

Современная экспериментальная физика

В.И. Тельнов

Новосибирский Государственный университет



Орг. вопросы

- Лекции: В.И.Тельнов (ИЯФ), вторник, БФА 12:40

- Семинары: 4 группы, вторник 14:30

- Белобородов Константин Иванович (ИЯФ) ауд 338 гр. 2,5,8,9,15,20

- Рябцев Игорь Ильич (ИФП, лазеры) ауд 336 гр. 4,10,11,18,19(к)

- Силагадзе Зураб Карлович (ИЯФ) ауд 333 гр. 1,13,16,19((к)

- Шошин Андрей Алексеевич (ИЯФ) ауд 340 гр. 3, 6, 12,19(к)

(вновь записавшиеся – идут в любую группу)

Форма занятий:

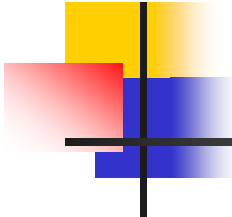
доклады студентов на выбранные темы по физ. исследованиям
обзоры тематики лабораторий, где студенты проходят практику
предложение интересного эксперимента

- Семинары – зачет (+реком. оценка)

- Лекции – письменный экзамен (~10х3 вопросов) (с учетом реком. оценки за семинары)

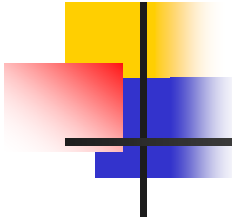
Семинарские занятия

		<i>К-во</i>	<i>Преподаватель</i>
1.	Кафедра физики элементарных частиц		З.К.Силагадзе
2.	Кафедра физики плазмы		К.И.Белобородов
3.	Кафедра радиофизики		А.А. Шошин
4.	Кафедра физики полупроводников		И.И.Рябцев
5.	Кафедра автомат. физико-техн.исследований		К.И.Белобородов
6.	Кафедра химической физики и биофизики		А.А. Шошин
7.	Кафедра физ. методов исследования тв. тела		
8.	Кафедра физики неравновесных процессов		К.И.Белобородов
9.	Кафедра физики сплошных сред		К.И.Белобородов
10.	Кафедра аэрофизики и газовой динамики		И.И.Рябцев
11.	Кафедра квантовой оптики		И.И.Рябцев
12.	Кафедра физико-технической информатики		А.А. Шошин
13.	Кафедра физики ускорителей		З.К.Силагадзе
14.	Кафедра квантовой электроники (ф.опт.явл)		
15.	Кафедра биомедицинской физики		К.И.Белобородов
16.	Каф.ФЭЧ, медфизика		З.К.Силагадзе
17.	Кафедра нанокompозитных материалов		
18.	кафедра квантовой электроники (кв. инфор)		И.И.Рябцев
19.	иностранцы		Р+Ш+С
20.	???		К.И.Белобородов



Китайские магистранты

Ли Юаньсюань	ауд. 336	Рябцев И.И.
Лю На	ауд. 336	Рябцев И.И.
Сунь Тинъи	ауд. 333	Силагадзе З.К
Сунь Чжаньпэн	ауд. 333	Силагадзе З.К
Чжан Сяосяо	ауд. 340	Шошин А.А.
Юэ Юаньчао	ауд. 340	Шошин А.А.



Программа и Литература

- на WWW сайте В.И.Тельнова:
<http://www.inp.nsk.su/~telnov/modphys/>
программа, электронные презентации в
формате .pdf, (ежегодно обновляющиеся),
+(несколько) видеолекций

Современная экспериментальная физика

проф. В.И. Тельнов

Новости, объявления

Контакты: vitelnov@mail.ru, +7-962-831-3670

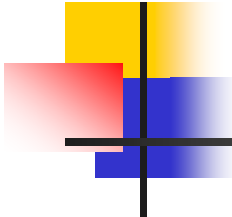
Программа и литература ([.pdf](#) [.doc](#))

Лекции

1. [Введение](#)
2. [Методы изучения микромира. Ускорители.](#)
3. [Взаимодействие частиц с веществом](#)
4. [Методы регистрации частиц, детекторы](#)
5. [Физика элементарных частиц](#)
6. [Использование ускорителей и детекторов в прикладных задачах\(.pdf\)](#)
7. [Нейтринные исследования\(.pdf\)](#)
8. [Лазеры: общие принципы\(.pdf\)](#)
9. [Применение лазеров](#)
10. [Энергетика и экология, термоядерная энергетика\(.pdf\)](#) ([уч.пособие](#))
11. [Полупроводники и нанотехнология\(pdf\)](#) ([уч. пособие](#)) ([видео](#))
12. [Квантовые компьютеры](#)
13. [Астрофизические исследования\(.pdf\)](#)
14. [Космология, темные материя и энергия во вселенной\(.pdf\)](#)
15. [Гравитационные волны](#)

дополнительно:

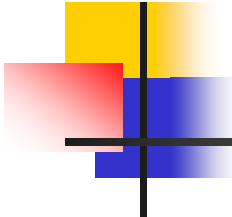
[Сверхпроводимость и ее применение](#)



Программа

1. Введение. Основные направления экспериментальной физики.
2. Методы изучения микромира. Ускорители.
3. Взаимодействие частиц с веществом.
4. Методы регистрации частиц. Детекторы.
5. Физика элементарных частиц
6. Нейтринные исследования.
7. Использование ускорителей и детекторов в прикладных задачах.
8. Лазеры.
9. Применения лазеров.
10. Энергетическая проблема. Источники энергии.
11. Совр. физика полупроводников, нанотехнологии.
12. Квантовые компьютеры
13. Астрофизические исследования.
14. Космология, темные энергия и материя,
15. Гравитационные волны

Дополнительно: Сверхпроводимость



Методы изучения микромира. Ускорители.

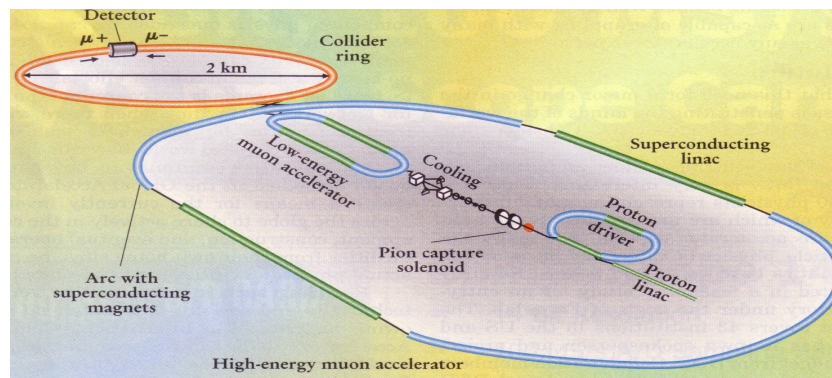
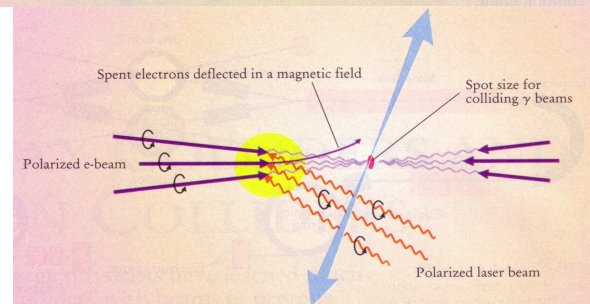
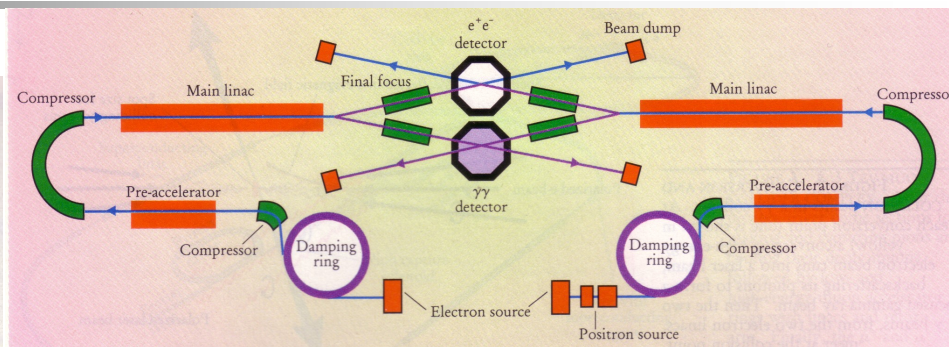
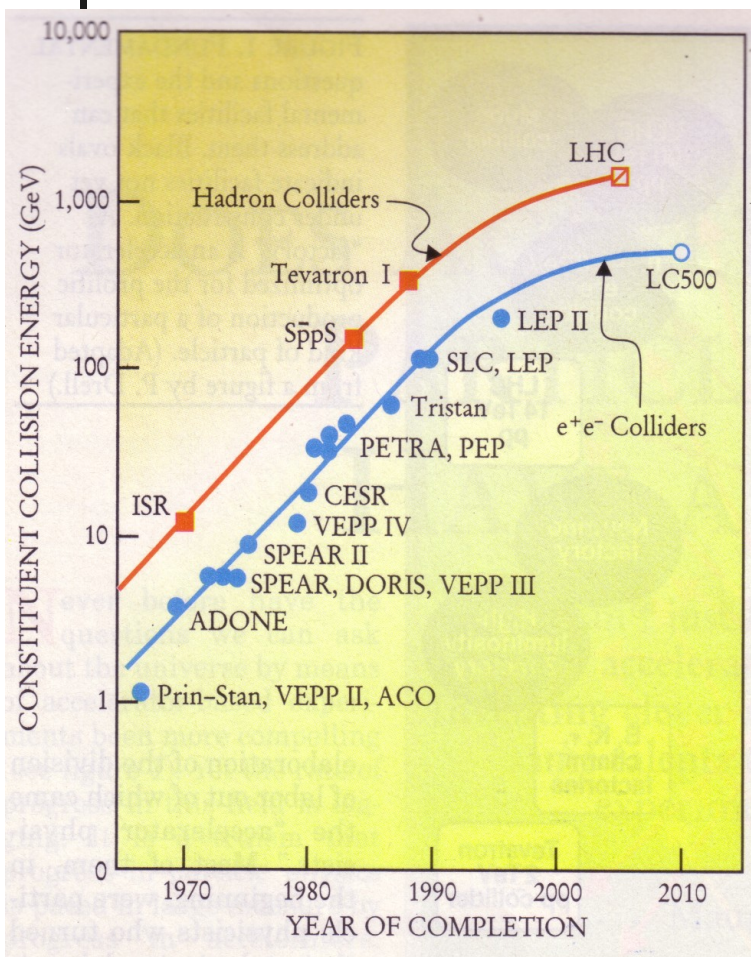
- Методы изучения микромира;
- Типы, основные принципы, и характеристики современных и планируемых ускорителей;
- протон-протонные, протон-антипротонные накопители;
- электрон-позитронные накопители;
- линейные e^+e^- , γe , $\gamma\gamma$ коллайдеры;
- мюонные коллайдеры;
- выведенные пучки;
- космические частицы.

Ускорители:

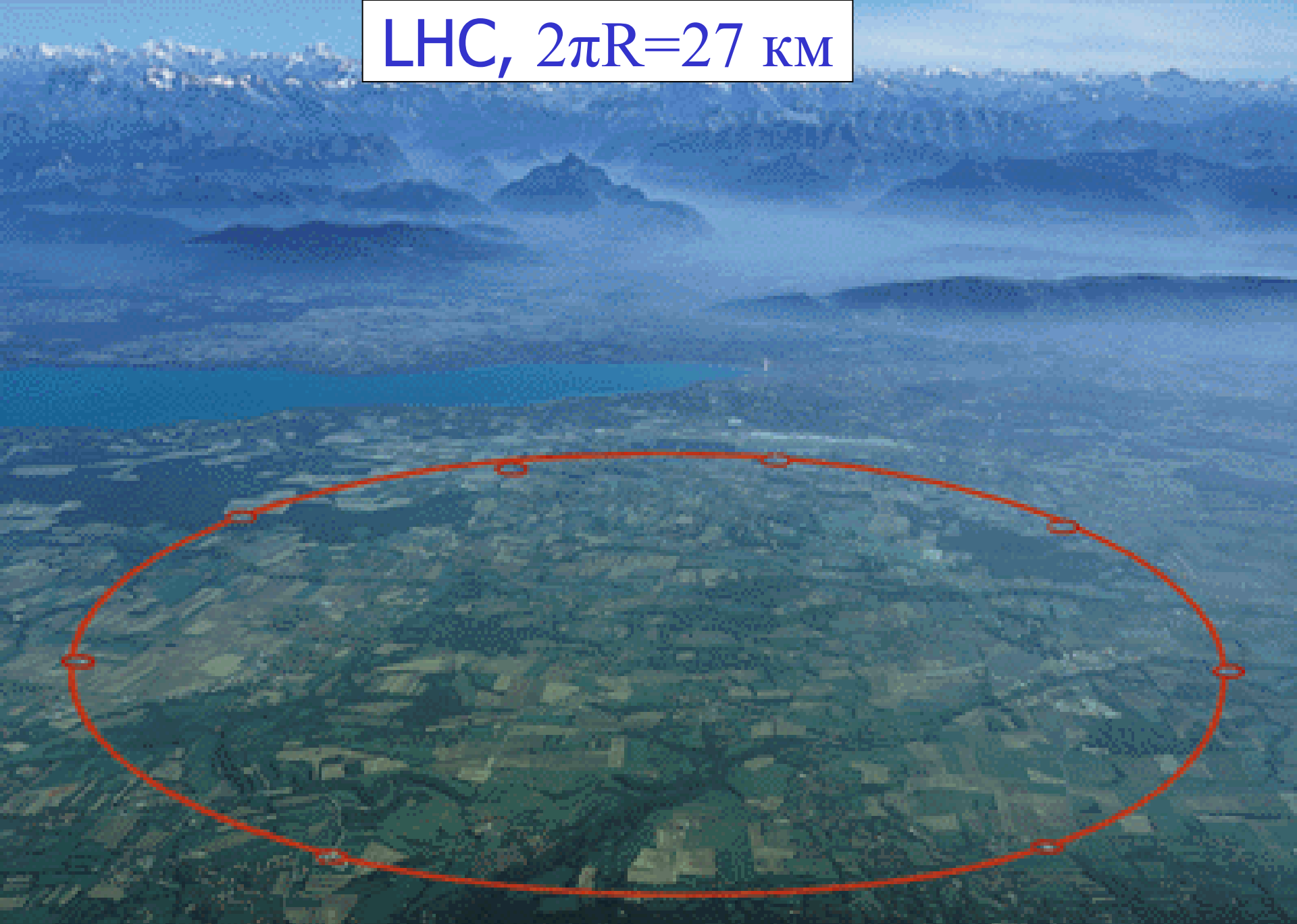
современные

и

будущие



LHC, $2\pi R=27$ km

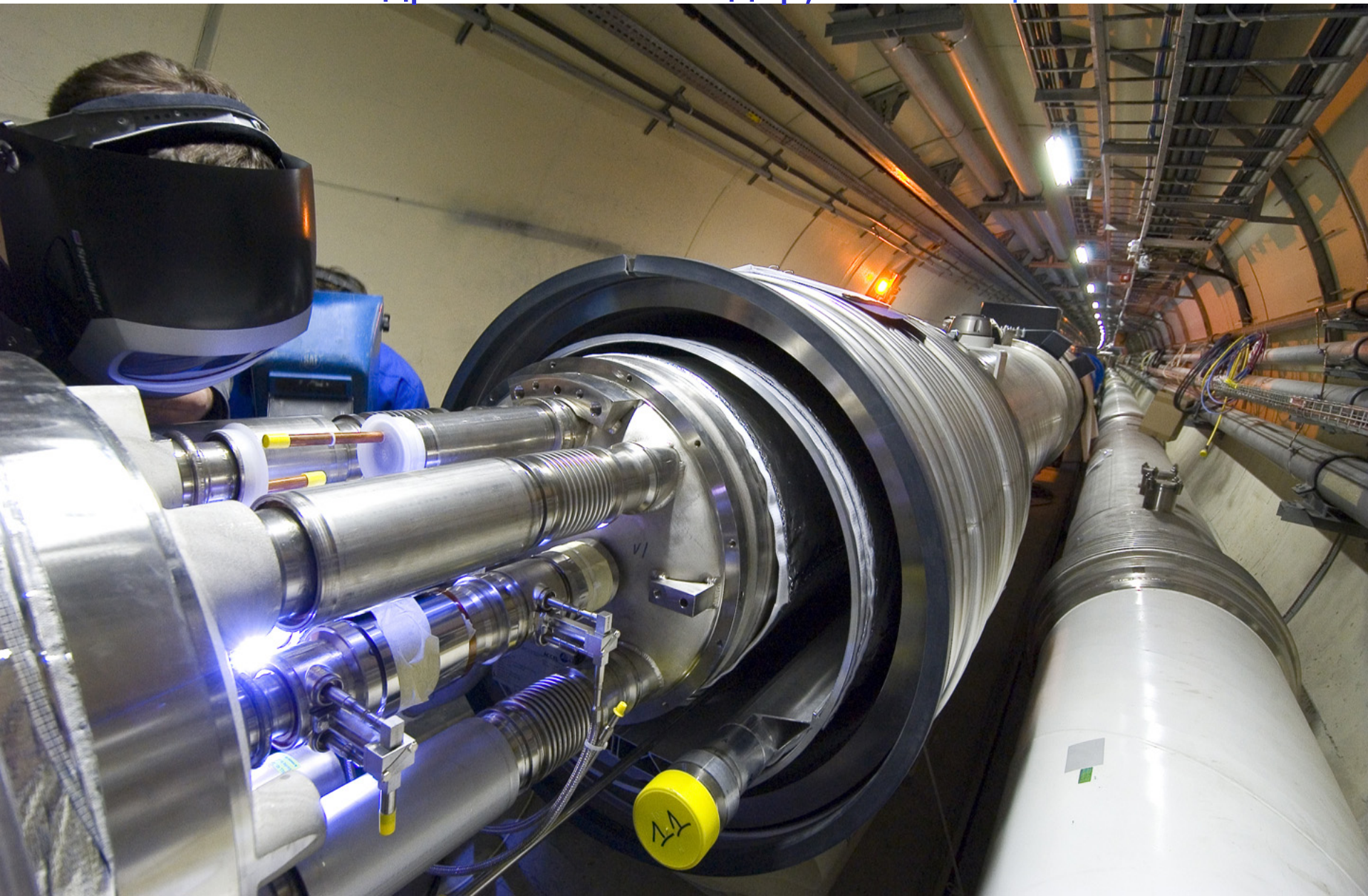


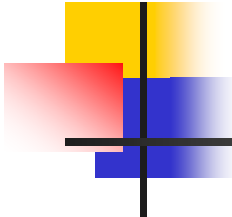
CERN from the AIR

(LEP $\rightarrow$ LHC !)

ЛНС-Большой адронный коллайдер,

начало работы 2008





Взаимодействие частиц с веществом

Заряженные частицы

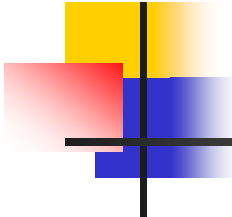
- ионизационные потери
- радиационные потери
- многократное рассеяние
- черенковское излучение
- переходное излучение
- ядерное взаимодействие,

ФОТОНЫ

- фотоэффект
- комптоновское рассеяние
- рождение пар фотоном

Нейтринные взаимодействия

Дозиметрия



Методы регистрации частиц. Детекторы.

Измерение координат:

- пропорциональные и дрейфовые камеры и др. газовые детекторы,
- полупроводниковые детекторы.

Идентификация частиц:

- сцинтилляционные счетчики,
- черенковские счетчики,
- счетчики переходного излучения.

Регистрация фотонов:

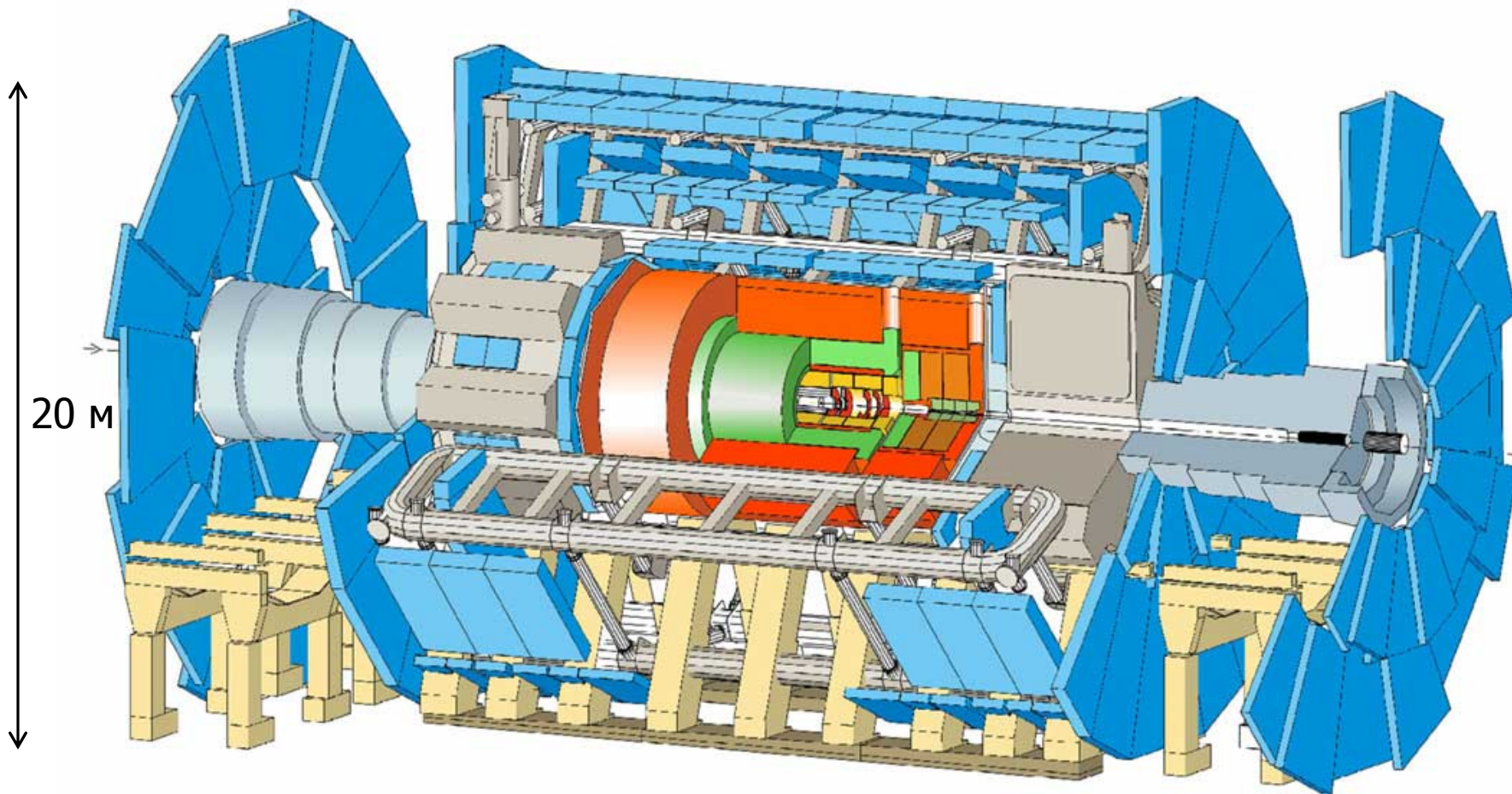
- пропорциональная камера,
- счетчики полного поглощения, сэндвичи,
- полупроводниковые детекторы.

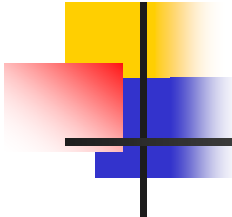
Адронные калориметры.

Эксперименты на ускорителях:

- основные компоненты больших детекторов, триггер, обработка информации.

Детектор ATLAS на LHC





Открытия в физике элементарных частиц

Проверка квантовой электродинамики.

Кварки и глюоны:

- структура протона;
- s, b, t -кварки, глюон.

Лептоны,

- тау-лептон, нейтрино, измерение числа поколений лептонов

Бозоны:

- W и Z , электрослабые взаимодействия, Хиггсовский бозон

Таблица фундаментальных частиц. Стандартная модель.

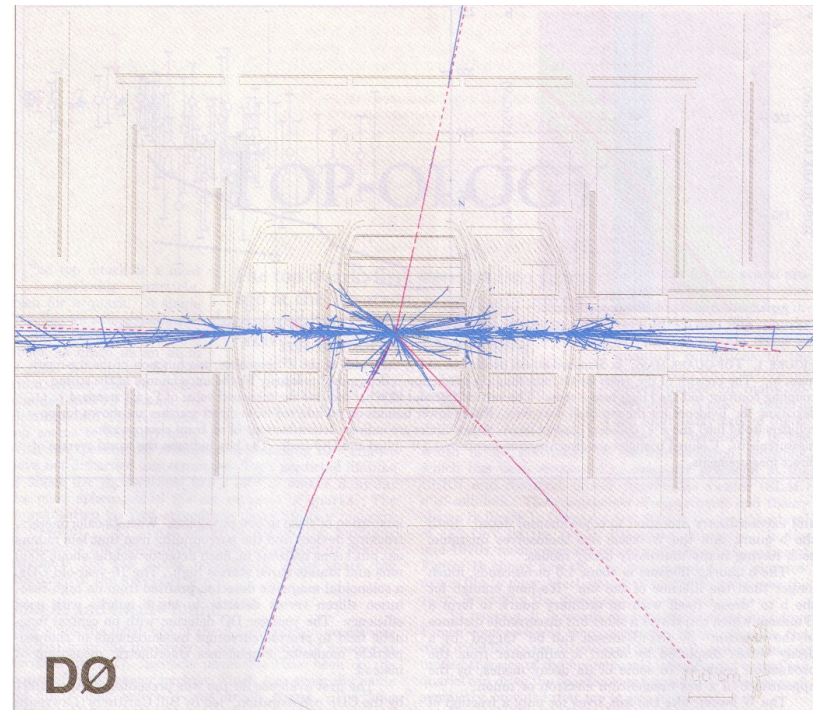
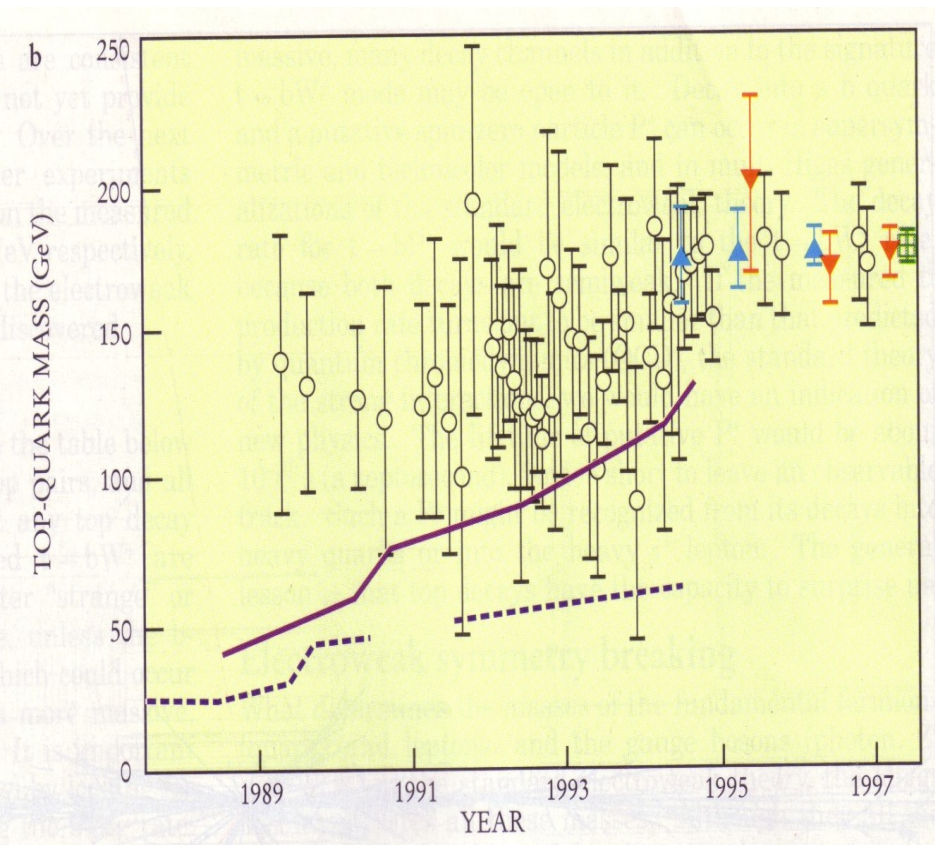
Симметрии,

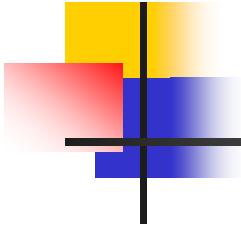
- открытие несохранения P , C , CP , T -четностей.

Будущие эксперименты и возможные открытия

- суперсимметрия, темная материя? ...

Открытие t-кварка

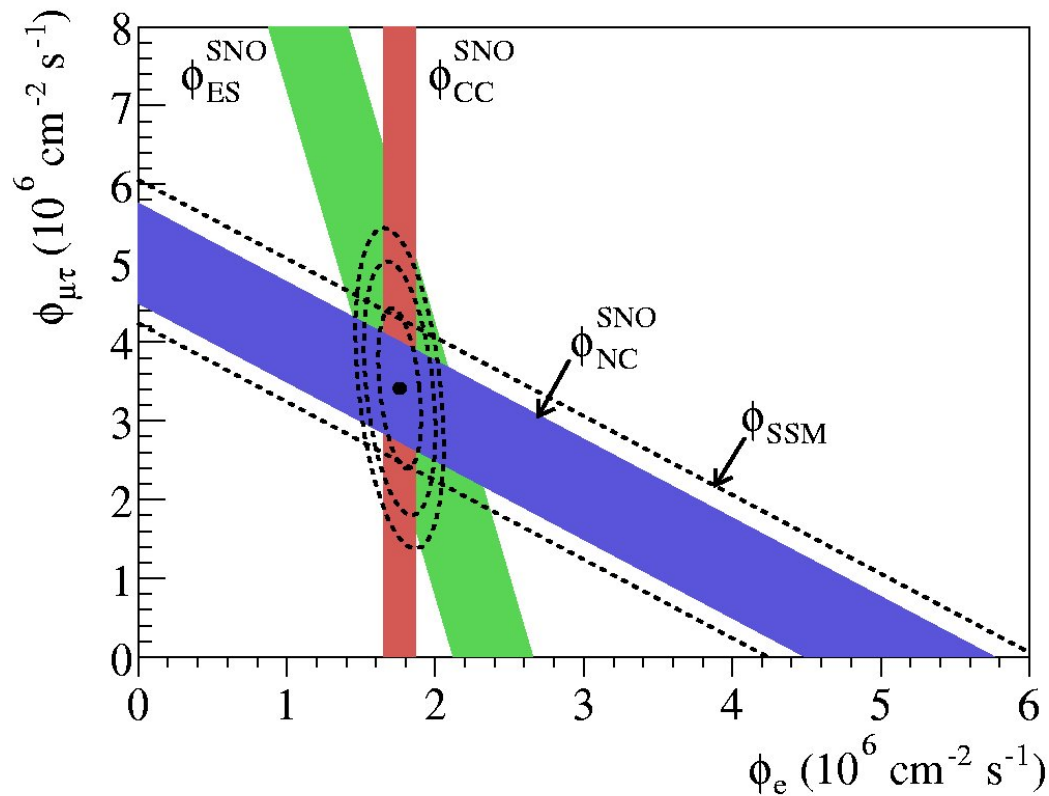
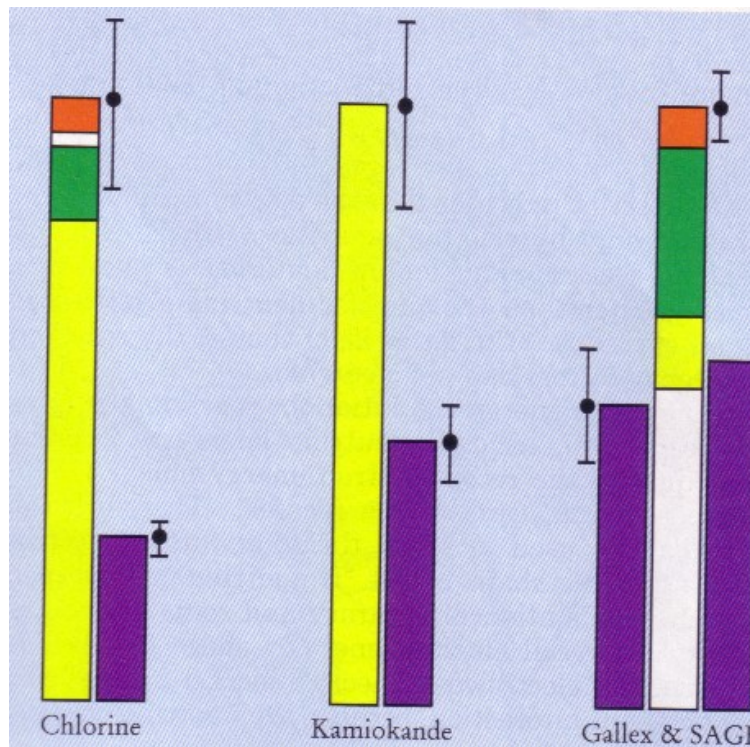




Нейтринные исследования

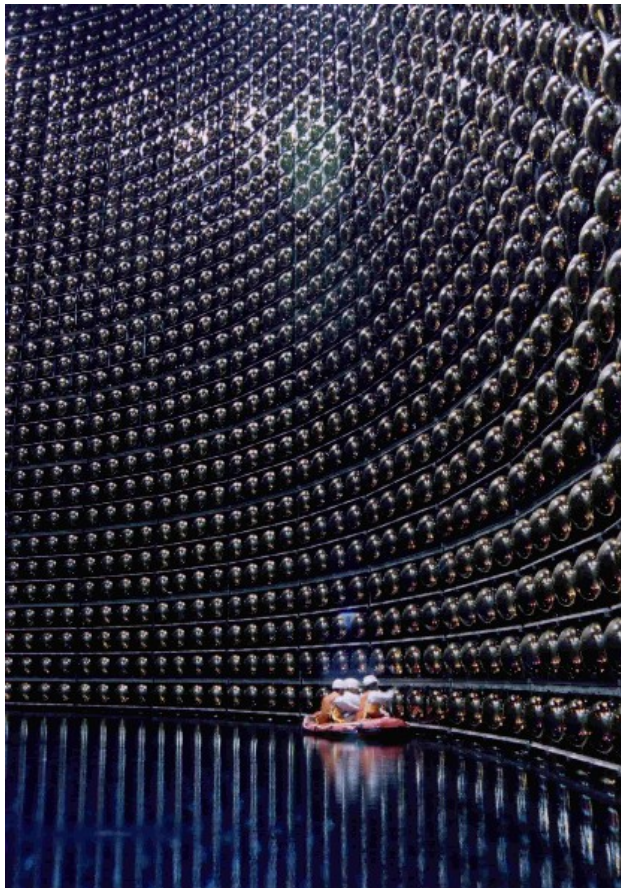
- Открытие нейтрино.
- Нейтринные пучки на ускорителях.
- Три типа нейтрино.
- Взаимодействие нейтрино с веществом.
- Заряженные и нейтральные токи.
- Массы нейтрино.
- Проблема солнечных нейтрино (спектр, типы детекторов).
- Проблема атмосферных нейтрино.
- Открытие нейтринных осцилляций (и ненулевой массы нейтрино).
- Регистрация недостающих нейтрино от Солнца
- Дефицит реакторных антинейтрино
- Нейтринные эксперименты на ускорителях

Проблема солнечных нейтрино и ее решение



Детекторы нейтрино

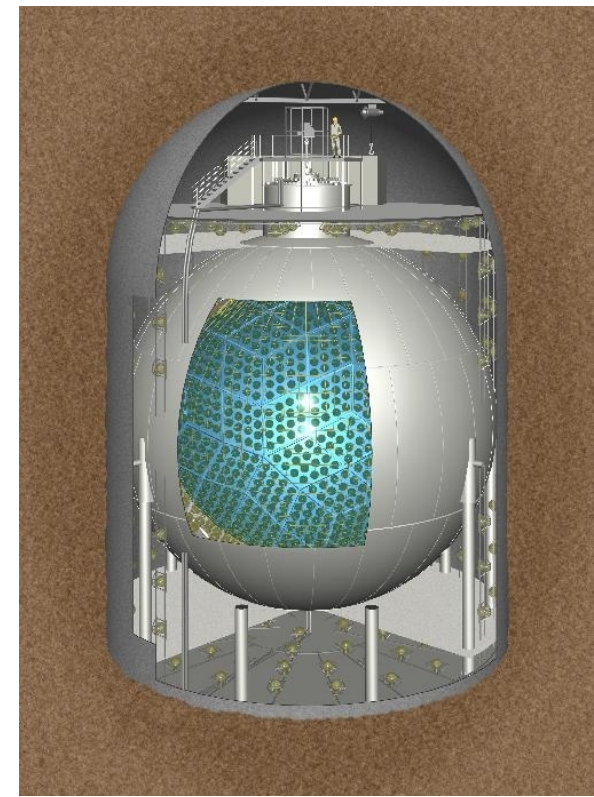
Super Kamiokanda



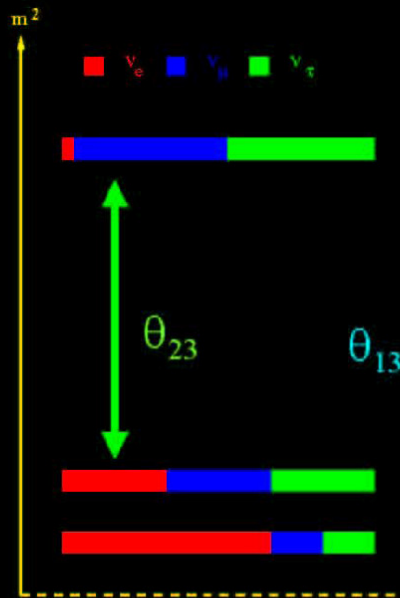
SNO



KamLand



Parameterization of Mixing Matrix



- Three mixing angles (like Euler rotation angles)
- One complex phase (CP violation)
- Two Majorana phases

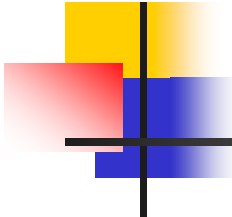
$$U = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

16

(large angle MSW)

$\nu_1 \rightarrow \nu_2 \rightarrow \nu_3$



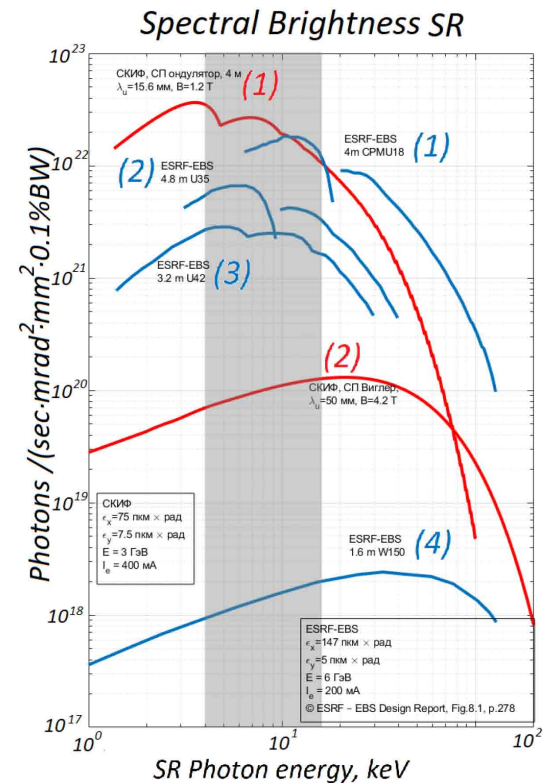


Использование ускорителей и детекторов в прикладных задачах

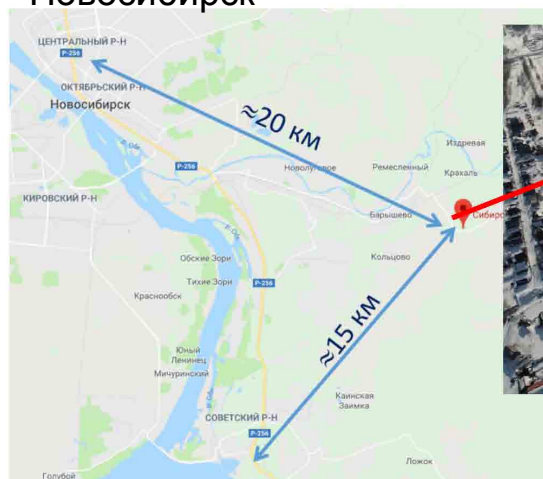
1. Источники синхротронного излучения,
 - основные характеристики,
 - ондуляторы и виглеры,
 - лазеры на свободных электронах,
 - применение в физических, химических и биологических исследованиях.
2. Промышленные ускорители.
3. Ускорители для терапии рака.
4. Рентгеновские детекторы для науки, медицины и др..
5. Рентгеновская и позитронная томография.
6. ЯМР-интроскопия.

СКИФ

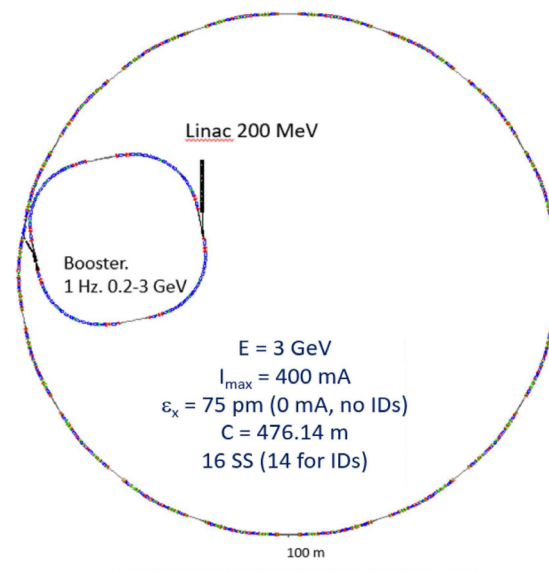
$E=3$ ГэВ, $P=476$ м, место –Кольцово, Новосибирск
Срок запуска – конец 2023

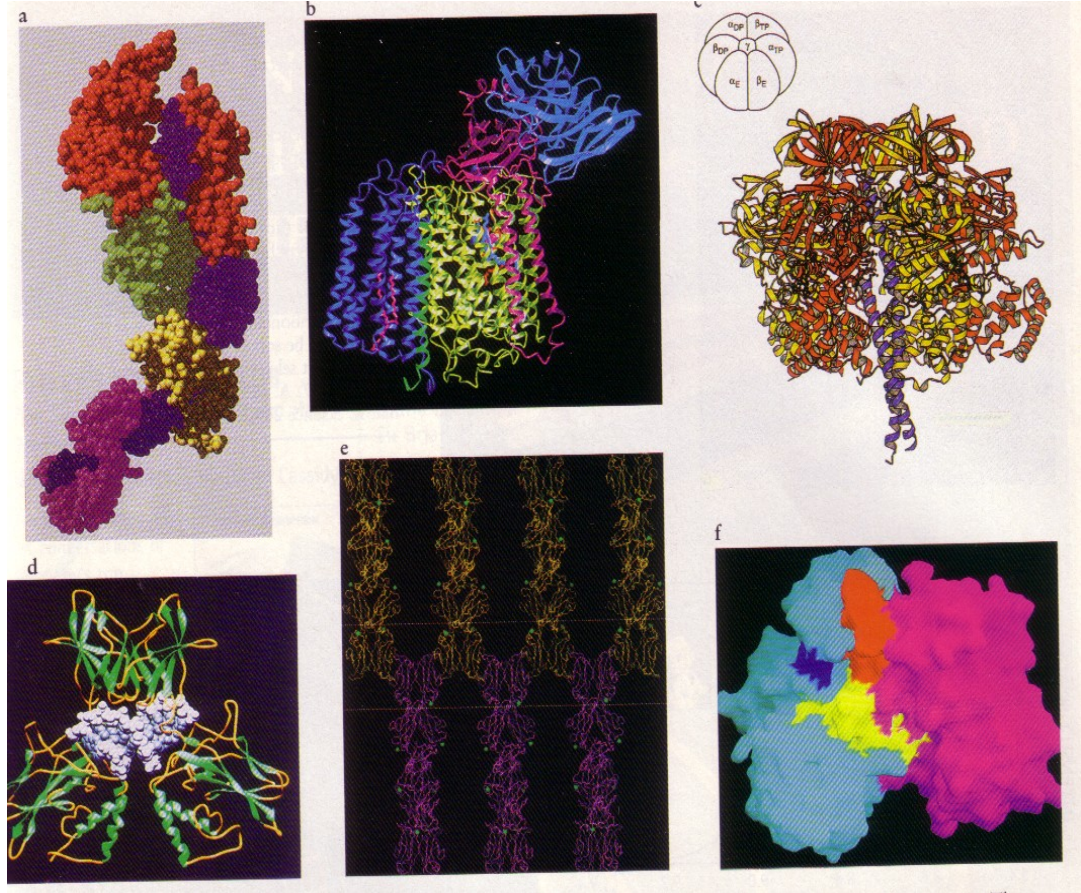
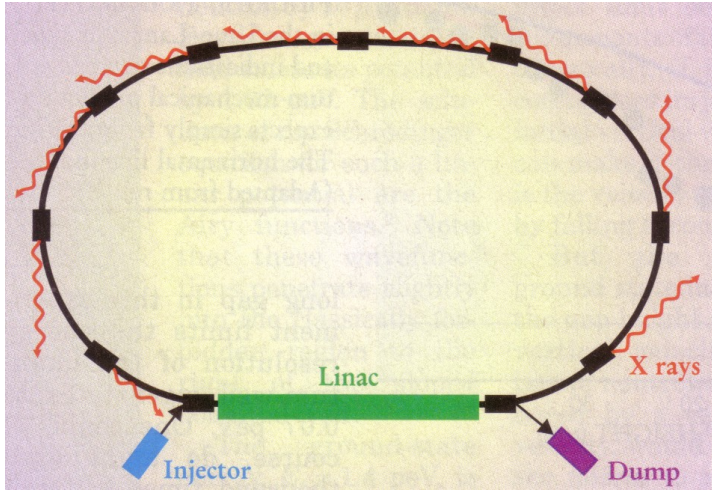


Новосибирск

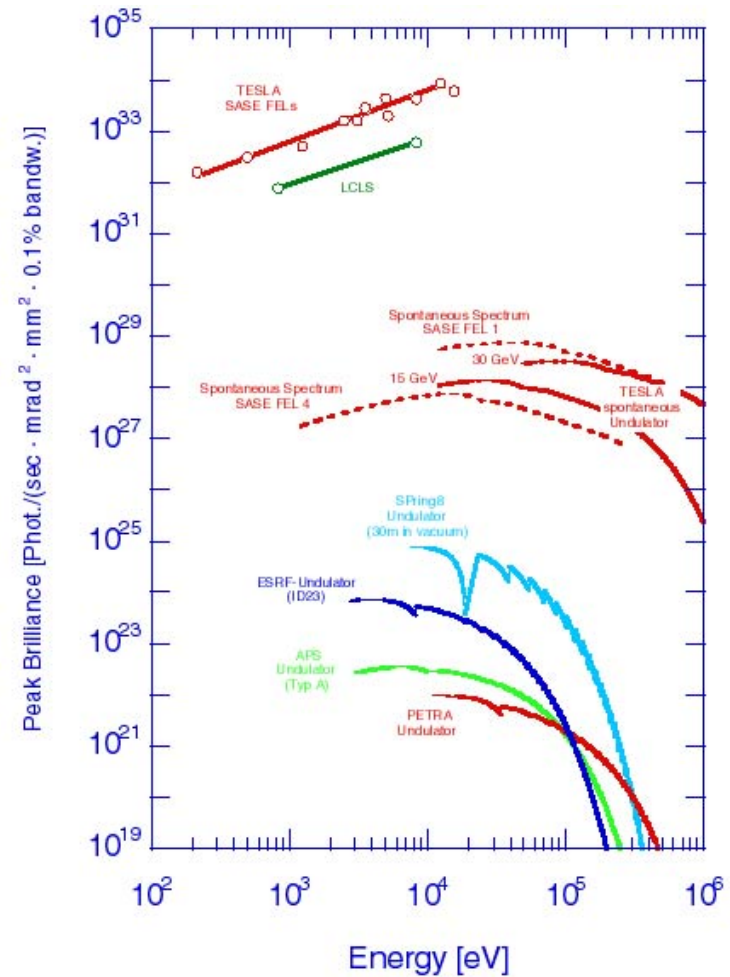
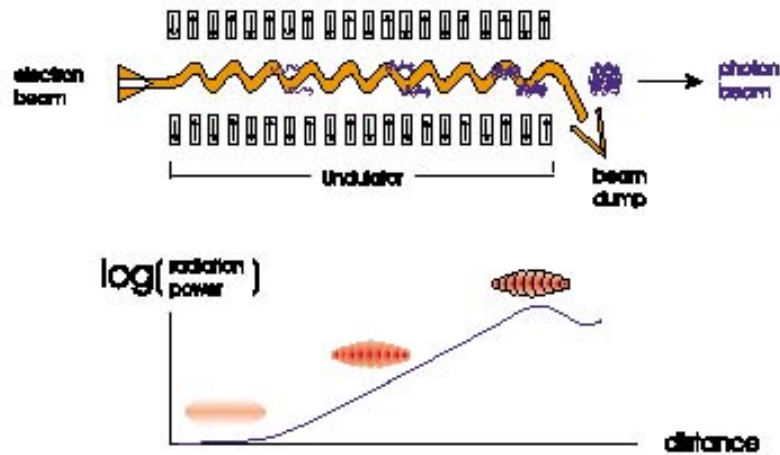


Академгородок



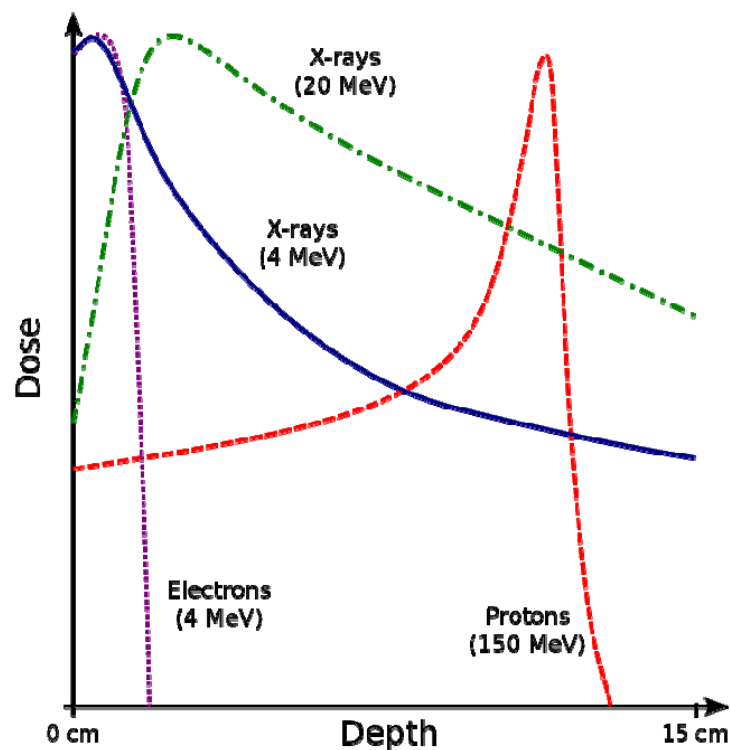
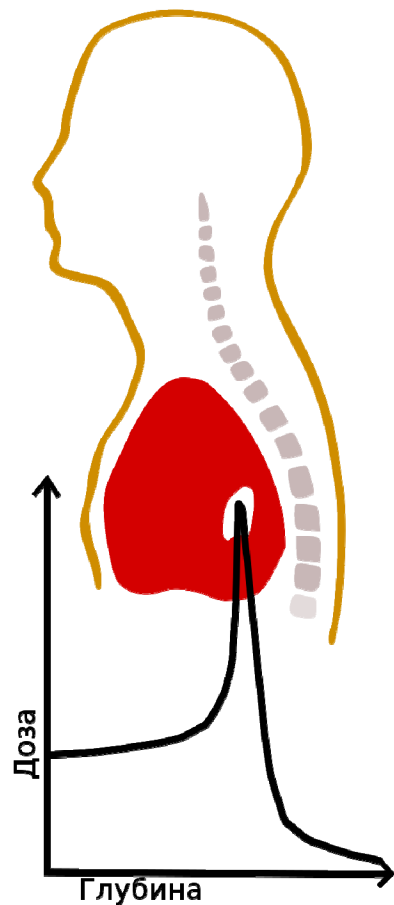


Лазеры на свободных электронах



Протонные и ионные ускорители для лечения рака

Преимущество протонов (ионов) в том, что в конце пробега они дают повышенную плотность ионизации (пик Брега)



Необходимая энергия протонов $E \sim 150-200$ МэВ (нерелятивистские)



Бор-нейтрон-захватная терапия (БНЗТ)

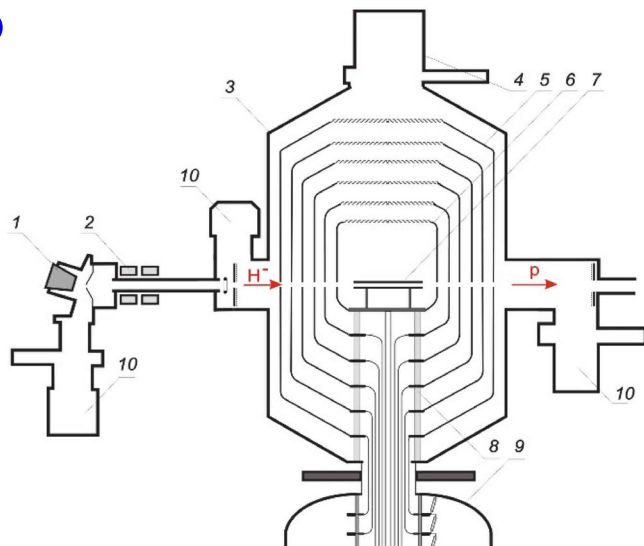
Бор накапливается в опухоли, при облучении нейтронами происходит реакция $n + \text{B}^{10} \rightarrow \text{Li}^7 + \alpha + \gamma$. Альфа частица и ион лития тормозятся на длине порядка 10 мкм, выделяют энергию 2.3 МэВ, нагревая и поражая клетку, содержащую бор. В раковых клетках бора больше в 3.5 раза.

Нейтроны получают путем облучения Li^7 протонами с энергией 1.9 МэВ (на 10-20 кэВ выше порога реакции). Получаются нейтроны с энергией ~ 30 кэВ.

Время облучения десятки минут для достижения терапевтического эффекта при дозе 20 Грей (2000 рад). Требуется 10^9 нейтронов/с в течение часа.

Метод предложен в 1936 г, с 1951 начались клинические испытания на специальных медицинских реакторах. В ИЯФ создается нейтронный источник на базе ускорительной техники.

В ИЯФ



Энергия: от 0,6 до 2,3 МэВ

Ток: от 0,5 до 9 мА

Отсутствие ускорительных трубок

Большая запасенная энергия – 40 Дж

Быстрый темп ускорения – 25 кВ/см

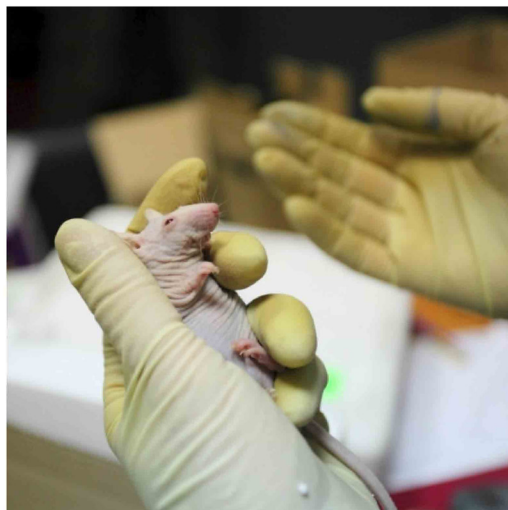
Сильная входная линза

Сначала ускоряются H^- , затем ионы обдираются на газовой струе и далее ускоряются протоны, получается более компактная установка (тандемный ускоритель)

Лабораторные животные

Облучение мышей с привитой опухолью приводит к их излечению

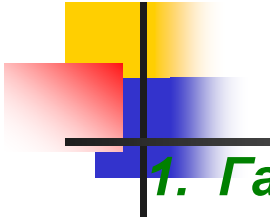
Пучок нейтронов пригоден для БНЗТ



Пока успешно лечат
мышей

Лазеры

- Общие принципы и основные виды лазеров.
- Свойства лазерного излучения.
- Газоразрядные лазеры на переходах в атомах и ионах.
- Импульсное возбуждение. Молекулярные лазеры. Газодинамические и химические лазеры.
- Твердотельные лазеры на ионных кристаллах.
- Генерация гигантских и сверхкоротких импульсов.
- Перестраиваемые лазеры на растворах органических красителях и кристаллах с центрами окраски.
- Полупроводниковые лазеры. Лазеры с ядерной накачкой.
- Преобразование частот методами нелинейной оптики.
- Обращение волнового фронта. Рекордные параметры лазеров.



ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

1. Газовые лазеры

He-Ne, CO₂, N₂, XeCl

2. Твердотельные лазеры

Nd:YAG, Al₂O₃:Ti³⁺, AlGaAs

3. Жидкостные лазеры

Rhodamine 6G

4. Плазменные лазеры

Ar⁺⁺, Kr⁺⁺

5. Рентгеновские лазеры

6. Лазеры с ядерной накачкой

7. Лазеры на свободных электронах

Накачка

1. Оптическая

2. Газовый разряд

3. Инжекция электронов

4. Химическая

5. Газодинамическая

Режим генерации

1. Непрерывный

2. Импульсный

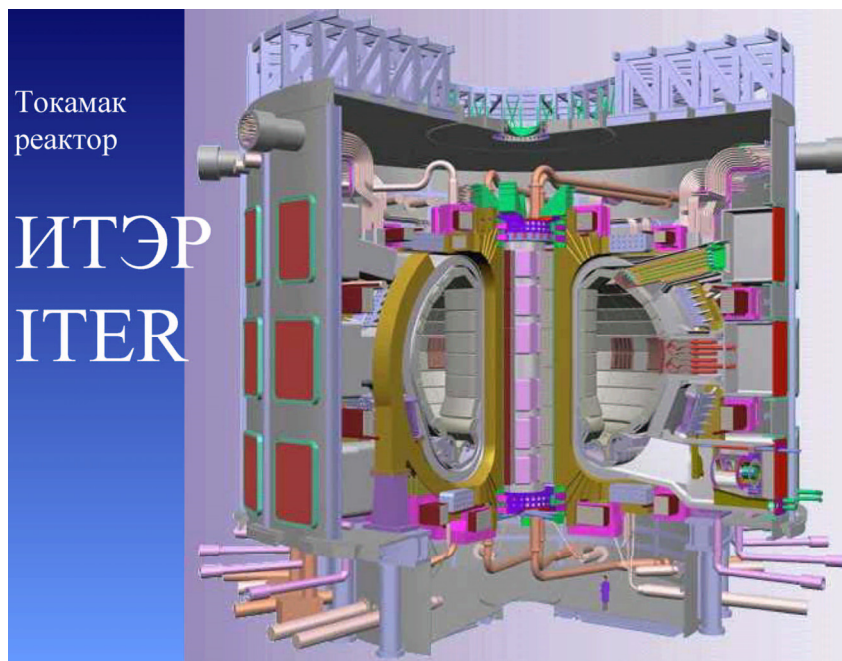
Применение лазеров

- Субдоплеровская нелинейная спектроскопия.
- Стандарты времени и длины.
- Сверхкороткие импульсы, исследование быстропротекающих процессов.
- Управление движением нейтральных атомов с помощью лазерного излучения, глубокое охлаждение, бозе конденсат
- Поляризация газа излучением.
- Светоиндуцированные газокINETические явления.
- Лазерная фотохимия и лазерное разделение изотопов.
- Другие применения: лазерный термояд, оптические линии передачи информации, лазеры в медицине, лазеры в информатике. оптический гироскоп.

Энергетическая проблема. Источники энергии.

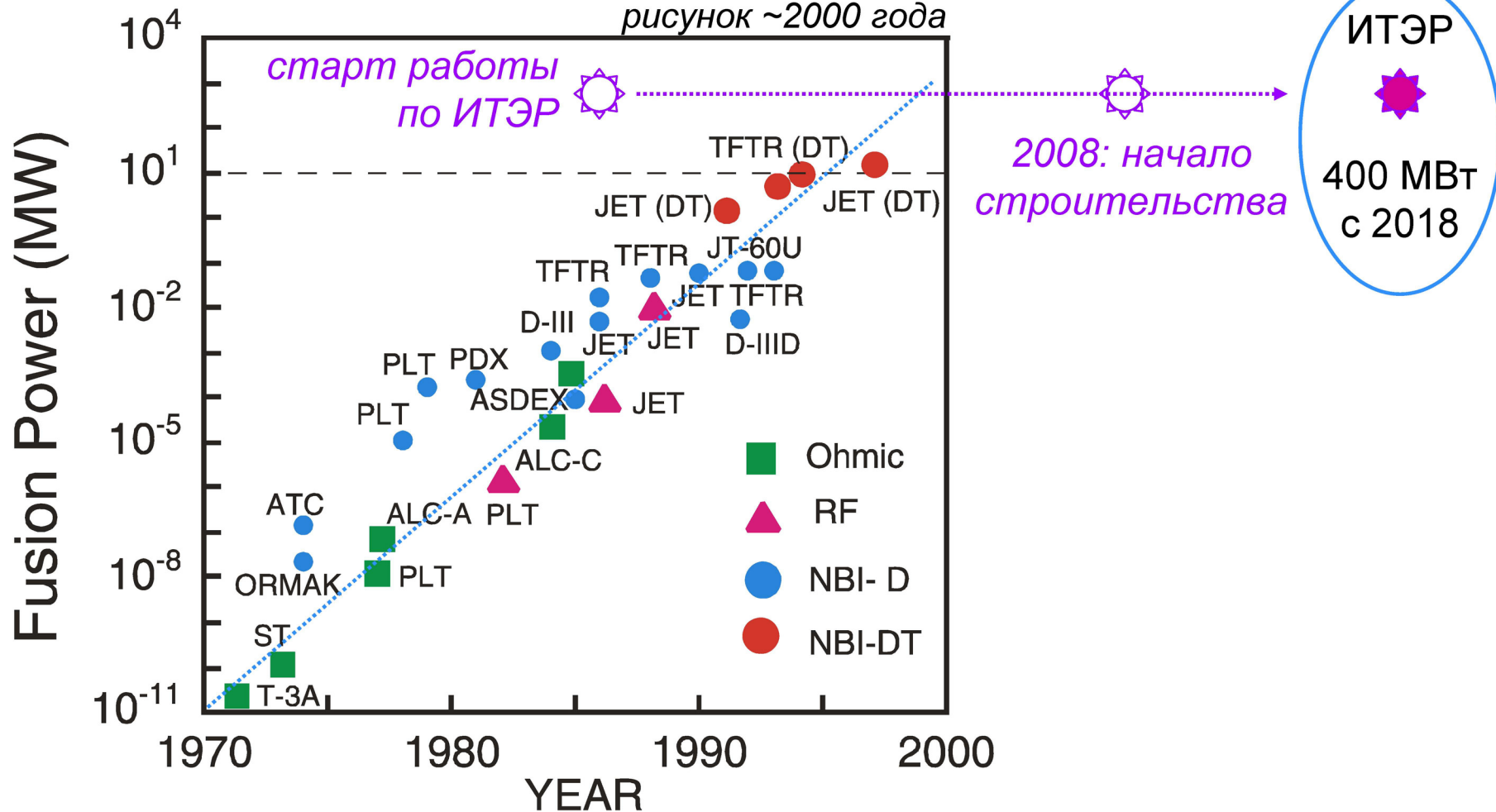
В.В. Поступаев

- Источники энергии.
- Ядерные реакторы.
- Исследования по управляемому термоядерному синтезу, токамаки, открытые ловушки, основные достижения и проблемы.
- Инерциальный термояд.
- Солнечная энергия?



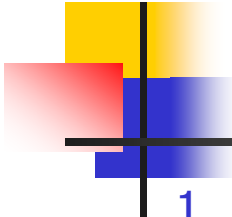
Прогресс в достигнутой Т/Я мощности

рисунок ~2000 года



- до 1997 года динамика развития была более быстрой, чем известный закон Мура в микроэлектронике!
- после 1997 года прогресса нет, так как нет установок следующего поколения

Сверхпроводимость

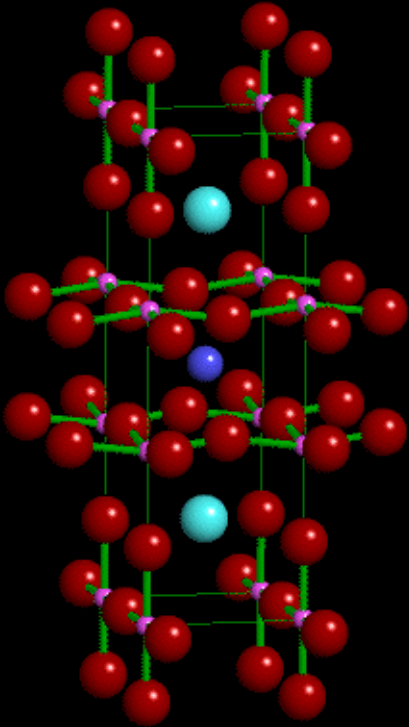


1. Основные свойства, нулевое электросопротивление.
2. Несовместимость сверхпроводящего состояния и магнитного поля - эффект Мейснера.
3. Слабая сверхпроводимость, эффект Джозефсона.
Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), Медь-кислородные ВТСП. Бескислородные ВТСП. Сверхпроводимость в соединениях на основе углерода, в фуллеренах, углеродных нанотрубках, кристаллах графита, алмазе.
4. Основные области применения сверхпроводников.
 - Сверхпроводящие квантовые измерители магнитного потока (СКВИДы).
 - Получение сильных магнитных полей.
 - Передача электроэнергии без потерь.
 - Накопители энергии на сверхпроводящих индуктивных устройствах.
 - Микроэлектронные устройства на основе сверхпроводников

Сверхпроводимость

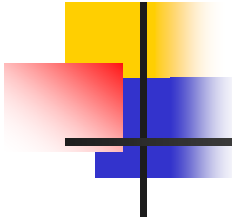
*Сверхпроводимость стоит изучать
потому, что это очень интересно, ...*

...и полезно



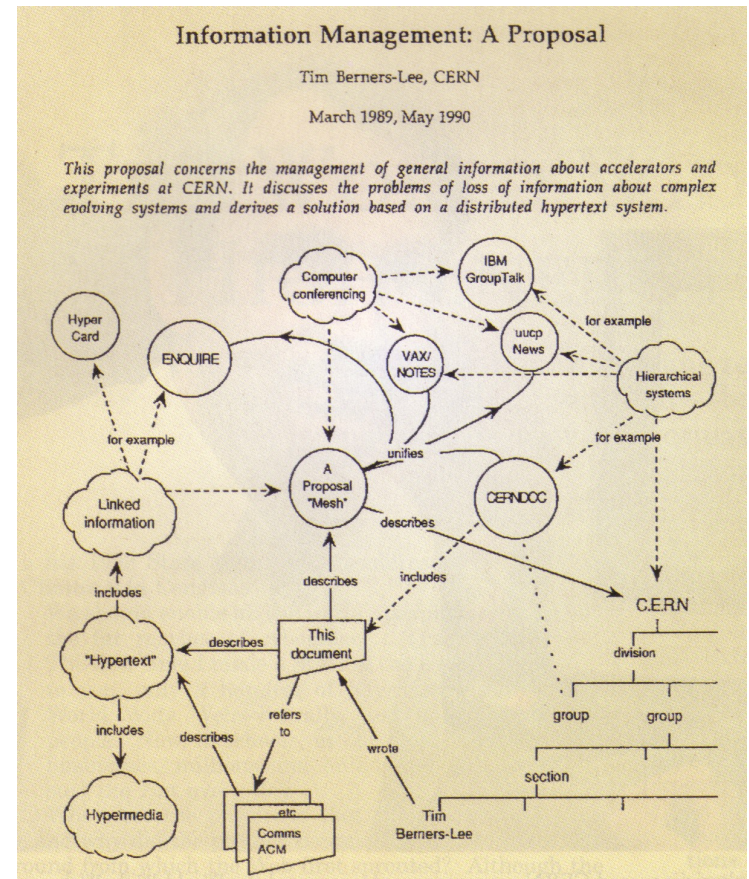
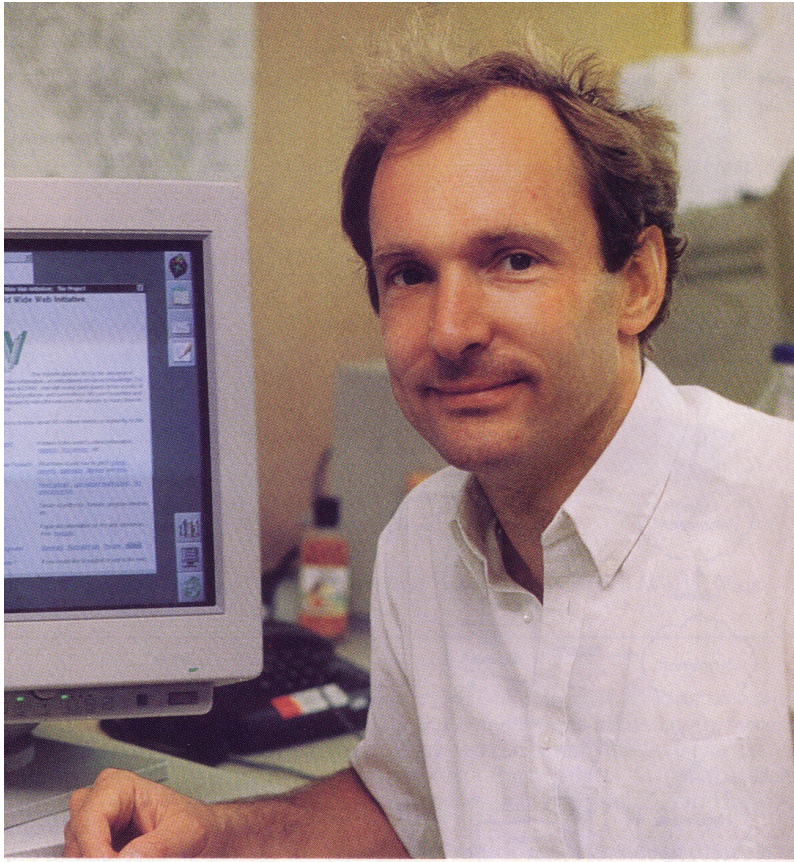
581 км/час

нанотехнологии (акад. А.Л. Асеев, П.В.Гейдт)

- 
- Как делают современные БИСЗ.
 - Молекулярно-лучевая эпитаксия. Нанолитография.
 - Квантовые ямы и сверхрешетки.
 - Квантовая интерференция в твердотельных системах.
 - Электронные волноводы.
 - Квант сопротивления, квантовый эффект Холла.
 - Электронный интерферометр.
 - Одноэлектронный транзистор.
 - Туннельный микроскоп.
 - Нанотехнологии !

WWW

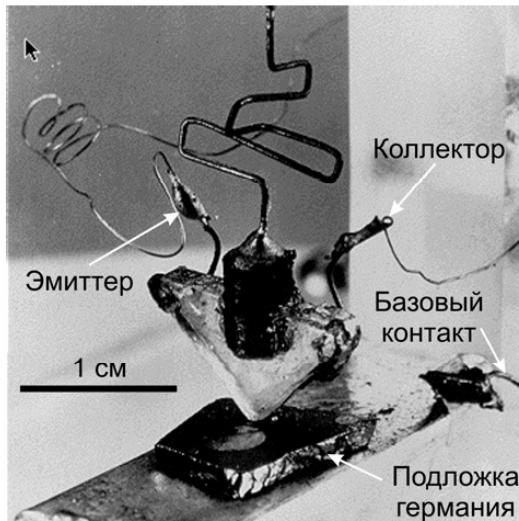
Berens-Lee



Прогресс электроники

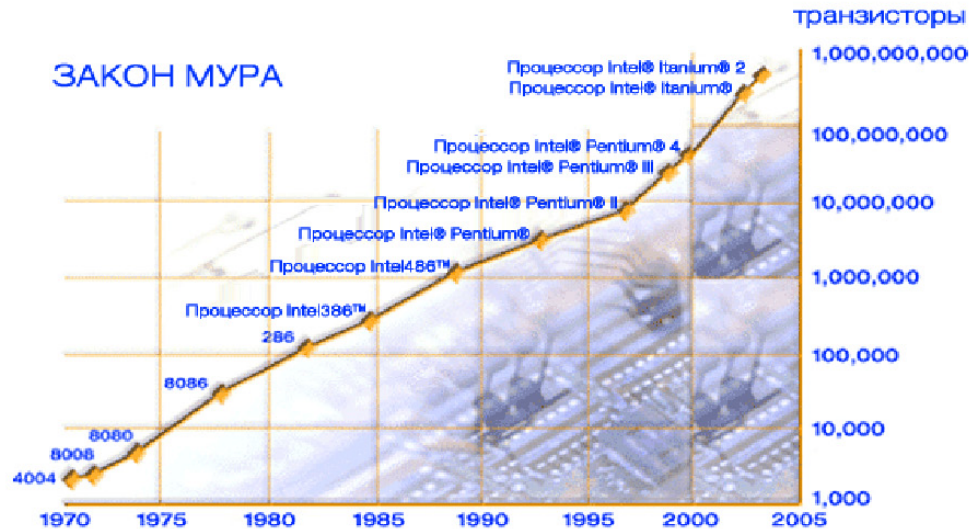
50 лет микроэлектроники дали - компьютеры, телевизоры, мобильные телефоны, интернет, навигаторы, флэш-память, магнитофоны, ноутбуки, цифровые видеокамеры и т.д.

Нанoeлектроника - уже миллиарды транзисторов на чипе
На одной пластине – уже триллионы транзисторов и все работают!
Библиотека конгресса США на флэшке.



Джон Бардин

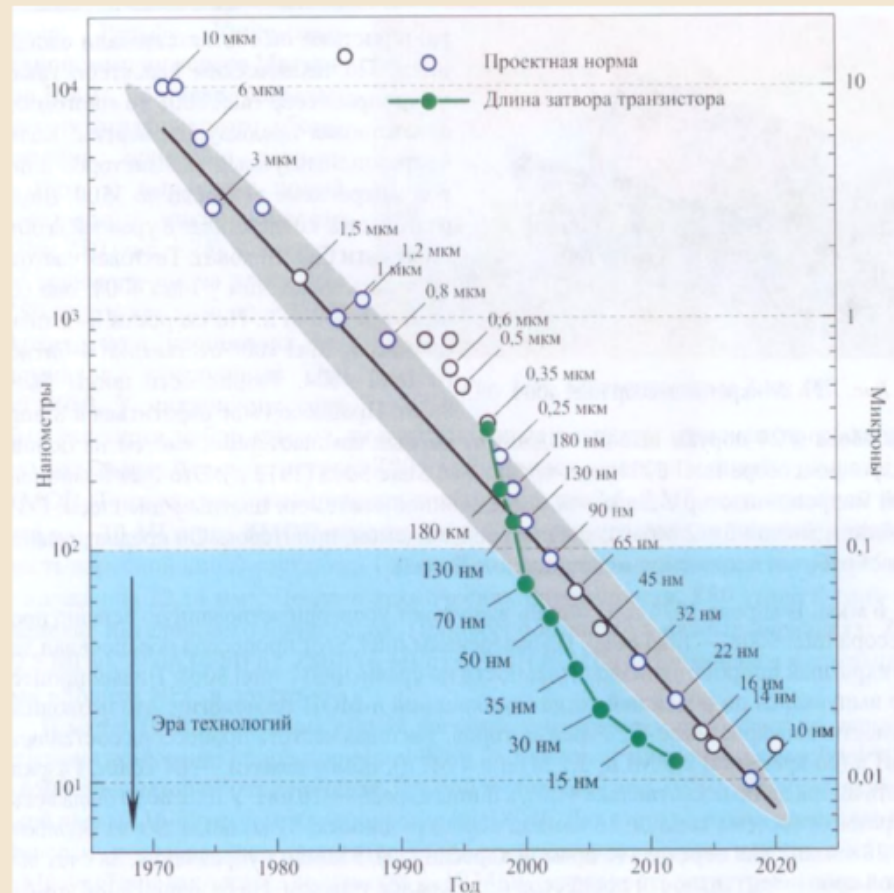
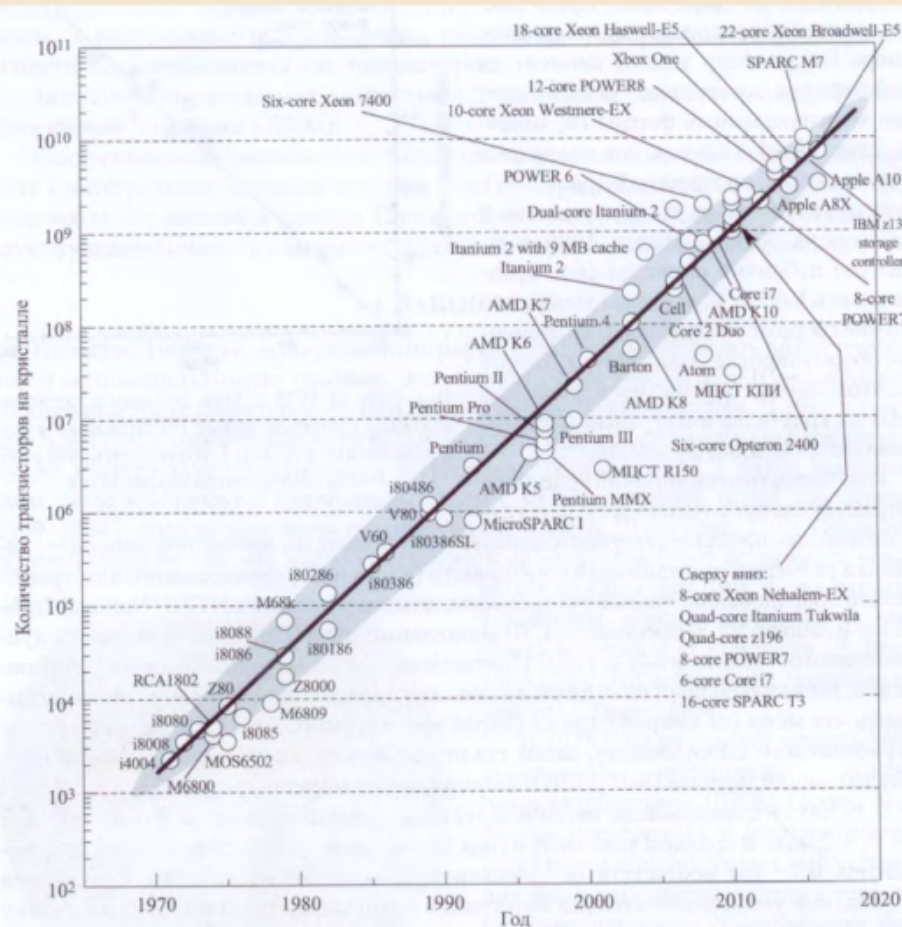
Объем, приходящийся на один транзистор, сократился в 10^{20} раз !



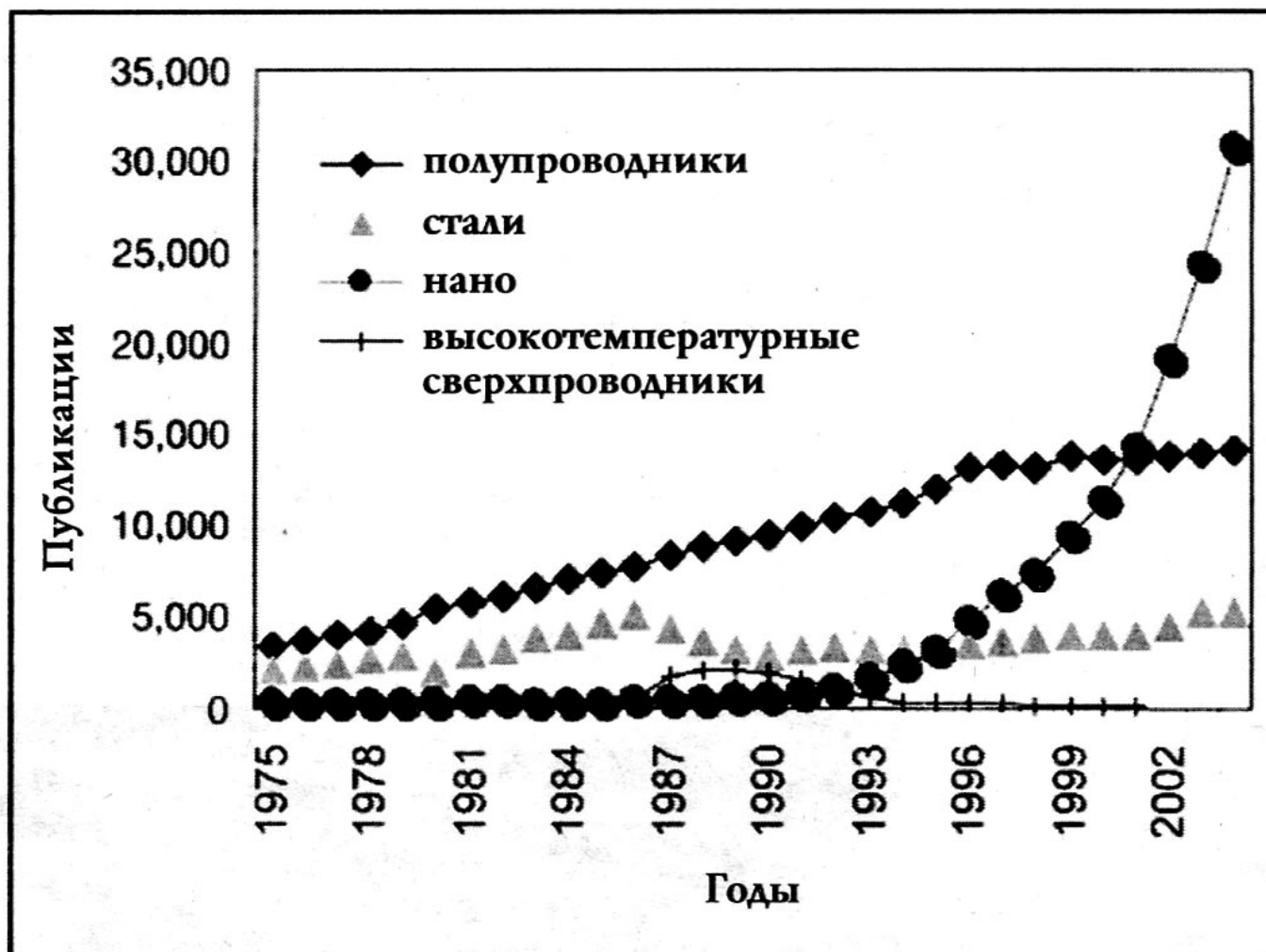
В 1958 году один кремниевый транзистор стоил 10\$. В настоящее время на каждого человека в среднем приходится 100 млн. транзисторов и в сумме они также стоят 10\$ (результат миниатюризации и одновременного, параллельного изготовления транзисторов на подложке)

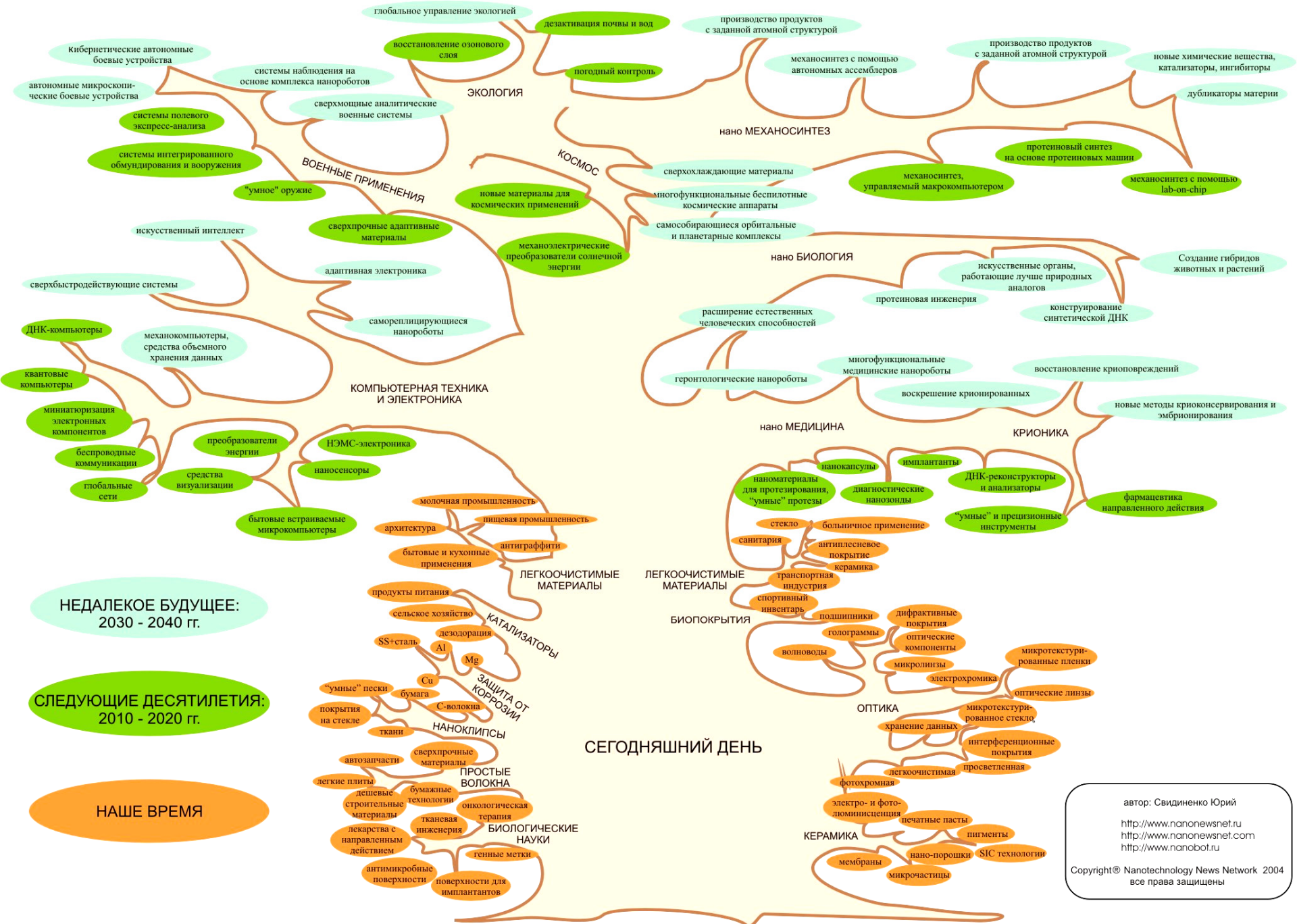
Параллельное производство - одно и то же время изготовления одного или триллиона транзисторов

ИЗМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТРАНЗИСТОРОВ НА КРИСТАЛЛЕ МИКРОСХЕМ, ПРОЕКТНОЙ НОРМЫ И ДЛИНЫ ЗАТВОРА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ГОДАМ - ЗАКОН МУРА (MOORE'S LAW)

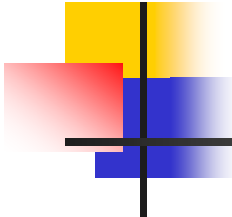


Нанотехнологии





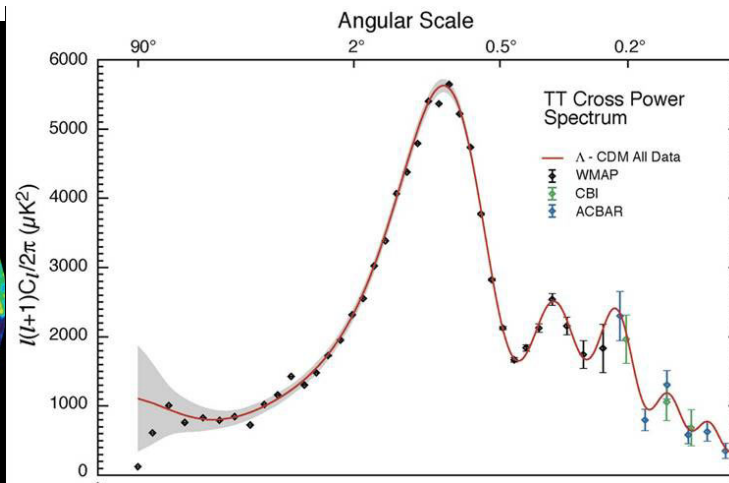
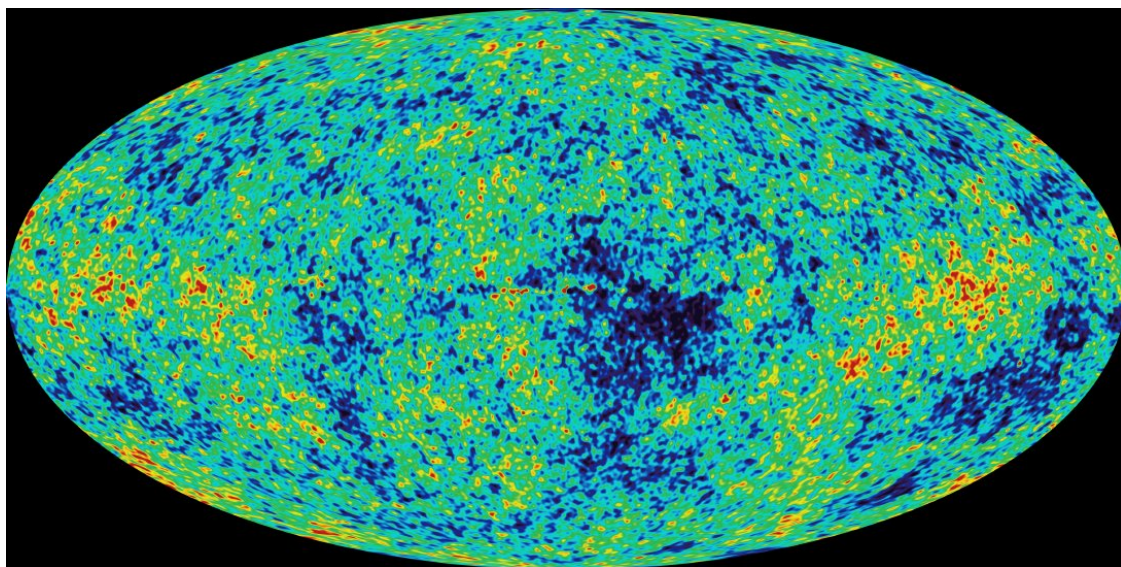
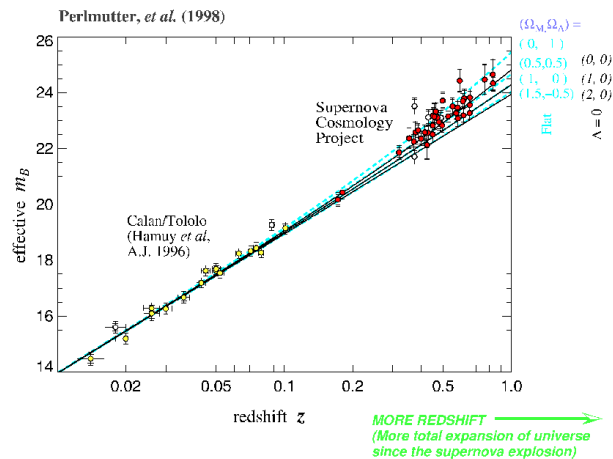
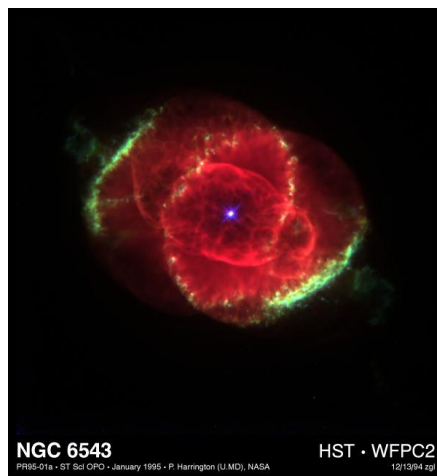
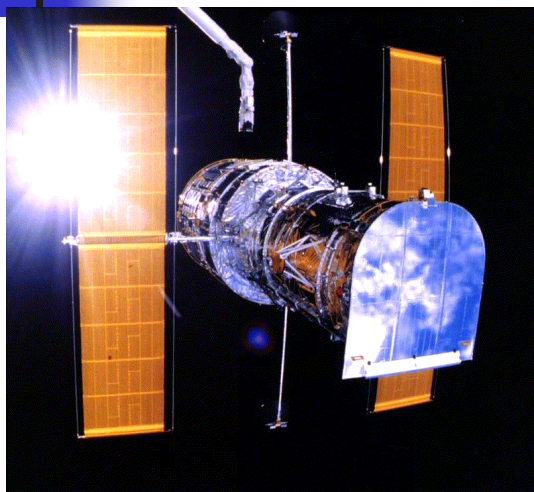
автор: Свидиненко Юрий
<http://www.nanonewsnet.ru>
<http://www.nanonewsnet.com>
<http://www.nanobot.ru>
Copyright© Nanotechnology News Network 2004
все права защищены



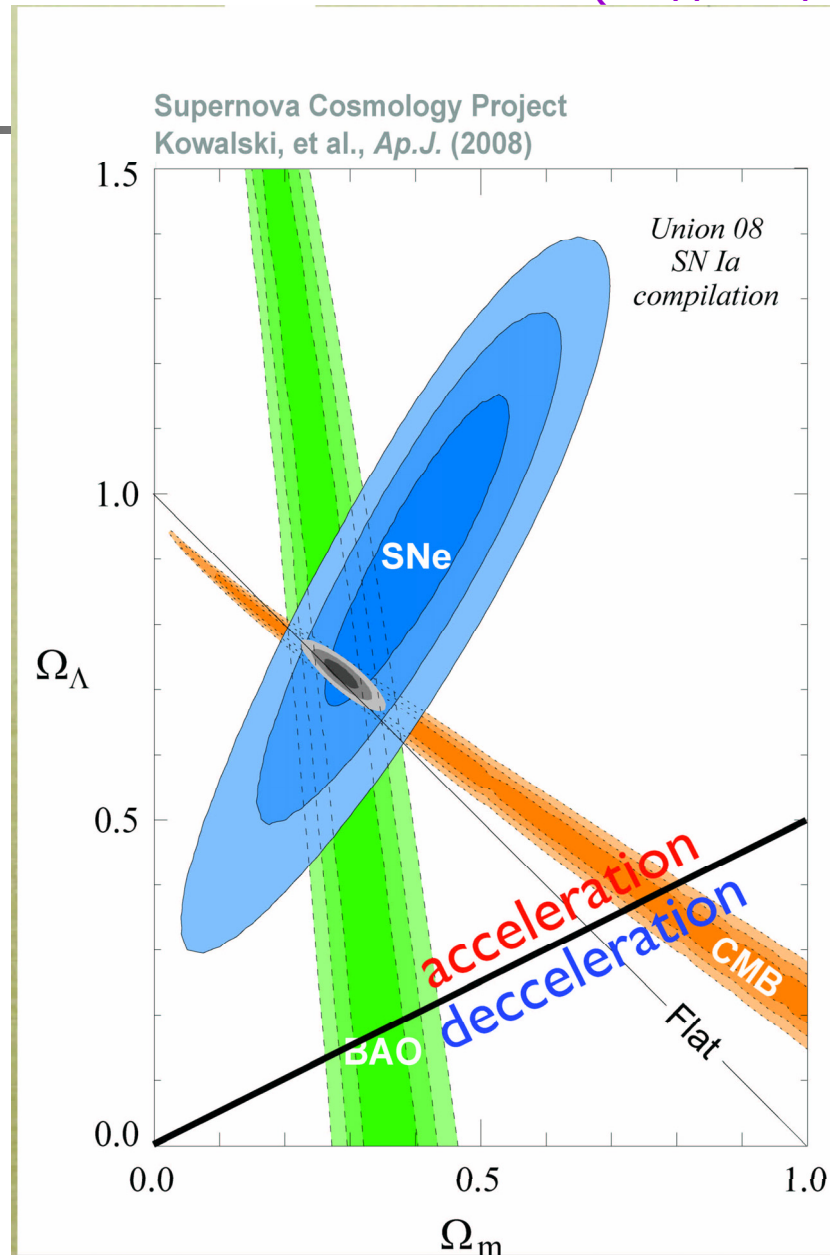
Астрофизические исследования

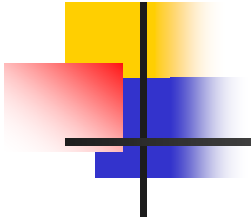
- Всеволновая астрономия, открытия.
- Строение вселенной.
- Оптические телескопы, Хаббл, адаптивная оптика
- Рентгеновские, гамма телескопы,
- Радиотелескопы с большой базой,
- Гамма вспышки,
- Черные дыры.
- Расширяющаяся вселенная, возраст вселенной, открытие ускорения расширения.
- Плотность Вселенной, свидетельства существования темной материи, темная энергия.
- Гравитационные линзы.
- Реликтовое излучение, открытие анизотропии.
- Измерение космологических величин (кривизна, плотность барионной, темной материи и энергии вакуума).
- Двойной пульсар и гравитационные волны.
- Прямая регистрация гравитационных волн

Золотой век астрофизики



Количество материи (видимой и невидимой) и «темной энергии» во Вселенной (в единицах крит. плотности)





Состав вселенной (в ед.критич. плотности)

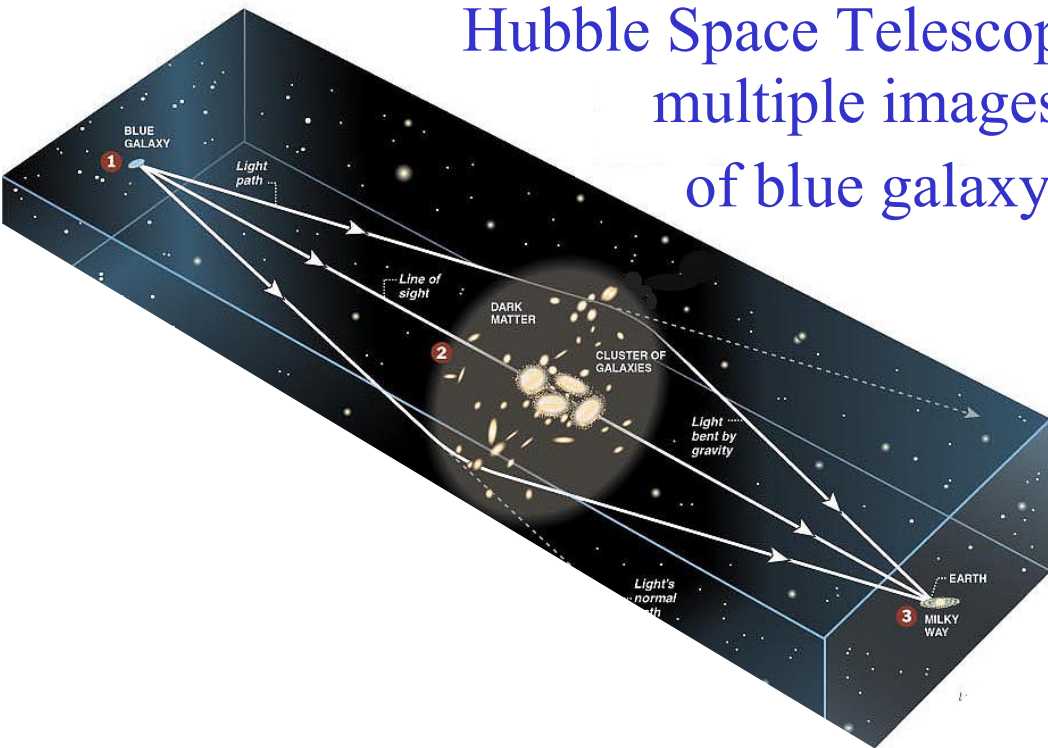
Фотоны	0.005%
Нейтрино	<3%
Барионы/звезды	4.5/0.5%
Темная (небарионная) материя	25%
Темная энергия	70%

Общая плотность близка к ρ_c (плоская Вселенная)

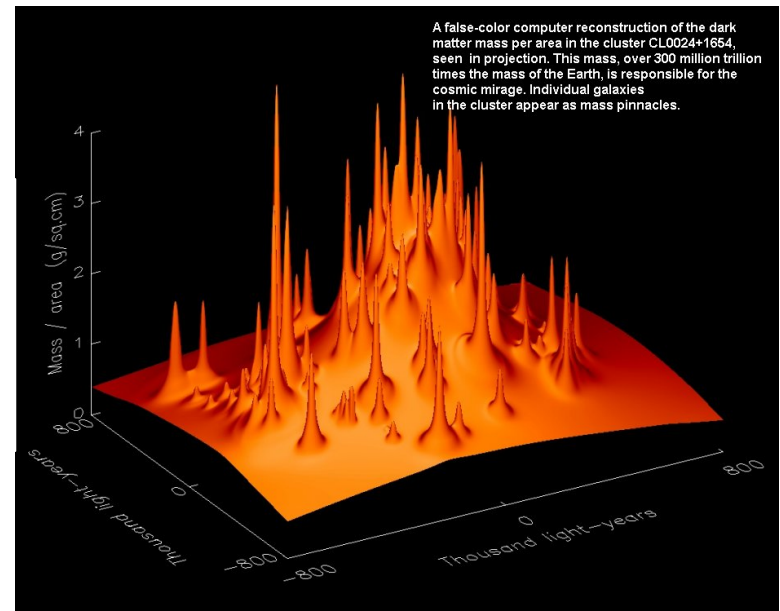
Данные в согласии с инфляционной моделью (критическая плотность, изотропия и анизотропия рел. излучения)

Темная материя и темная энергии – полная загадка.

Гравитационное линзирование кластеров



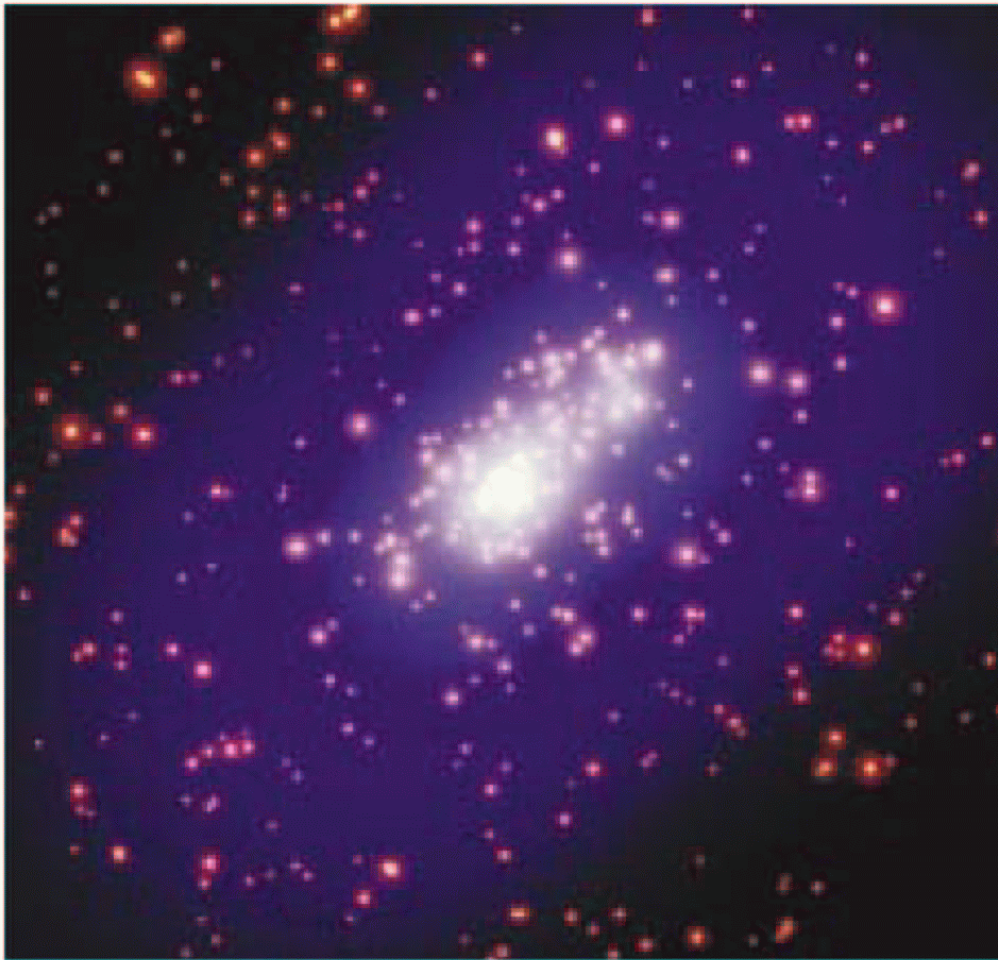
Hubble Space Telescope
multiple images
of blue galaxy



Гигантский кластер галактик

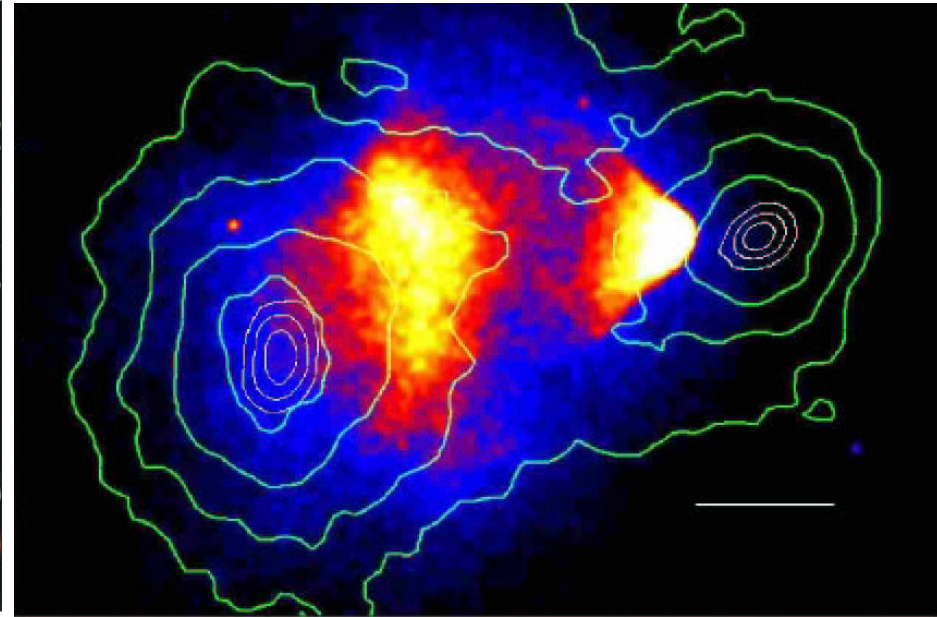
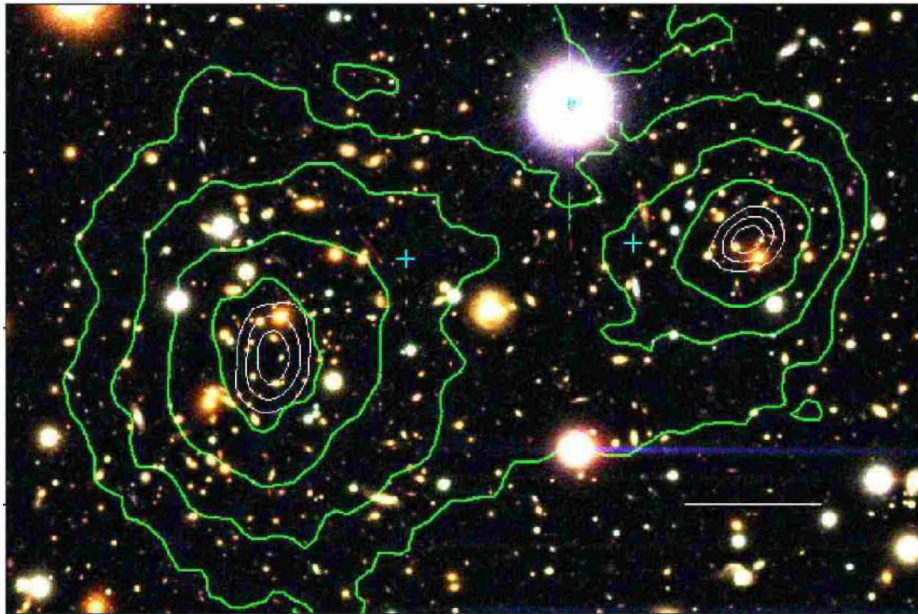
4.5 млрд. св. лет
от Земли

Невидимая темная
материя, рассчитанная
по гравитационному
линзированию,
показана голубым
цветом

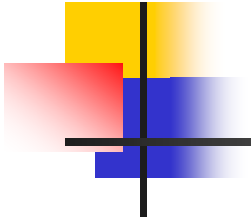


DARK MATTER MAP The total mass within giant galaxy cluster CL0025+1654 is the sum of the galaxies themselves, seen in yellow as ordinary luminous matter, plus the cluster's invisible dark matter shown in blue. The cluster's dark matter is not evenly distributed, but follows the clumps of luminous matter closely. *Credit: J.-P. Kneib Observatoire Midi-Pyrenees, Caltech. ESA, NASA*

Прямое свидетельство существования темной материи astro-ph/0608407



Последствия столкновения двух галактических кластеров. Светится обычная материя. Зеленые контуры – распределение гравитирующей материи, найденное по гравитационному линзированию.



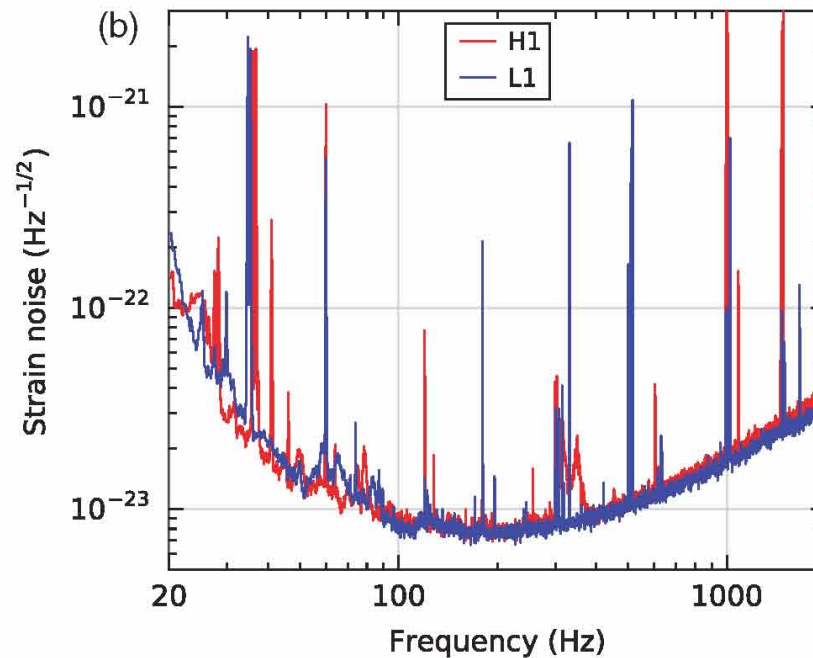
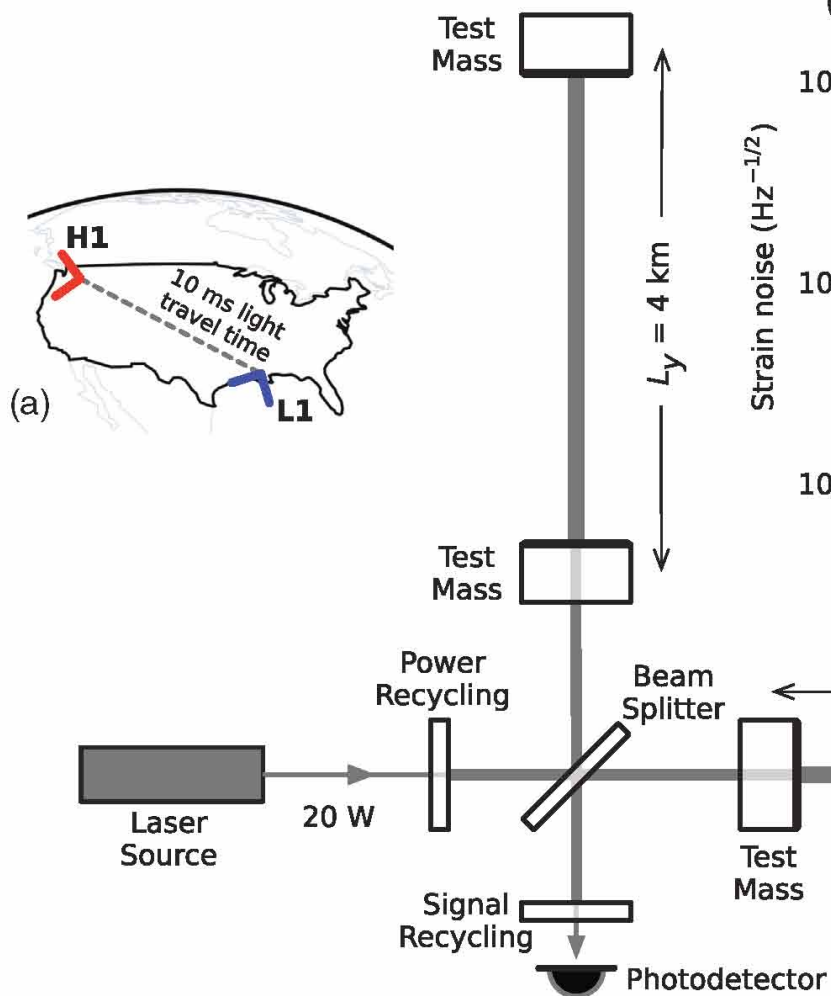
Гравитационные эксперименты

- Опыты по проверке принципа эквивалентности. Пятая сила?
- Измерение зависимости гравитационной постоянной от расстояния.
- Косвенное наблюдение гравитационных волн.
- Прямая регистрация гравитационных волн (2.2016 г)
- Гравитация и антивещество.
- Проверка ОТО.
- Изучение динамики вселенной, открытие космологического члена (антигравитации вакуума).
- Планируемые эксперименты.

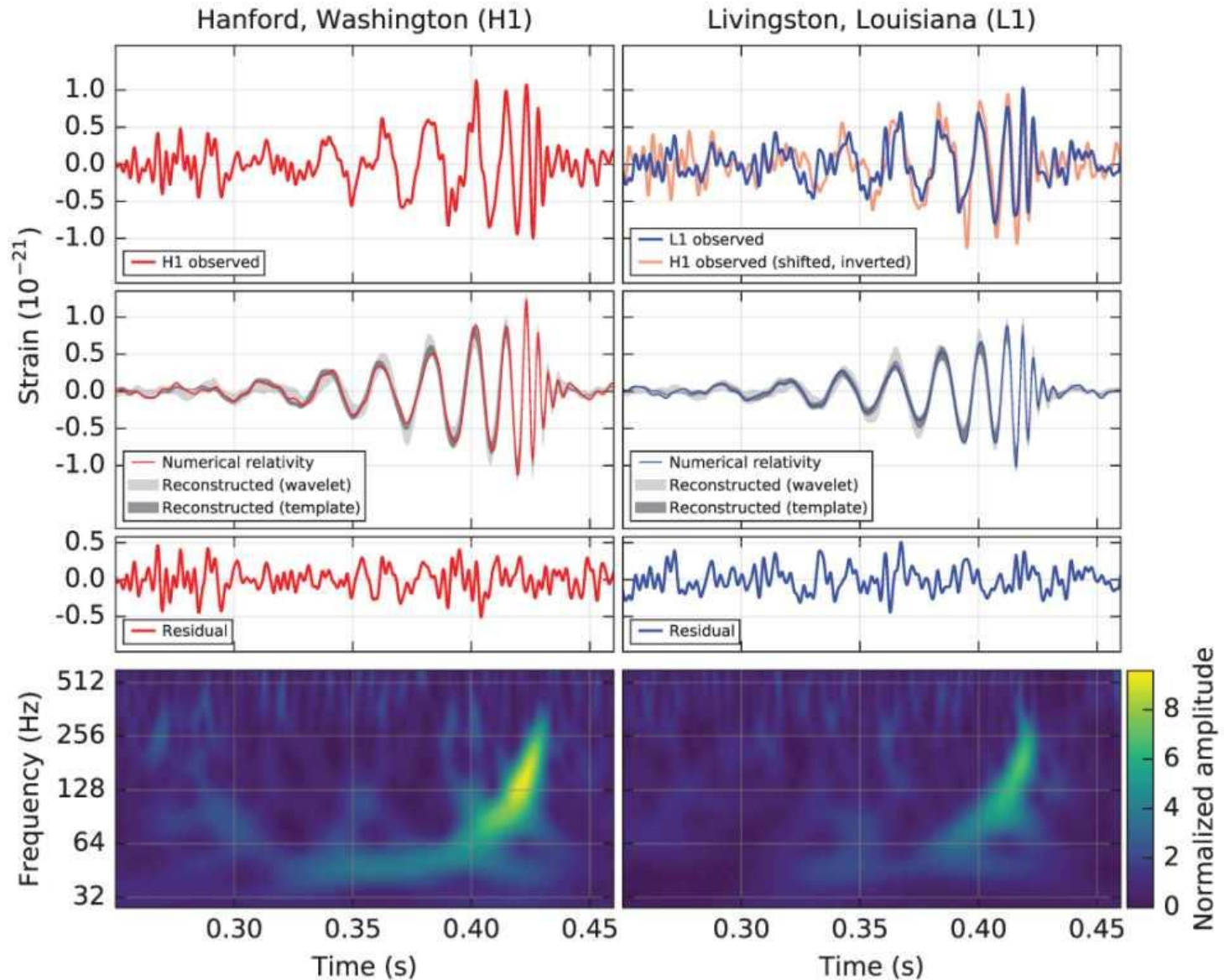
A digital illustration depicting gravitational waves. At the center, two bright blue spheres, representing black holes, are shown in the final stages of a merger, surrounded by glowing, swirling energy. Concentric, wavy rings of light blue and white emanate from this central point, expanding outwards across the frame. The background is a dark, deep space filled with numerous small, distant stars. The overall color palette is dominated by blues, purples, and whites, creating a sense of cosmic scale and dynamic energy.

Гравитационные волны

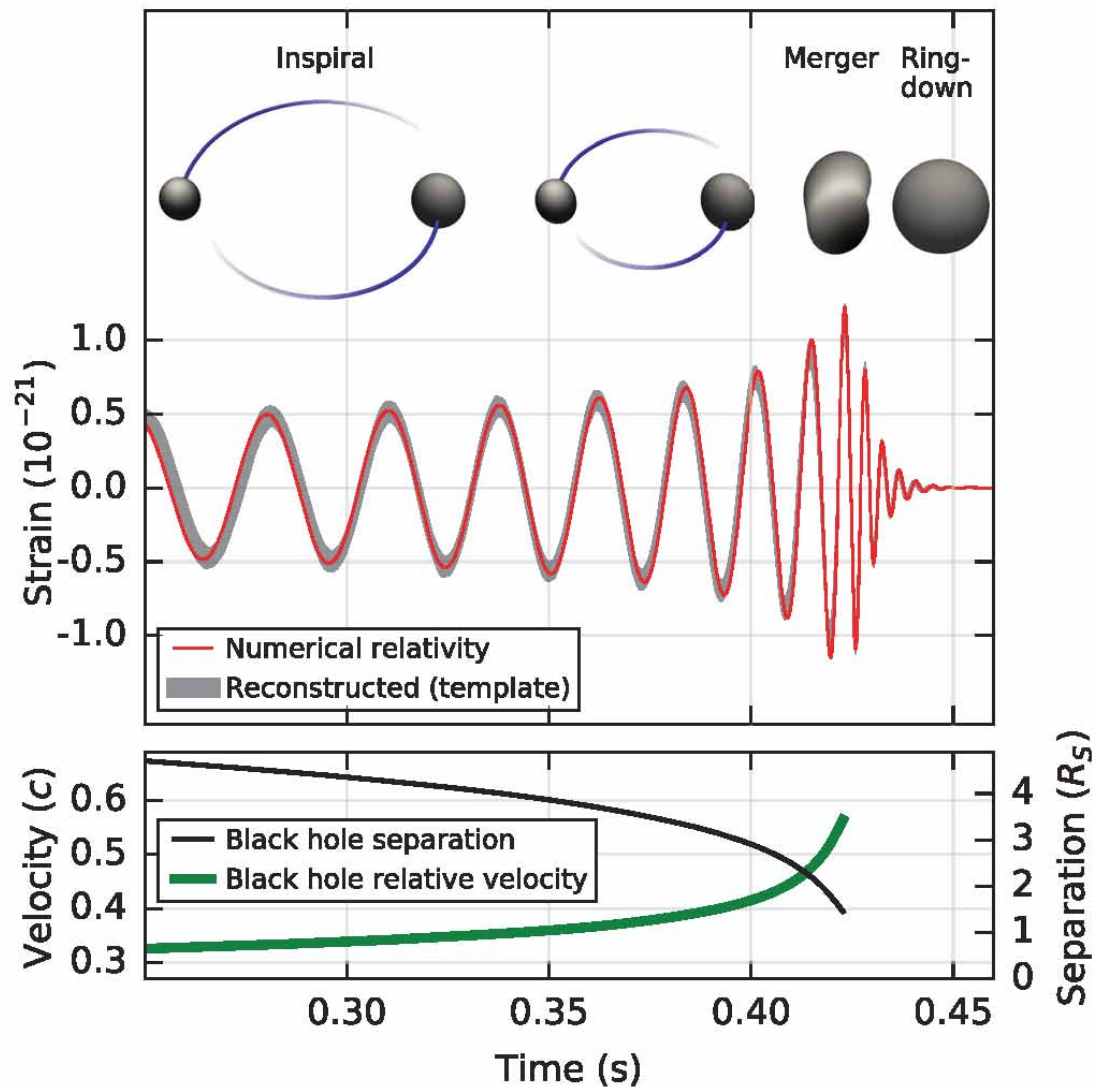
Эксперимент LIGO



Прямое обнаружение гравитационных волн, 11.2.2016

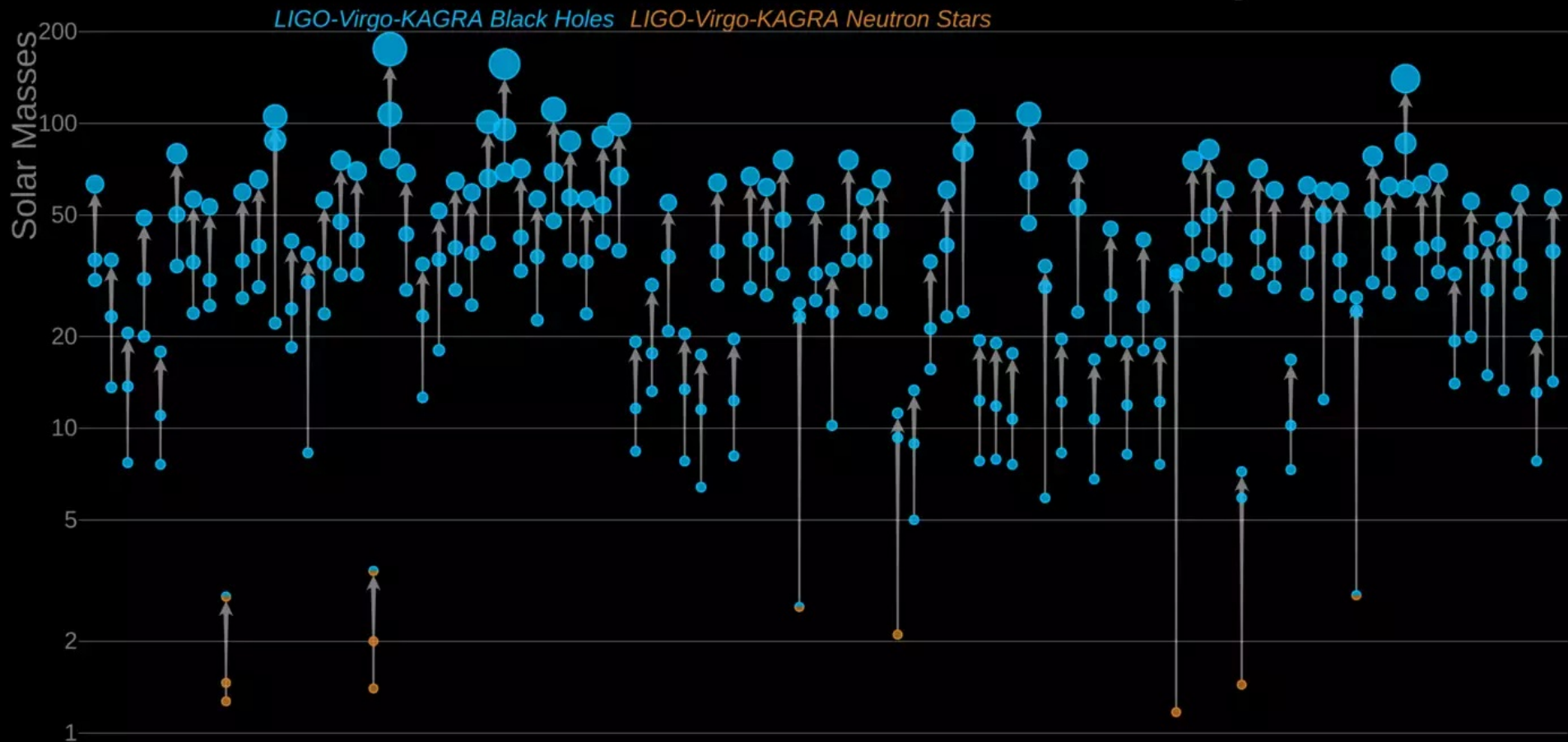


Слияние черных дыр с массами $\sim 30 M_{\text{солн}}$
на расстоянии ~ 1 млрд. свет. лет



2023

Masses in the Stellar Graveyard



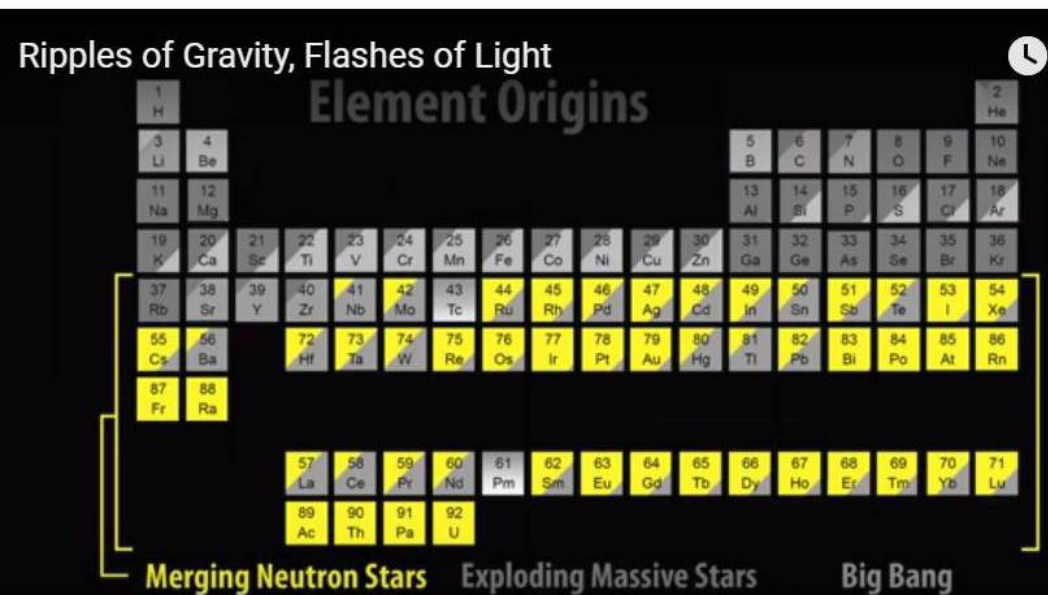
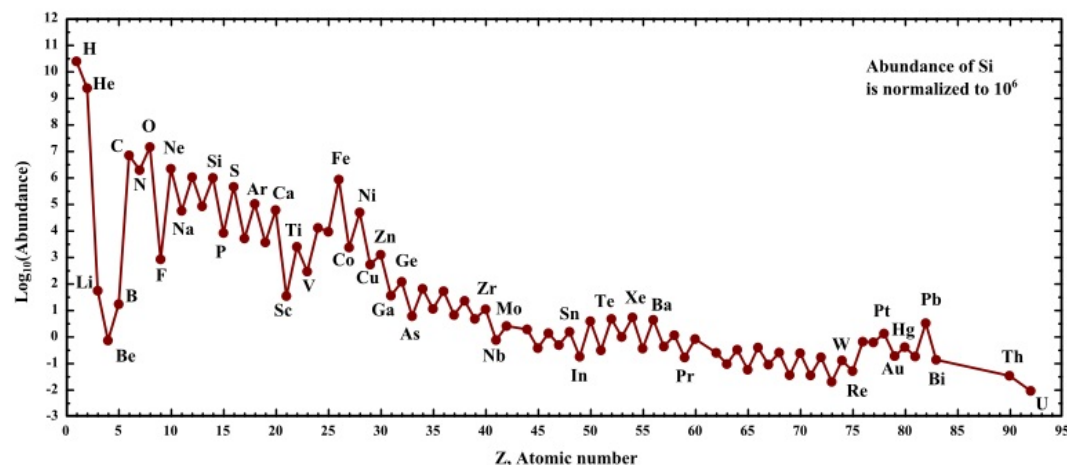
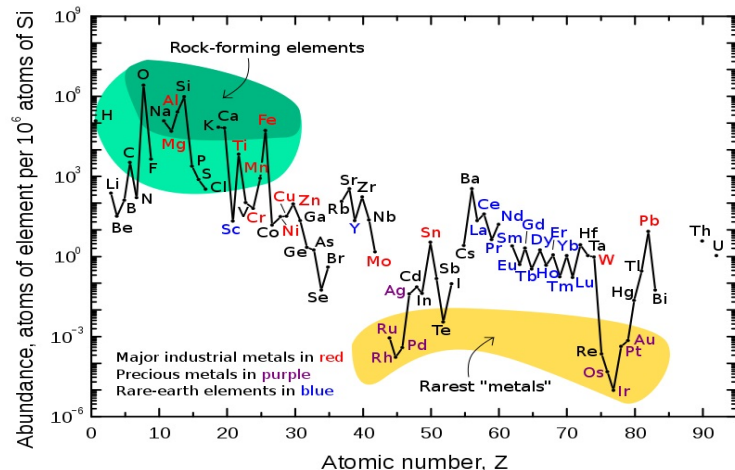
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

Слияние нейтронных звезд является основным механизмом образования элементов тяжелее железа, r-process

Распространенность элементов

В Земной коре

в солнечной системе



Желтым отмечены элементы образующиеся при слиянии нейтронных звезд.

В зарегистрированном событии было выкинуто в пространство золото с массой порядка 20 масс Земли!

Было зарегистрировано характерное свечение «килоновой».

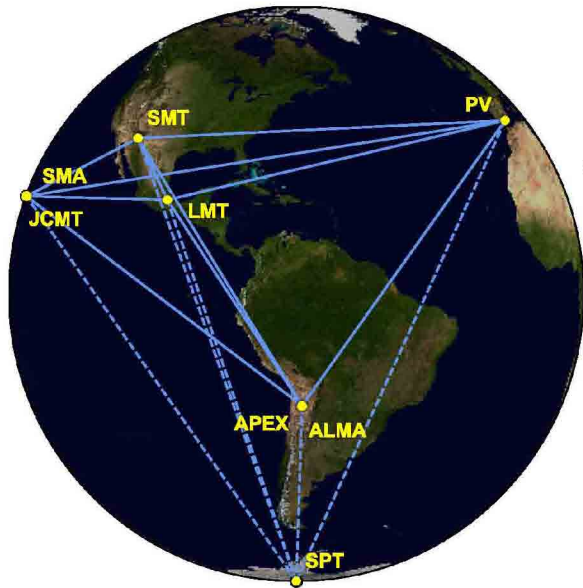
Первое наблюдение горизонта черной дыры (2019)

Угловое разрешение $\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{d}$

$$\lambda \approx 1 \text{ мм}, D \approx 10000 \text{ км}$$

$$\Rightarrow \Delta\theta \approx 10^{-10} \text{ rad}$$

Event Horizon Telescope (EHT)



Эти «фото» впервые доказали, что Ч.Д. действительно имеют горизонт, согласующийся с теорией.

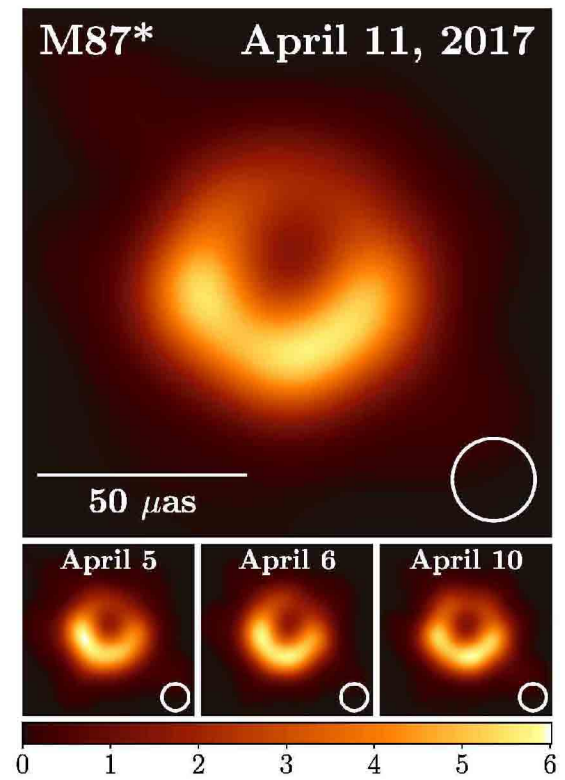
Масса $M \approx (6.5 \pm 0.7) \cdot 10^9 M_{\odot}$

Расстояние $D \approx (16.8 \pm 0.8) \text{ Мпс}$

Угловой размер $\Delta\theta \approx (42 \pm 0.3) \mu\text{as}$
 $\approx 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ rad}$

Полный угловой размер кольца $\Delta\theta \approx 5.2 r_s / D$

Свет дает газ, вращающийся вокруг ч.д. на расстоянии $> 1.5 r_s$ (нам видно кольцо с $r \sim 2.6 r_s$).



Космический телескоп James Webb

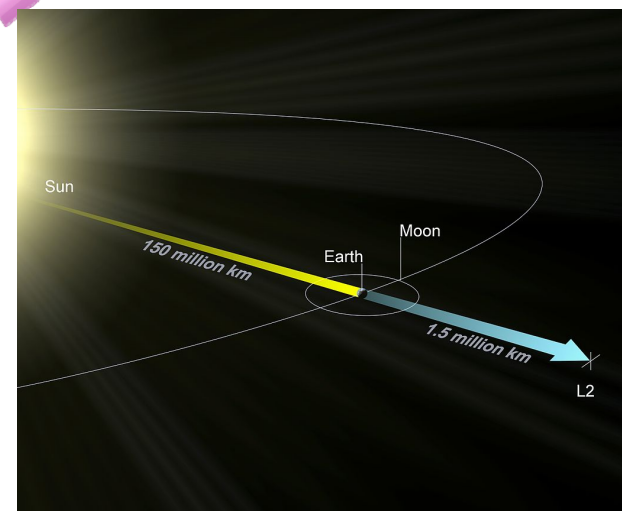
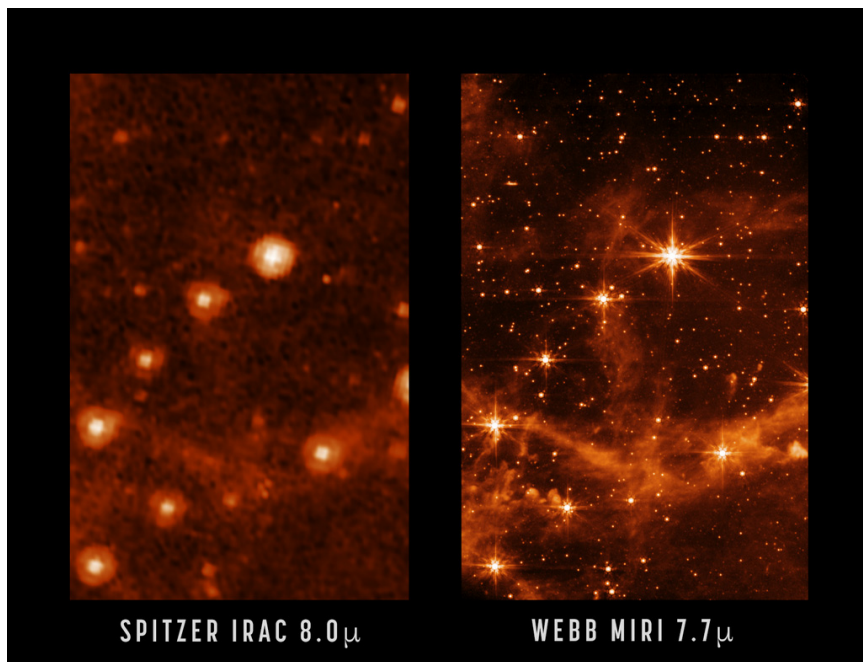
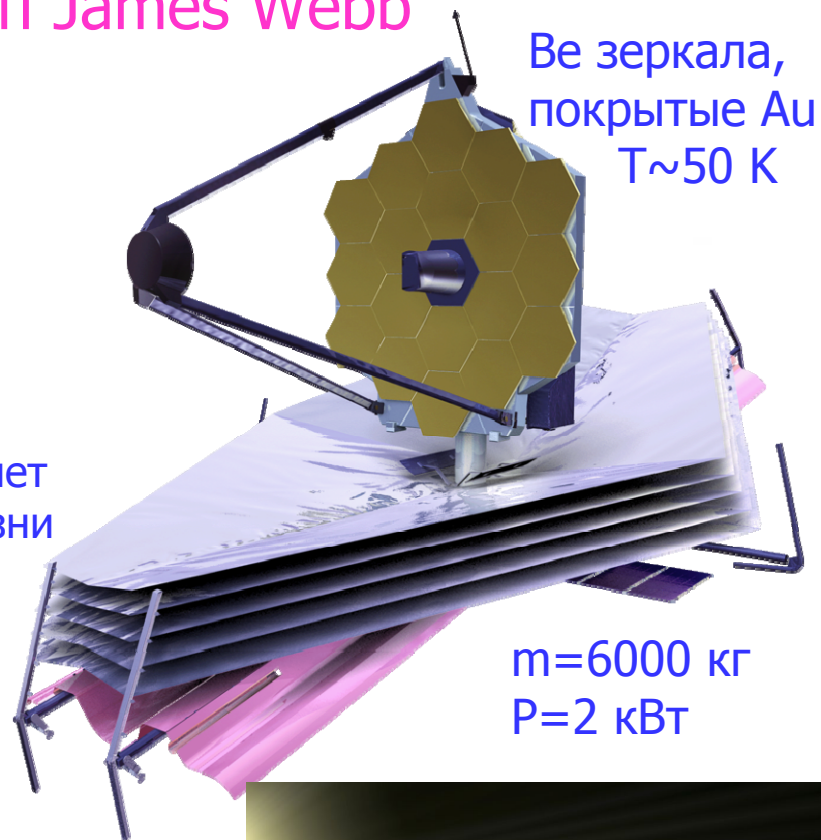
Запущен 25.12.2021 в точке L2

диаметр 6.5 м

$\lambda=0.6-28 \mu\text{m}$

Цели миссии:

- искать свет от первых звезд и галактик
- изучать образование и эволюцию галактик
- изучать звездообразование и формирование планет
- изучать планетные системы и происхождение жизни



Сейчас это самый лучший телескоп, будут открытия!

