

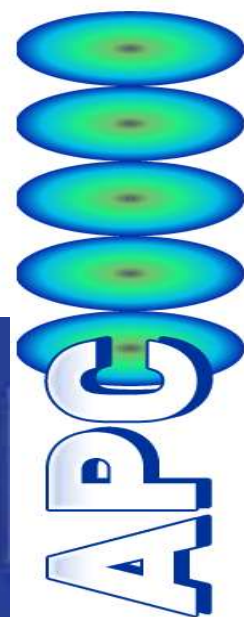


Частицы Сверхвысоких Эnergий : Ускорители **vs** Космос

Владимир Шильцев

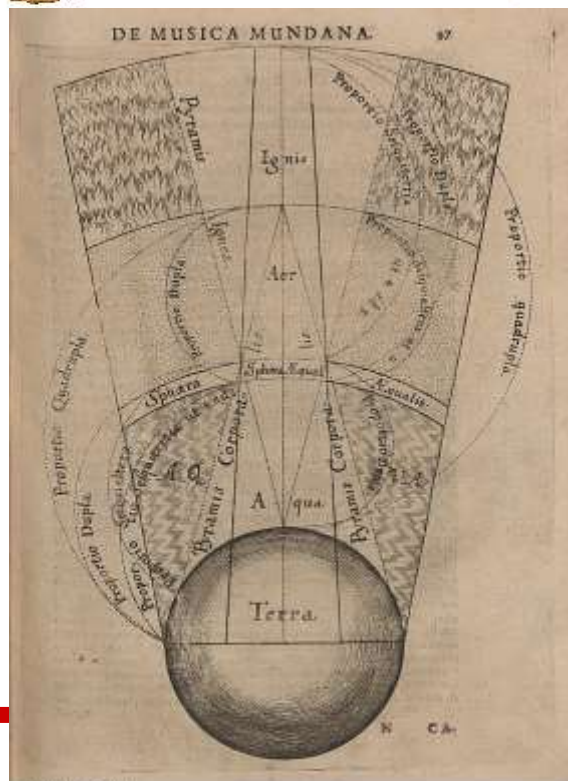
Директор Центра Ускорительной Физики
Лаборатория им.Э.Ферми (США)

ноябрь 2014

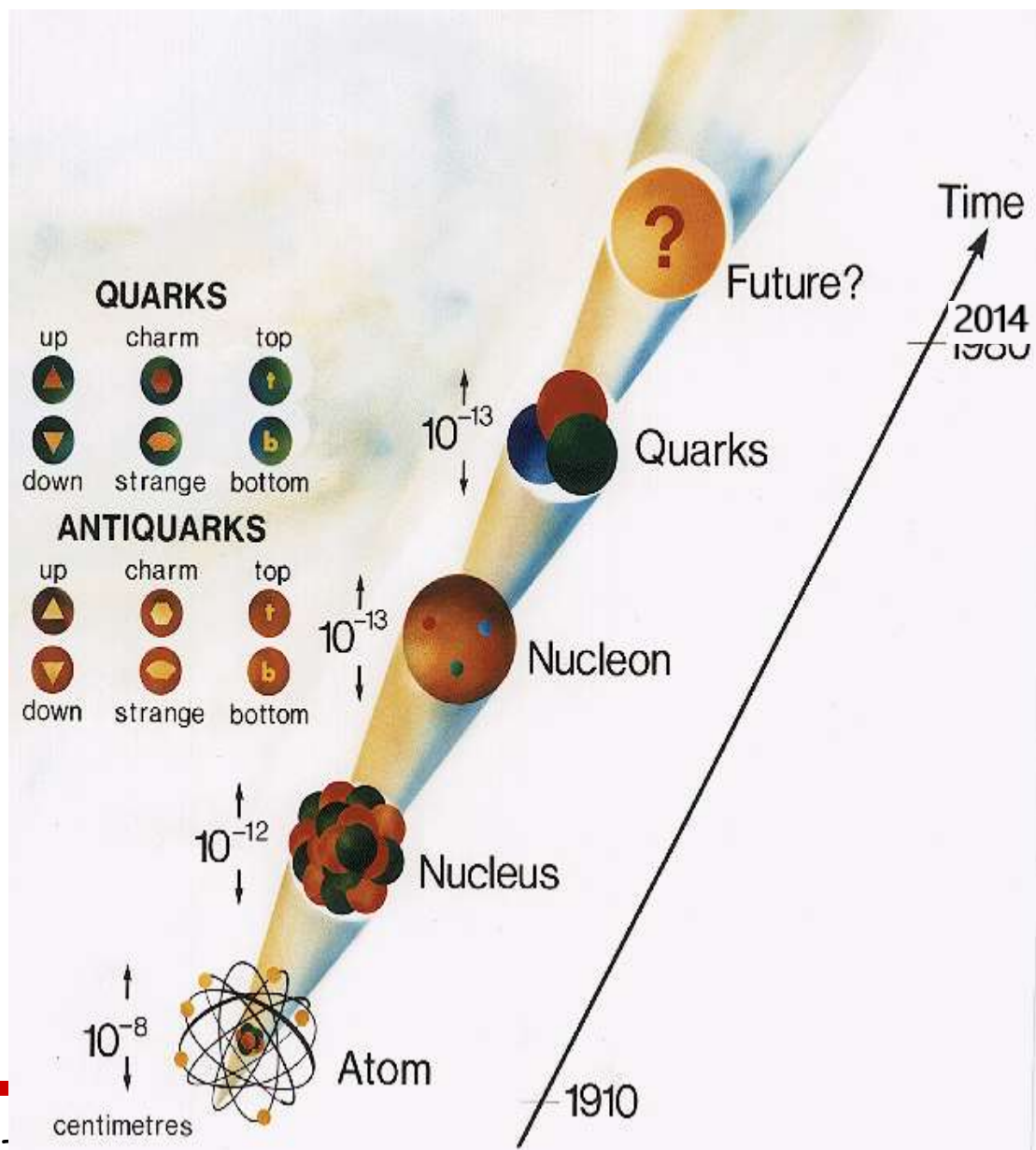




"Элементы" – начало начал



Aristotle Elements (4 BC) - terra (earth), aqua (water), aer (air), and ignis (fire) – explained micro & macrosom (1617)



Физика Элементарных Частиц

- “Не очень старая наука” ~100-120 лет
- Весьма успешная и масштабная:
 - Всего на НИР(World R&D) ~1,600 B\$
 - или ~1.8% мирового ВВП
 - На фундамент.науку ~280 B\$
 - или ~18% от НИР
 - На физику частиц ~4.0 B\$
 - ~1.5% всей фонд. науки

Не так плохо для ~14,000 ученых(<0.2% total)





Физика Частиц: Нобелиаты



1906 Joseph John Thomson (1856-1940)
"In recognition of the great merits of his theoretical and experimental investigations on the conduction of electricity by gases"



1908 Ernest Rutherford (1871-1937)
(Laureate in Chemistry)
"for his investigations into the disintegration of the elements, and the chemistry of radioactive substances"



1918 Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)
"In recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta"



1921 Albert Einstein (1879-1955)
"for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"



1923 Robert Andrews Millikan (1868-1953)
"for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect"



1927 Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959)
"for his method of making the paths of electrically charged particles visible by condensation of vapour"



1932 Werner Karl Heisenberg (1901-1976)
"for the creation of quantum mechanics, the application of which has, inter alia, led to the discovery of the allotropic forms of hydrogen"



1933 Erwin Schrödinger (1887-1961)
Paul M.A. Dirac (1902-1984)
"for the discovery of new productive forms of atomic theory"



1935 James Chadwick (1891-1974)
"for the discovery of the neutron"



1936 Carl David Anderson (1905-1991)
"for his discovery of the positron"



1938 Enrico Fermi (1901-1954)
"for his demonstrations of the existence of new radioactive elements produced by neutron irradiation, and for his related discovery of nuclear reactions brought about by slow neutrons"



1939 Ernest Orlando Lawrence (1901-1958)
"for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it, especially with regard to artificial radioactive elements"



1945 Wolfgang Pauli (1900-1958)
"for the discovery of the Exclusion Principle, also called the Pauli Principle"



1948 Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974)
"for his development of the Wilson cloud chamber method, and his discoveries therein in the fields of nuclear physics and cosmic radiation"



1949 Hideki Yukawa (1907-1981)
"for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces"



1950 Cecil Frank Powell (1903-1969)
"for his development of the photographic method of studying nuclear processes and his discoveries regarding mesons made with this method"



1951 John Cockcroft (1897-1947)
Ernest Walton (1903-1995)
"for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles"



1957 Chen Ning Yang (1922-)
Tsung-Dao Lee (1926-)
"for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles"



1960 Donald Arthur Glaser (1916-)
"for the invention of the bubble chamber"



1961 Robert Hofstadter
"for his pioneering studies of electron scattering in atomic nuclei and for his thereby achieved discoveries concerning the structure of the nucleus"



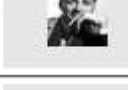
1963 Eugene Paul Wigner
"for his contributions to the theory of the atomic nucleus and the elementary particles, particularly through the discovery and application of fundamental symmetry principles"



1965 S. Tomonaga (1906-1979)
Julian Schwinger (1918-1994)
Richard P. Feynman (1918-1988)
"for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles"



1968 Luis Walter Alvarez (1911-1986)
"for his decisive contributions to elementary particle physics, in particular the discovery of a large number of resonance states, made possible through his development of the technique of using hydrogen bubble chamber and data analyzer"



1969 Murray Gell-Mann (1929-)
"for his contributions and discoveries concerning the classification of elementary particles and their interactions"



1974 Simon Richter (1921-)
Samuel Chao Ch. Ting (1926-)
"for their pioneering work in the discovery of a heavy elementary particle of a new kind"



1979 Sheldon L. Glashow (1922-)
Abdus Salam (1924-1994)
Steven Weinberg (1923-)
"for their contributions to the theory of the unified weak and electromagnetic interaction between elementary particles, including, inter alia, the prediction of the weak neutral current"



1980 James Watson Cronin (1921-) Val Logsdon Fitch (1923-)
"for the discovery of violations of fundamental symmetry principles in the decay of neutral K-mesons"



1984 Carlo Rubbia (1926-)
Simon van der Meer (1925-)
"for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communications of weak interaction"



1986 Leon R. Lederman (1922-)
Melvin Schwartz (1923-2006)
Jack Steinberger (1921-)
"for the neutrino beam method and the demonstration of the double structure of the leptons through the discovery of the muon neutrino"



1988 J. L. Friedman (1920-)
Henry W. Kendall (1924-1999)
Richard E. Taylor (1927-)
"for their pioneering investigations concerning deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics"



1990 Georges Charpak (1924-)
"for his invention and development of particle detectors, in particular the multiview proportional chamber"



1992 Martin L. Perl (1927-)
Frederick Reines (1918-1998)
"for pioneering experimental contributions to lepton physics"



1995 Gerardus 't Hooft (1946-)
Hendrik J.G. Velten (1921-)
"for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics"



2003 Raymond Davis (1916-2006)
Masatoshi Koshiba (1926-)
"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

2004 David Jonathan Gross (1941-)
H. David Politzer (1949-)
Frank Wilczek (1951-)
"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"

2008 Yoichiro Homb (1921-)
Makoto Kobayashi (1946)
Toshihide Maskawa (1940)
"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics" and "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

2013 François Englert (1932-)
Peter H. Higgs (1929)
"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

1992 Georges Charpak (1924-)
"for his invention and development of particle detectors, in particular the multiview proportional chamber"



1995 Martin L. Perl (1927-)
Frederick Reines (1918-1998)
"for pioneering experimental contributions to lepton physics"



1999 Gerardus 't Hooft (1946-)
Hendrik J.G. Velten (1921-)
"for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics"



2003 Raymond Davis (1916-2006)
Masatoshi Koshiba (1926-)
"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"



2004 David Jonathan Gross (1941-)
H. David Politzer (1949-)
Frank Wilczek (1951-)
"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



2008 Yoichiro Homb (1921-)
Makoto Kobayashi (1946)
Toshihide Maskawa (1940)
"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics" and "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"

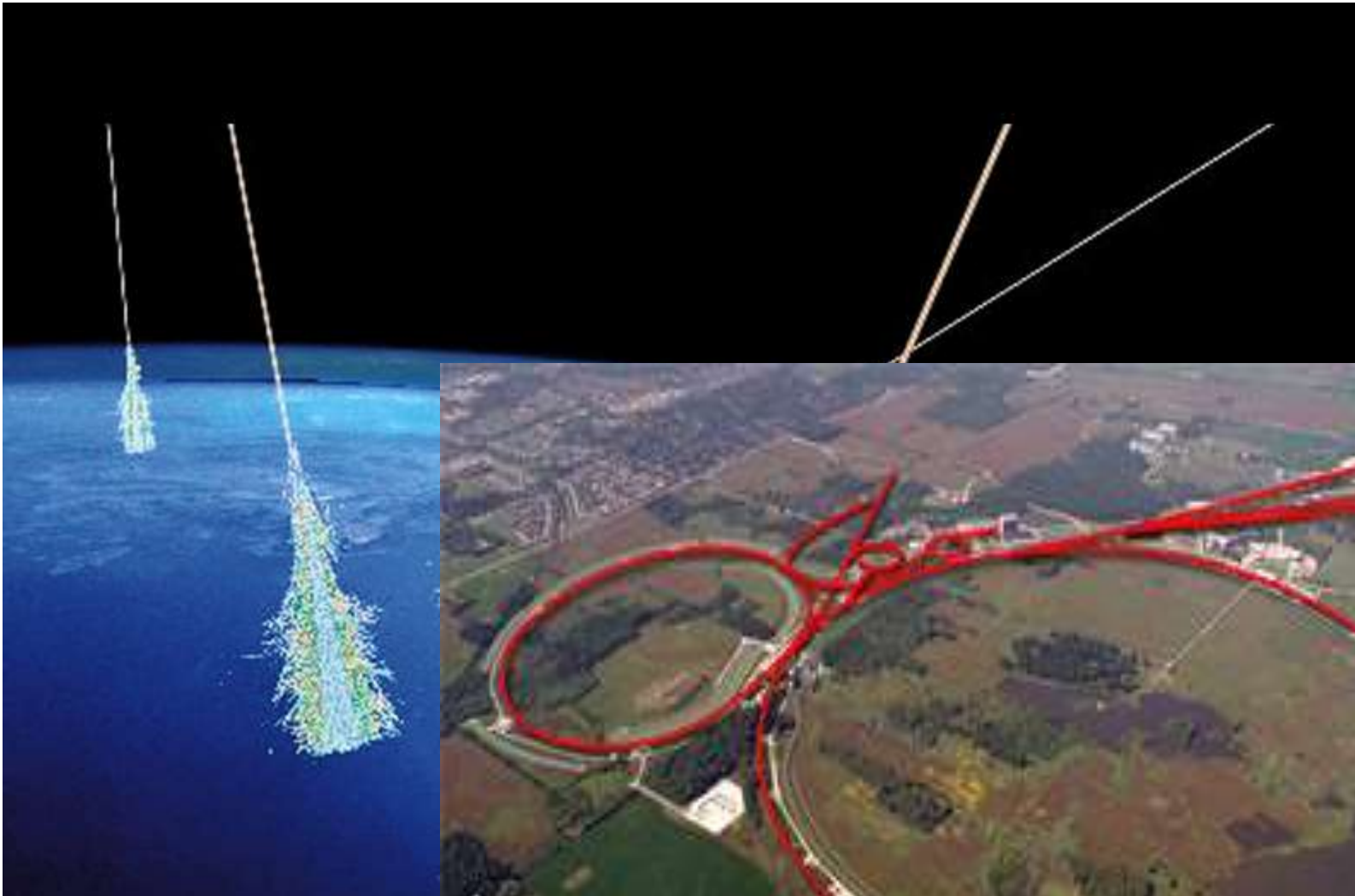


2013 François Englert (1932-)
Peter H. Higgs (1929)
"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"





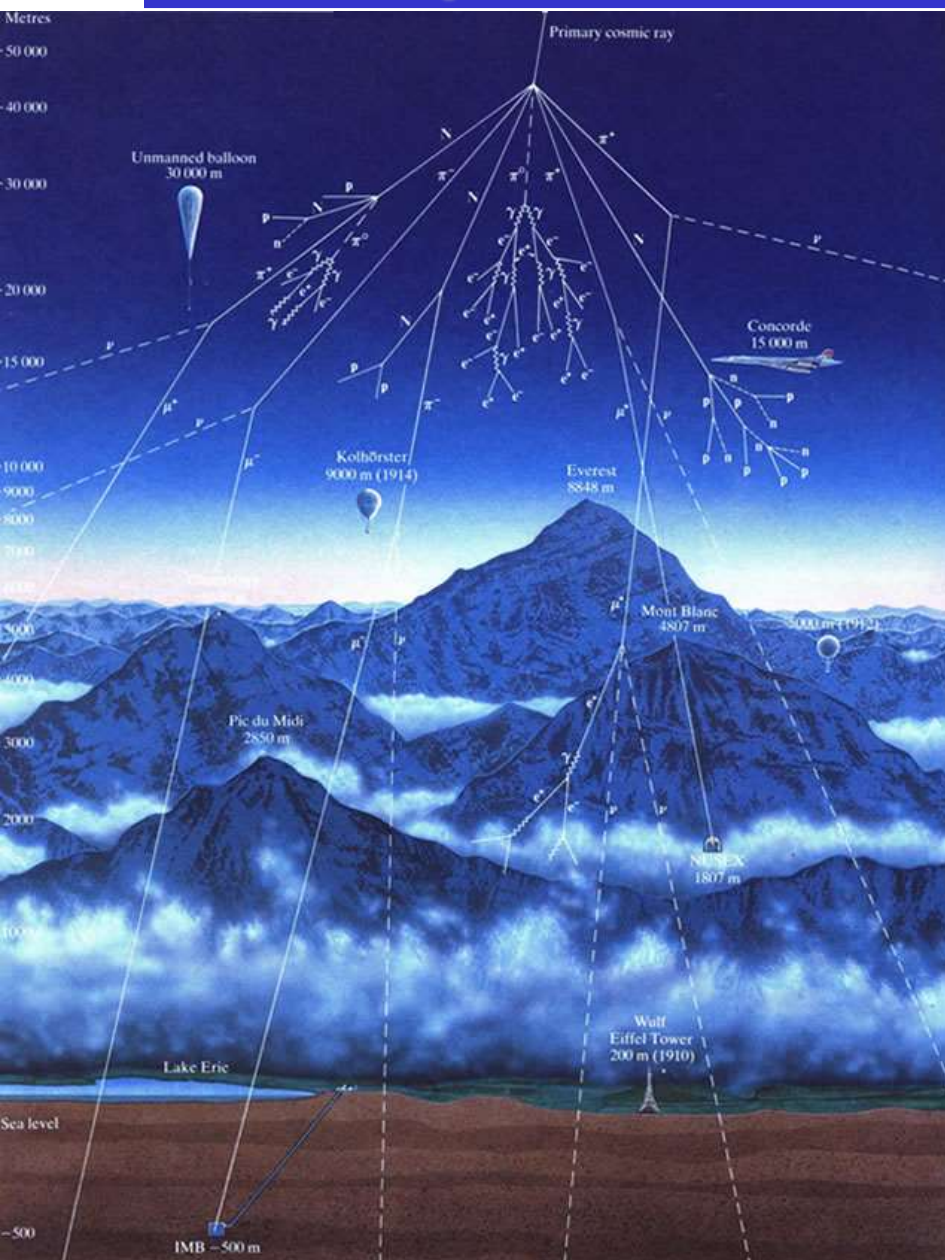
Cosmos vs Accelerators



1895	Х-лучи	В.Рентген	ускоритель
1897	электрон	Дж.Томпсон	ускоритель
1919	протон	Э.Резерфорд	ядерн.реакции
1932	нейтрон	Дж.Чадвик	ядерн.реакции
1932	позитрон	К.Андерсон	косм.лучи
1937	мюон	С.Недермайер	косм.лучи
1947	пион	С.Пауэлл	косм.лучи
1947	каон	Г.Рочестер	косм.лучи
1955	антипротон	О.Чемберлен	ускоритель
1956	нейтрино	Ф.Рейнс	ядерн.реакции
1962	μ -нейтрино	Л.Ледерман	ускоритель
1969	кварки	М.Гелл-Манн	ускоритель
1974	J/ ψ meson	С.Тинг	ускоритель
1975	Тау-мезон	М.Перл	ускоритель
1977	Y-мезон	Л.Ледерман	ускоритель
1979	глюон	DESY	ускоритель
1983	W и Z бозоны	К.Руббия	ускоритель
1995	Топ-кварк	Fermilab	ускоритель
2000	Тау-нейтрино	Fermilab	ускоритель
2012	Хиггс	CERN	ускоритель



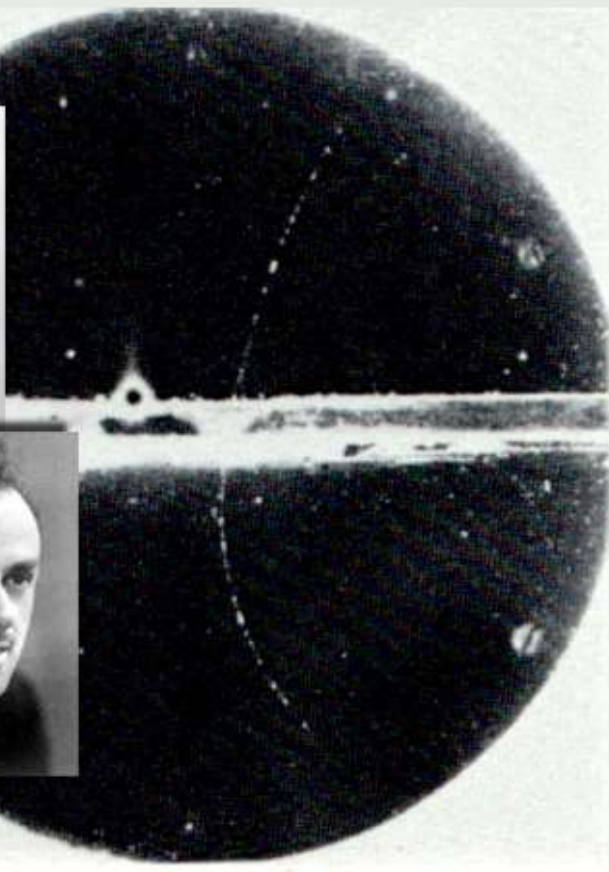
Открытие Античастиц 1932



Carl Anderson



Paul Dirac



Carl Anderson, Paul Dirac, and a positron track observed in a cloud chamber (17cm dia, 1.5T)

~ 60 million electron Volts = 60 MeV



Нужны высокие энергии

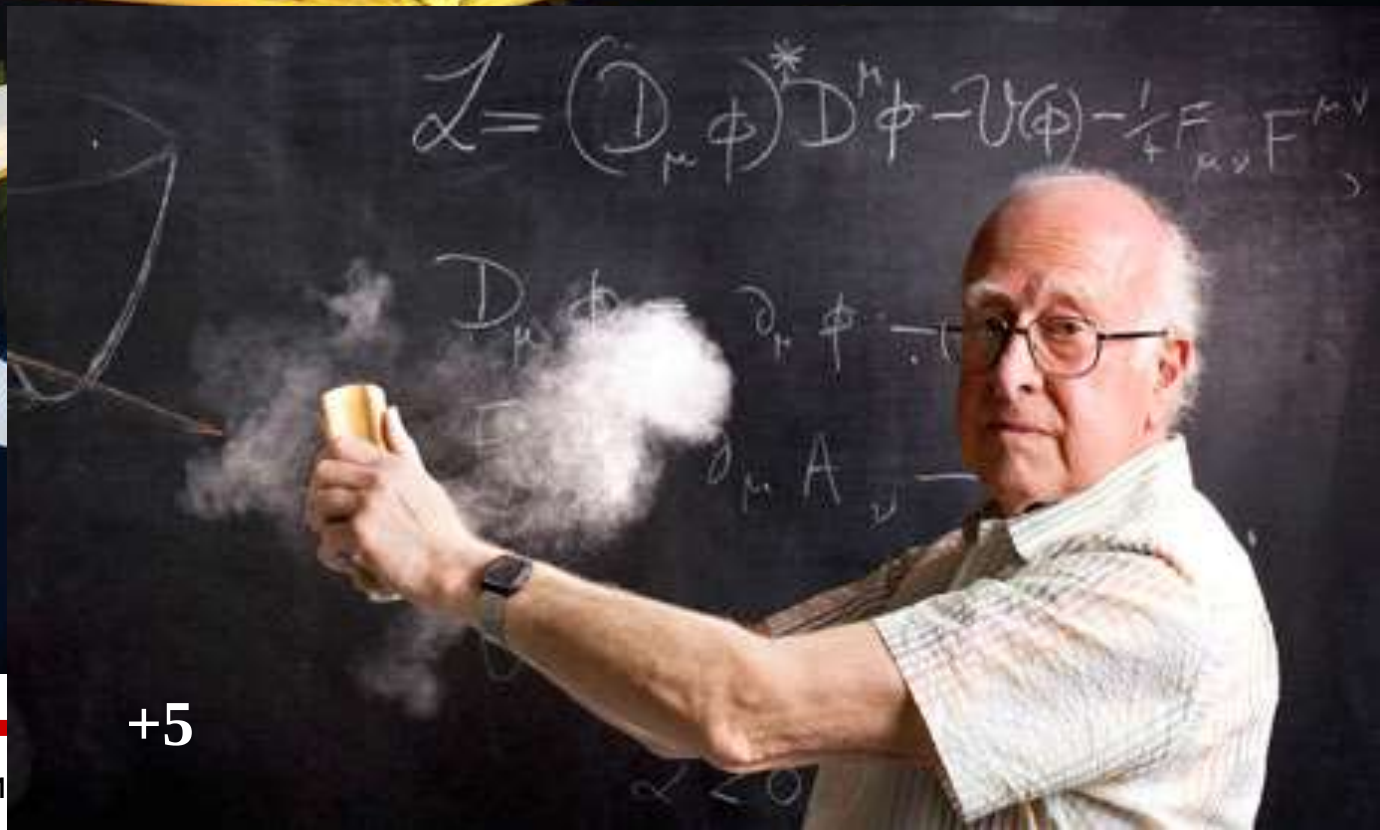
- Квантовая теория связывает минимальные размеры с максимальными энергиями :

$$\lambda \sim \frac{\hbar}{p} = \frac{c\hbar}{E}$$

- Последнее открытие – частицы Хиггса в 2012 – потребовало энергии в 100 000 раз больше, чем для открытия позитрона в 1932

HIGGS

BO



+5

Влади



БАК=LHC=Large Hadron Collider

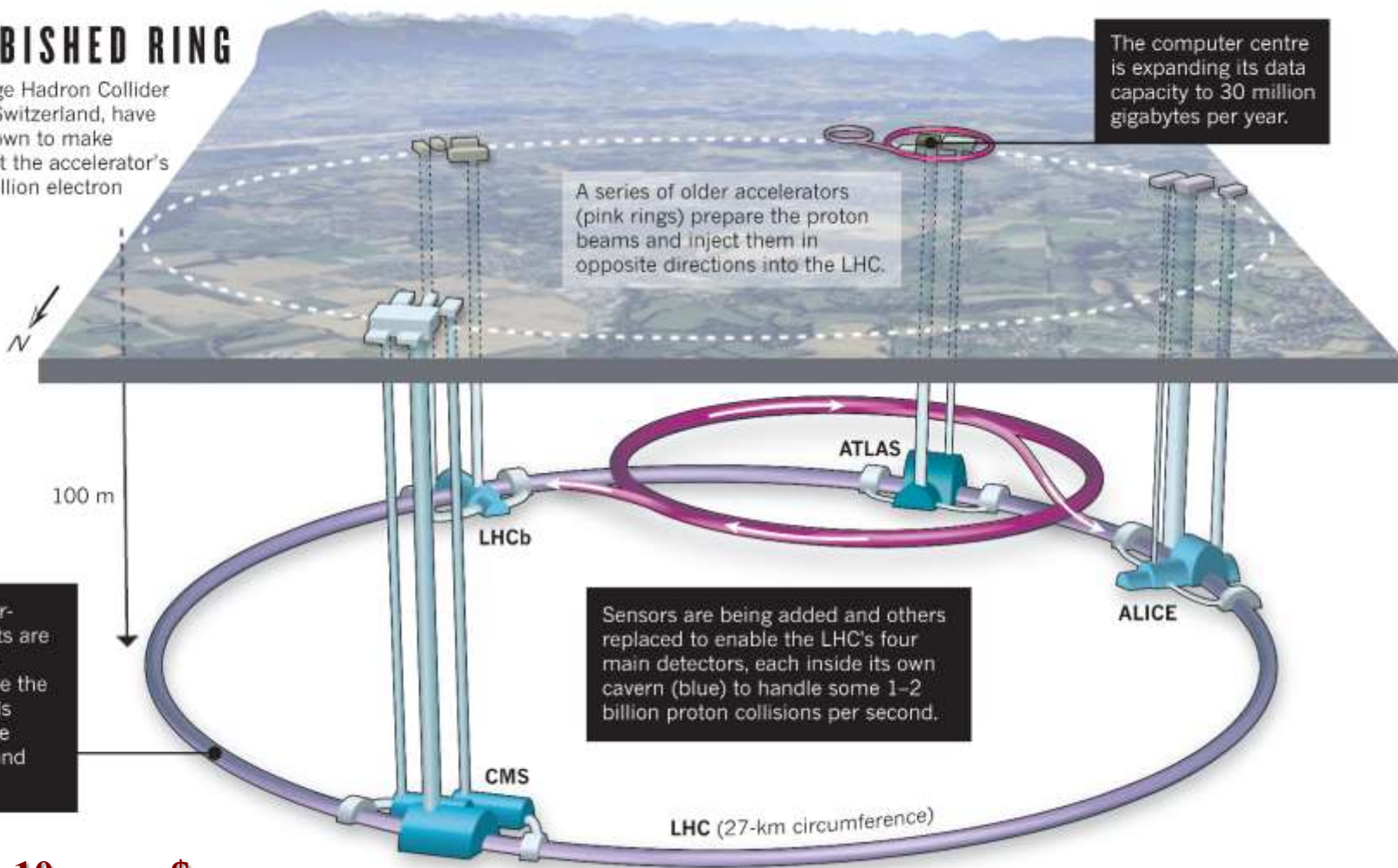
NEWS FEATURE

THE REFURBISHED RING

Physicists at the Large Hadron Collider (LHC) near Geneva, Switzerland, have used a 2-year shutdown to make repairs that will boost the accelerator's energy to nearly 7 trillion electron volts per beam.

The computer centre is expanding its data capacity to 30 million gigabytes per year.

A series of older accelerators (pink rings) prepare the proton beams and inject them in opposite directions into the LHC.



Thousands of superconducting magnets are being repaired and reinforced to handle the high magnetic fields needed to guide the proton beams around the LHC's ring.

Sensors are being added and others replaced to enable the LHC's four main detectors, each inside its own cavern (blue) to handle some 1–2 billion proton collisions per second.

10 лет и 10 млрд \$

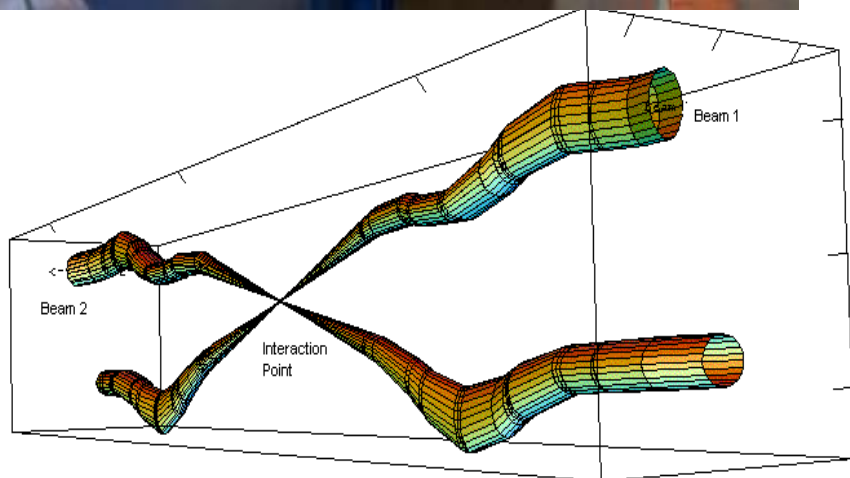
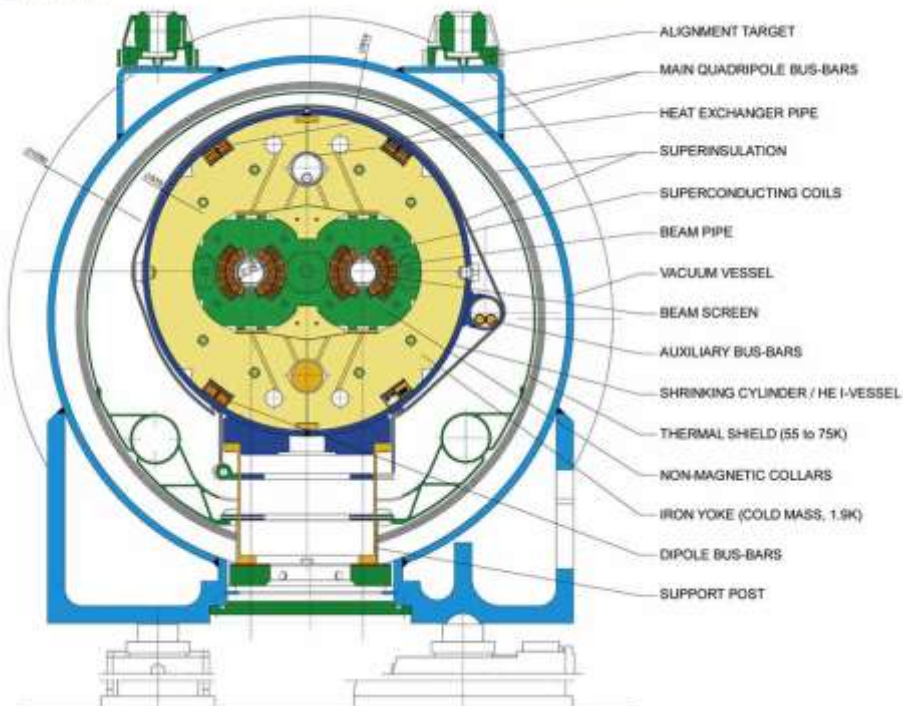
9 OCTOBER 2014 | VOL 514 | NATURE | 159



Что находится в 27 км тоннеле



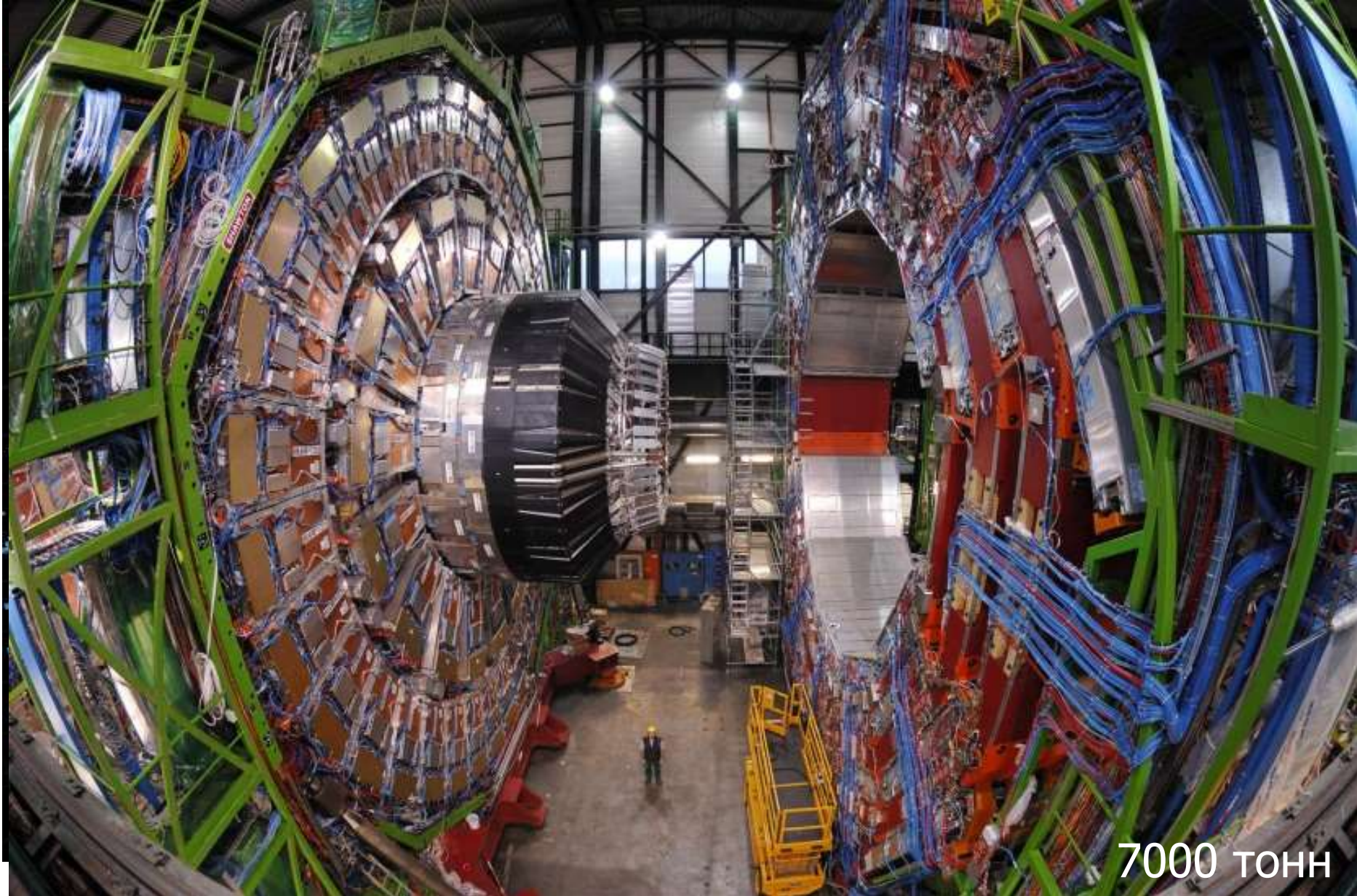
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

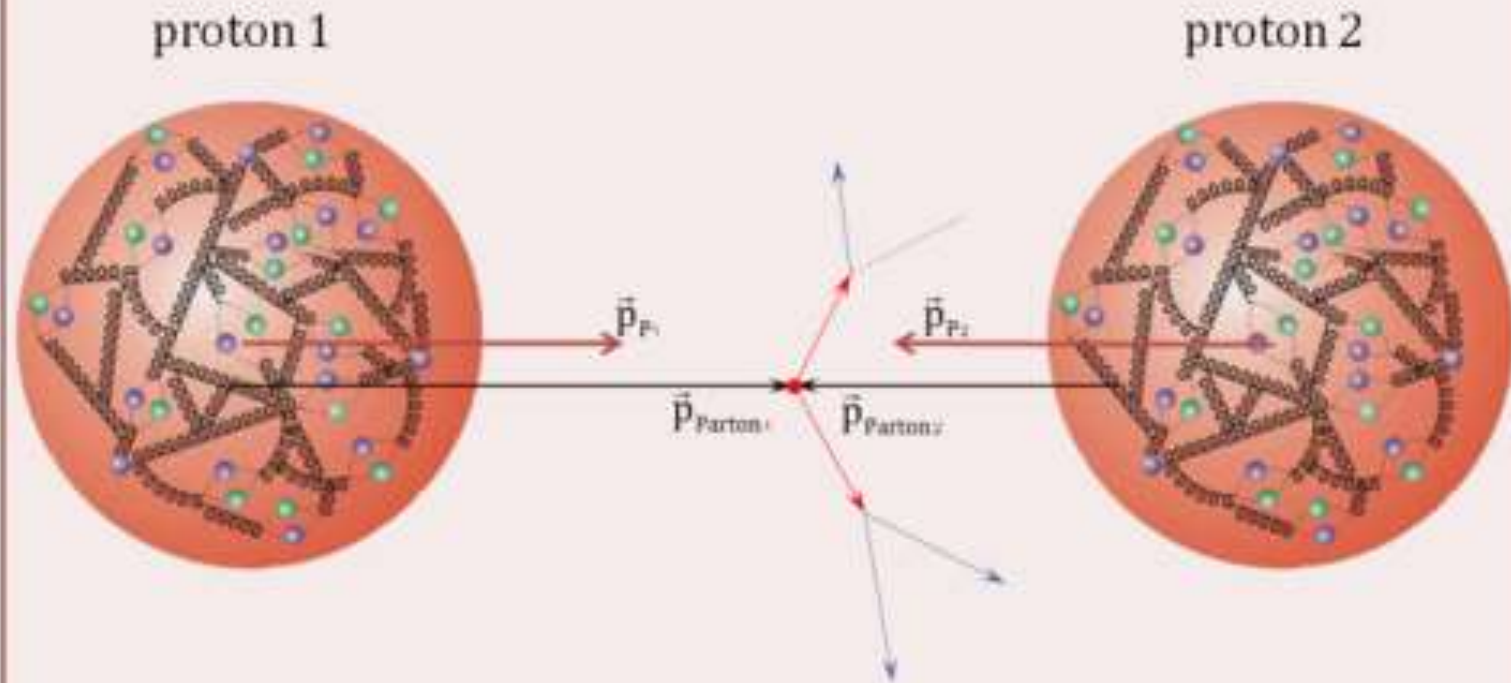
1232 поворотных магнита 15м
NbTi кабель, 13 кА @ 1.9 К
до 9 Тесла (90 000 Гс), 10 GJ
Вакуум пучка $<1e-12$ атм

Детекторы частиц: CMS & ATLAS



Протон-Протонные Столкновения

Interactions of constituents of the colliding protons, the so called partons (quarks, gluons)



$\vec{p}_{P_1}$... momentum proton 1

$\vec{p}_{P_2}$... momentum proton 2

• interaction vertex

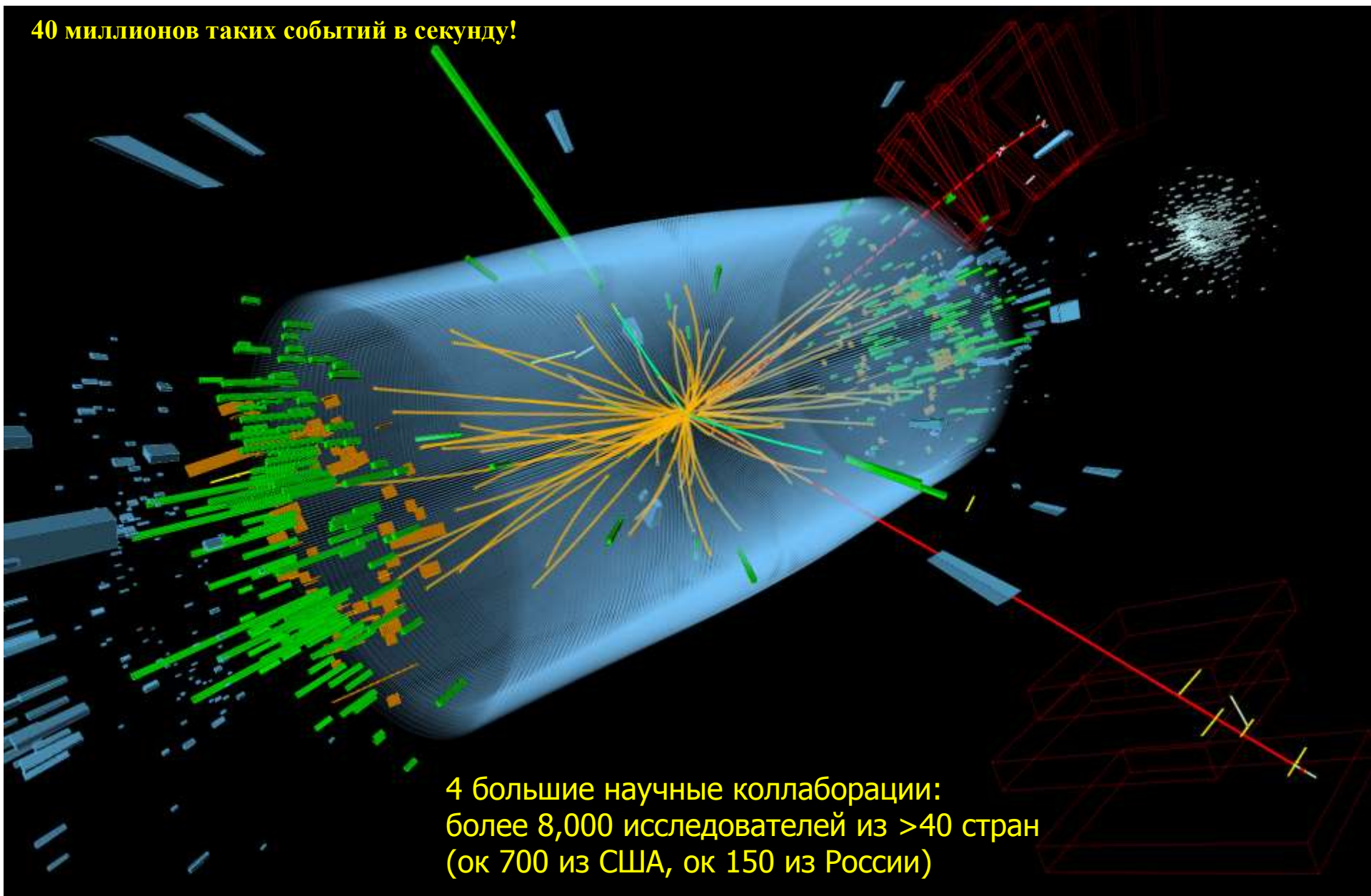
$\vec{p}_{Parton_1}$... momentum parton 1

$\vec{p}_{Parton_2}$... momentum parton 2



Обработка "событий" БАКа

40 миллионов таких событий в секунду!

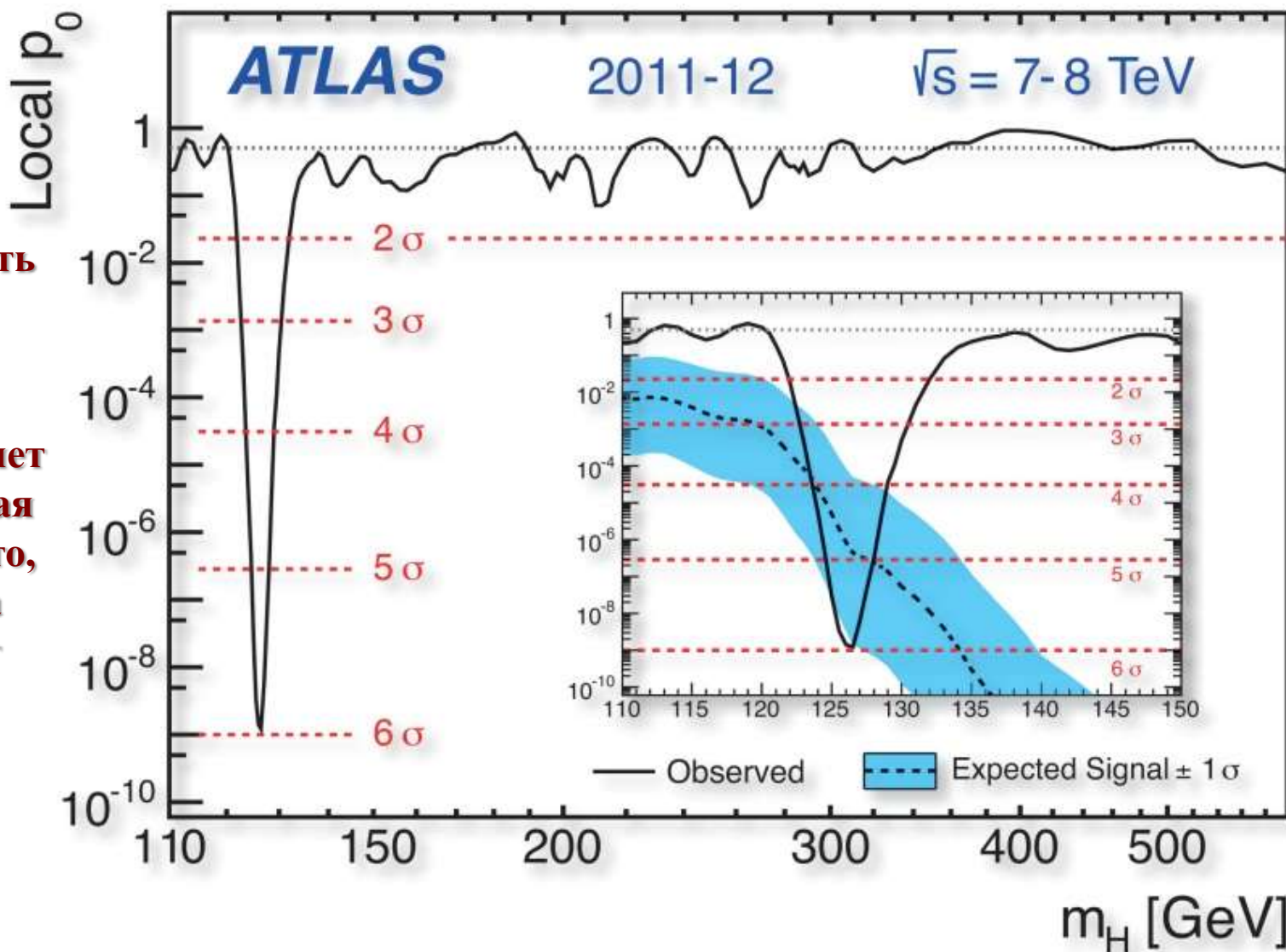


4 большие научные коллаборации:
более 8,000 исследователей из >40 стран
(ок 700 из США, ок 150 из России)



Выборка "особых" распадов и вероятность ошибки

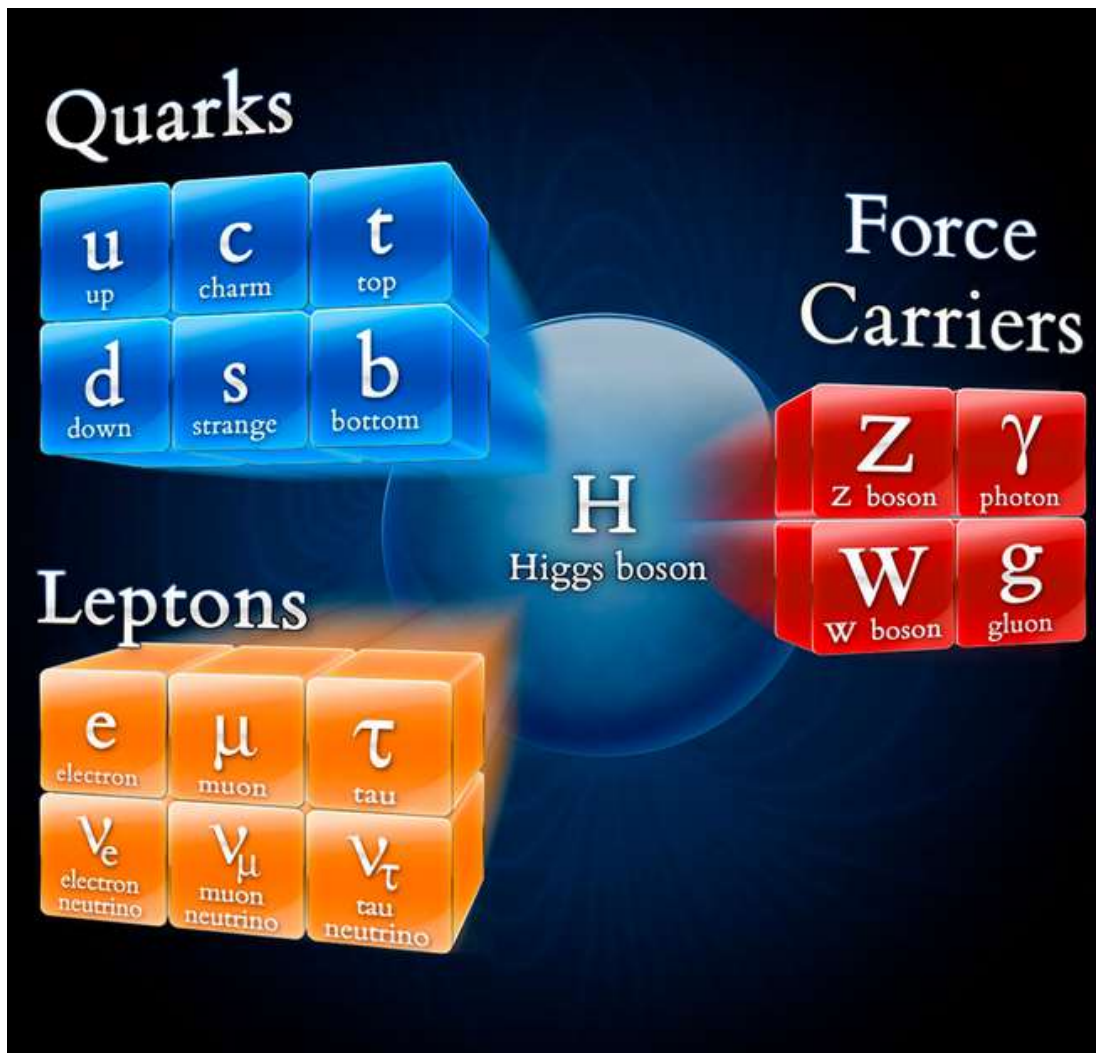
вероятность того, что частицы Хиггса с энергией нет почти такая же, как и то, что завтра не взойдет Солнце





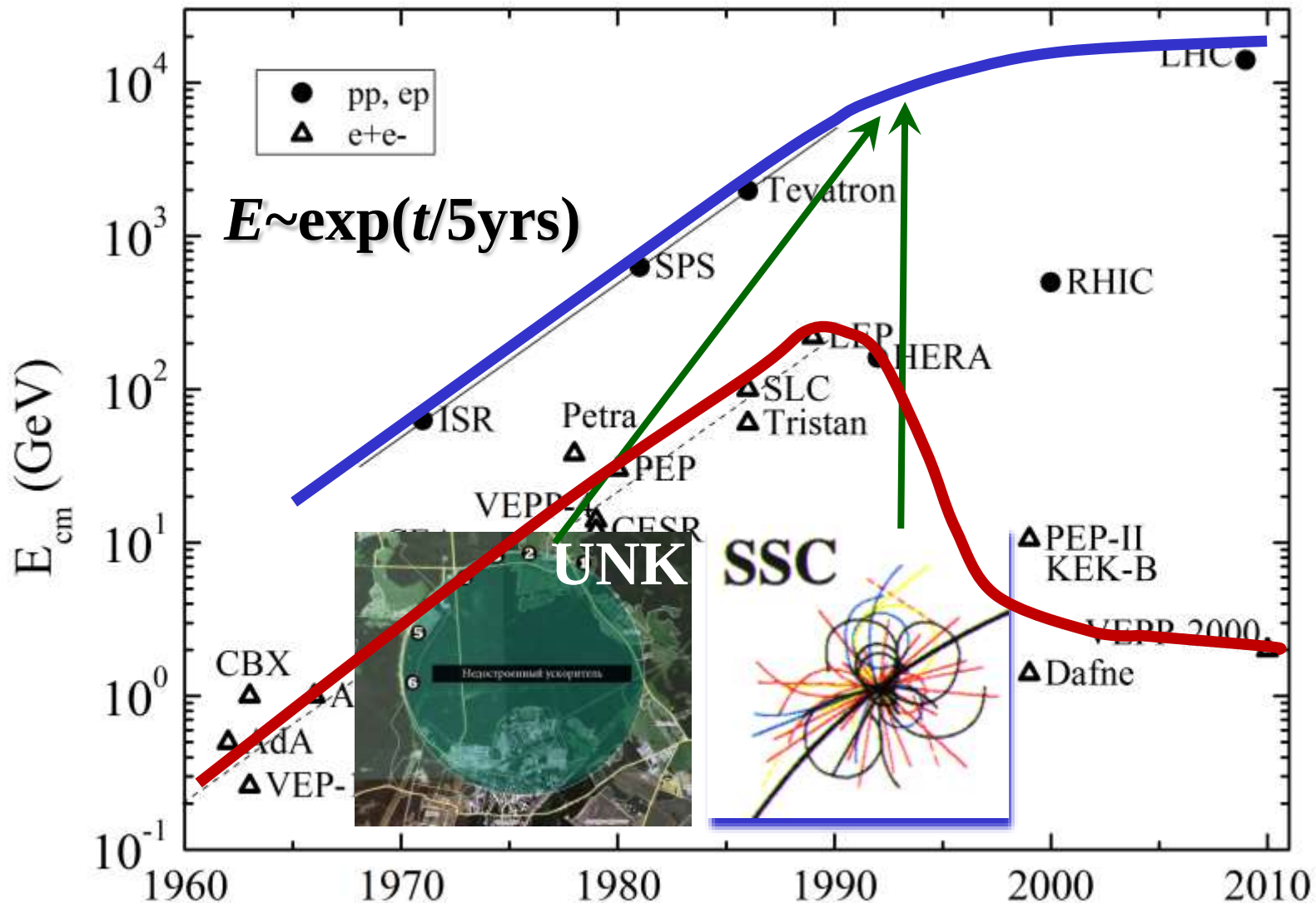
Состояние дел в Физике Частиц

Standard Model



- Открыто 17 частиц, предсказанных и требуемых теорией т.н. “стандартной модели”
 - Почему так много?
 - Все имеют анти-частицы (почему?)
 - Некоторые имеют “цвет” (почему?)
 - Три разных типа и Хиггс (почему?)
- Все, кроме 3 – на ускорителях:
 - 4 в Европе и 9 в США
 - 3 в Фермилабе

Коллайдеры – “Героическое” Прошлое



?

Всего построено - 29 Year

Что не нравится, к чему стремиться?

- “Стандартная модель” объясняет электромагнитные, сильные и “слабые” силы, но:
 - 25 параметров, включая массы 15 частиц
 - почему так сложно? Есть более красивые теории с меньшим количеством параметров
 - Нет объяснения многим явлениям:
 - темная материя
 - темная энергия
 - асимметрия вещество-антивещество
 - странные свойства нейтрино
 - гравитация
-



Что Делать Дальше: Опции

- I. Строить “сверх-большие” коллайдеры
 - II. Внимательно изучать отклонения от Стандартной Модели на существующих или “не сверх-больших” ускорителях
 - III. Изобрести недорогие способы получения частиц сверхвысоких энергий
 - IV. Изучать частицы сверхвысоких энергий, летящие из космоса
-



Опция 1

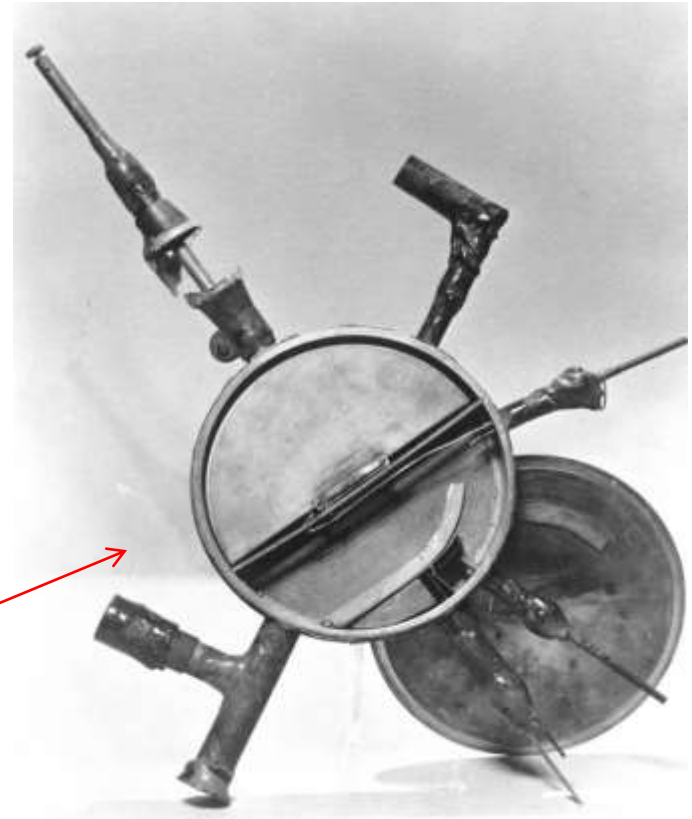
БОЛЬШЕ



Дедушка Современных Ускорителей



Эрнест Лоуренс



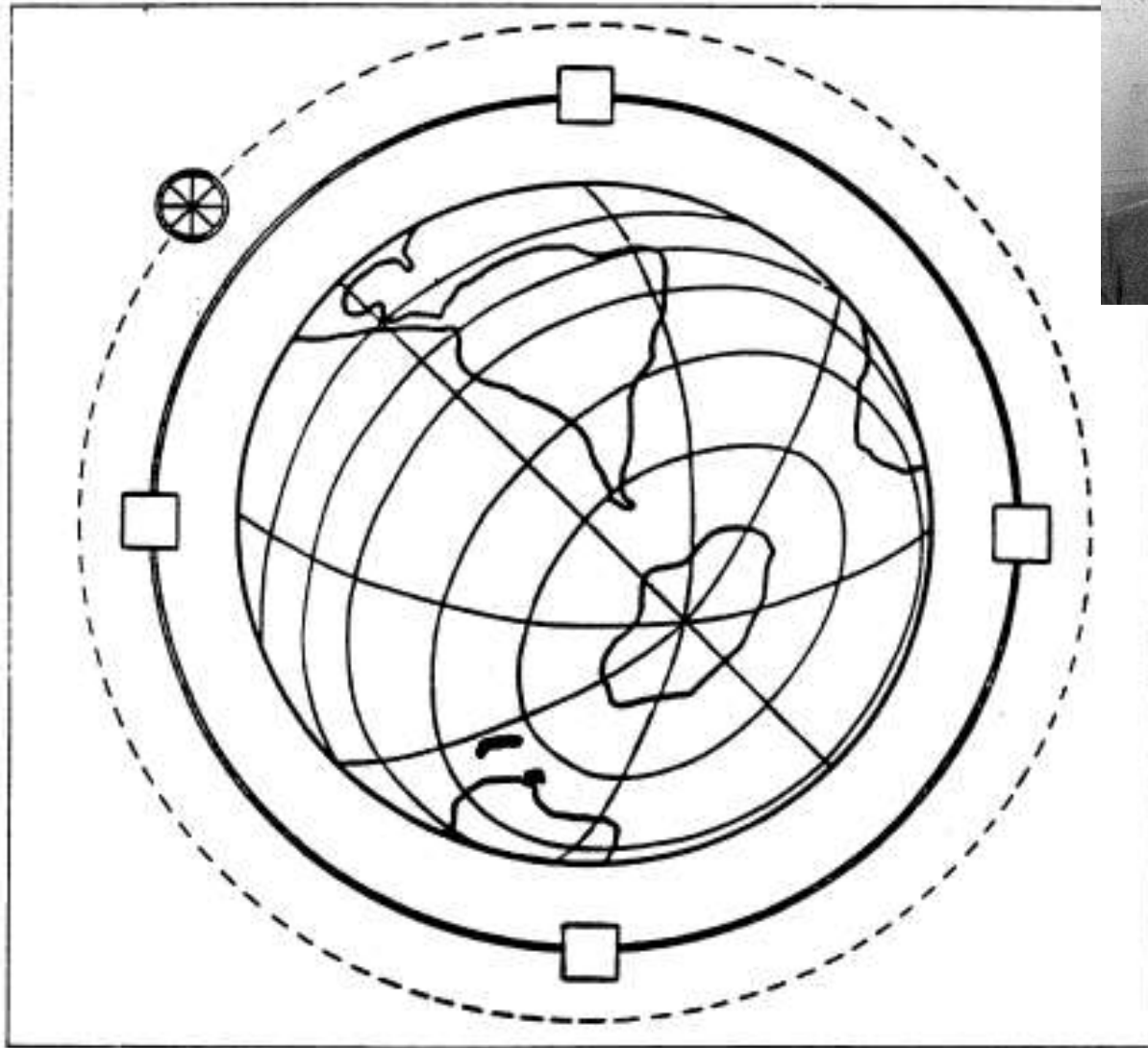
Циклотрон 25\$
80,000 Вольт

Предельный ускоритель Э.Ферми

■ “globaltron”

➤ 40,000 km

➤ >> 1000 B\$



Э.Ферми
1954

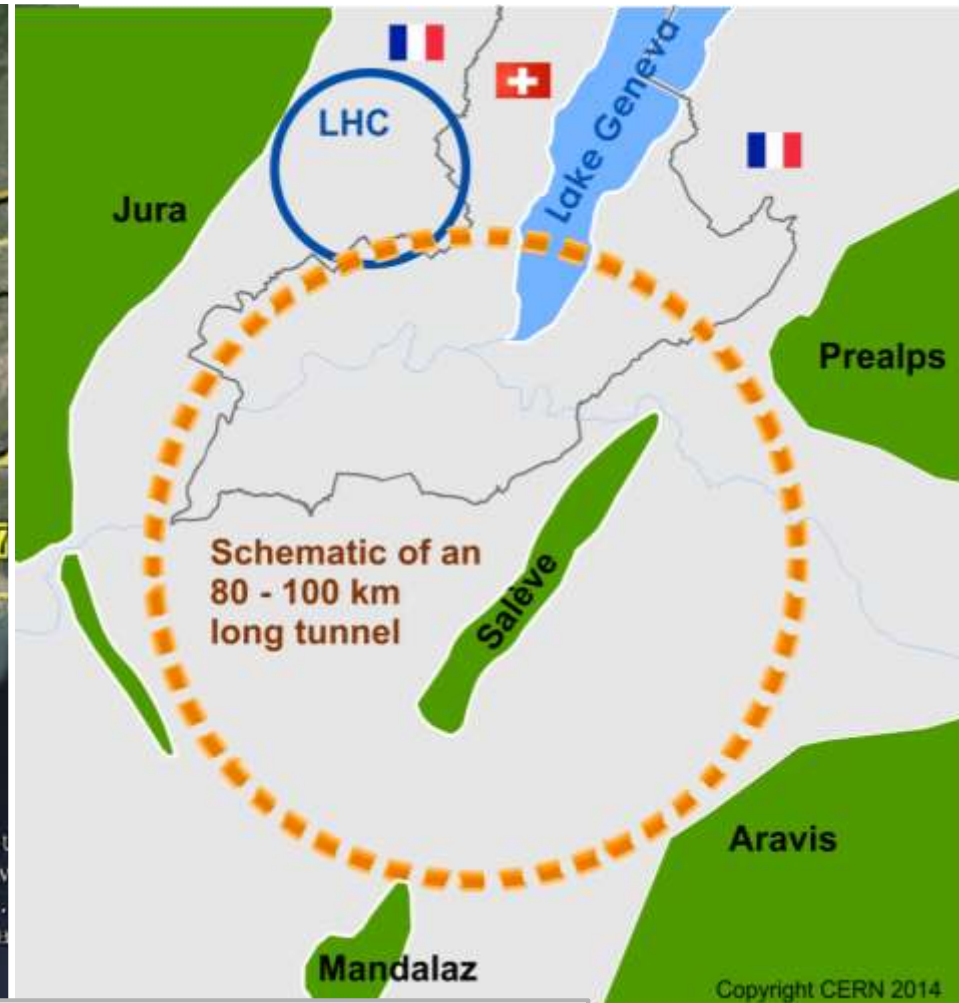
From a 1954 Slide by Enrico Fermi, University of Chicago Special Collections.



В стадии начального планирования

В Китае – 50-80 км, энергия в 3-5 раз больше LHC

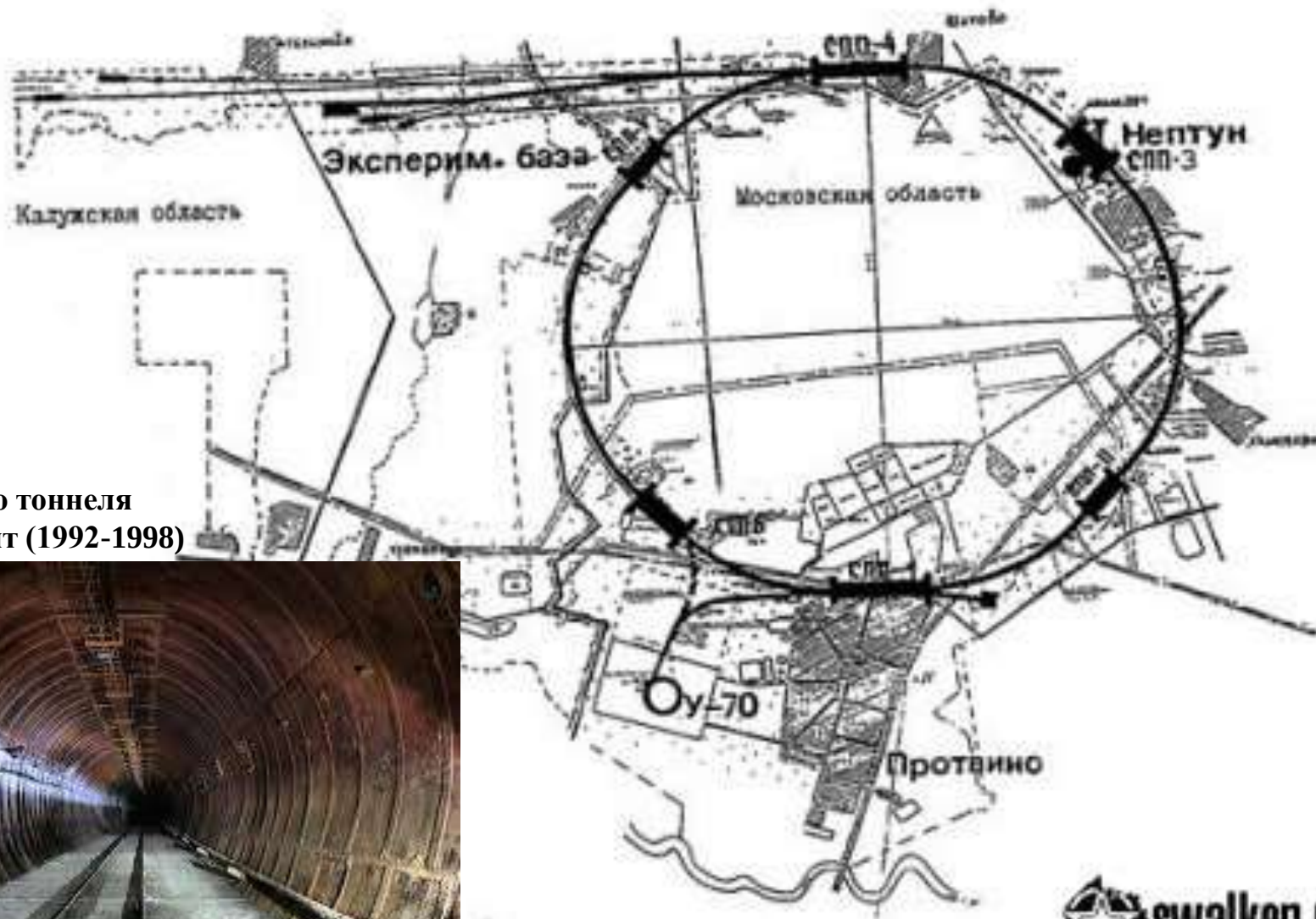
В ЦЕРНе – 100 км, энергия в 7 раз больше LHC



Стоимость? x3-4 LHC ? 30-40 B\$?



Коллайдер УНК (Серпухов)



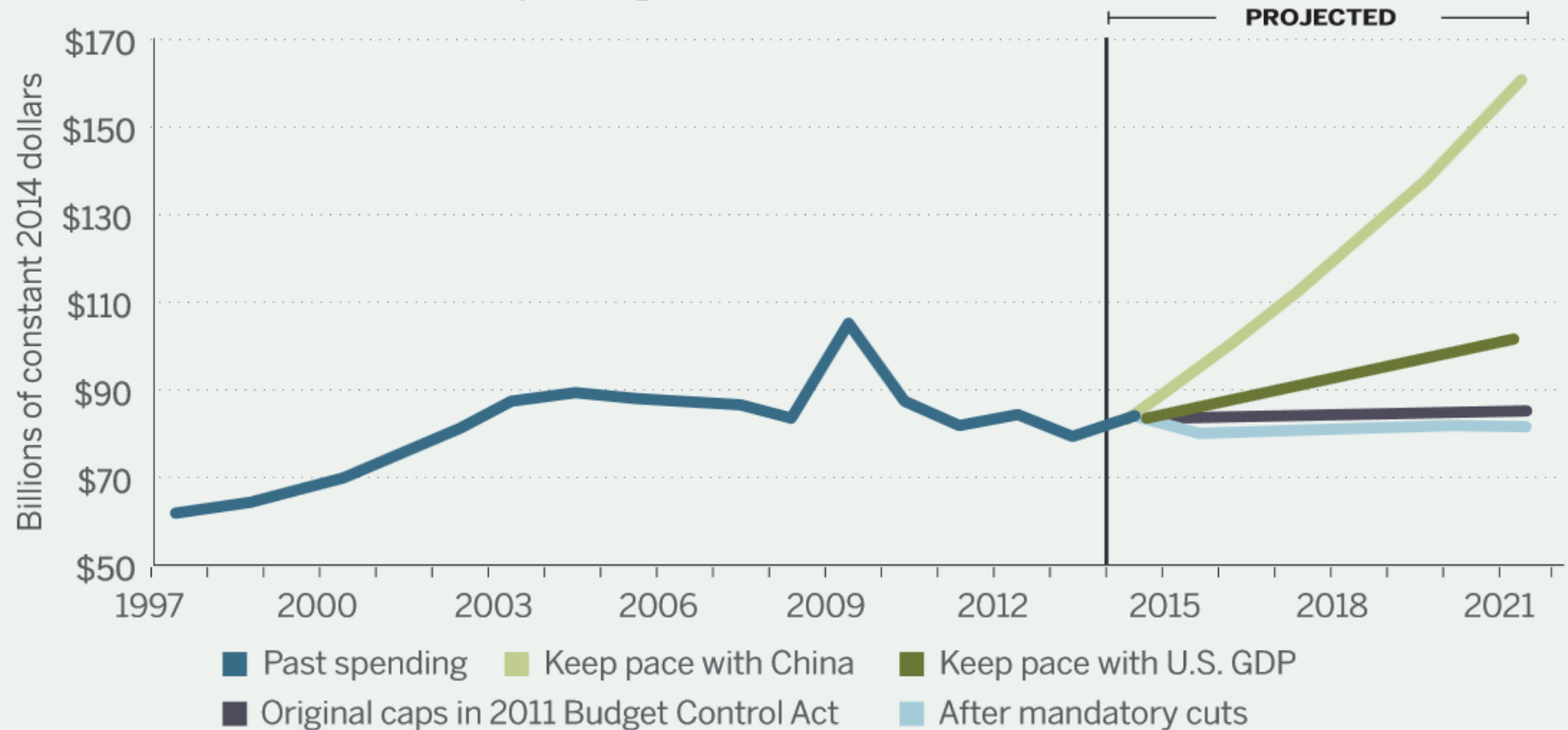
21 км готового тоннеля
Проект закрыт (1992-1998)





Шансы на увеличение бюджета

Four scenarios for future U.S. spending on basic science





Опция 2

Внимательнее



Работающие Коллайдеры - 7

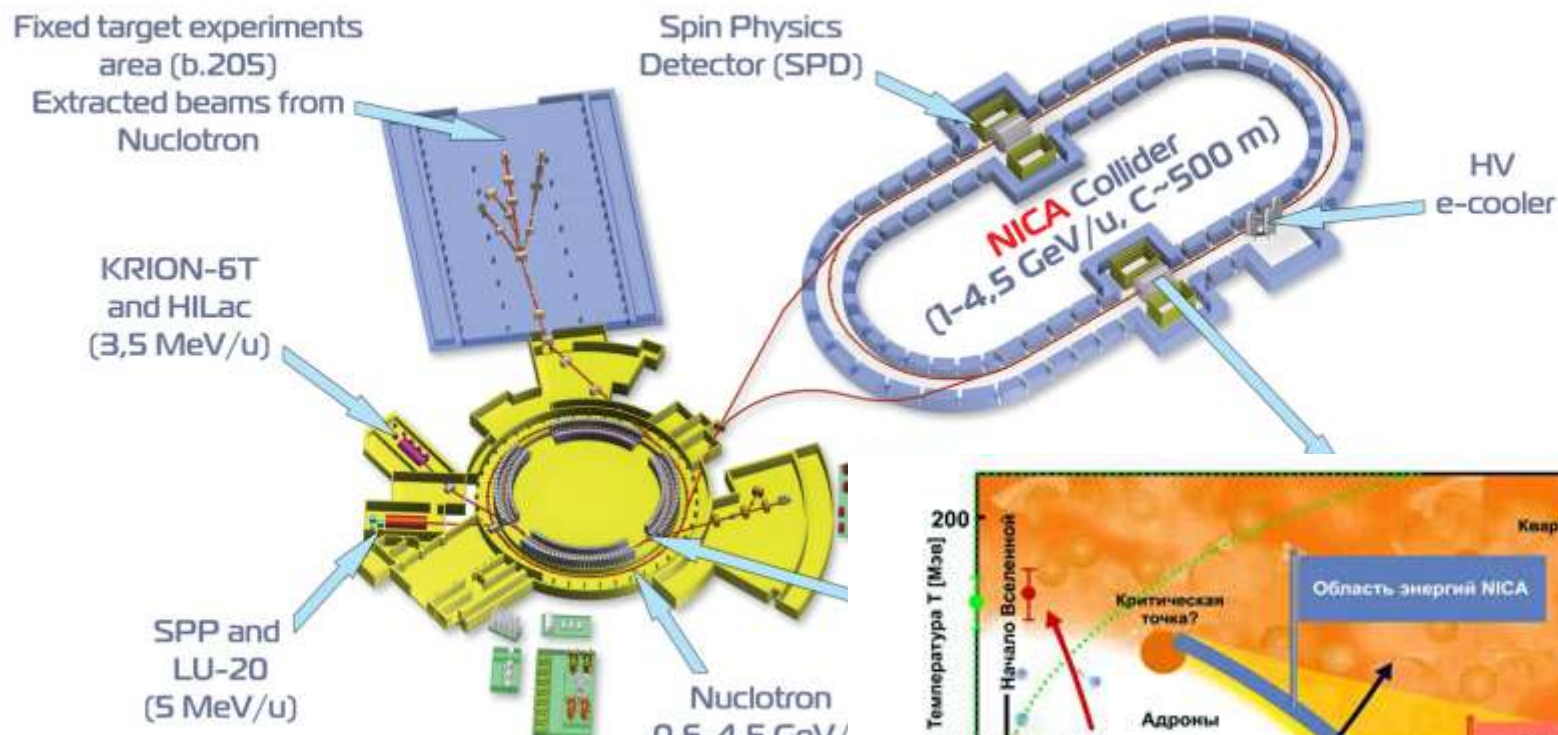
2 – Коллайдеры широкого профиля (LHC, RHIC)
5 – т.н. “фабрики” частиц определенного типа



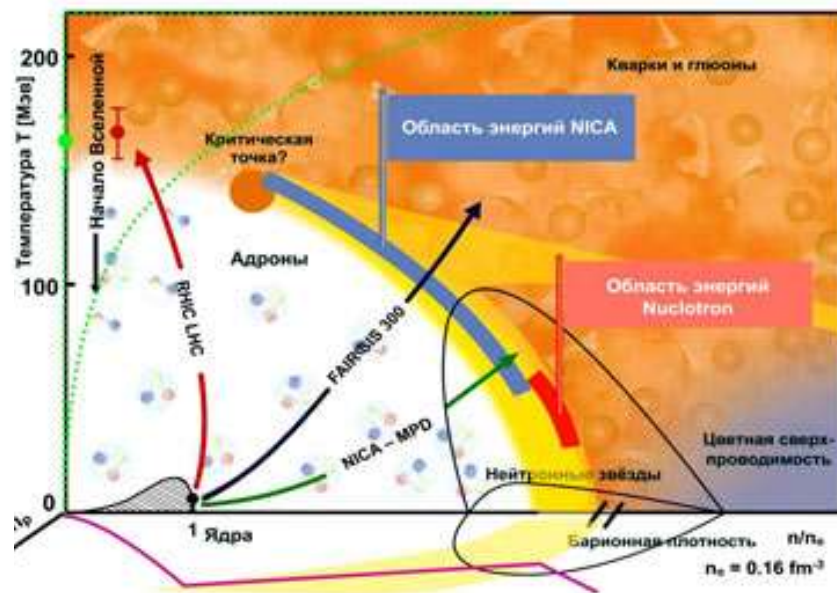


Фабрика Кварковой Плазмы (Дубна)

Superconducting accelerator complex **NICA** (**N**uclotron based **I**on **C**ollider **f**acility)



- Интересный проект
- Сильная коллаборация
 - >200 чел, Германия, БРИКС, США
- С списке мегапроектов РФ
 - ожидает финансирования



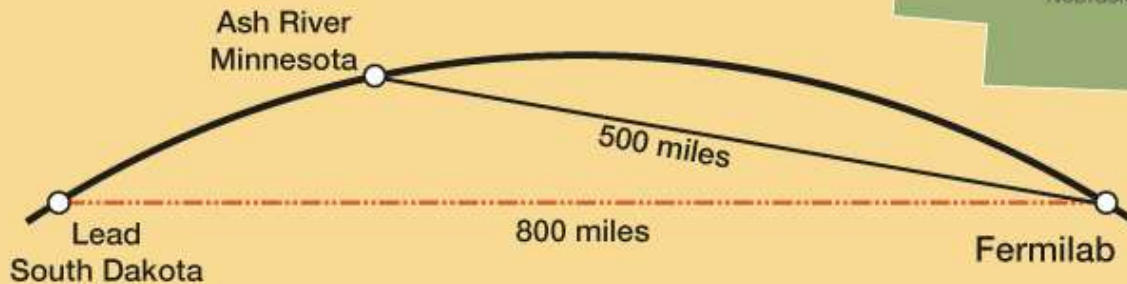


Фабрика Нейтрино (США)

- Уникальная установка по производству $O(10^{21})$ ν 's в год
- Высокие энергии (x 1000 выше чем в термояде Солнца)
- Изучить "осцилляции" типов нейтрино и определить их массу

Straight Through the Earth

MINOS	Soudan Mine, MN	2340 ft deep
NOvA	Ash River, MN	Surface level
LBNE	Homestake Mine, SD	4850 ft deep





Трудно поймать неуловимые нейтрино

Нужна масса детектора (14,000 тонн) и время (4 года)

- The NOvA collaboration is made up of 208 scientists and engineers from 38 institutions.
 - ОИЯИ, ФИАН, ИЯИ

16x16x80 метров – больше чем все детекторы LHC вместе



Опция 3

Изобрести новые
способы ускорить
до сверх-высоких
энергий “дешево”:

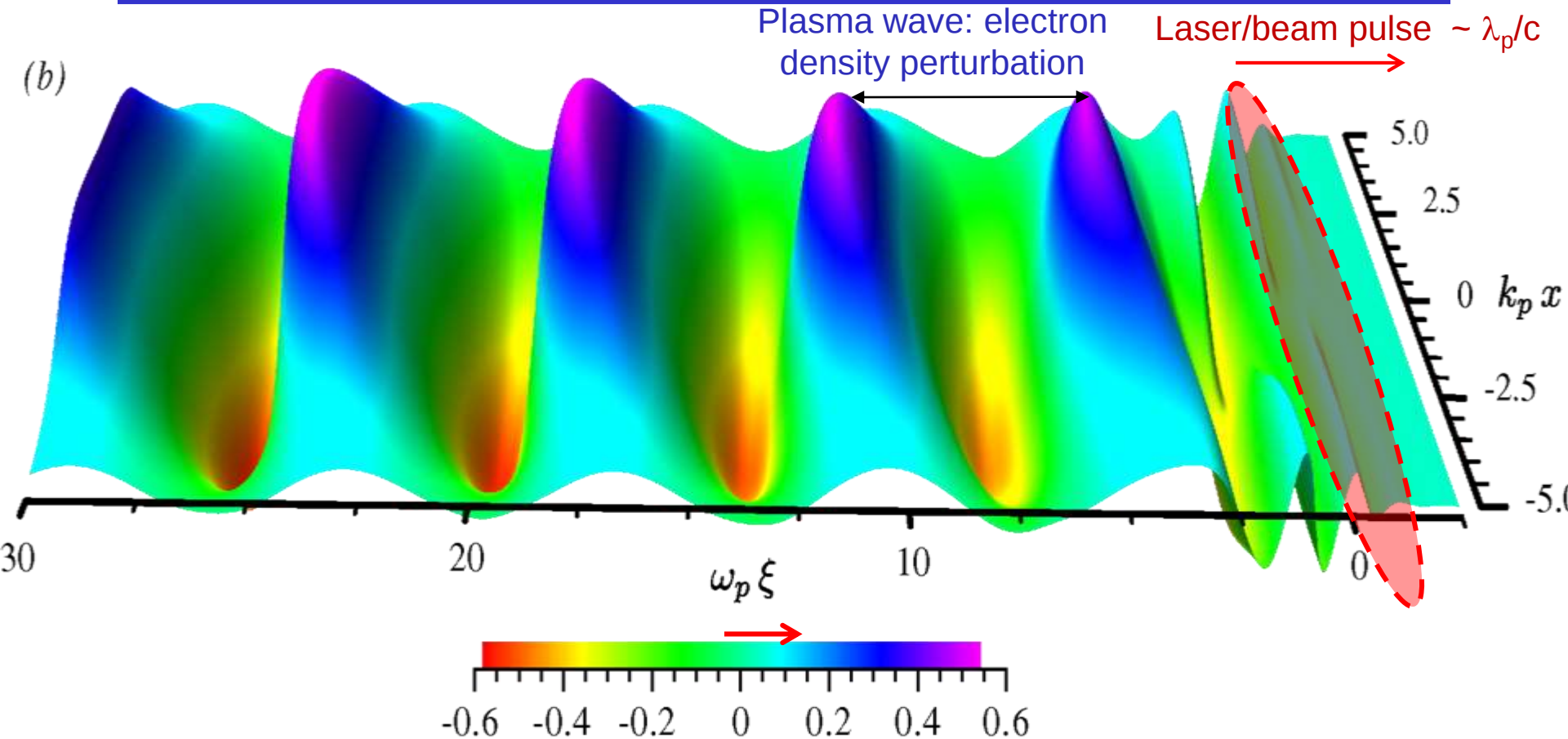
- Меньшие размеры
 - Дешевая технология ускорения
 - Меньшее электропотребление
-

БАК = бак ~ 1 м, а пучок частиц 0.2 мм





Текущий Фаварит: Волны в Плазме



Плотная плазма 10^{18}cm^{-3}

Возбуждение либо коротким пучком электронов 20
мкм либо коротким лазерным импульсом



Мировой Рекорд (Lawrence Berkeley Lab, CA)

Ускорение до 5 GeV на 10 см !
вместо 100 м ускорителя

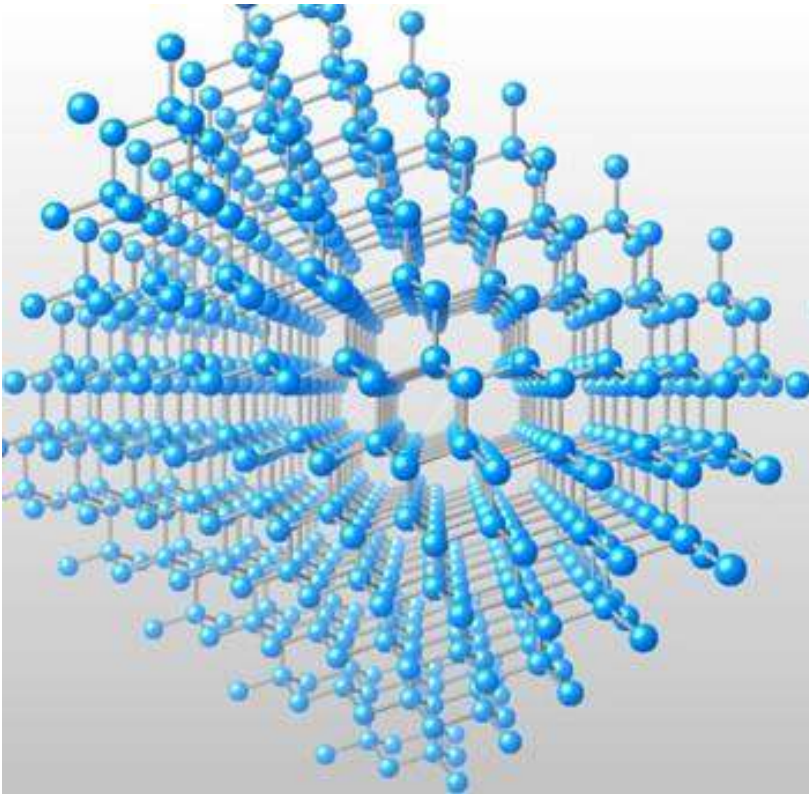
...но (“рояль в кустах”):
Петаваттный Лазер ($\sim 1000 \text{ м}^2$)





Еще Вариант

- Ускорение в кристаллах или нанотрубках
- В режиме каналирования
- Невиданные темпы ускорения (1-10 TeV/m)
 - теоретически
 - ускоритель в этой комнате даст энергию частиц больше, чем в LHC !
- Множество нерешенных проблем:
 - как эффективно возбудить плазму микроканала и пр.
 - дайте знать, кому интересно!



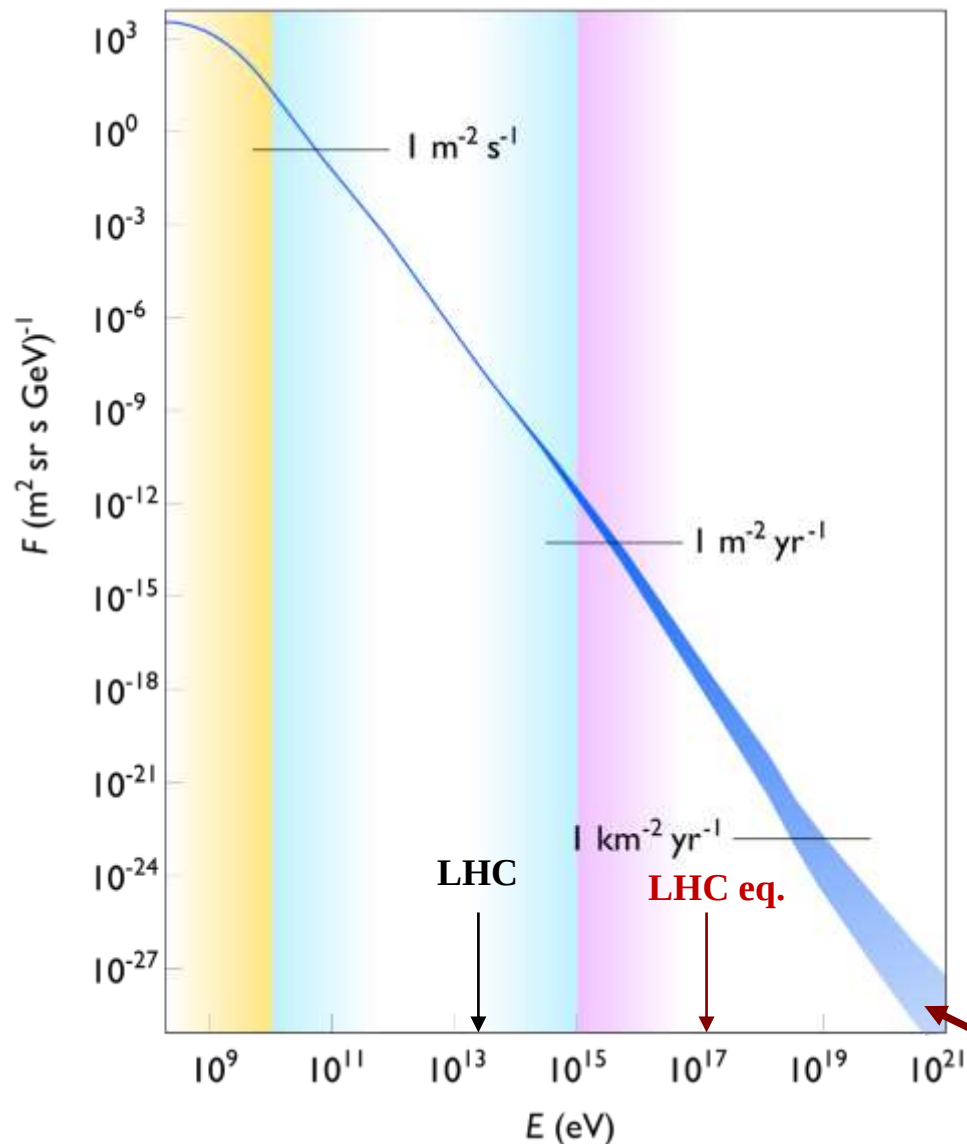


Опция 4

КОСМИКА



Сверх-энергичные частицы

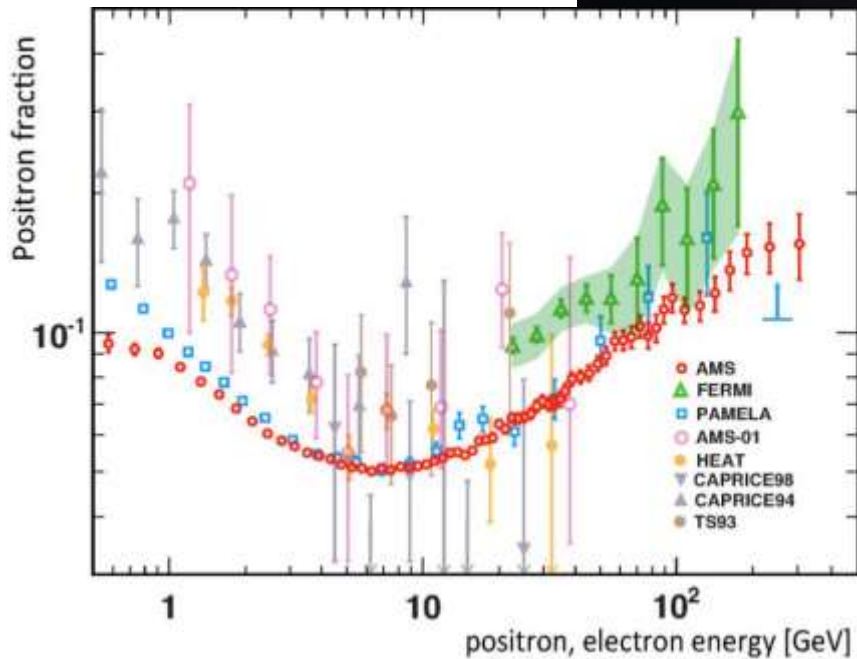
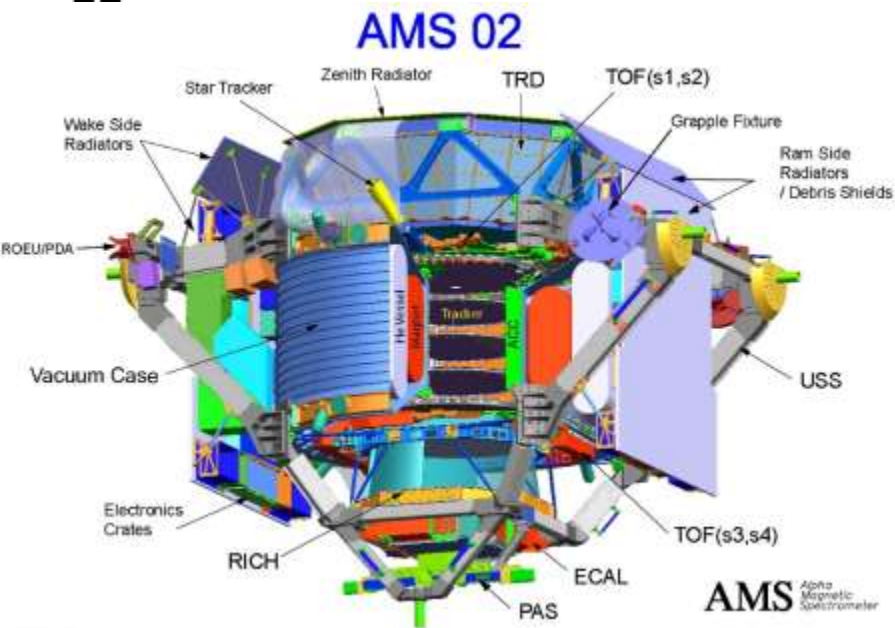


- Происхождение этих частиц не вполне ясно
 - но это и не так важно
- Но мало и редко
- Не предсказуемо
- Не долетают до Земли
 - надо выходить в космос
 - Дорого
- Не предсказуемы и нельзя *столкнуть* друг с другом
 - Эквивалентная энергия не так велика
 - ~100xLHC 1 событие / год

AMS at ISS

(Alpha Magnetic Spectrometer)

- 8 ton, 2 B\$





Общий Вывод

Ускорители vs Космос

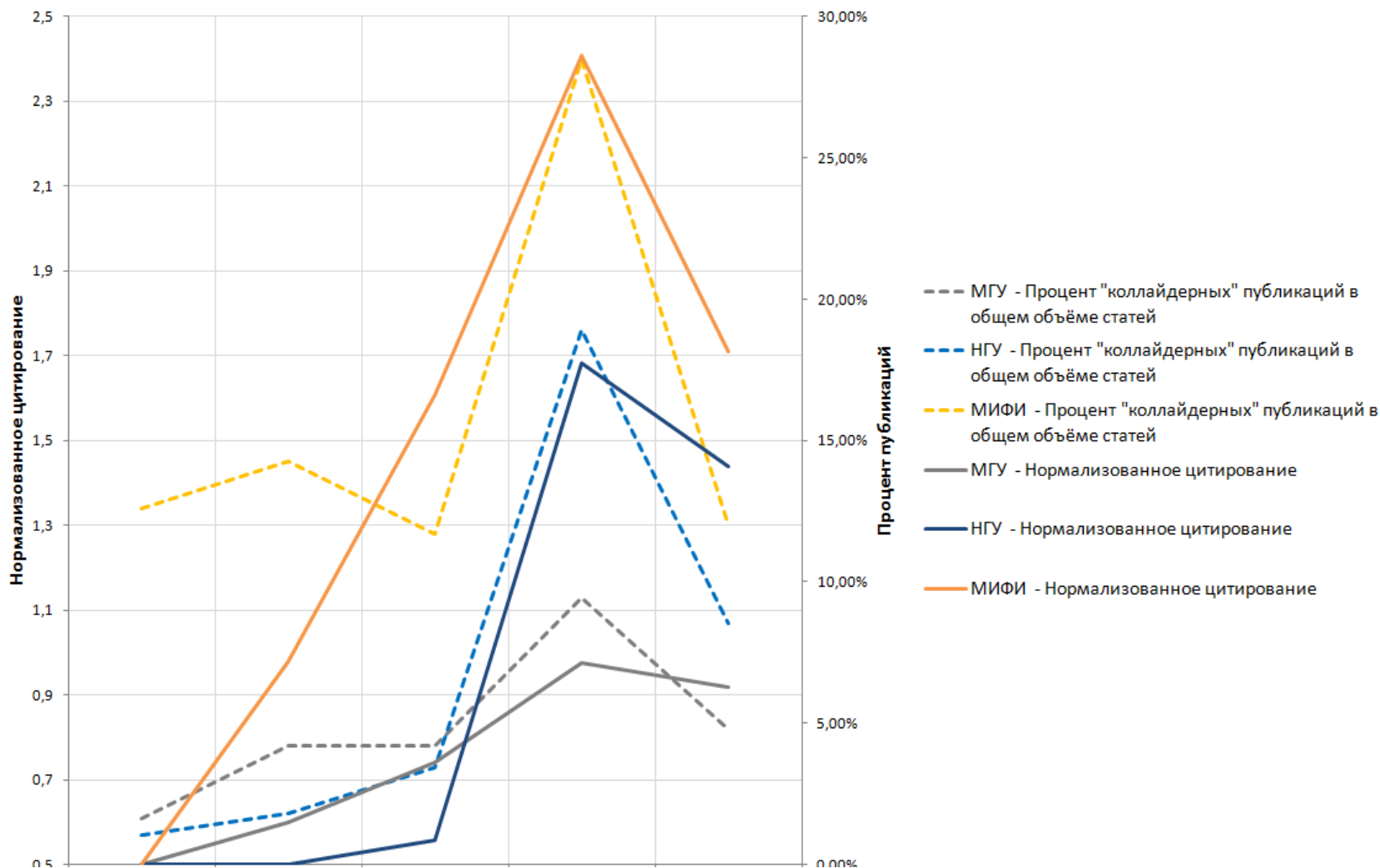
для изучения самых
глубинных , элементарных
частиц и процессов:

- самая фундаментальная физика
- инструменты дороги (1-10B\$)
- экстенсивный прогресс невозможен
- но есть ряд опций – надо двигаться

Vita in motu !



Зависимость цитируемости российских университетов от вовлечённости в коллаборации Большого Адронного Коллайдера



Здесь нужно обратить внимание на то, что у МИФИ были довольно хорошие показатели и до того, как количество БАКовских статей вышло на существенный уровень. Это связано не в последнюю очередь с тем, что МИФИ помимо этого участвует ещё и в коллаборациях ZEUS (эксперимент на коллайдере HERA в Гамбурге) и STAR (на коллайдере RHIC в Брукхейвенской Национальной Лаборатории).