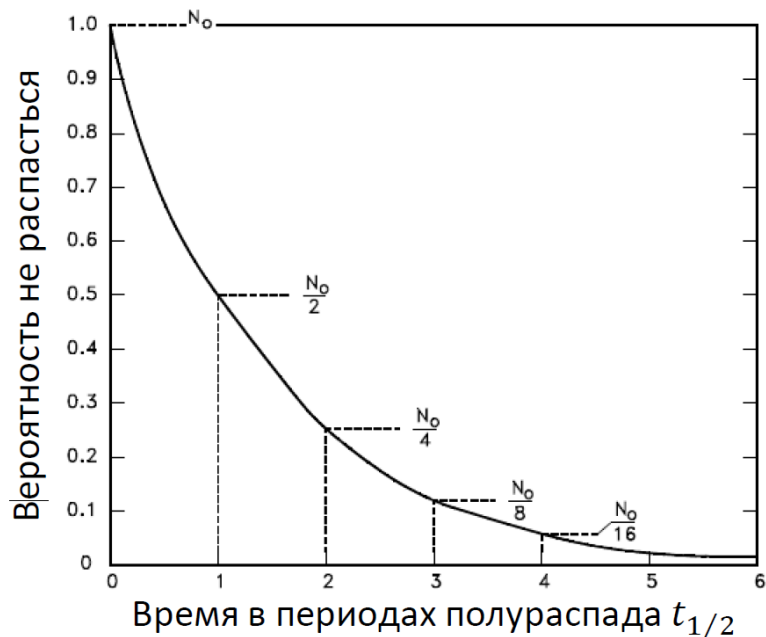
$\tau = \frac{1}{\lambda}$ – среднее время жизни ядра (до распада);

$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ – период полураспада.

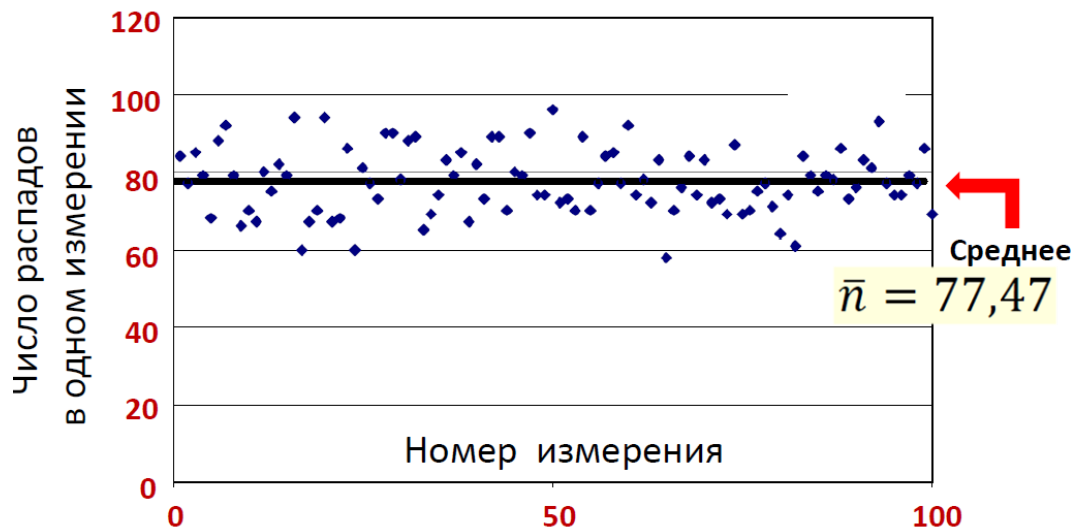
Среднее число \bar{n} распадов за время t :

$$\bar{n} = N\lambda t$$

Кривая радиоактивного распада



100 одинаковых по времени измерений распадов от одного радиоактивного источника



Вероятность P_n за время t испытать n распадов даётся распределением Пуассона:

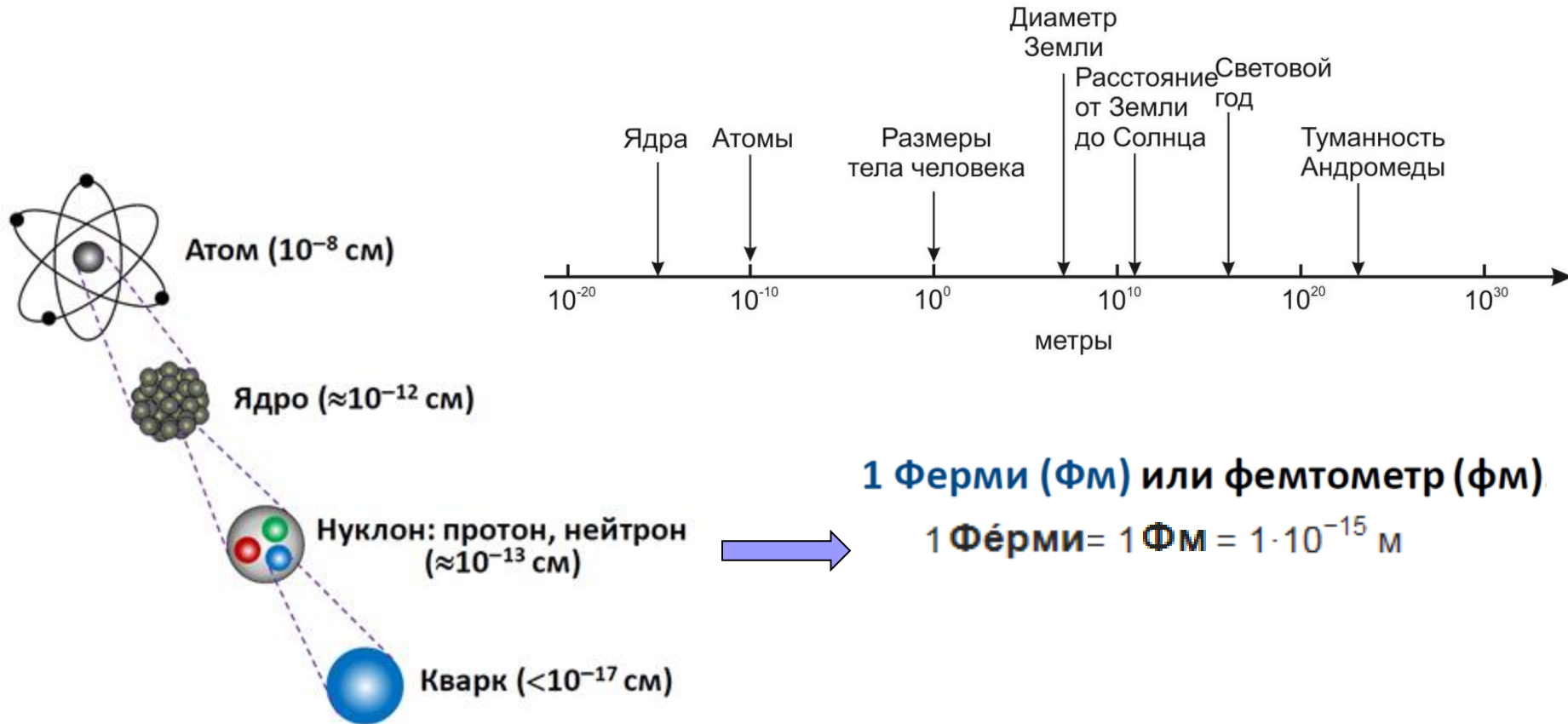
$$P_n(\text{Пуассон}) = \frac{(\bar{n})^n}{n!} e^{-\bar{n}}.$$

При $\bar{n} \gg 1$ оно переходит в распределение Гаусса:

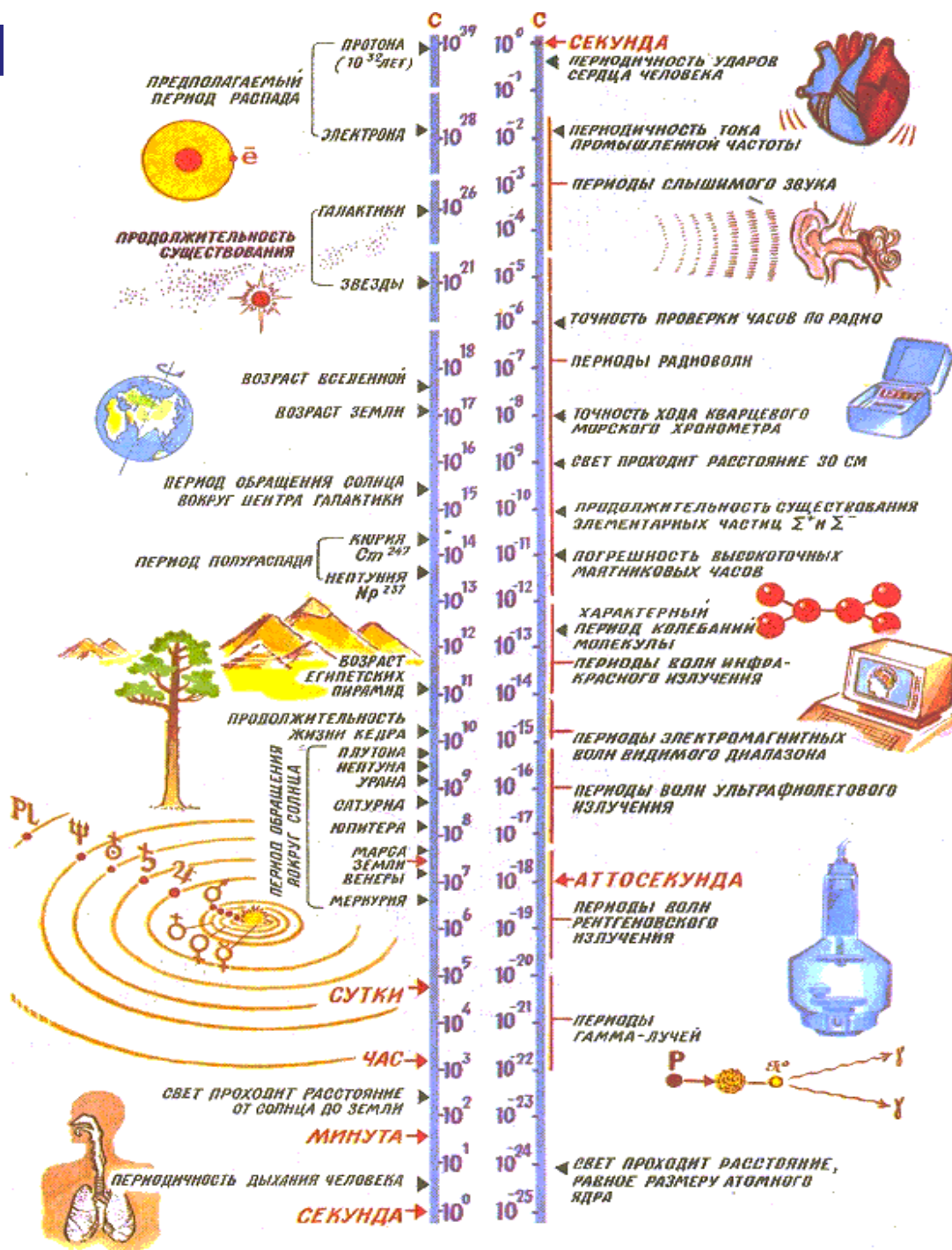
$$P_n(\text{Гаусс}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{n}}} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\bar{n}}}.$$

3. Масштабы физических величин в ядерной физике

Расстояние



Время

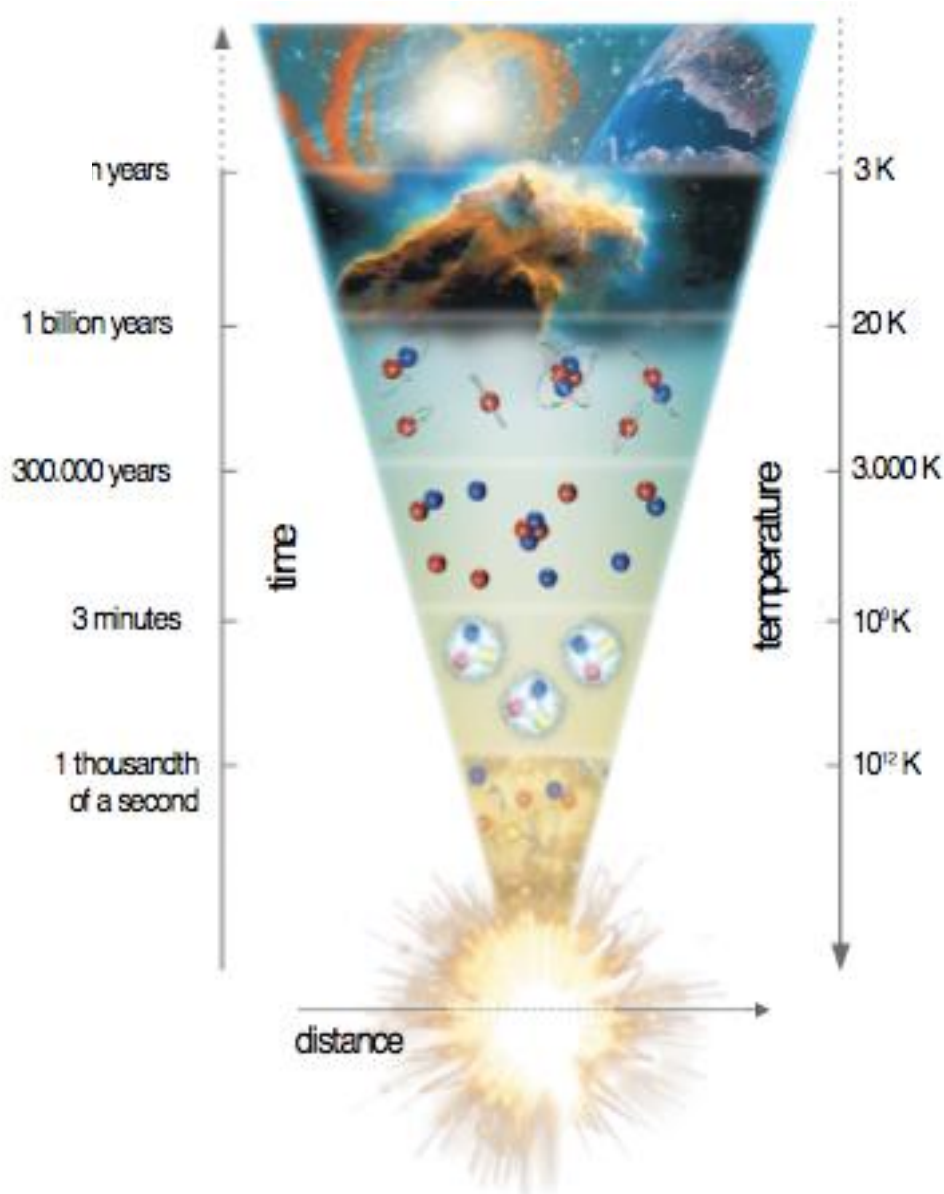


$c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/сек
 скорость света

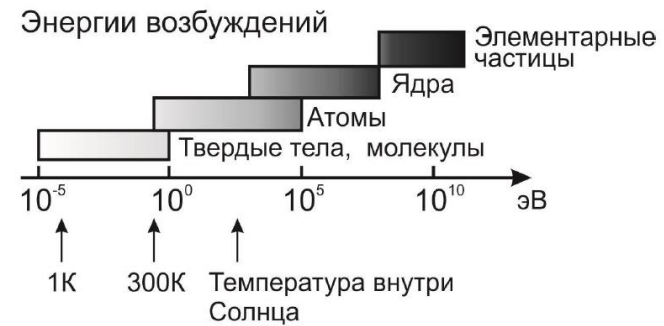
$$\tau = \frac{R_{яд}}{c} \approx \frac{10^{-13}}{10^{10}} \approx 10^{-23} \text{ сек}$$



Энергия



$$1 \text{ эВ} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ K}$$



Энергетическая шкала



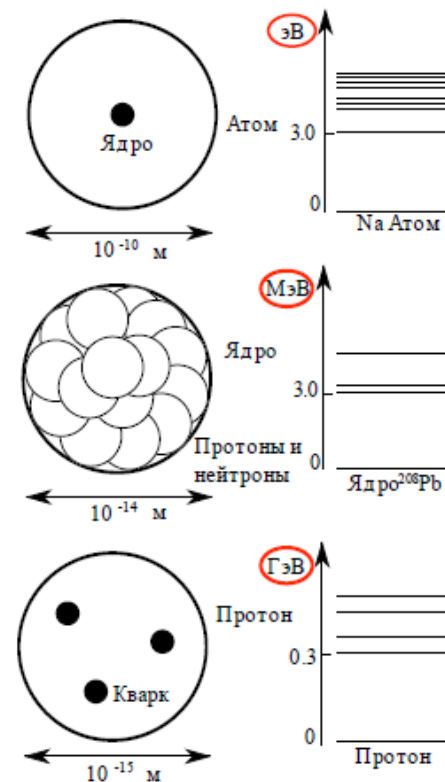
* Единица энергии, используемая в ядерной физике - электрон-вольт (эВ)

* $1 \text{ эВ} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

* $1 \text{ кэВ} = 1000 \text{ эВ}$

* $1 \text{ МэВ} = 1000 \text{ кэВ}$

В микромире масса обычно выражается в энергетических единицах mc^2 , например, масса электрона ($9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$): $m_e c^2 = 0,511 \text{ МэВ}$, масса протона ($1,6727 \cdot 10^{-24} \text{ г}$): $m_p c^2 = 938,27 \text{ МэВ}$.



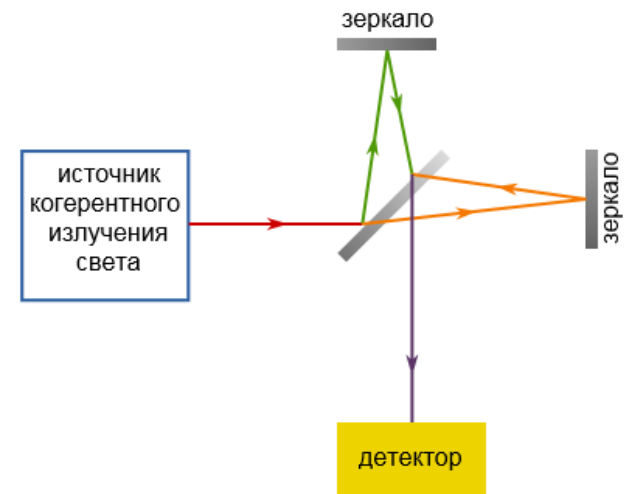
4. Релятивистские свойства частиц

$c = 2,9979 \cdot 10^{10}$ см/сек
скорость света в вакууме

- **Лоренц-фактор:** $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$,
где $\beta = \frac{v}{c}$, а v – скорость,
- **Полная энергия:** $E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} = \gamma m c^2 = m c^2 + T$,
где T – кинетическая энергия,
- **Кинетическая энергия:** $T = m c^2 (\gamma - 1)$,
- **Импульс:** $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$,
- $v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m c^2}{E}\right)^2}$,
- $p^2 c^2 = T(2m c^2 + T) = 2Tm c^2 + T^2$.

$E^2 - p^2 c^2 = invariant$,
где E – **полная энергия** частицы или системы частиц,
 p – **импульс** частицы или суммарный импульс системы частиц.

1887
Опыт Майкельсона-Морли



Эффект замедления времени для релятивистской частицы

Рассмотрим частицы, испытывающие распад. Их собственное время жизни (среднее время жизни в покое состоянии) равно τ_0 . Количество таких покоящихся частиц со временем меняется по закону

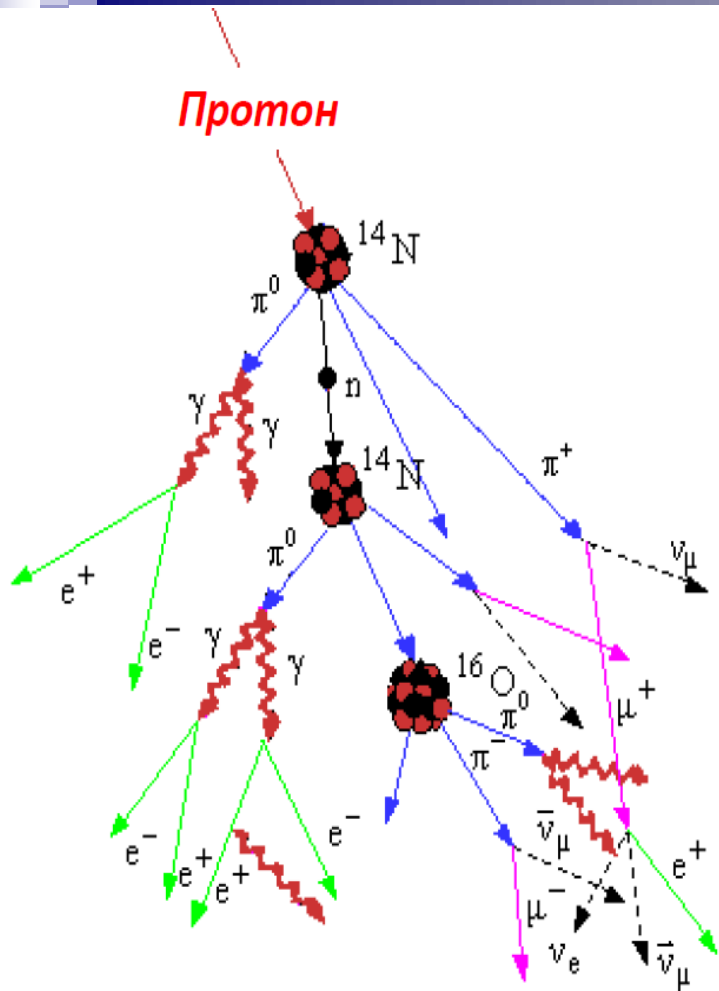
$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}}.$$

Если частицы движутся со скоростью v , то за счёт релятивистского замедления времени среднее время их жизни возрастет до $\tau = \gamma\tau_0$, где Лоренц-фактор

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

В этом случае количество частиц со временем будет меняться по закону

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = N(0) \cdot e^{-\frac{t}{\gamma\tau_0}}.$$



Основной компонентой космических лучей, падающих на Землю, являются **протоны**, энергия которых может достигать 10^{20} эВ. При попадании **протонов** в земную атмосферу и взаимодействии с атомными ядрами атмосферы рождаются **заряженные пионы** (π^\pm), которые в свободном полете испытывают затем распад на релятивистские **мюоны** (μ^\pm), **мюонные нейтрино** ν_μ (или их **антинейтрино** $\bar{\nu}_\mu$):

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

Для такого распада $\tau_0(\pi^\pm) = 2,6 \cdot 10^{-8}$ сек.

В свою очередь мюоны распадаются по схеме

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Собственное время жизни относительно такого распада $\tau_0(\mu^\pm) = 2,2 \cdot 10^{-6}$ сек.

релятивистское замедление времени позволяет почти половине мюонов с кинетической энергией **1 ГэВ**, родившихся на высоте **5 км**, идвигающихся в направлении Земли, достичь её поверхности.

Пусть на высоте **5 км** от поверхности Земли рождаются мюоны с кинетической энергией $T_\mu = 1$ ГэВ.

Двигаясь в направлении земной поверхности, будут ли они достигать её до распада?

Эффект сокращения продольного размера

В *Большом Адронном Коллайдере*
(*Large Hadron Collider*)

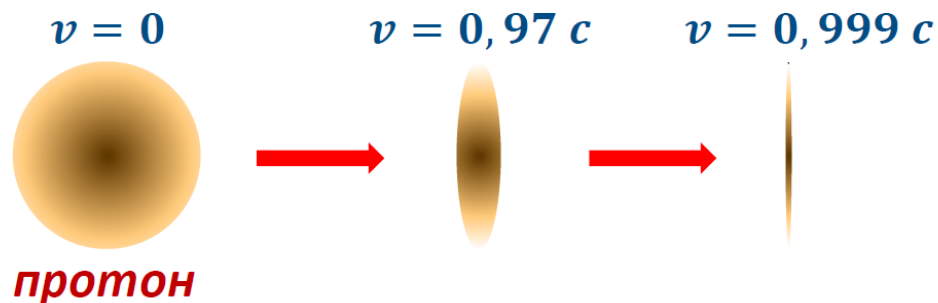
кинетическая энергия ускоренных **протонов**
достигает **7000 ГэВ = 7 ТэВ**.

Покоящийся **протон** сферически симметричен
и его радиус $\approx 0,8 \text{ Фм} = 0,8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$.

Учитывая Лоренц-фактора протона с $T_p = 7000 \text{ ГэВ}$:

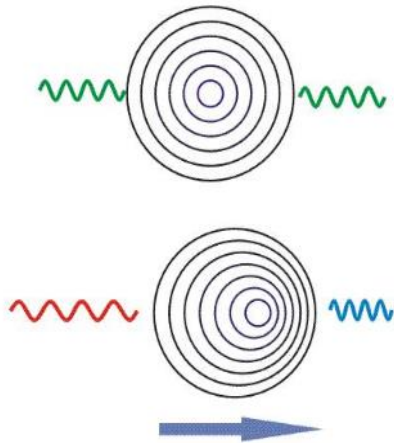
$$\gamma_p = 1 + \frac{T_p}{m_p c^2} = 1 + \frac{7000 \text{ ГэВ}}{0,93827 \text{ ГэВ}} = 7463 \approx 7500,$$

получаем, что **радиус протона** в продольном
направлении сократится до $\approx 10^{-4} \text{ Фм} = 10^{-17} \text{ см}$.



Эффект красного смещения

Эффект Доплера



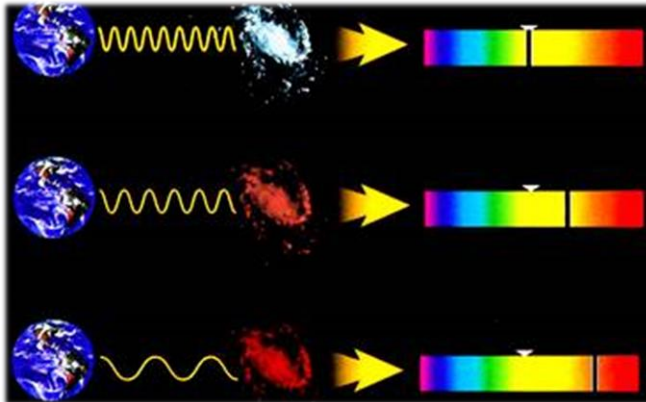
Цвет удаляющегося источника света испытывает **красное смещение**, а приближающегося – **синее смещение**

Закон Хаббла

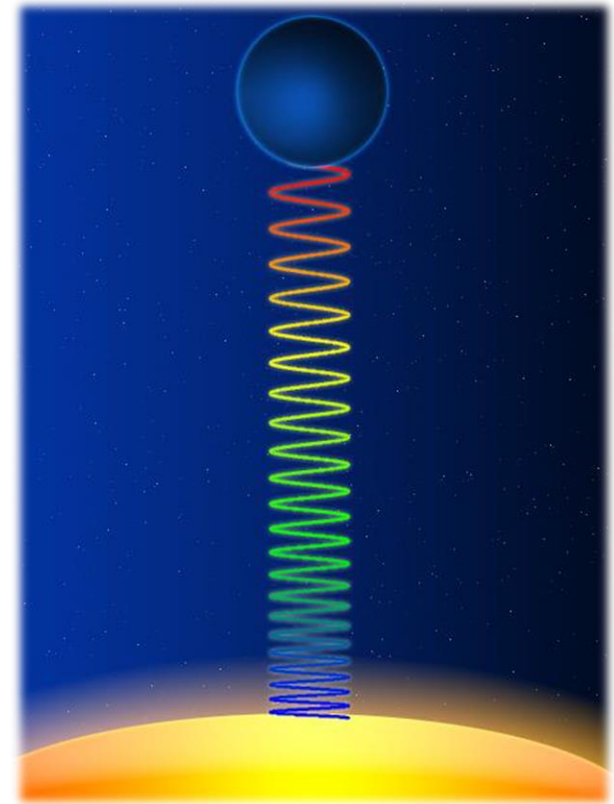
$$v = H R$$

v – скорость галактики
 R – расстояние до галактики
 H – постоянная Хаббла

$$H = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$$



Замедление времени в гравитационном поле



5. Квантовые свойства частиц

Постоянная Планка (квант действия)

$$\hbar = 1,054\,571\,800(13) \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

$$\hbar = 1,054\,571\,800(13) \times 10^{-27} \text{ эрг}\cdot\text{с}$$

$$\hbar = 6,582\,119\,514(40) \times 10^{-16} \text{ эВ}\cdot\text{с}$$

* Корпускулярно-волновой дуализм света

Свет представляет собой поток фотонов, с энергией $E=h\nu$ и импульсом $p=E/c$. Вводя круговую частоту $\omega=2\pi\nu$ и $\hbar=h/(2\pi)$, можно записать $E=\hbar\omega$, $p=2\pi\hbar/\lambda=\hbar k$, где $\lambda=c/\nu$ - длина волны, $k=2\pi/\lambda$ - волновое число.

* Частицы, как квантово-механические объекты

Частицам тоже присущ корпускулярно-волновой дуализм:

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad p = h/\lambda = \hbar k, \quad \text{где } E, p - \text{ энергия и импульс частицы, соответственно}$$

$$\Psi(\mathbf{r}, t) \sim e^{-i/\hbar(Et - \mathbf{p}\mathbf{r})}.$$

Свободно движущаяся частица описывается плоской волной (волна де Бройля)

* Волновая функция

$$dW = |\Psi(x, y, z)|^2 dx dy dz.$$

Квадрат модуля волновой функции - вероятность найти частицу в области от x до $(x+dx)$, от y до $(y+dy)$, от z до $(z+dz)$

$$\iiint |\Psi(x, y, z)|^2 dx dy dz = 1,$$

Условие нормировки

* Уравнение Шредингера

$$-\hbar^2/(2m)\nabla^2\Psi(\mathbf{r}) + V\Psi(\mathbf{r}) = E\Psi(\mathbf{r}).$$

Стационарное уравнение Шредингера

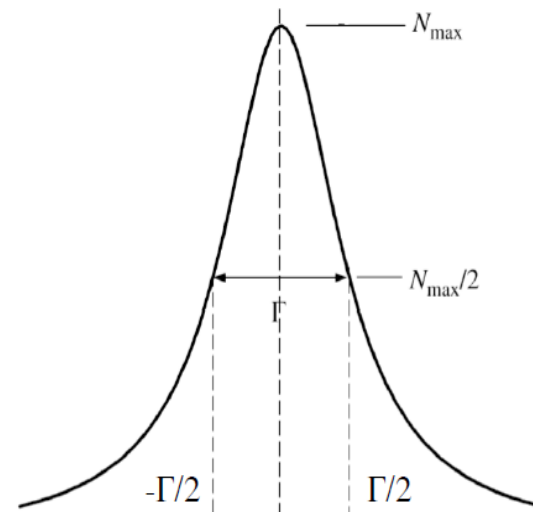
$$i\hbar\partial\Psi(\mathbf{r}, t)/\partial t = -\hbar^2/(2m)\nabla^2\Psi(\mathbf{r}, t) + V\Psi(\mathbf{r}, t).$$

Временное уравнение Шредингера

* Соотношение неопределенности Гейзенберга

$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$; $\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$ Паре характеристик квантовой частицы, нельзя одновременно приписать точные значения энергии - времени и импульса - координаты

* Неопределенность времени распада, связанная со средним временем жизни t , приводит к неопределенности полной энергии, как следует из соотношения $\Delta E \Delta t \cong \hbar/2$

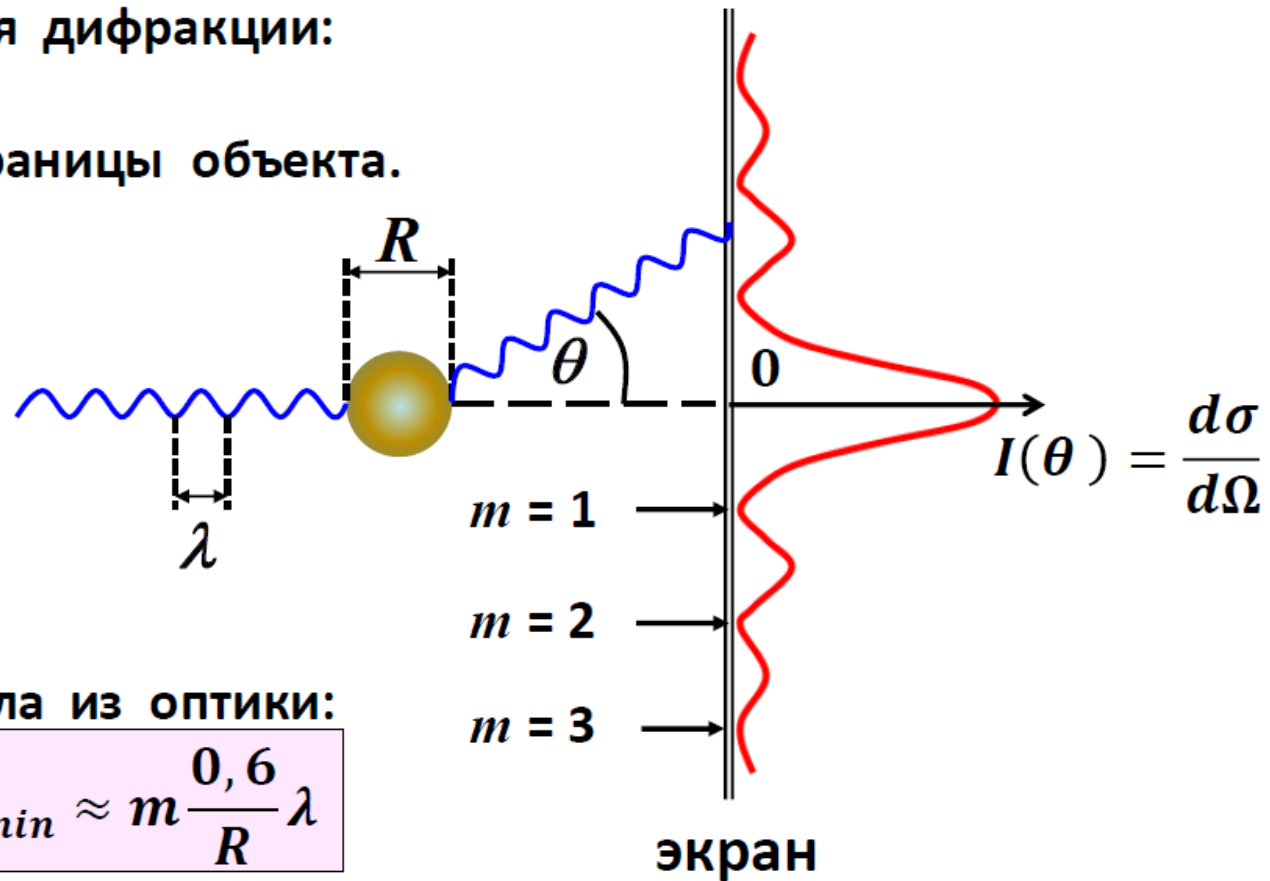


$$\Gamma = 1 \text{ МэВ} \sim t = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ с}$$

Дифракция на круглом (сферическом) объекте

Два условия дифракции:

- 1) $\lambda < R$,
- 2) Чёткие границы объекта.

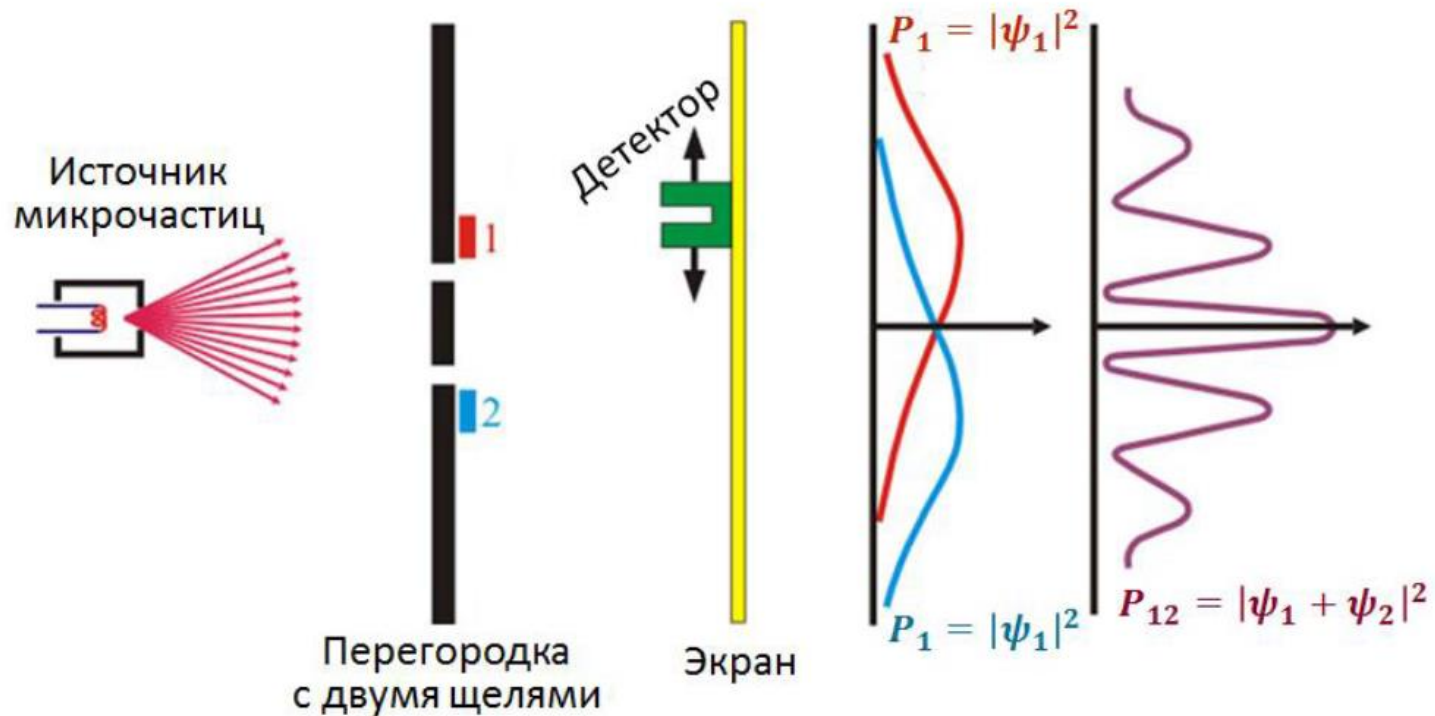


Формула из оптики:

$$\sin\theta_{min} \approx m \frac{0,6}{R} \lambda$$

Волновые свойства оптического излучения

Схема опыта с двумя щелями



Волновые свойства электронов

В **1927 г.** **Дэвиссон и Джермер** (США) и **Дж. Томсон** (Англия) впервые наблюдали дифракцию электронов (**Nobel Prize, 1937**)

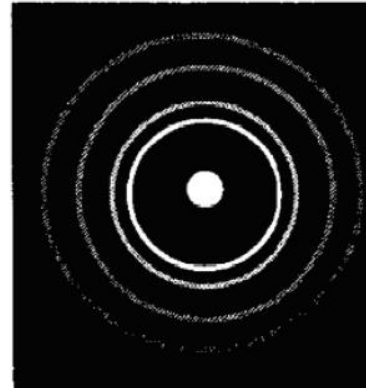


Дэвиссон, Джермер

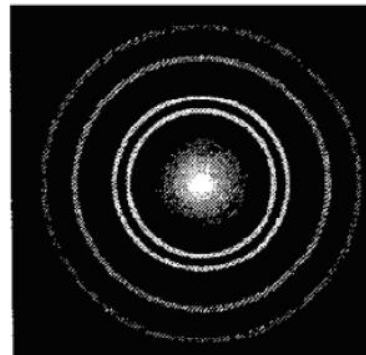


Томсон

Современные
данные

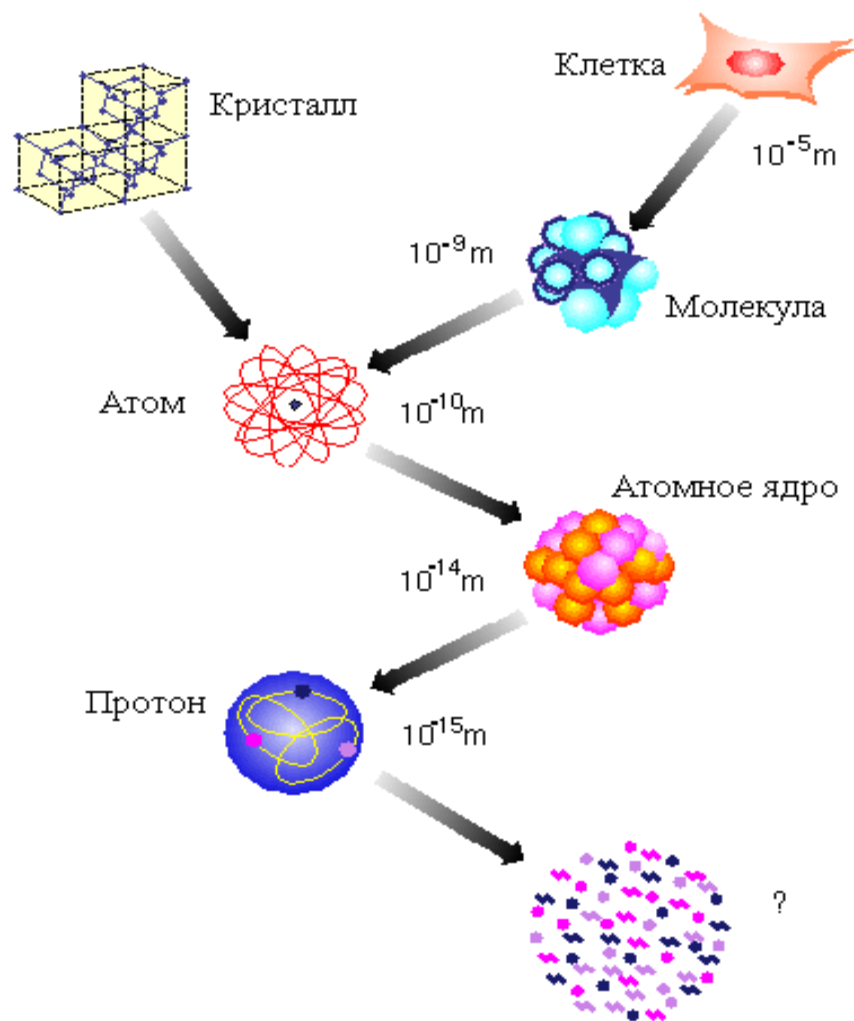


Дифракция электронов с энергией 0,6 кэВ на алюминиевой фольге



Дифракция рентгеновских фотонов с энергией 1,8 кэВ на алюминиевой фольге

6. Измерения в микромире

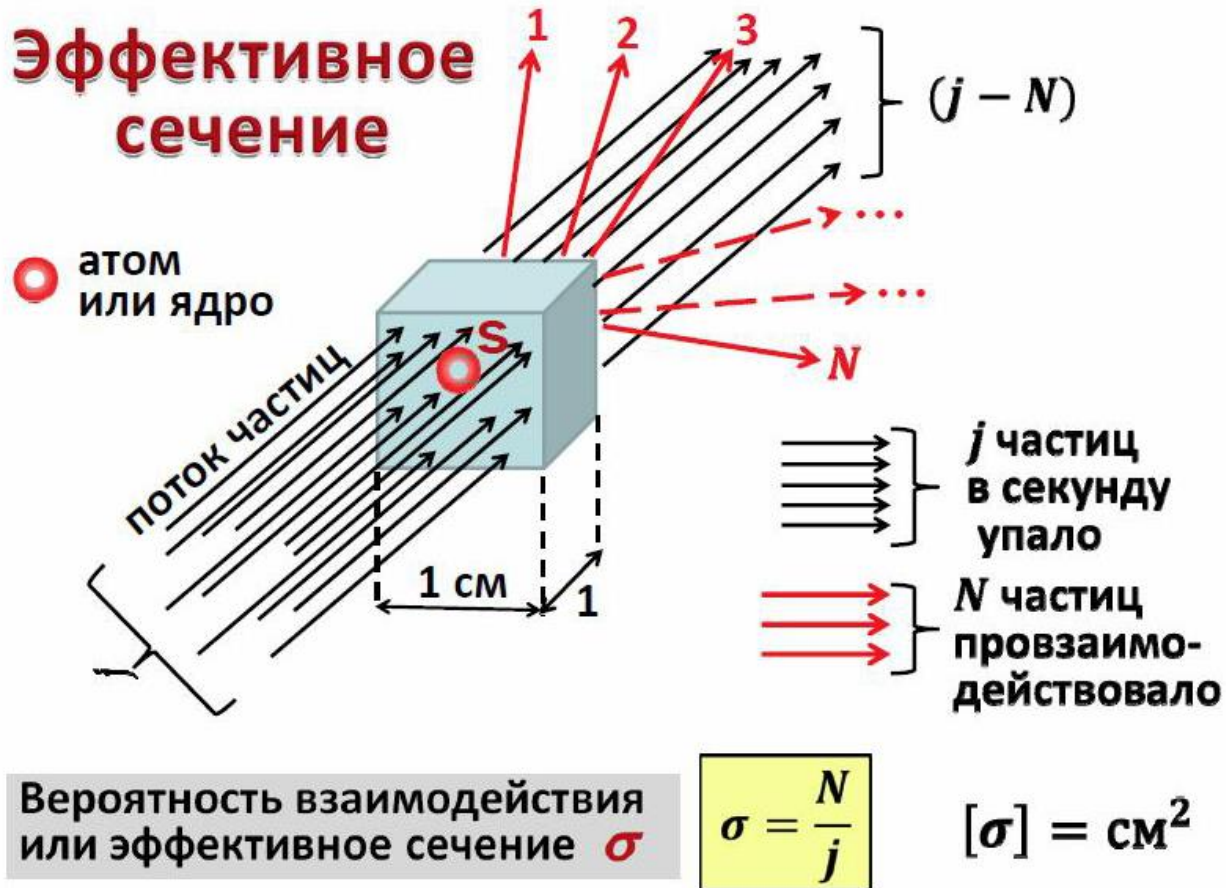


эксперимент в микромире



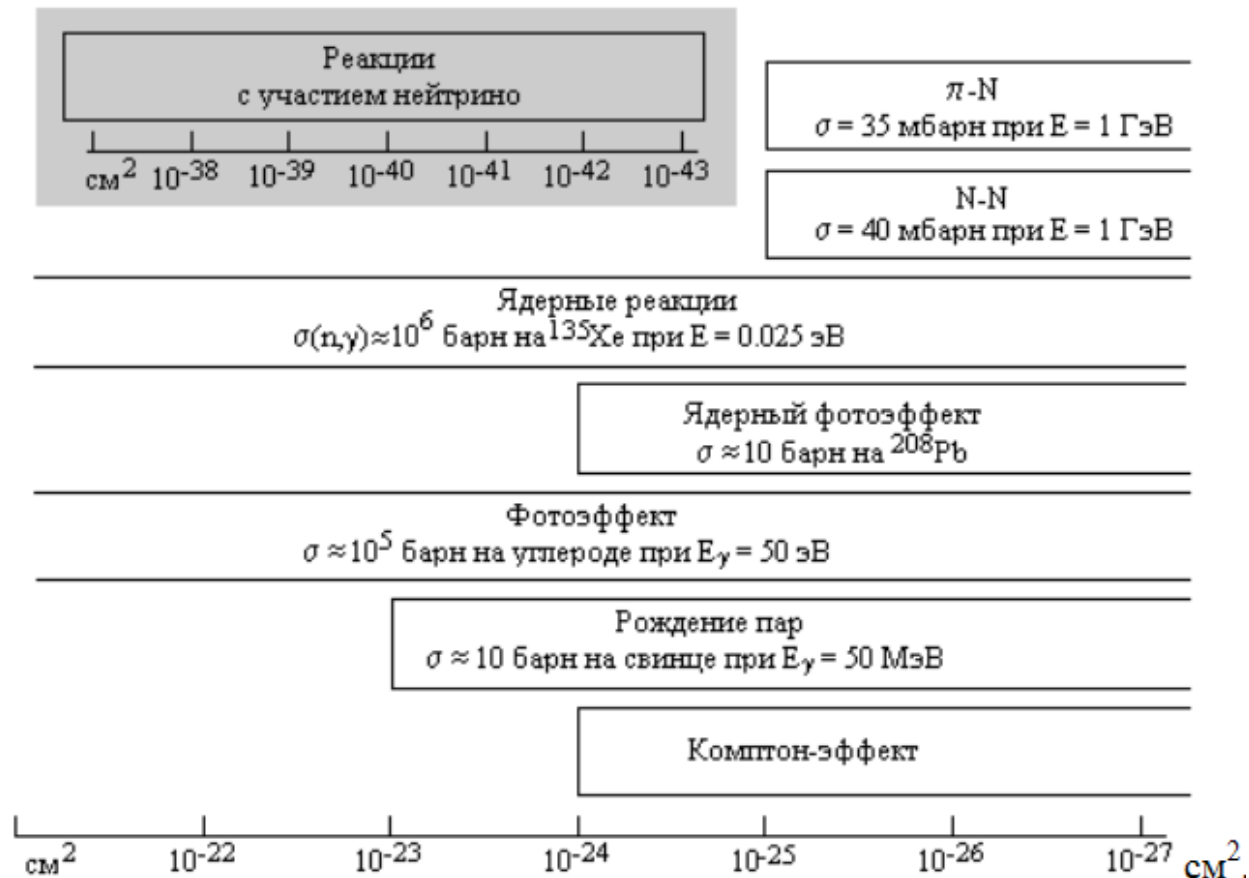
макроскопический опыт





СЕЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ = ВЕРОЯТНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ!

Характерные величины сечений в физике ядра и частиц.



$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2,$$

$$1 \text{ мбарн} = 10^{-27} \text{ см}^2.$$

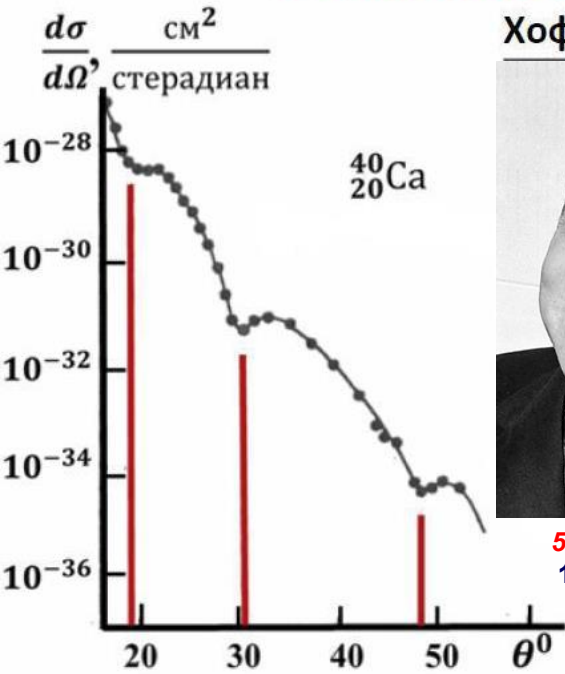
Рассеяние электронов на ядрах

Хофштадтер (1953, США):

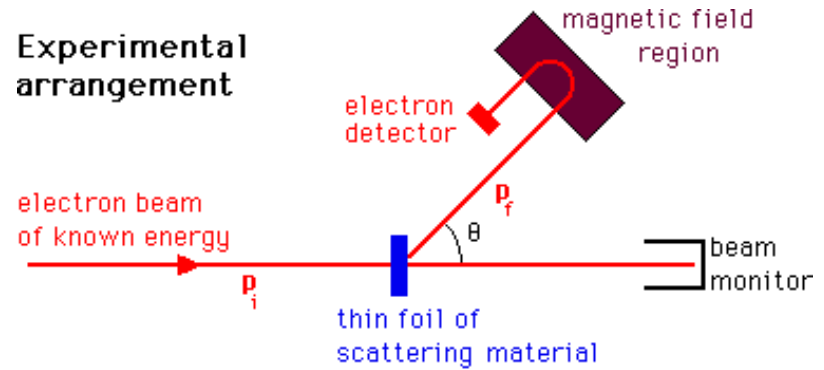
Nobel Prize
1961



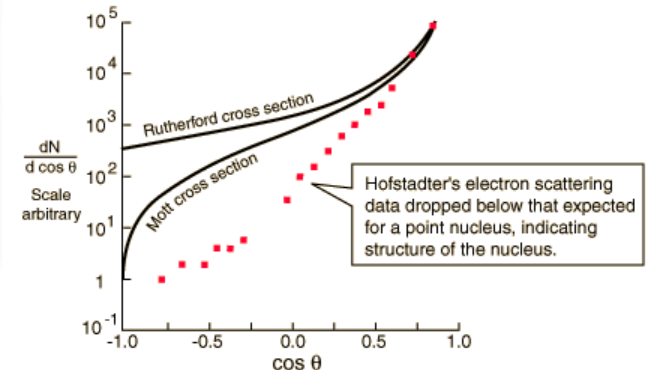
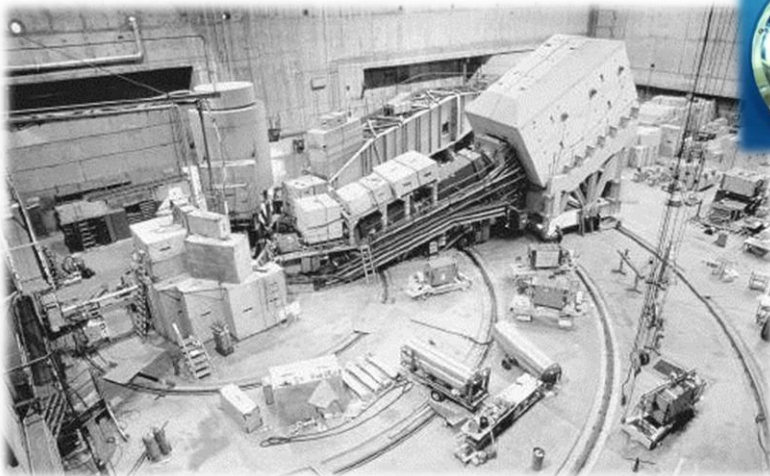
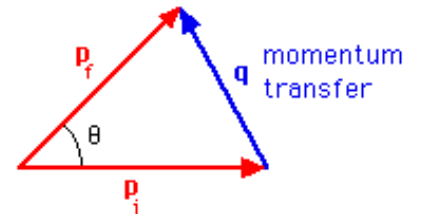
5 февраля 1915
17 ноября 1990



Experimental arrangement



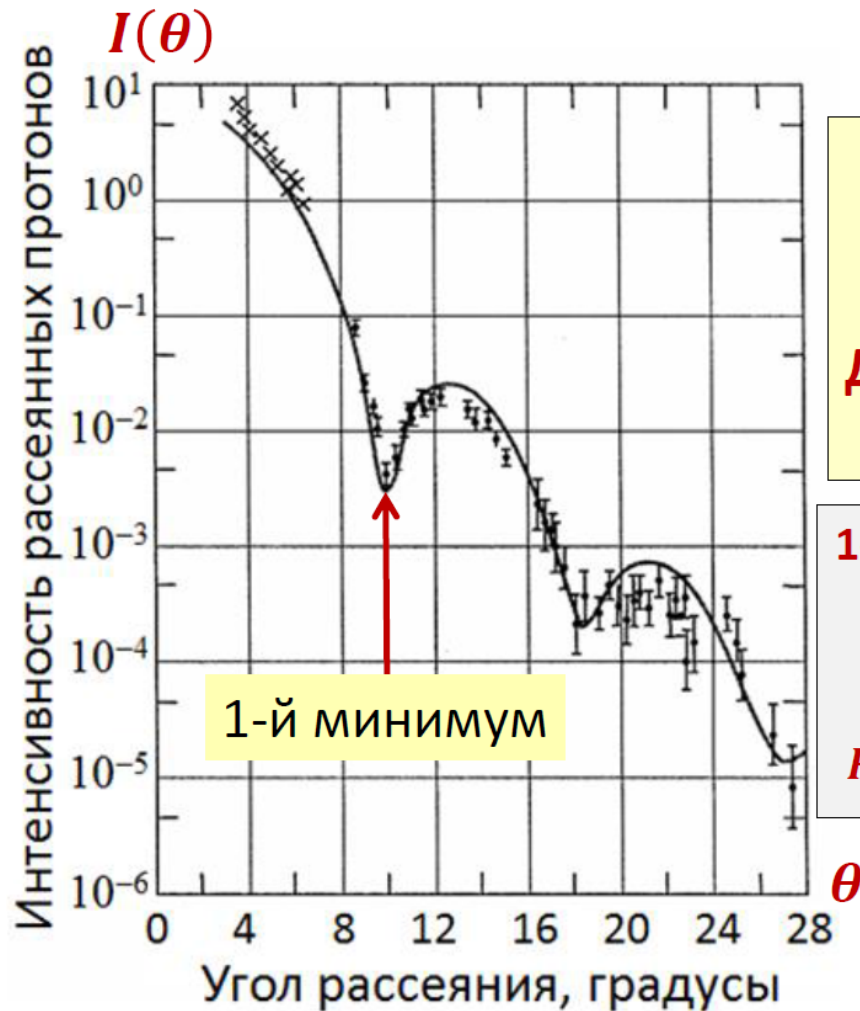
Kinematics or momentum triangle



Hofstadter, R., et al., Phys. Rev. 92, 978 (1953).

The Detection of Gamma-Rays with Thallium-Activated Sodium Iodide Crystals
Phys. Rev. 75, 796 – Erratum Phys. Rev. 75, 1611 (1949)

Волновые свойства протонов

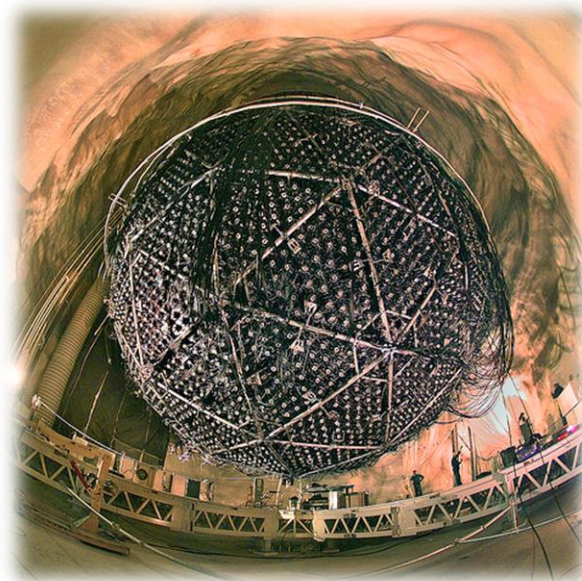
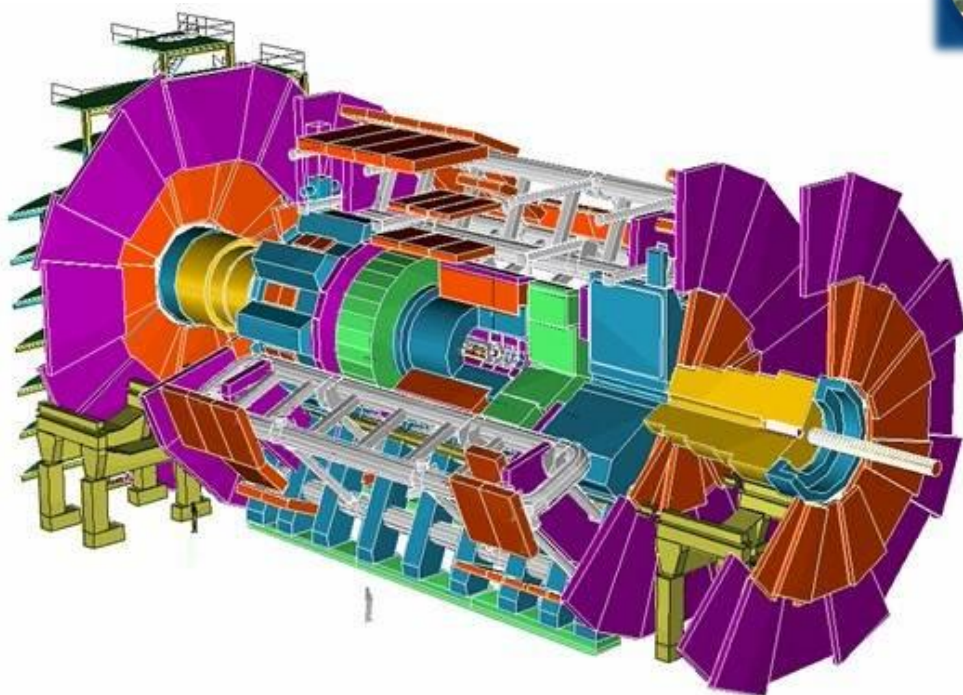
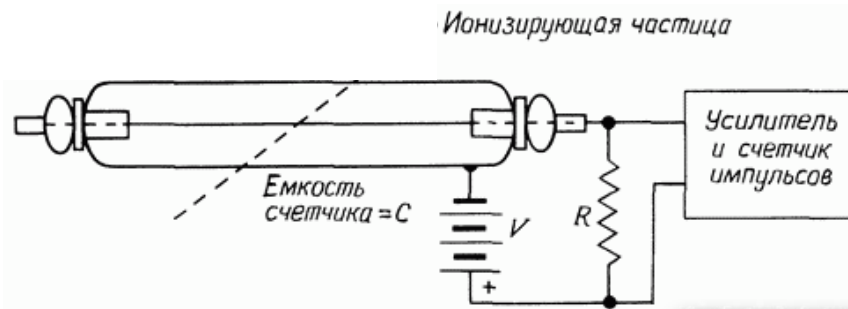
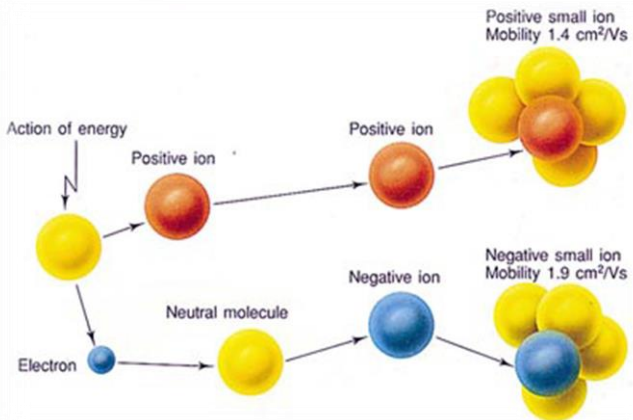


Рассеяние протонов
с энергией 1 ГэВ
на ядре кислорода.
Длина волны протона
0,73 Фм .

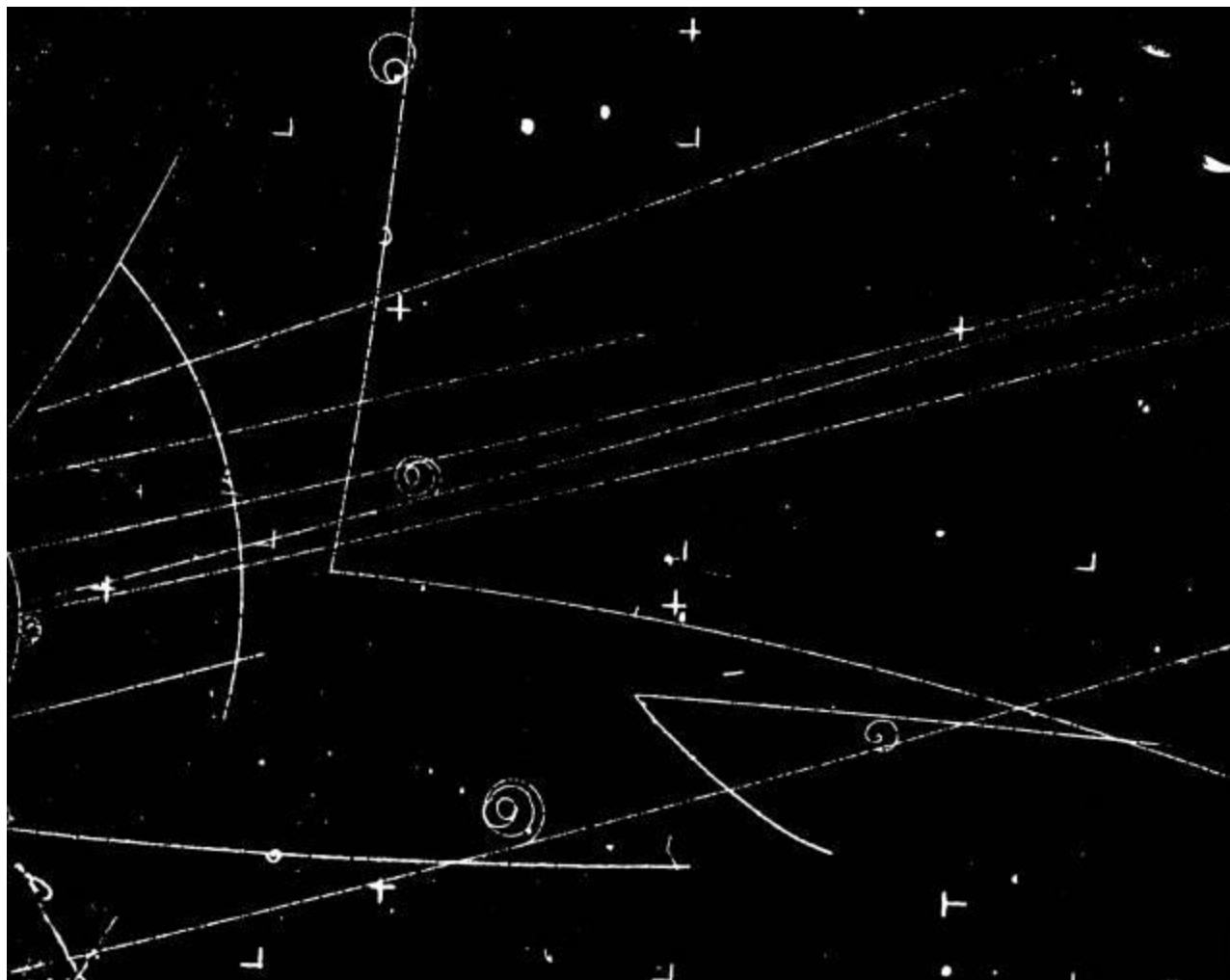
1-й минимум при $\theta = 10^\circ$,
откуда радиус
ядра кислорода

$$R = \frac{0,6 \cdot 0,73 \text{ Фм}}{\text{Sin}10^\circ} = 2,5 \text{ Фм}$$

Инструментарий

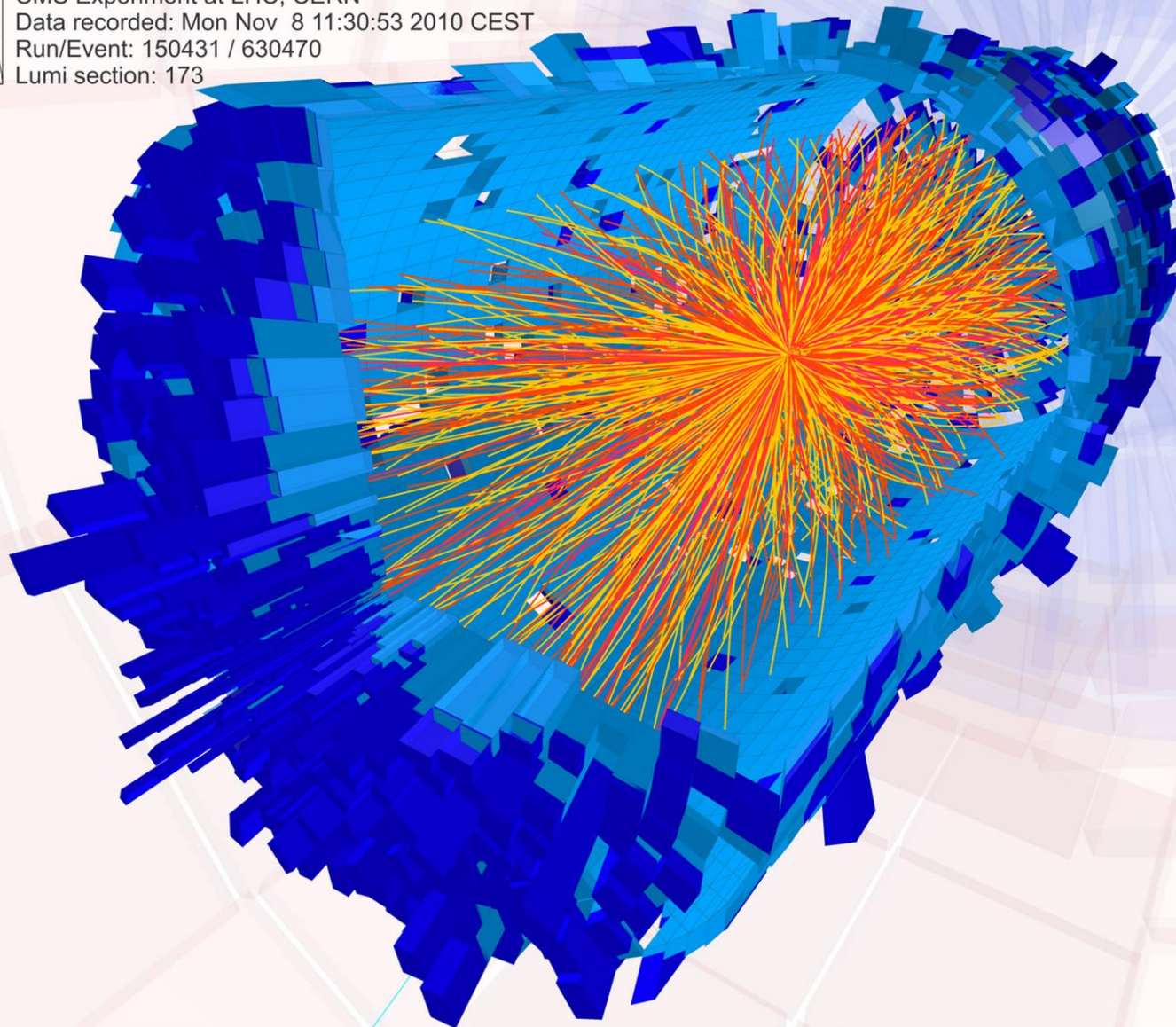


Визуализация явлений в микромире





CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Nov 8 11:30:53 2010 CEST
Run/Event: 150431 / 630470
Lumi section: 173



ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

Самое прекрасное, что может выпасть нам на долю, - это тайна. Стремление разгадать её стоит у колыбели подлинного искусства и подлинной науки. Тот, кто не знает этого чувства, утратил любопытство, неспособен больше удивляться, все равно что задутая свеча.

Альберт Эйнштейн

1931 г.

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Т.1, стр.12-24
2. И.М. Капитонов. Физика атомного ядра и частиц:
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/lect/kapitonov2015/lk01c.pdf/>
3. К.А. Гриднев. Ядерная физика: <http://www.phys.spbu.ru/content/old-pdf/File/Veronica/Nuclear%20physics/lectures.pdf>
4. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 1;
<http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf> .
5. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Изд. 2е. М.: Наука, 1980. Глава I. <http://review3d.ru/shirokov-yu-m-yudin-n-p-yadernaya-fizika-izd-2e>