

**«Физика ядра»
(в ЛФВЭ и ...)**

С.С. Шиманский (ОИЯИ)

24-25.09.2019

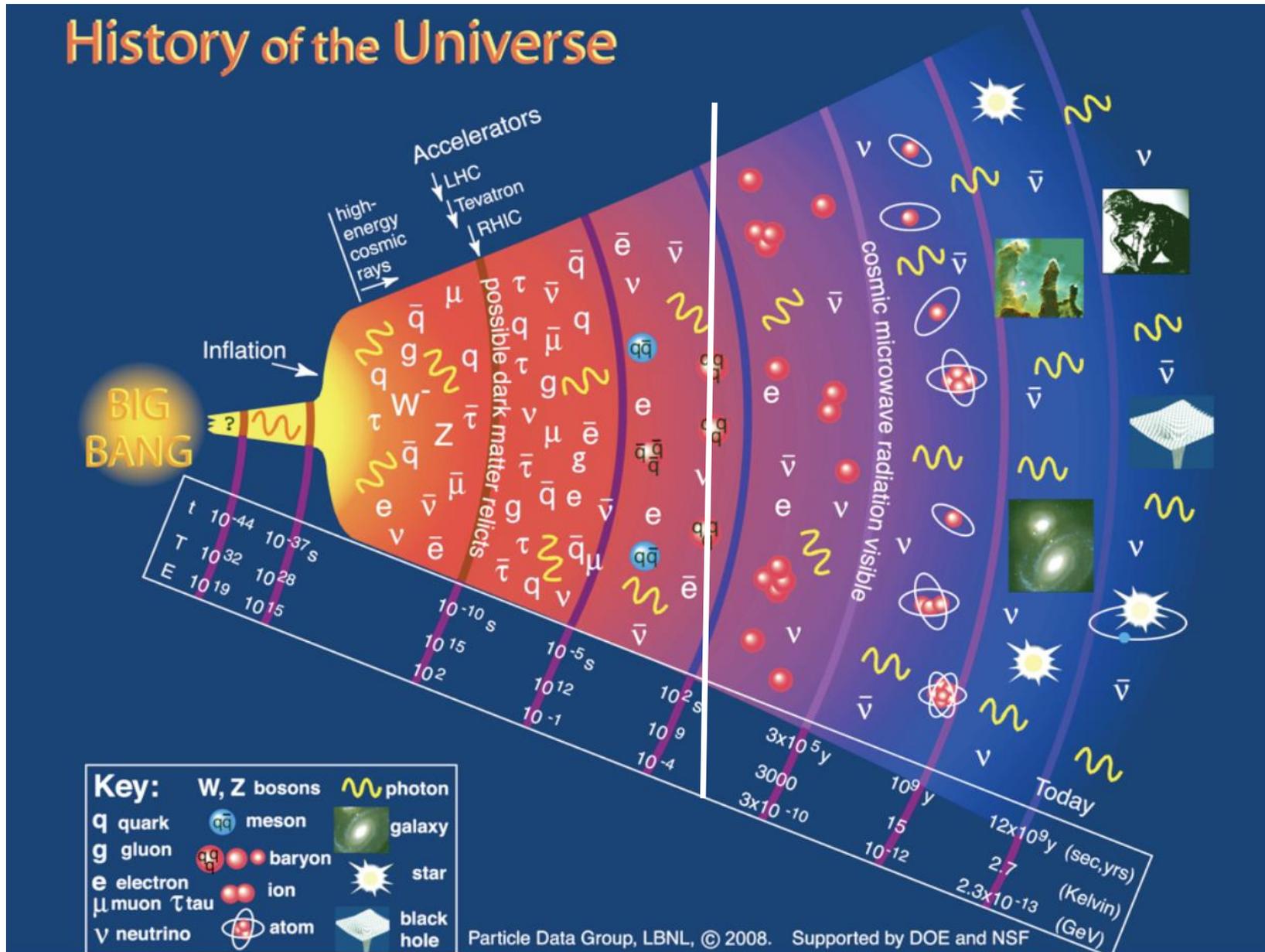
Лекция 2-3

Релятивистская ядерная физика

или

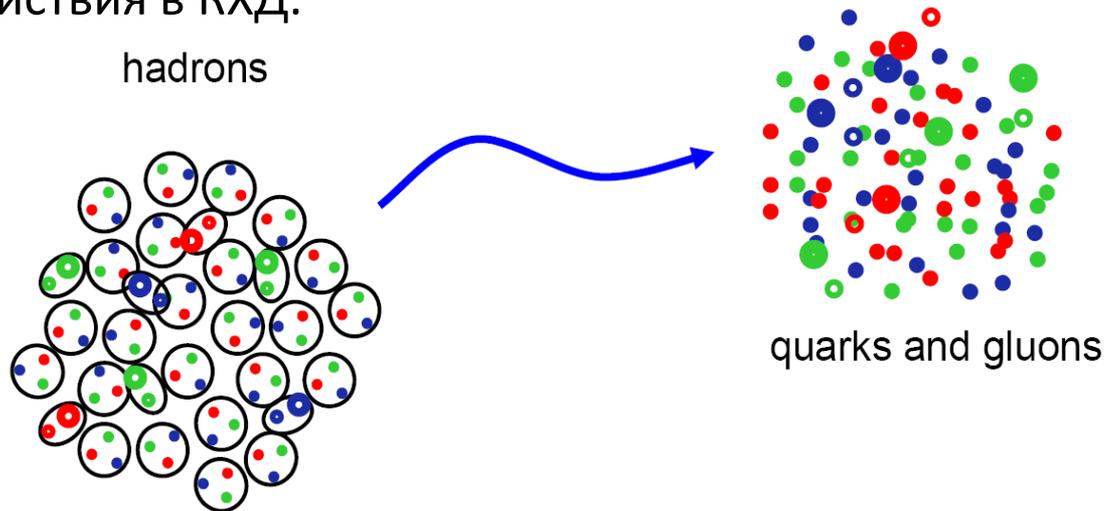
Какие состояния у ядерной
материи(наше нынешнее
непонимание)

Горизонт нашего знания (по Рубакову и К) 1 МэВ!?



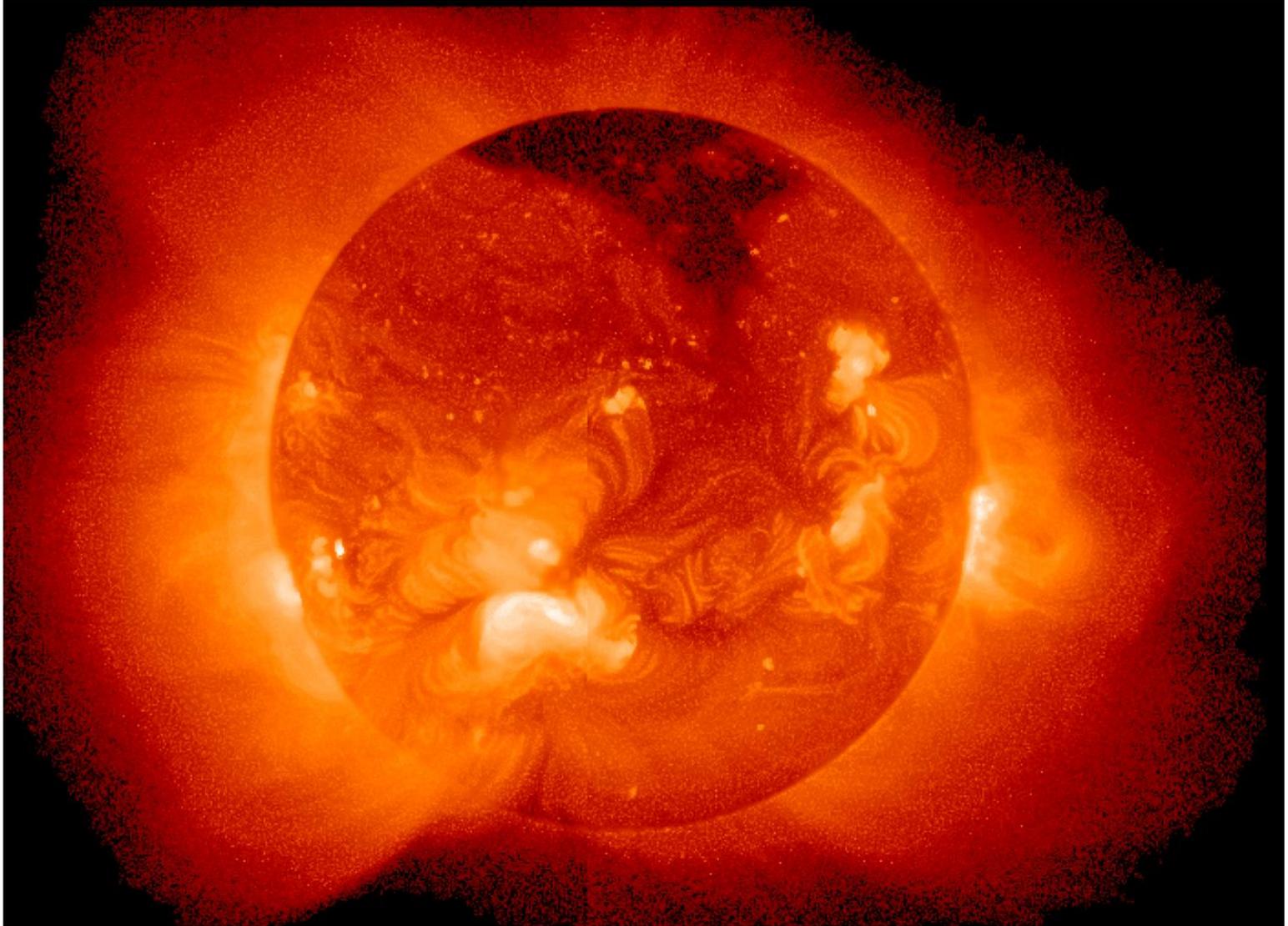
Кварк-глюонная плазма (КГП)

Вычисления на основе КХД предсказывают, что при температуре около 170 МэВ сильно взаимодействующая материя испытывает **фазовый переход** в новое состояние, в котором **кварки и глюоны больше не заперты** в адроны и слабо взаимодействуют между собой, так как при высоких энергиях уменьшается сила взаимодействия в КХД.



На сколько горячо при температуре $T \sim 170$ МэВ ?

Температура в центре Солнца ~ 15 000 000 К(эВ)



Температура КГТ около 170 МэВ

Фазовая диаграмма ядерной материи 40 лет назад и сегодня

RHIC Physics: 3 Lectures*

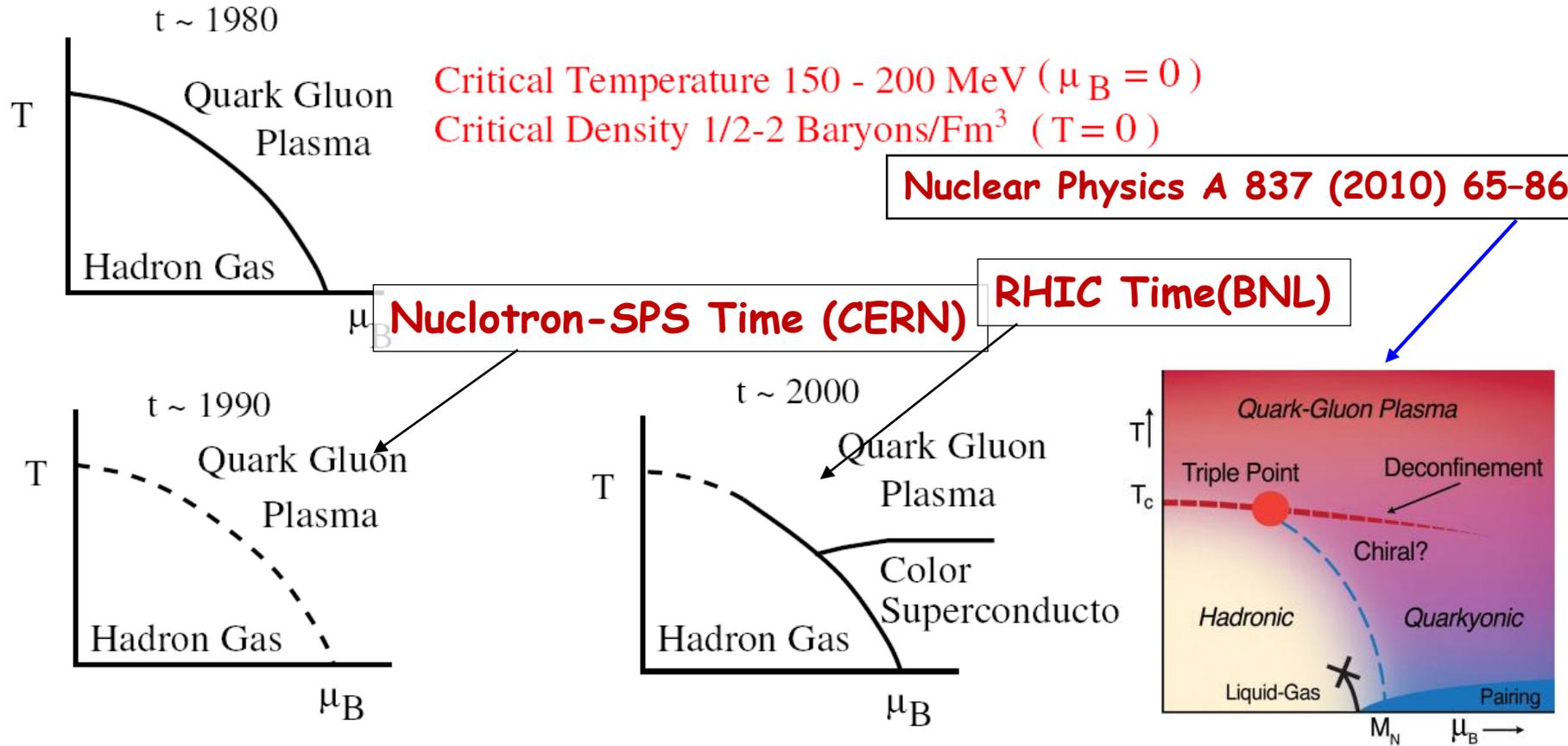
Larry McLerran

Physics Department PO Box 5000 Brookhaven National Laboratory Upton, NY 11973 USA

September 13, 2003

+ CERN Yellow Report
2007-005, p.75
2008-005

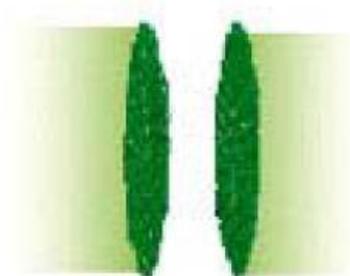
The Evolving QCD Phase Transition



Горячая ядерная материя.

Столкновения тяжелых ионов – АА-столкновения

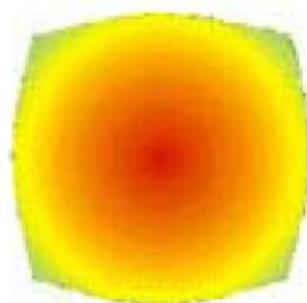
Столкновение релятивистских ядер



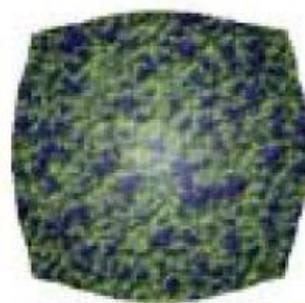
CGC



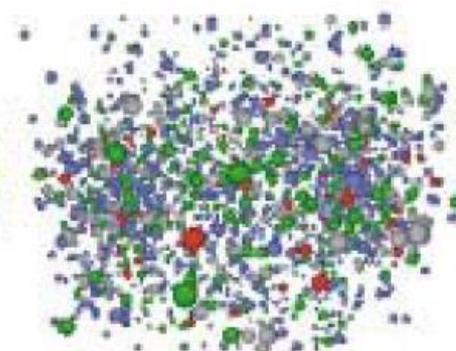
Initial
Singularity



Glasma

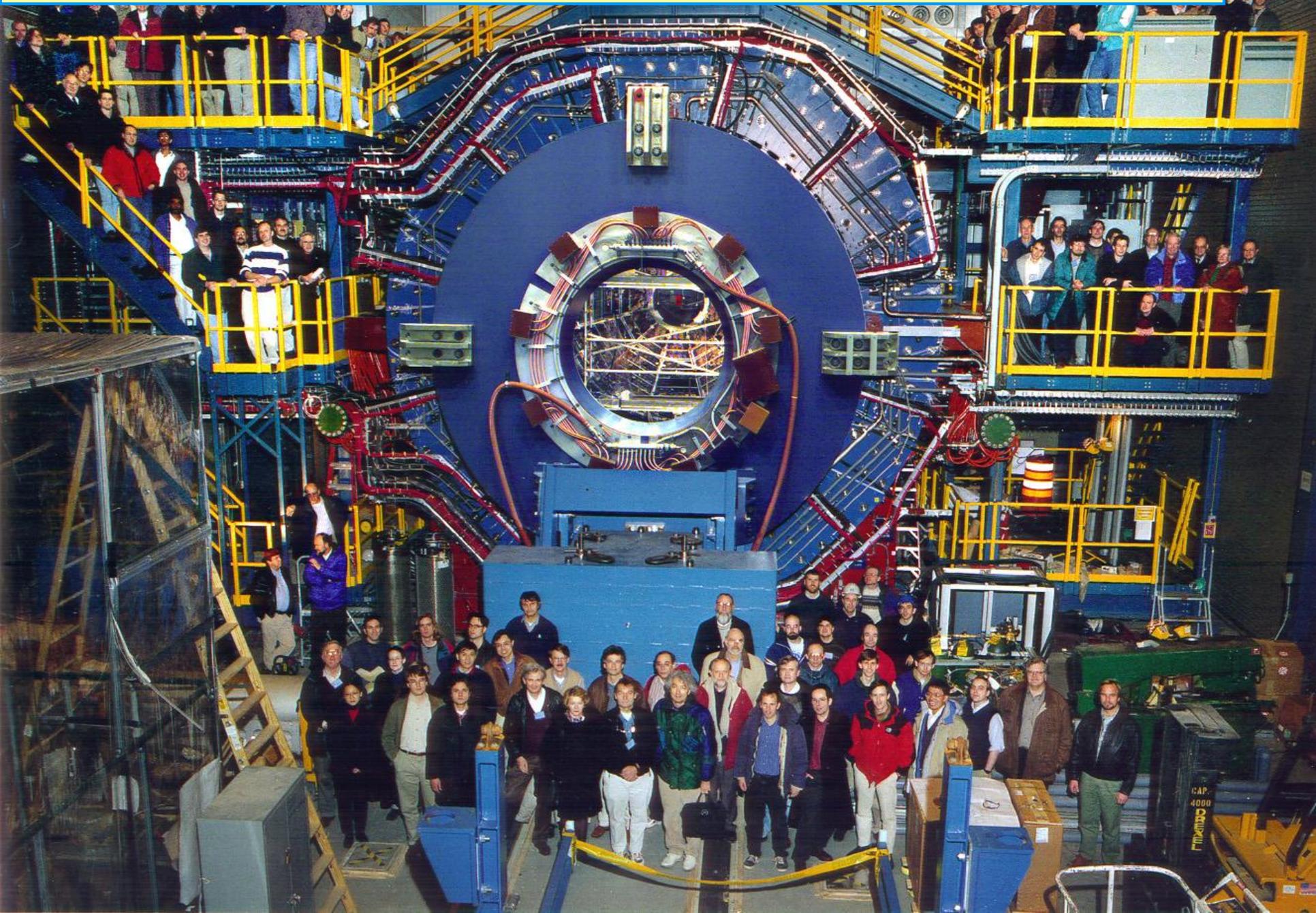


sQGP

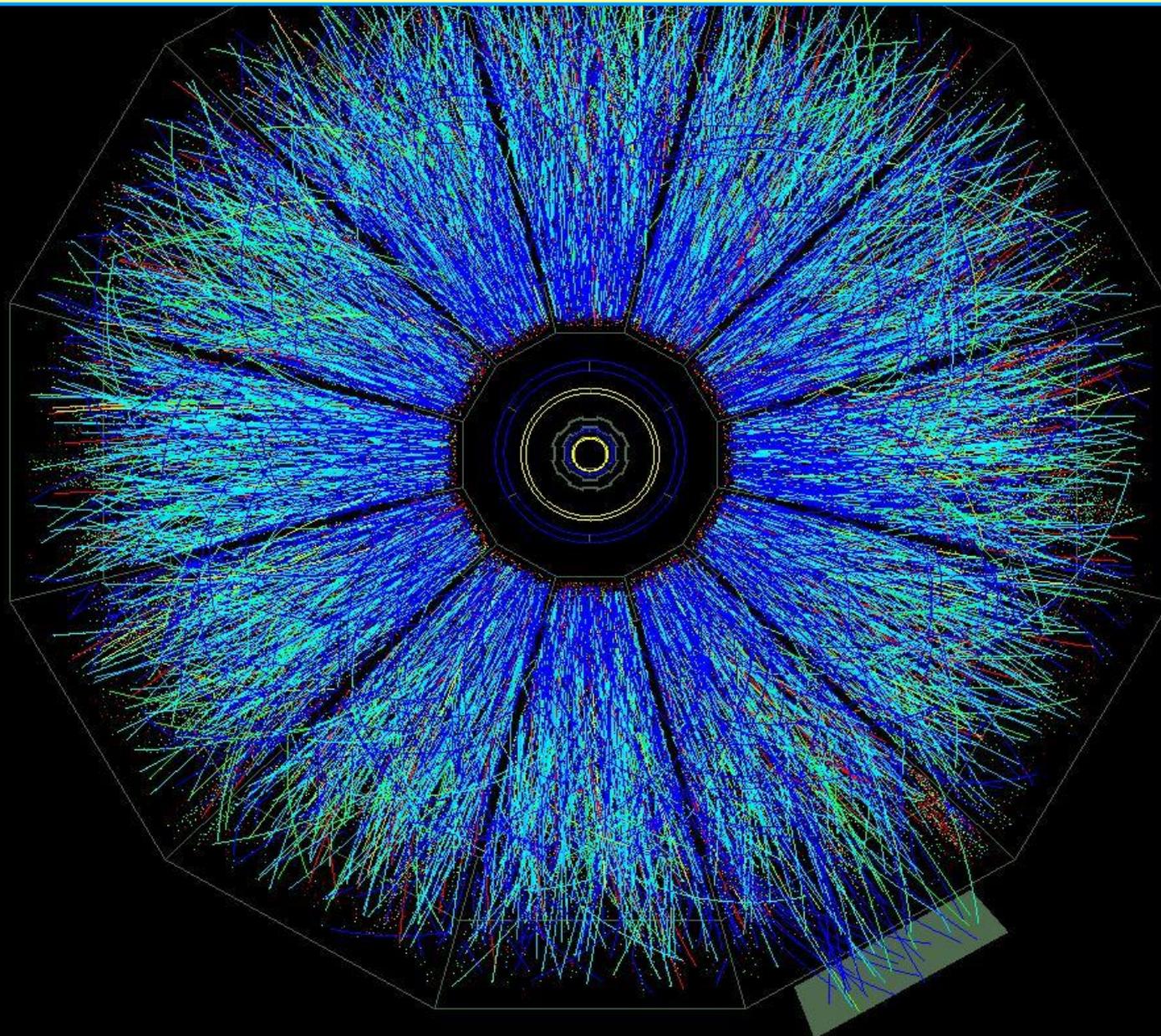


Hadron Gas

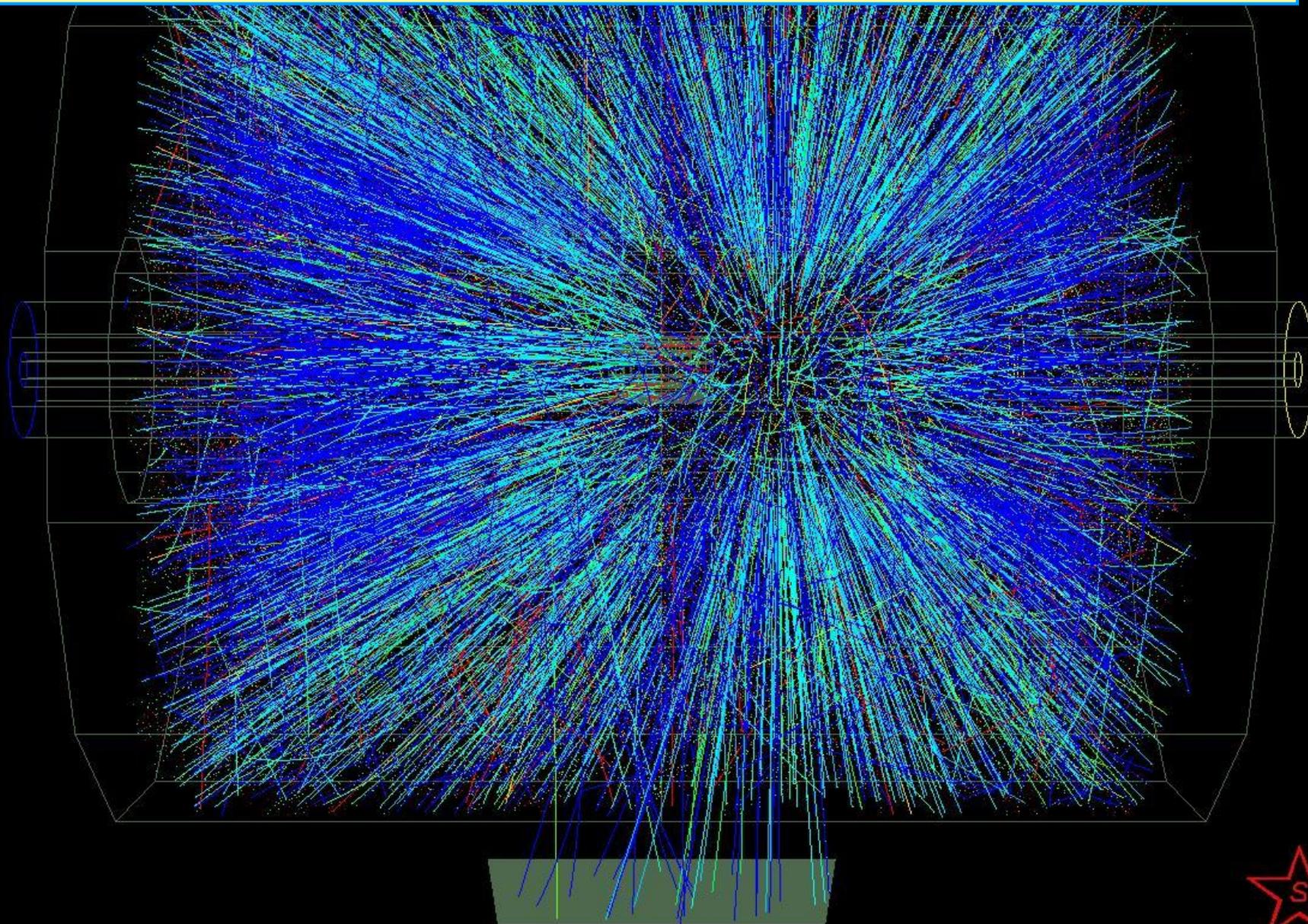
Установки STAR, работающая на ускорителе RHIC (БНЛ, США)



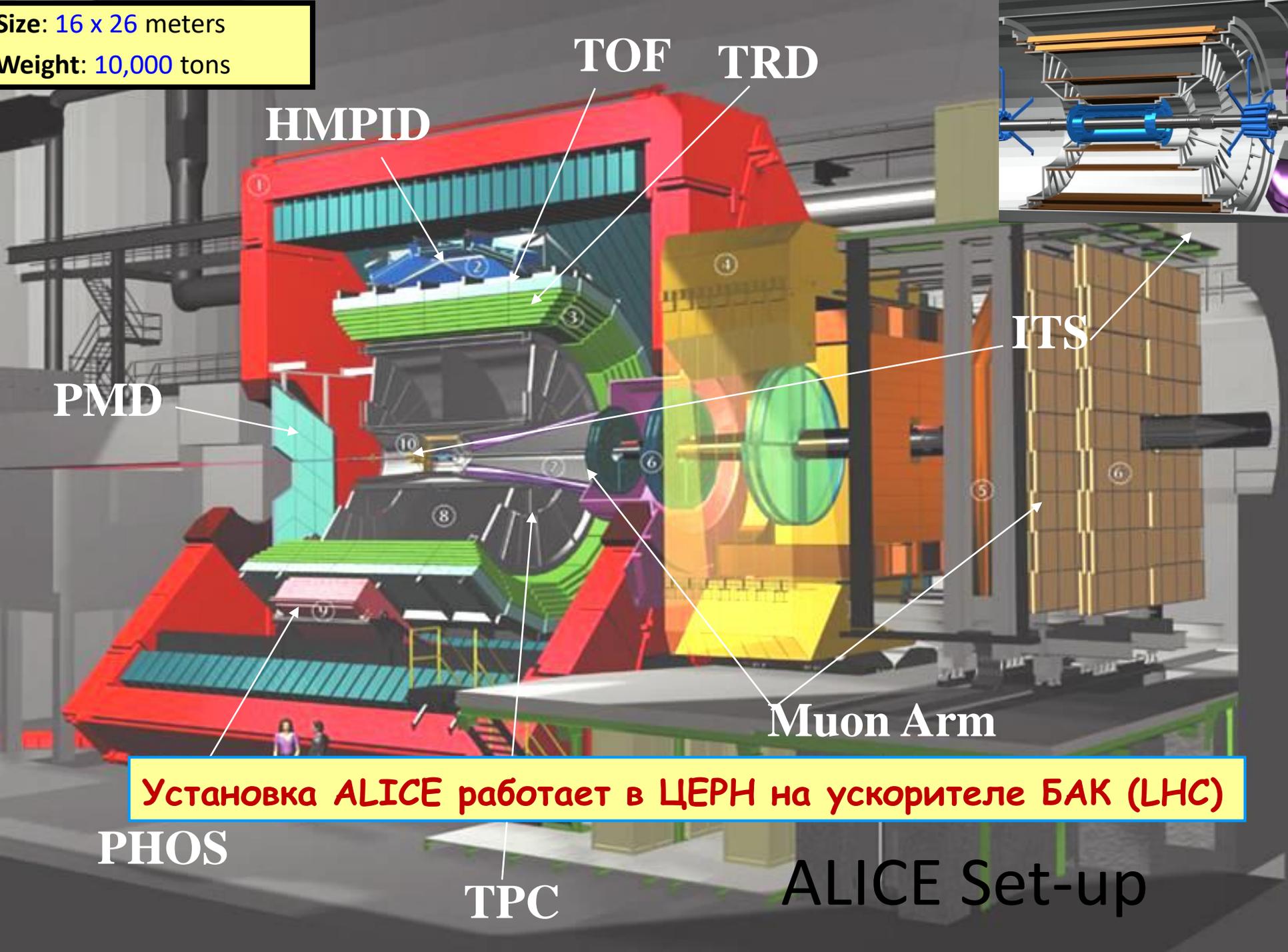
Изображение центрального столкновения Au-Au в ТРС
установки STAR, работающей на ускорителе RHIC (БНЛ, США)



Изображение центрального столкновения Au-Au в ТРС
установки STAR, работающей на ускорителе RHIC (БНЛ, США)



Size: 16 x 26 meters
Weight: 10,000 tons



TOF TRD

HMPID

PMD

ITS

Muon Arm

Установка ALICE работает в ЦЕРН на ускорителе БАК (LHC)

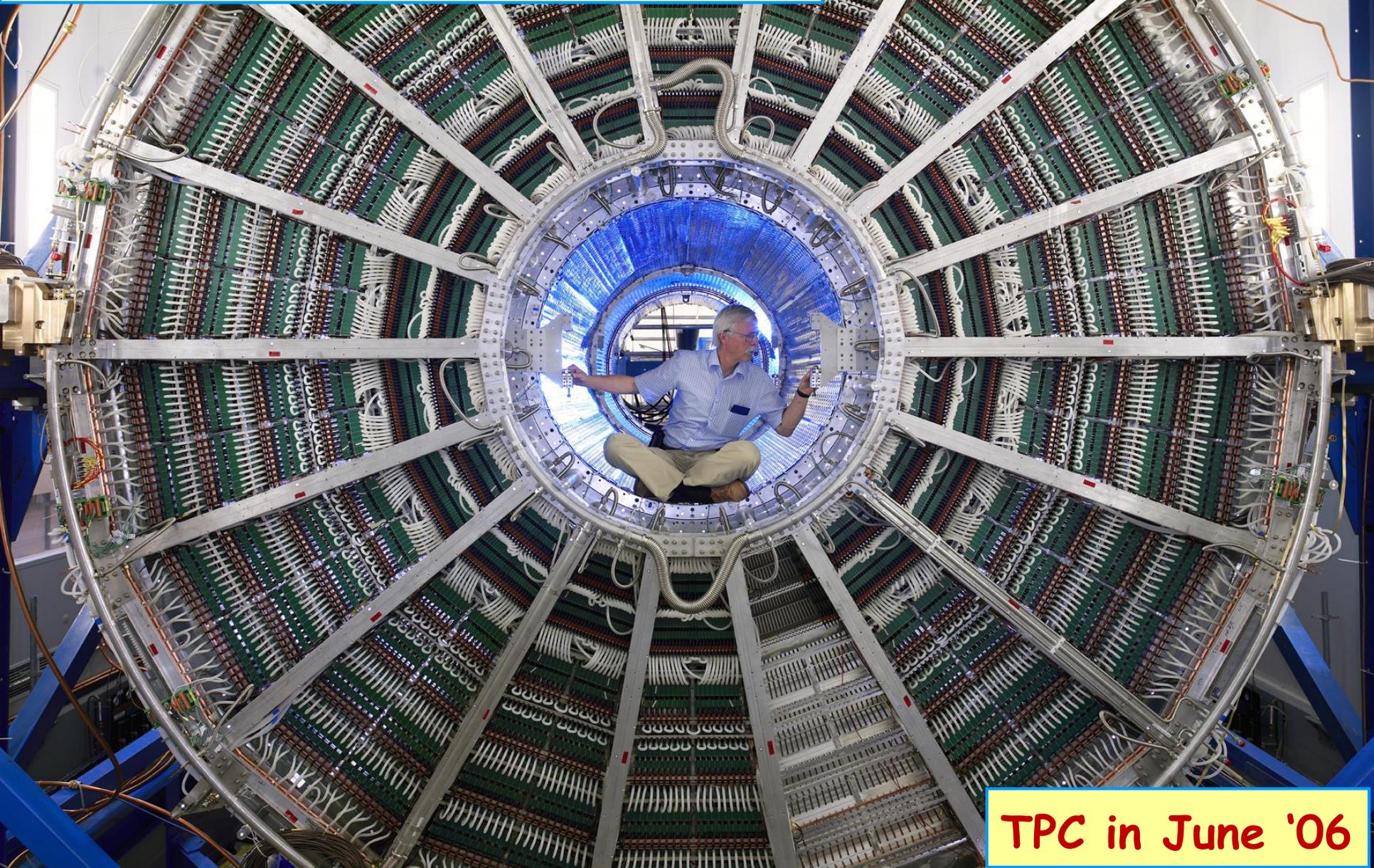
PHOS

TPC

ALICE Set-up

Установка ALICE

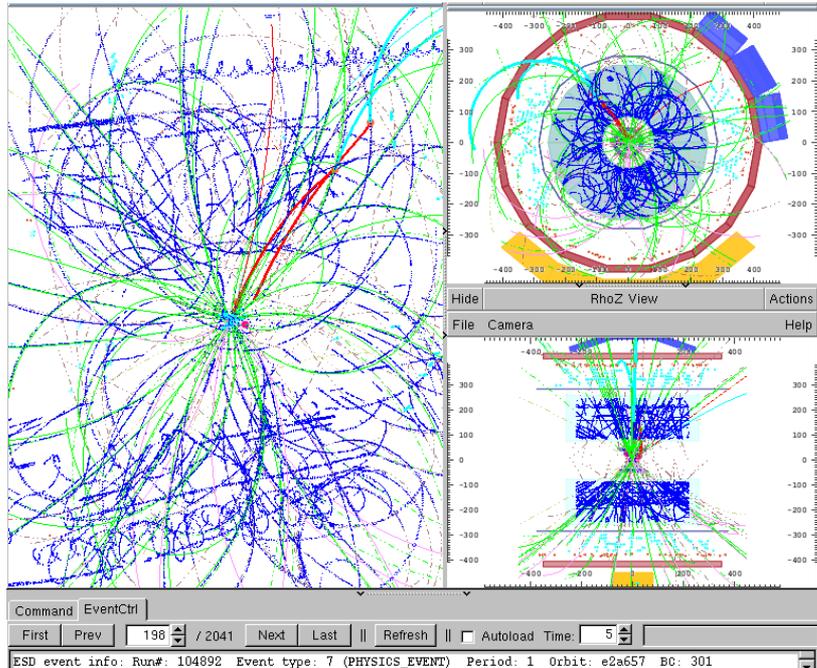
время-проекционная камера (TPC)



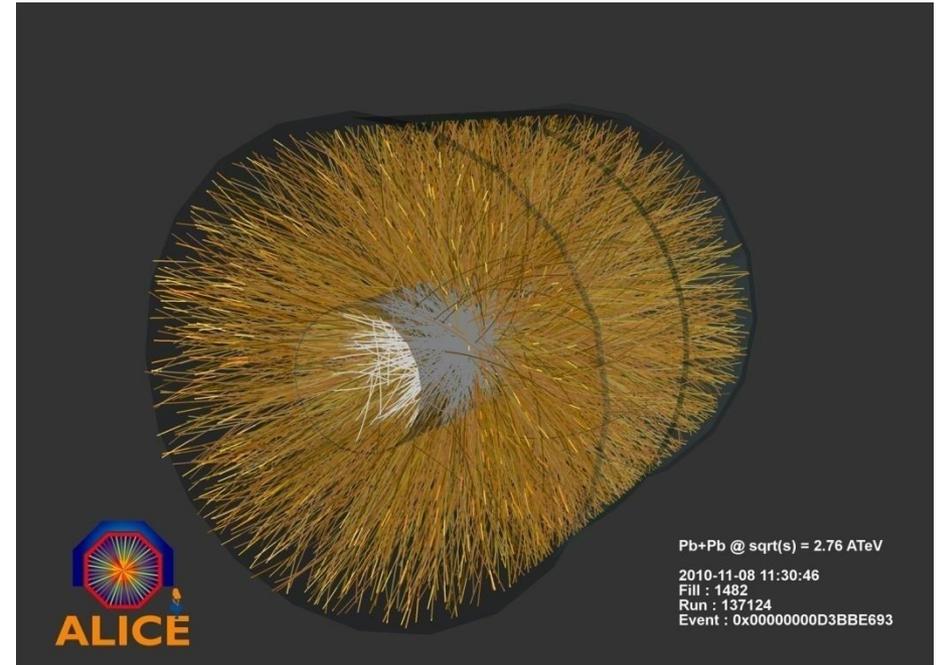
TPC in June '06

Изображения событий с рождением ~ 100 частиц в pp-столкновении и $\sim 10\,000$ частиц в AA-столкновении на установке ALICE

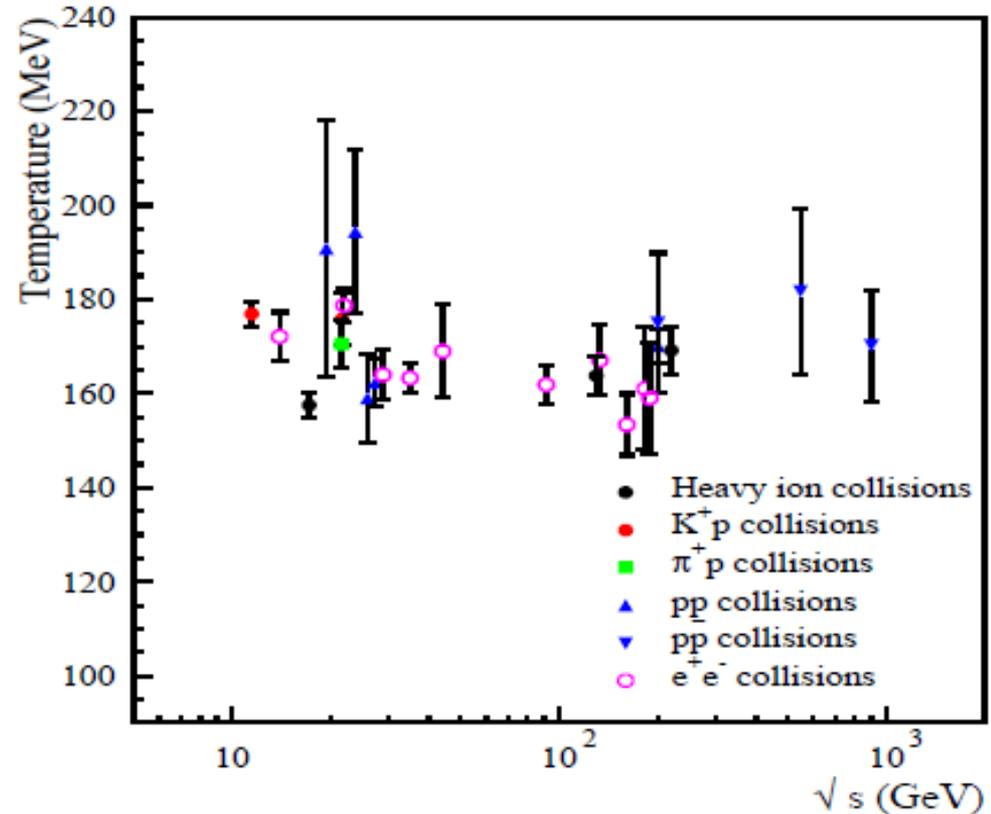
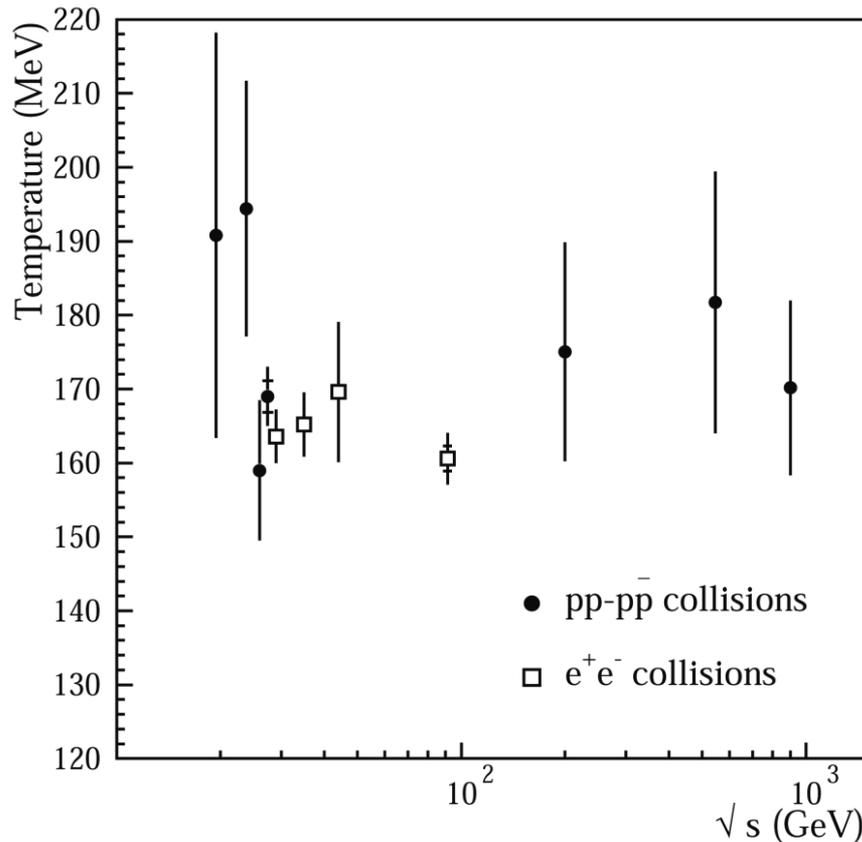
in p-p at 7 TeV



in Pb-Pb at 2.76 A·TeV



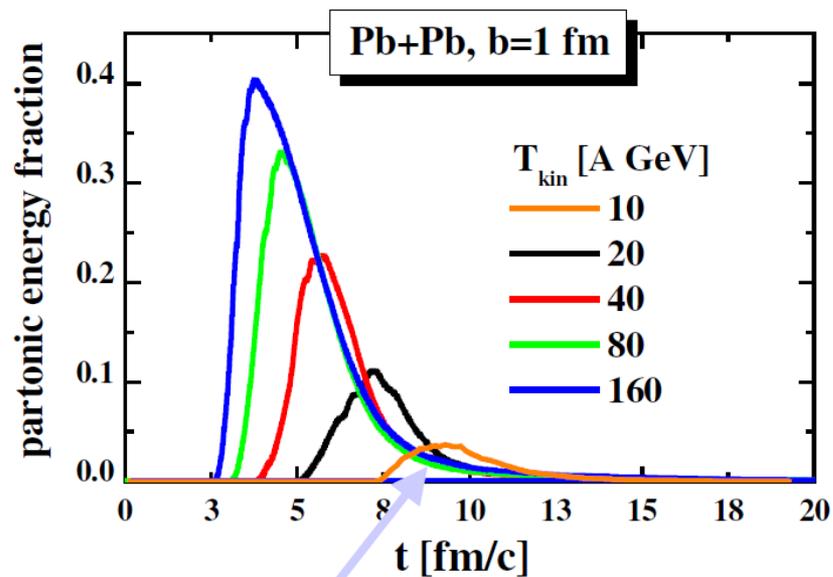
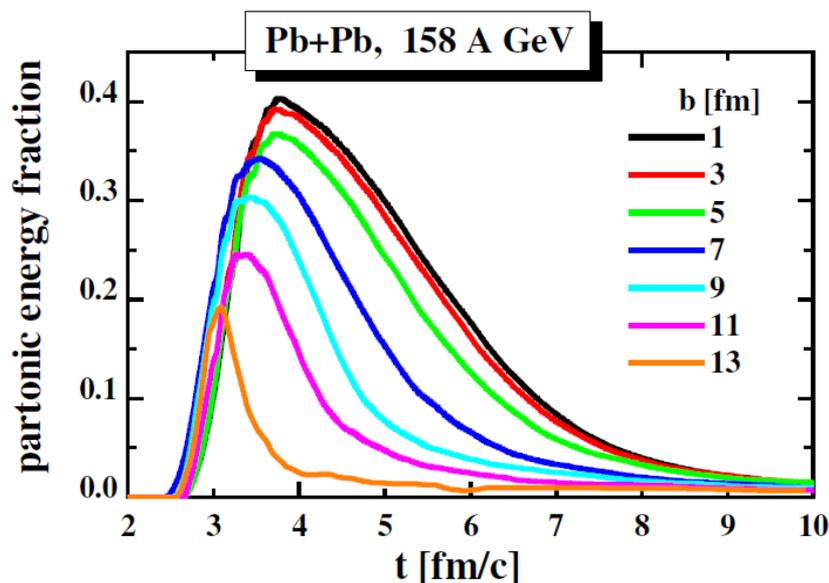
Температуры образующейся материи в различных столкновениях при высоких энергиях.



- **$T \approx 170$ MeV** (good old Hagedorn temperature)
- **T_{ch} does not (or only weakly) depends on \sqrt{s}**
- **Universal hadronization mechanism at critical values ?**

Доля партонной (кварк-глюонной) фазы образующейся при разных прицельных параметрах (расстояние между центрами сталкивающихся ядер) и энергиях столкновений для ядер свинца.

partonic energy fraction vs centrality and energy



Dramatic decrease of partonic phase with decreasing energy and centrality

Некоторые наблюдаемые легче интерпретировать чем другие ...



Холодная плотная ядерная материя

Пример бесполезной сжатой холодной ядерной материи



Как современные теоретические модели видят состояние ядерной материи в центре массивных звёзд, когда плотность в разы больше обычной ядерной плотности.

astro-ph/0604422 v1 20 Apr 2006

Strangeness in Neutron Stars

FRIDOLIN WEBER,* ALEXANDER HO† RODRIGO P. NEGREIROS‡
PHILIP ROSENFELD§

$H \sim 10^{16} \text{ Gs}$

$E \sim 10^{19} \text{ V/cm}$

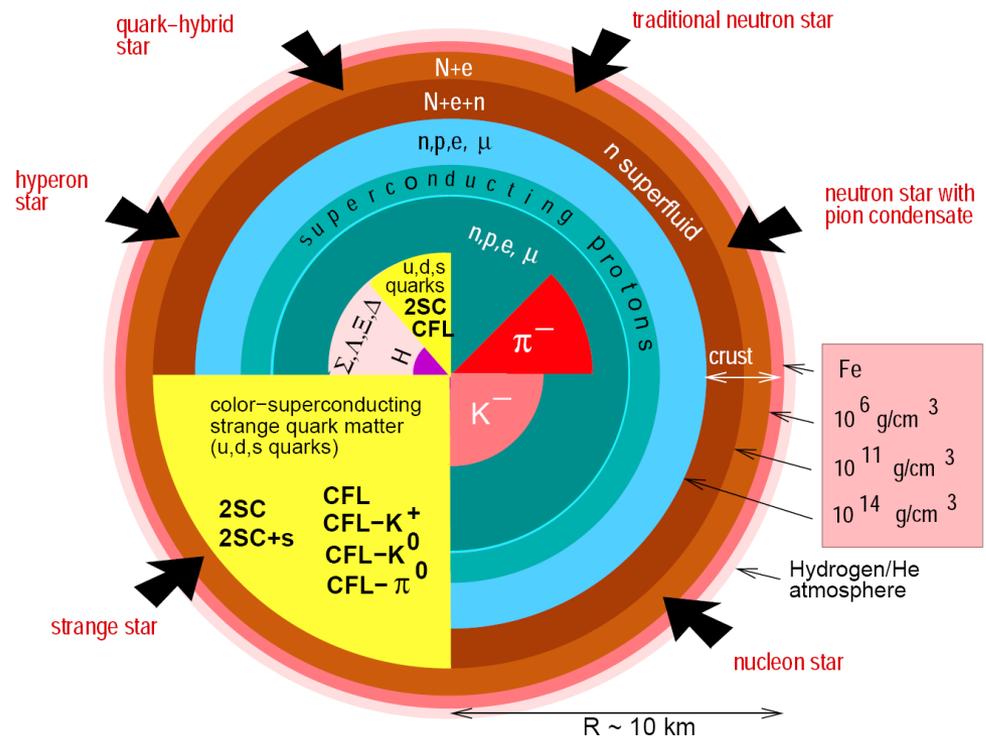


Fig. 1. Competing structures and novel phases of subatomic matter predicted by theory to make significant range of chemical potentials and strange quark masses⁵¹. If the strange quark mass is heavy enough to be ignored, then up and down quarks may pair in the two-flavor superconducting (2SC) phase. Other possible condensation patterns

color-superconducting strange quark matter (u,d,s quarks)

K. Rajagopal and F. Wilczek, *The Condensed Matter Physics of QCD*, At the Frontier of Particle Physics / Handbook of QCD, ed. M. Shifman, (World Scientific) (2001).
M. Alford, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **51** (2001) 131.

Холодная плотная ядерная фаза, не создается, скорее всего, в процессе столкновения тяжелых ядер.

Можем ли мы в лаборатории исследовать холодную компоненту ядерной материи и где эта компонента проявляется как физическая реальность?

**Кумулятивные процессы,
открывают возможность
исследовать холодную
плотную ядерную материю**

Первая работа А.М. Балдина высказавшая идею о существовании в ядре конфигураций содержащих несколько нуклонов, которые ведут себя как точечный объект.

Краткие сообщения по физике № 1 январь 1971

МАСШТАБНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ АДРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКОМ УСКОРЕНИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

А. М. Балдин

Пучки частиц высоких энергий по последнее время получались исключительно на протонных и электронных ускорителях, т.е. при ускорении частиц, обладающих единичным зарядом. Ускорение частиц, обладающих зарядом большим единицы, как известно, в принципе дает возможность получить энергию ускоряемых частиц (при одинаковых параметрах ускорителя) большую, чем энергия протонов, в число раз, равное кратности заряда. Так, например, на Дубненском синхрофазотроне, рассчитанном на получение протонов с энергией 10 Гэв, можно получить ядра гелия с энергией 20 Гэв, а ядра неона (заряд 10 е) с энергией 100 Гэв. Возникает естественный вопрос, не получатся ли в результате столкновения с мишенью ядер, например, неона, обладающих энергией 100 Гэв, пучки вторичных частиц, полученные пока только на Серпуховском ускорителе? Утвердительный ответ на этот вопрос означал бы, что с помощью ускорения тяжелых ядер, обладающих более высоким зарядом, можно было бы сравнительно дешевым способом в короткие сроки получить пучки частиц рекордно высоких энергий.

Цель настоящей заметки – рассмотреть этот вопрос и сделать определенные предсказания.

Обычно на вопрос о возможности передачи большой энергии составным ядром отдельному (например, спо-

Название кумулятивные процессы пошло из этой публикации

Выражаю глубокую благодарность С. Б. Герасимову, А. Б. Говоркову и Г. Н. Флерову за обсуждение изложенных соображений. Как мне стало известно, Г. Н. Флеров еще несколько лет назад высказывал мысль о возможных кумулятивных эффектах при соударении релятивистских ядер.

Поступила в редакцию
11 ноября 1970 г.

Основной особенностью кумулятивных процессов является образование частиц в кинематической области запрещенной для кинематики с участием свободных нуклонов (протонов и нейтронов). Изучение рождения частиц в кумулятивной кинематической области позволило определить вероятности присутствия в ядрах 2-х, 3-х и более тяжелых нуклонных (многокварковых) конфигураций, которые назвали флуктонами.

Независимые исследования рассеяния электронов на ядрах (эксперименты аналогичные опытам Резерфорда) также определили вероятности существования в ядрах многонуклонных (многокварковых) конфигураций. Сравнение результатов этих двух независимых исследований для углерода показаны на следующем слайде.

Очень хорошее совпадение полученных результатов доказывает факт существования в ядрах многонуклонных (многокварковых) конфигураций.

Сравнение данных о структуре ^{12}C при исследованиях спектров возбуждения и рассеяния электронов на ядрах

RNP - program at JINR

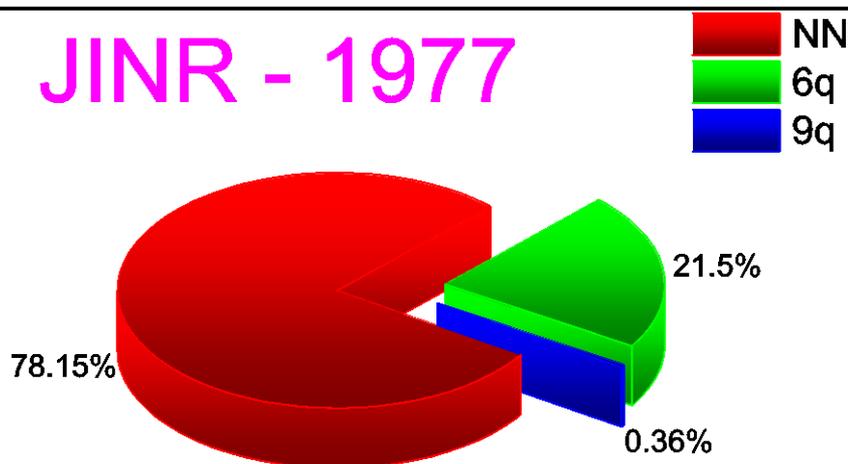
eA - program at JLab

V.V.B., V.K.Lukyanov, A.I.Titov, PLB, 67, 46(1977)

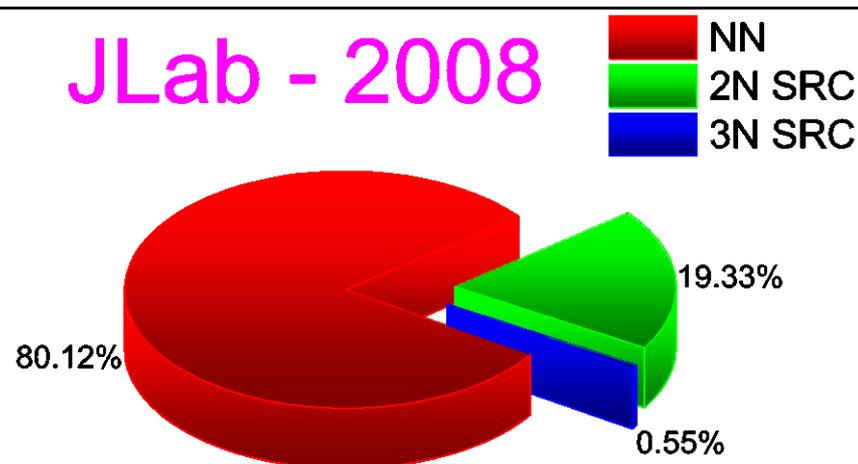
R.Subedi et al., Science 320 (2008) 1476-1478

e-Print: arXiv:0908.1514 [nucl-ex]

JINR - 1977



JLab - 2008

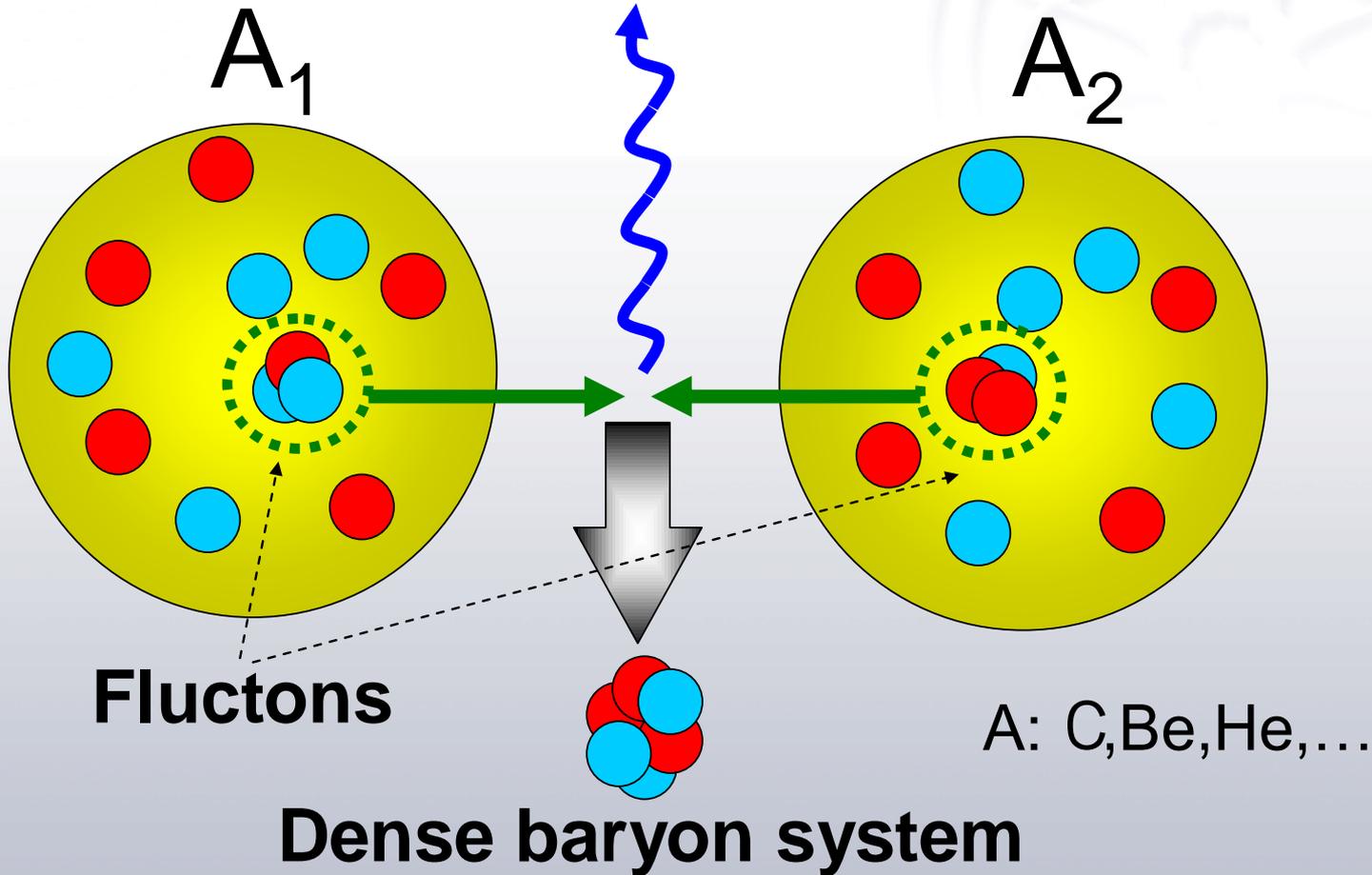


Если мы доказали существование многоуклонных (многокварковых) конфигураций, следующая задача исследовать природу и свойства этой компоненты

ИТЭФ(Москва) предложение -
«синтезировать» флуктоны с
максимальным числом нуклонов.

Флуктон-флуктонные
взаимодействия

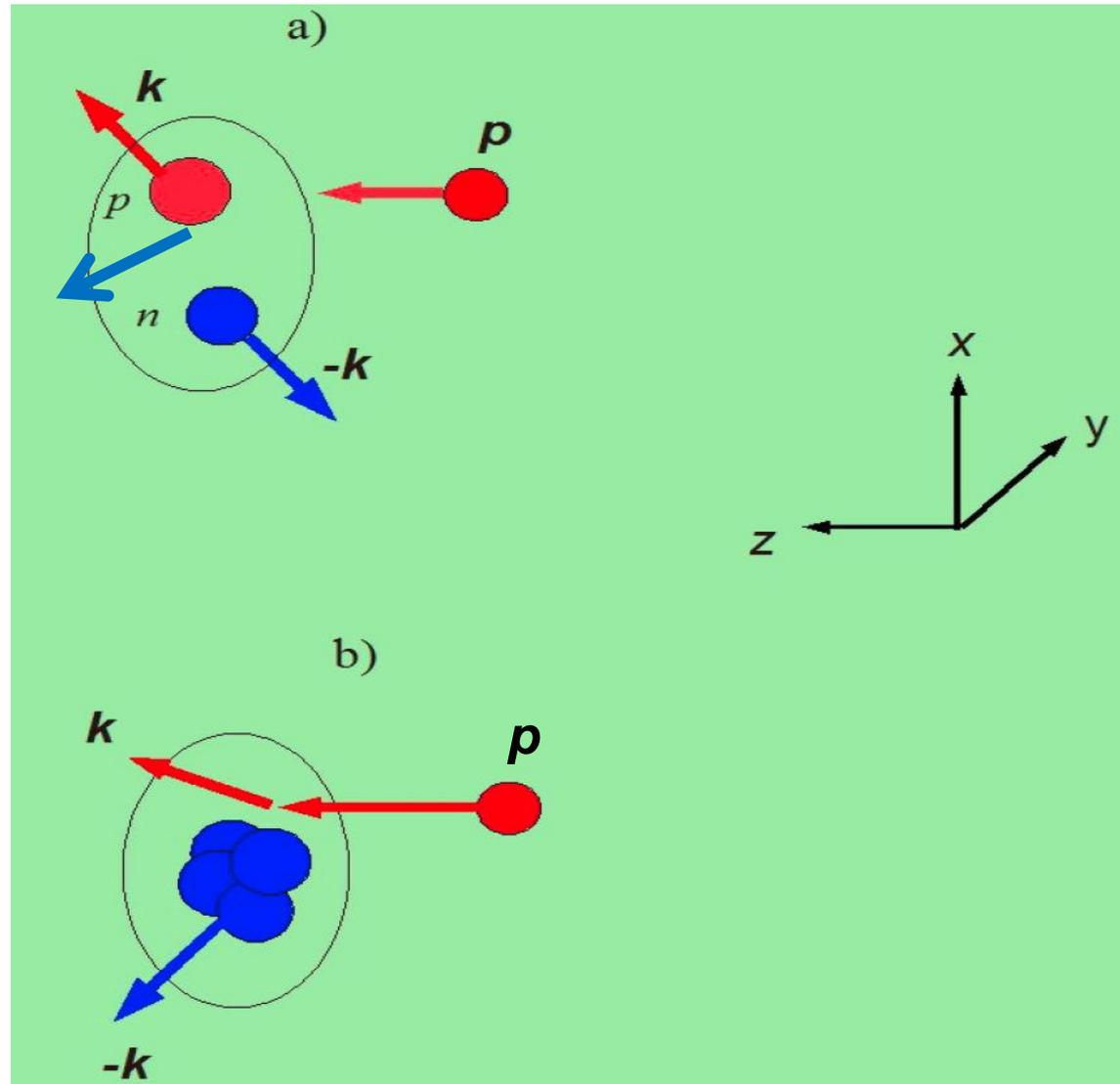
$\pi, \gamma, \gamma(\pi^0), \dots$ high p_t



Механизмы кумулятивных процессов и среднее число выбиваемых нуклонов (барионов) $\langle V \rangle$

Точечные нуклоны на малых расстояниях и большими относительными импульсами

$$\langle V \rangle \sim 1$$



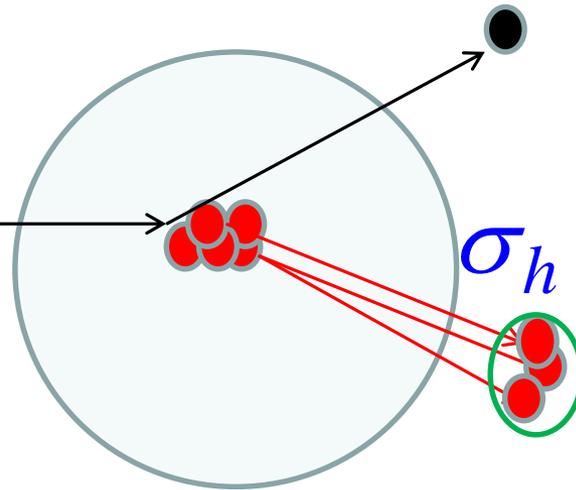
$$\langle V \rangle ?$$

Флуктоны. Среднее число барионов зависит от свойств флуктона.

Среднее число барионов для флуктонов с разными свойствами

$$\langle B \rangle > 1$$

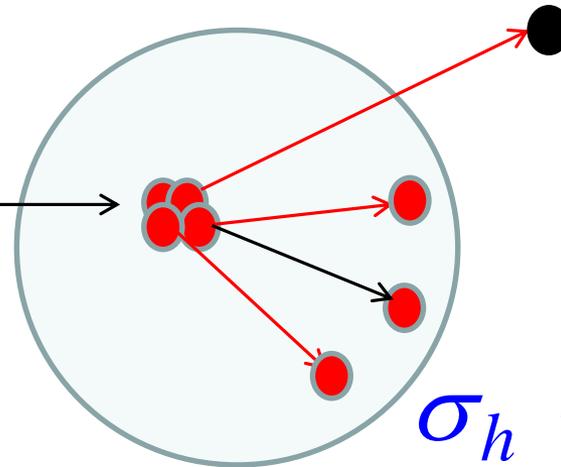
«Холодные» флуктоны – меньшие ядра в сжатой конфигурации. Выбивание лёгких ядер.



$$\sigma_h \sim P_K \cdot \frac{d\sigma_{el}(K)}{dt}$$

$$\langle B \rangle < 1$$

Горячие флуктоны – кварки и глюоны в малом объёме и большие относительные импульсы.

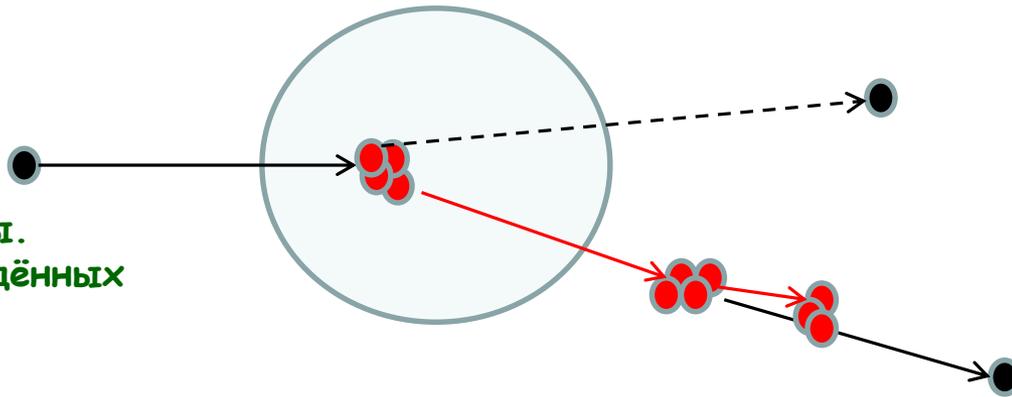


$$\sigma_h \sim P_K \cdot \frac{d\sigma_{inel}(K)}{dt}$$

Среднее число барионов для флуктонов с разными свойствами

$$\langle B \rangle > 1$$

Холдные флуктоны.
Выбивание возбуждённых
многоноуклонных
конфигураций и
дальнейший их распад.



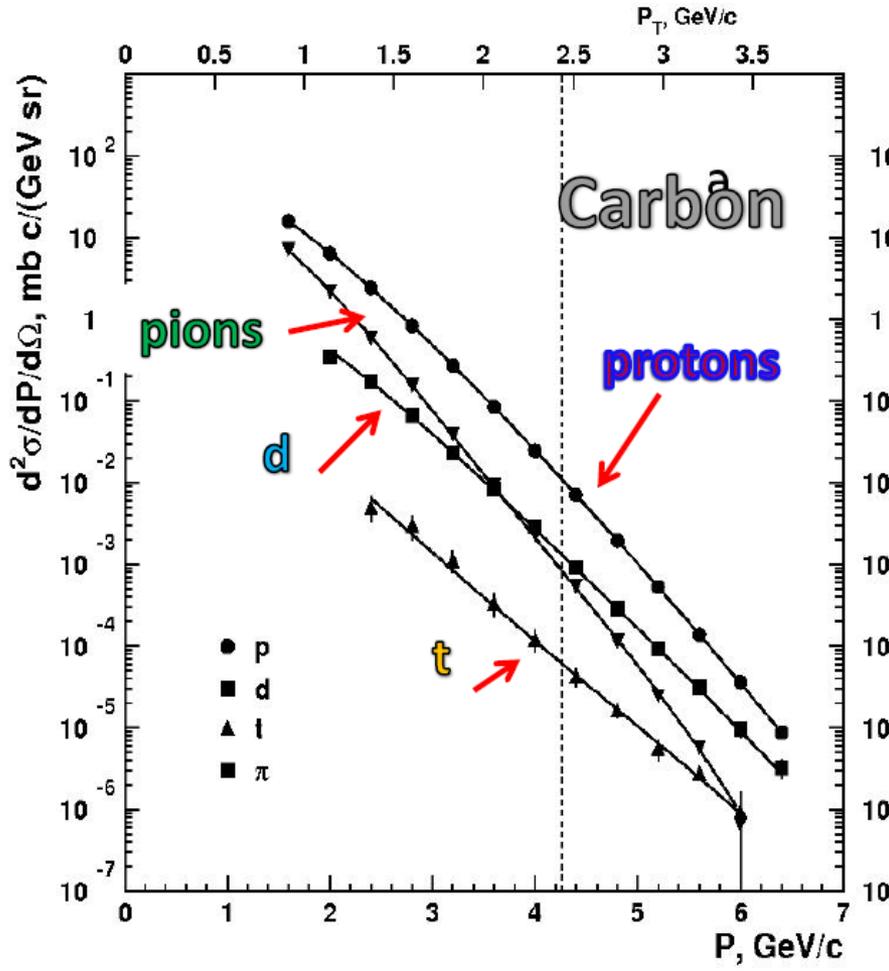
Одноплечевой магнитный спектрометр СПИН (ИФВЭ, Протвино)

3d рисунок установки СПИН в текущей конфигурации

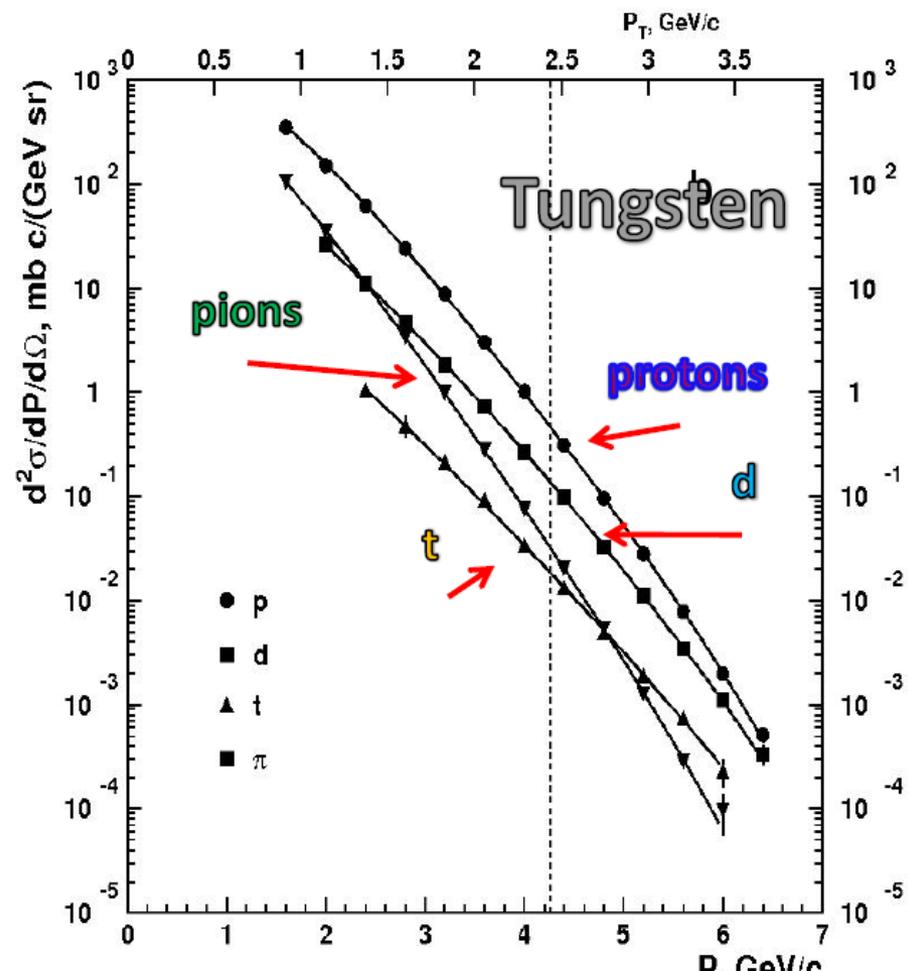
протоны
 $10^{12} - 10^{13}$ /цикл



Установка СТИН наблюдала (2013-2016) повышенный выход протонов и легчайших ядер по сравнению с пионами при рассеянии протонов с энергией 50 ГэВ на разных ядрах.

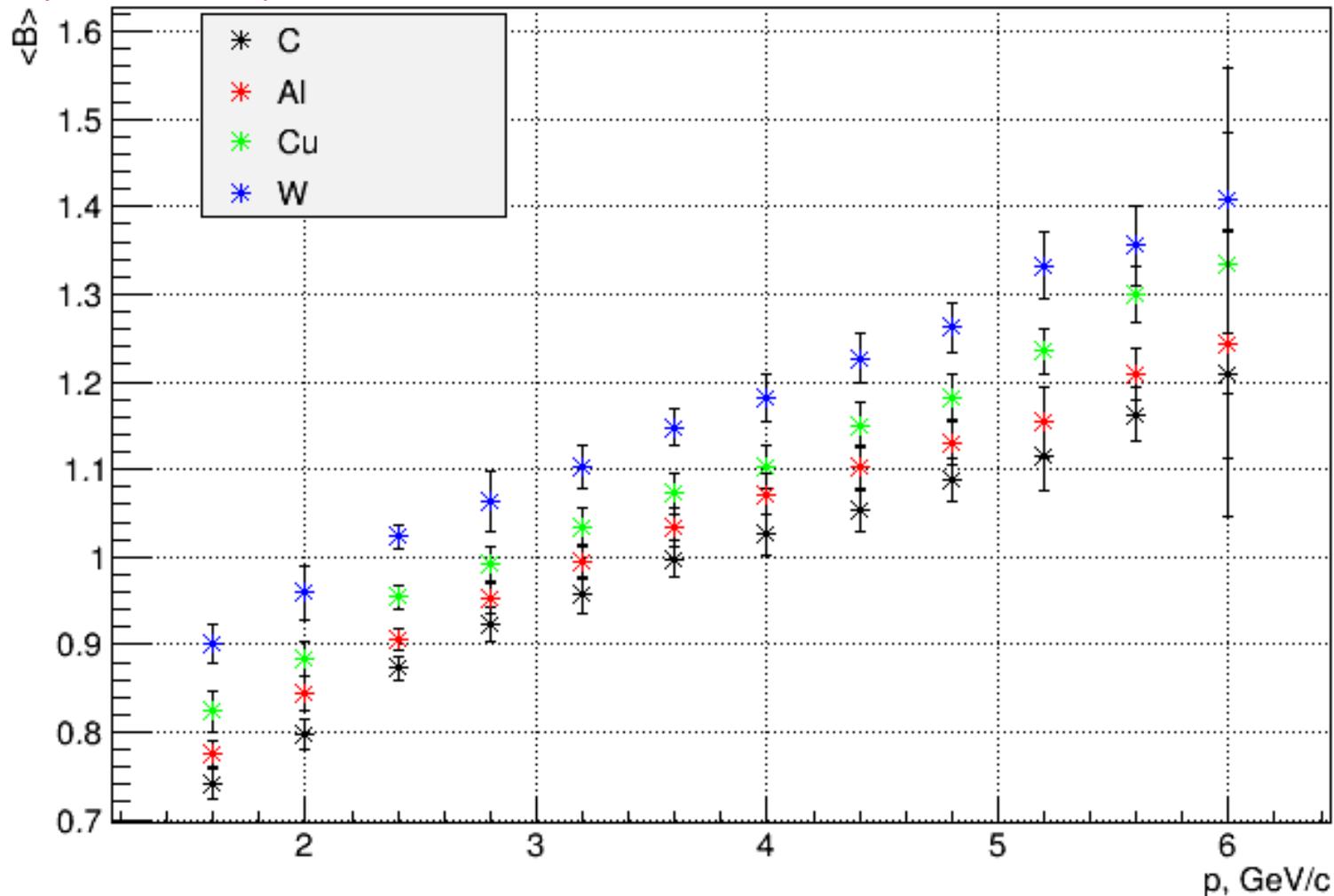


рС - столкновения



рW - столкновения

Среднее число барионов $\langle V \rangle$ растёт с ростом импульса регистрируемых частиц и превышает единицу. Это закрывает возможность существования конфигураций, когда точечные нуклоны на малом расстоянии и горячие нуклоны.



В работе первого директора ОИЯИ в 1957 высказывалась идея, что в ядре могут существовать ядра меньшей массы в сжатой конфигурации.

Т. 33. Журнал экспериментальной и теоретической физики. Вып. 5 (11)

1957

О ФЛУКТУАЦИЯХ ЯДЕРНОГО ВЕЩЕСТВА

Д. И. Блохинцев

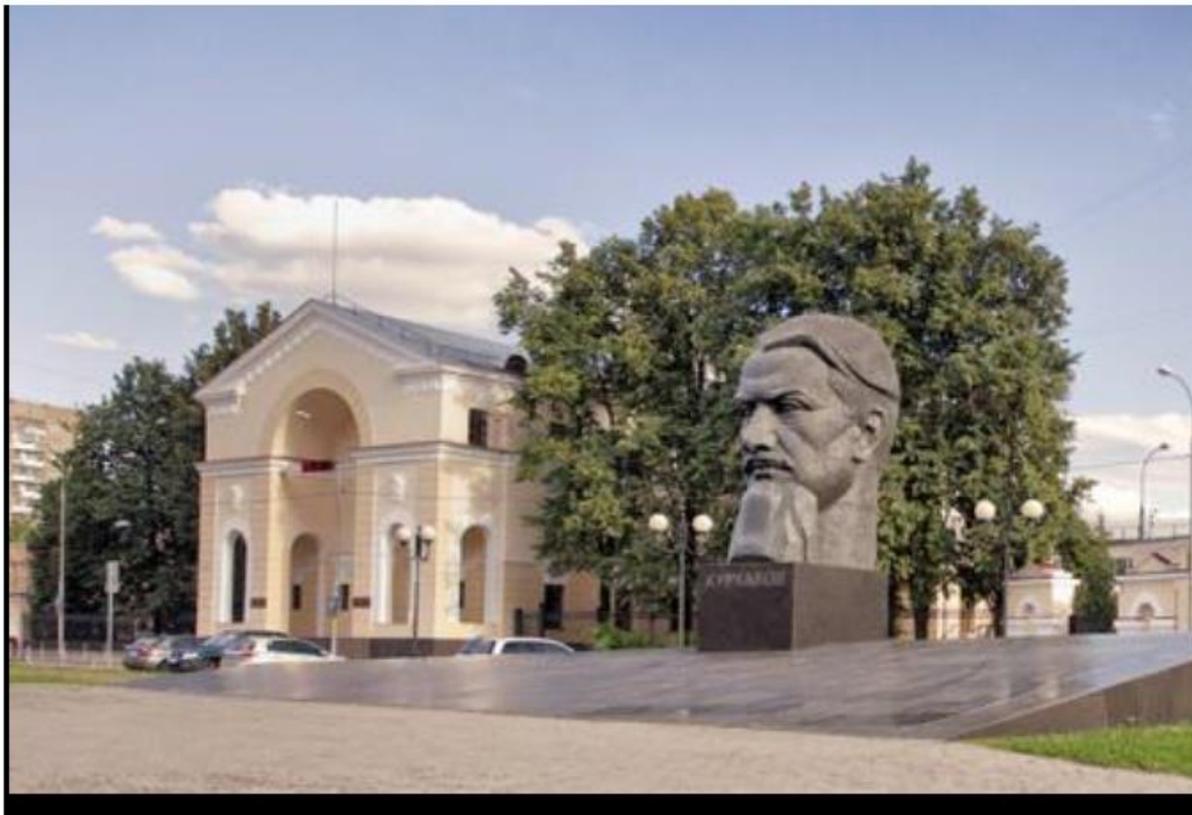
Показано, что возникновение энергичных осколков при столкновении быстрых нуклонов с ядрами может рассматриваться как результат столкновения нуклона с флуктуацией ядерного вещества.

1. Введение

В процессе движения нуклонов в ядре могут возникать кратковременные тесные скопления нуклонов, иными словами флуктуации плотности ядерного вещества. Такие скопления, будучи относительно удалены от других нуклонов ядра, являются атомными ядрами меньшей массы, находящимися в состоянии флуктуационного сжатия.

В недавнее время Мещеряковым и его сотрудниками [^{1,2}] при изучении рассеяния протонов с энергией в 675 MeV на легких ядрах, были обнаружены явления, которые подтверждают существование таких флуктуаций, по крайней мере для простейших парных флуктуаций, приводящих к образованию сжатого дейтона.

29.11.2017 **Исследования на установке СПИН были отмечены премией Курчатова**
Подведены итоги юбилейного конкурса на соискание премии имени И.В. Курчатова НИЦ "Курчатовский институт" за 2017 год



Победителями признаны следующие работы и авторские коллективы:

В области научных исследований:

"Поиск холодной сверхплотной барионной компоненты ядерной материи в процессах рождения кумулятивных частиц с большими поперечными импульсами в столкновениях протонов с ядрами при энергии 50 ГэВ"
Гапиенко В. А., Прудкогляд А.Ф., Семак А. А., Уханов М.Н. (НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ)

CsDBM

1. **Cold** – (холодная) существует как квантовая компонента в обычной ядерной материи.

2. **superDense** – (сверплотная) несколько нуклонов находятся в объёме меньшем чем размер нуклона.

3. **Baryonic Matter** – (барионная материя) повышенное содержание протонов и нейтронов, подавлено число мезонов, которые образуются при адронизации кварков и глюонов.

Экзотические состояния

Статья Гелл-Манна о кварках, где допускается возможность существования тетракварков и пентакварков

Volume 8, number 3

PHYSICS LETTERS

1 February 1964

Multiquark states have been discussed since the 1st page of the quark model

A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

M. GELL-MANN

California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964



If we assume that the strong interactions of baryons and mesons are correctly described in terms of the broken "eightfold way" ¹⁻³, we are tempted to look for some fundamental explanation of the situation. A highly promised approach is the purely dynamical "bootstrap" model for all the strongly interacting particles within which one may try to derive isotopic spin and strangeness conservation and broken eightfold symmetry from self-consistency alone ⁴). Of course, with only strong interactions, the orientation of the asymmetry in the unitary space cannot be specified; one hopes that in some way the selection of specific components of the F-spin by electromagnetism and the weak interactions determines the choice of isotopic spin and hypercharge directions.

Even if we consider the scattering amplitudes of strongly interacting particles on the mass shell only and treat the matrix elements of the weak, electromagnetic, and gravitational interactions by means

number $n_t - n_{\bar{t}}$ would be zero for all known baryons and mesons. The most interesting example of such a model is one in which the triplet has spin $\frac{1}{2}$ and $z = -1$, so that the four particles d^- , s^- , u^0 and b^0 exhibit a parallel with the leptons.

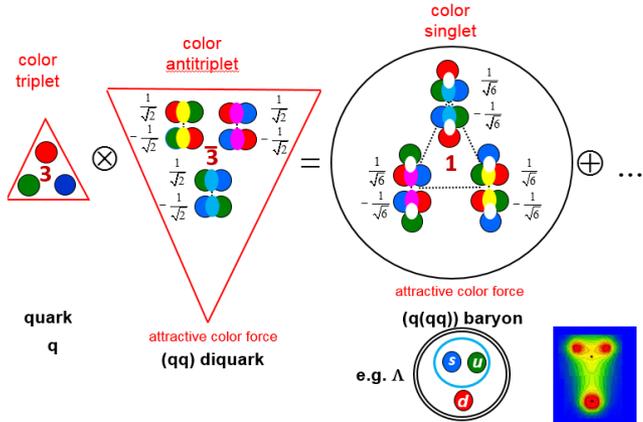
A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon b if we assign to the triplet t the following properties: spin $\frac{1}{2}$, $z = -\frac{1}{3}$, and baryon number $\frac{1}{3}$. We then refer to the members $u^{\frac{2}{3}}$, $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" ⁶) q and the members of the anti-triplet as anti-quarks \bar{q} . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq) , $(qqqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qq\bar{q}\bar{q})$, etc. It is assuming that the lowest baryon configuration (qqq) gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration $(q\bar{q})$ similarly gives just **1** and **8**.

that it would never have been detected. A search for stable quarks of charge $-\frac{1}{3}$ or $+\frac{2}{3}$ and/or stable di-quarks of charge $-\frac{2}{3}$ or $+\frac{1}{3}$ or $+\frac{4}{3}$ at the highest energy accelerators would help to reassure us of the non-existence of real quarks.

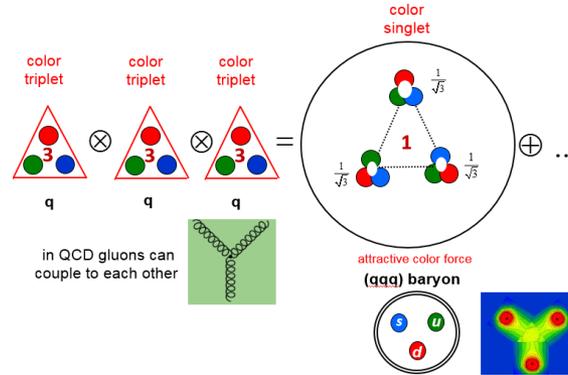
Адроны из дикварков. Тетракварки и пентакварки.

Still an open question!

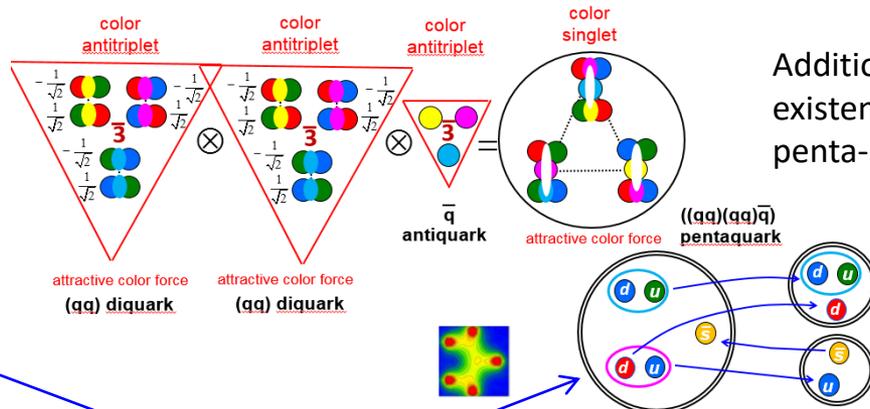
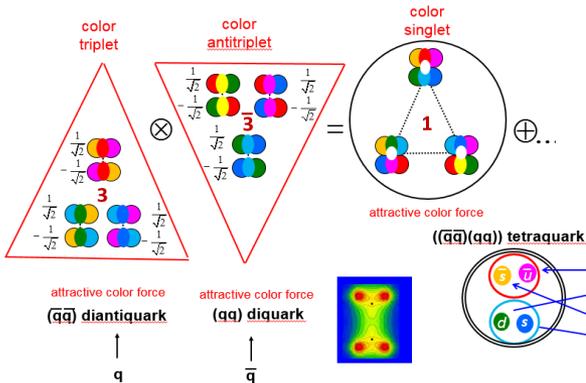
Role of diquarks in building hadrons?



VS.



Light and heavy baryon spectroscopy is sensitive to this question



Additional motivation for existence of tetra- and penta-quarks.

Does effective mechanism to suppress rapid fall-apart exist?

ЛФВЭ

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ – НОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

“New directions in science are launched by new tools much more often than by new concepts.

Новые направления в науке запускаются новыми инструментами(методиками) гораздо чаще, чем новыми концепциями.

The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways.

Эффект концептуальной революции состоит в том, чтобы объяснить старые вещи по-новому.

The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained”

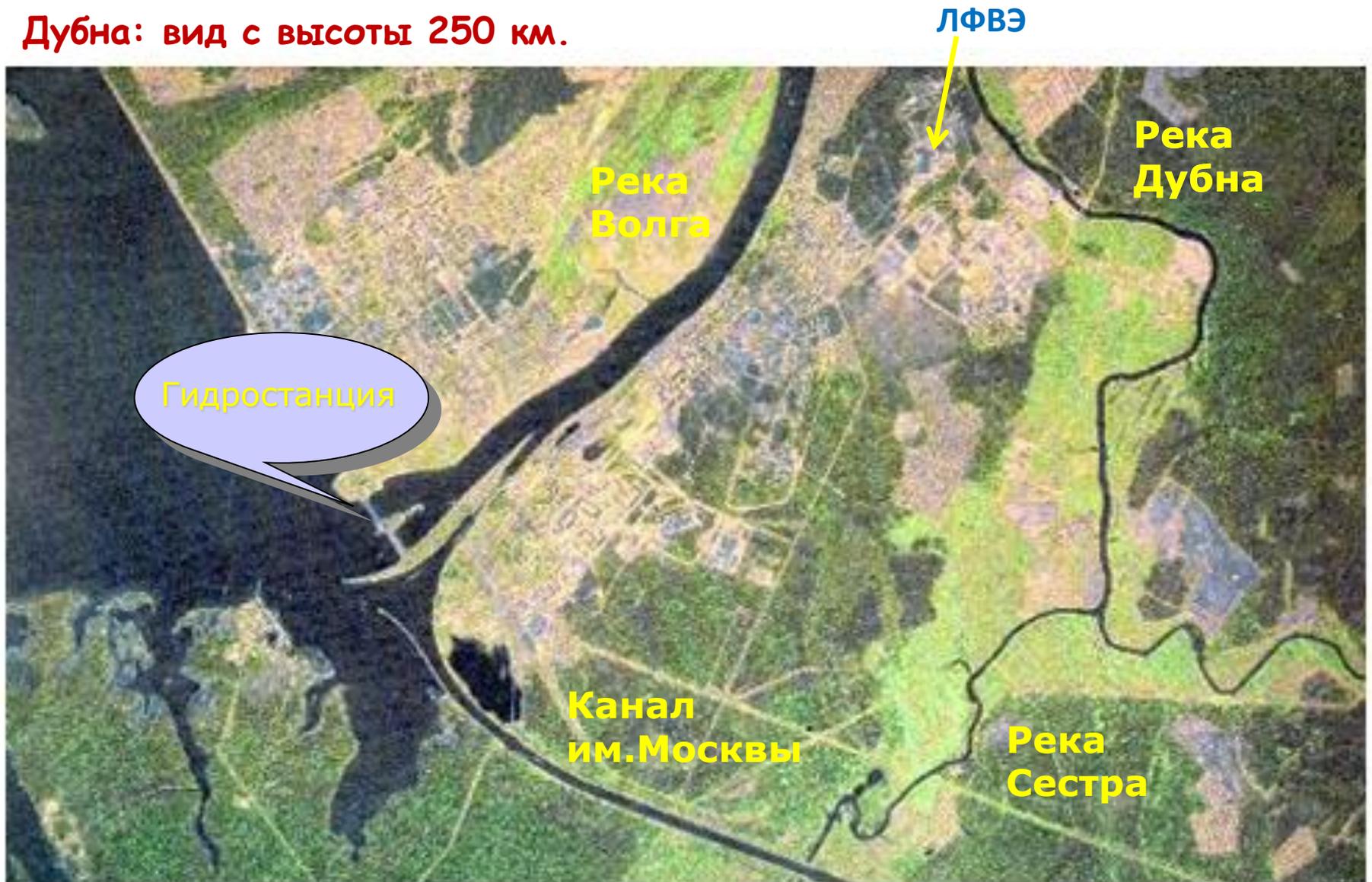
Эффект инструментальной революции заключается в открытии новых вещей, которые должны быть объяснены.



From Freeman Dyson ‘Imagined Worlds’₄₁

Научные исследования(ФВЭ сейчас)
- это захватывающий детектив, где
«следователи»-теоретики
выдвигают «версии»-модели,
«оперативные работники»-
экспериментаторы ищут
доказательства, но есть и были
исключения!

Дубна: вид с высоты 250 км.



Территория, на которой находится Дубна, можно назвать искусственным островом.



ЛВЭ-ЛФВЭ: от Синхрофазотрона к коллайдеру тяжелых ионов

1957

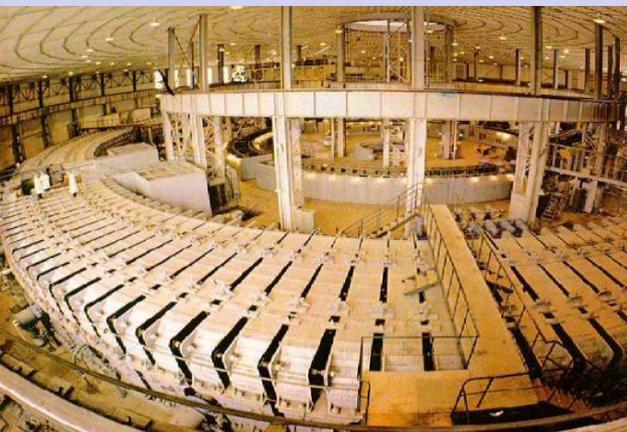
Синхрофазотрон

10 ГэВ ускоритель
протонов - лидер
по энергии

Начало
эры физики
высоких
энергий



В.И. Векслер – автор принципа
авто-фазировки



1993

Nuclotron

Впервые в мире
Сверхпроводящий
ускоритель
тяжелых
ионов



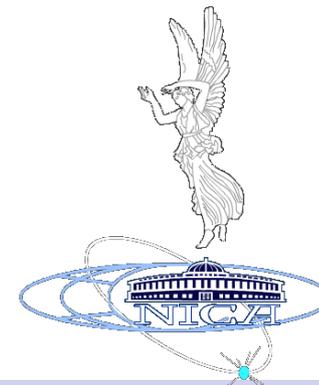
А.М. Балдин –
основоположник
исследований по
релятивистской ядерной
физике



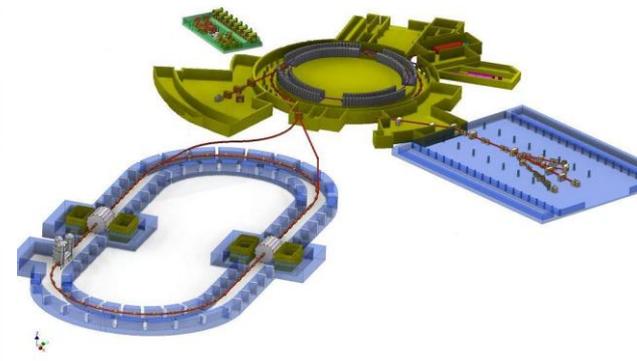
2017

NICA

Сверхпроводящий коллайдер
тяжелых ионов



Исследование материи при
экстремальных плотностях



УСКОРИТЕЛИ - ИСТОЧНИКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Пультовая Дубненского синхрофазотрона (запущен в 1957 г., Выведен из эксплуатации в 2002 г.)

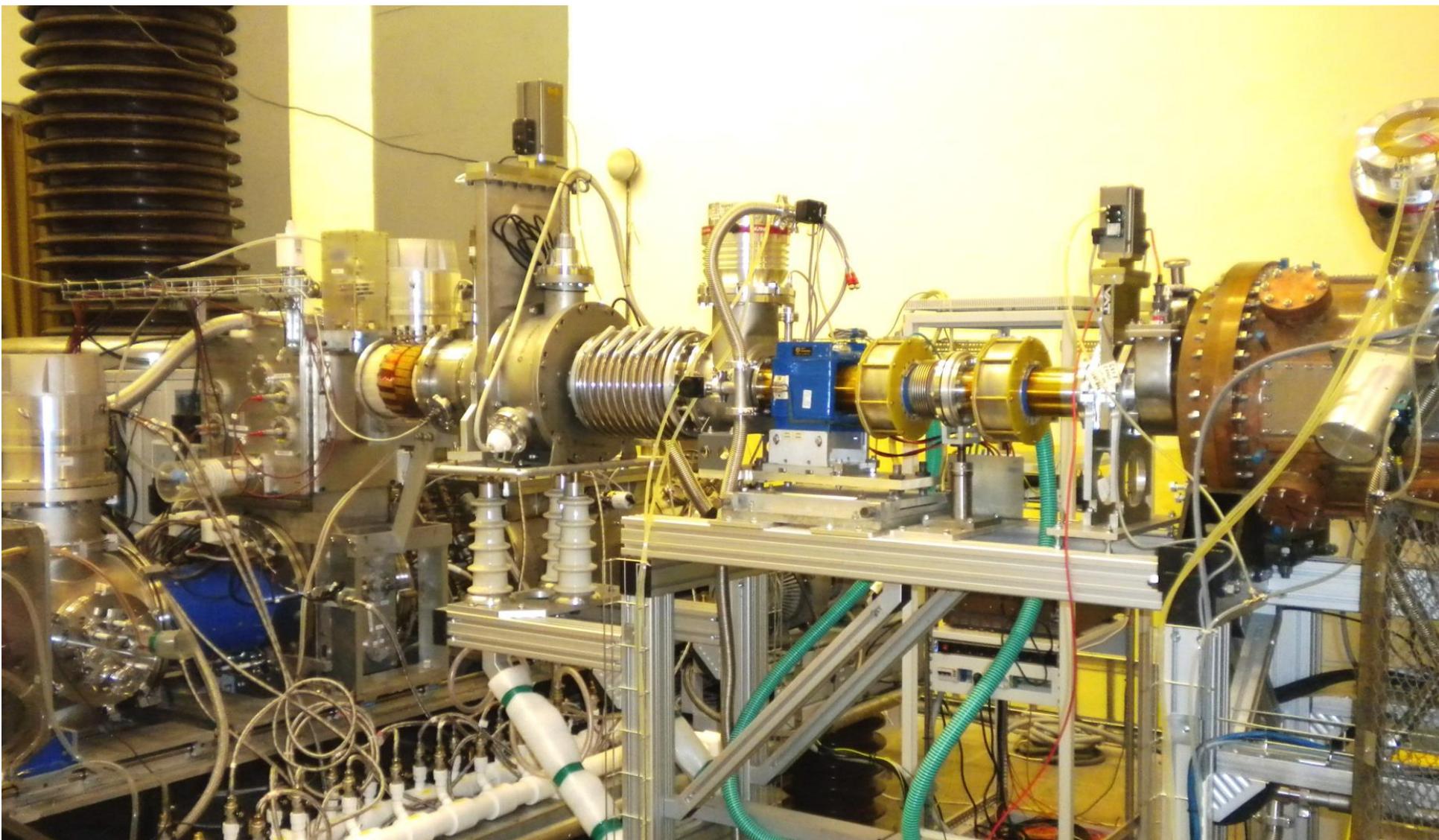


ПОЛЯРИС

Источник поляризованных дейтронов, работавший в ЛФВЭ ОИЯИ до 2002 г.



Новый источник поляризованных протонов и дейтронов ЛФВЭ ОИЯИ





**Юстировка дрейфовых трубок.
Внутренний вид линейного
ускорителя ЛФВЭ ОИЯИ ЛУ-20.**

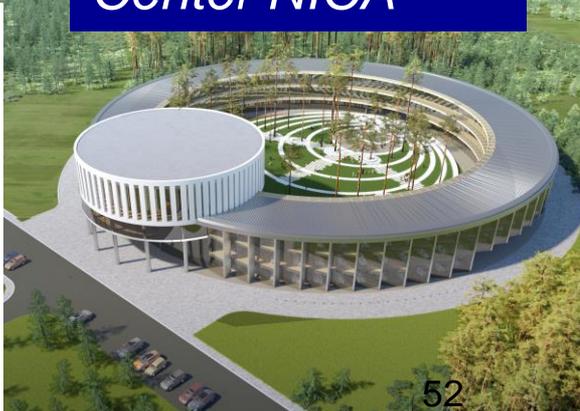
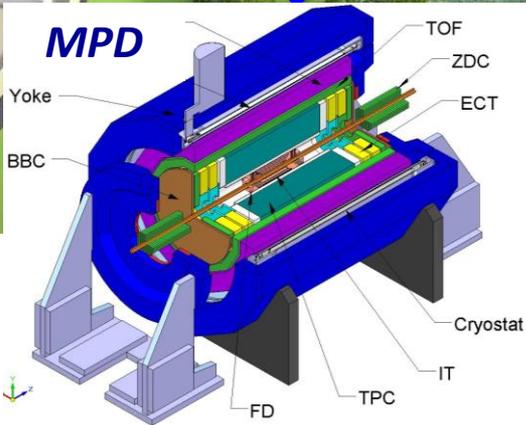
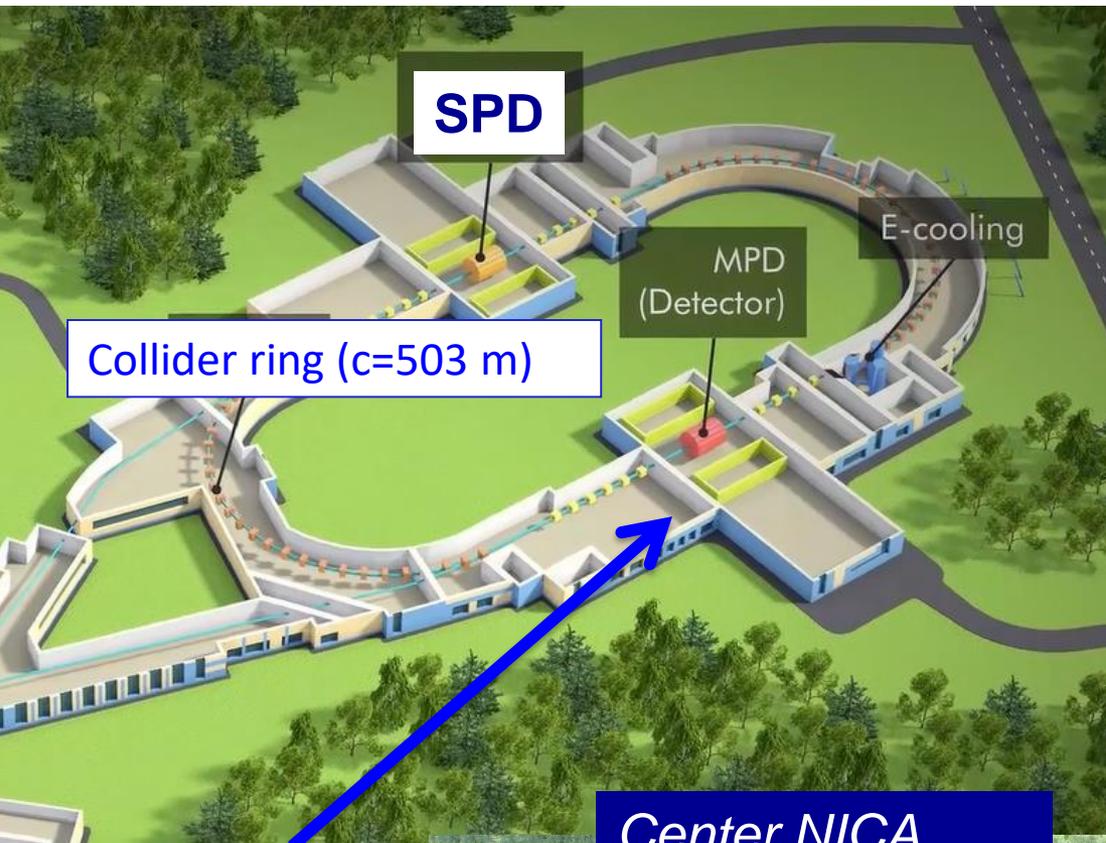
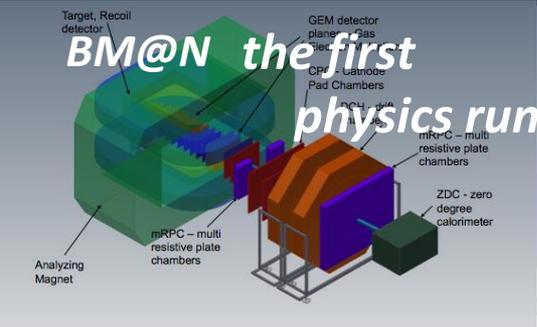
Линейный ускоритель ЛУ-20. Снят вакуумный кожух.



Установка по производству жидкого гелия ЛФВЭ ОИЯИ



Строящийся новый ускоритель ЛФВЭ ОИЯИ - коллайдер NICA



V. Kekelidze, JINR SC-125

21/02/2019

Общий вид детектора MPD

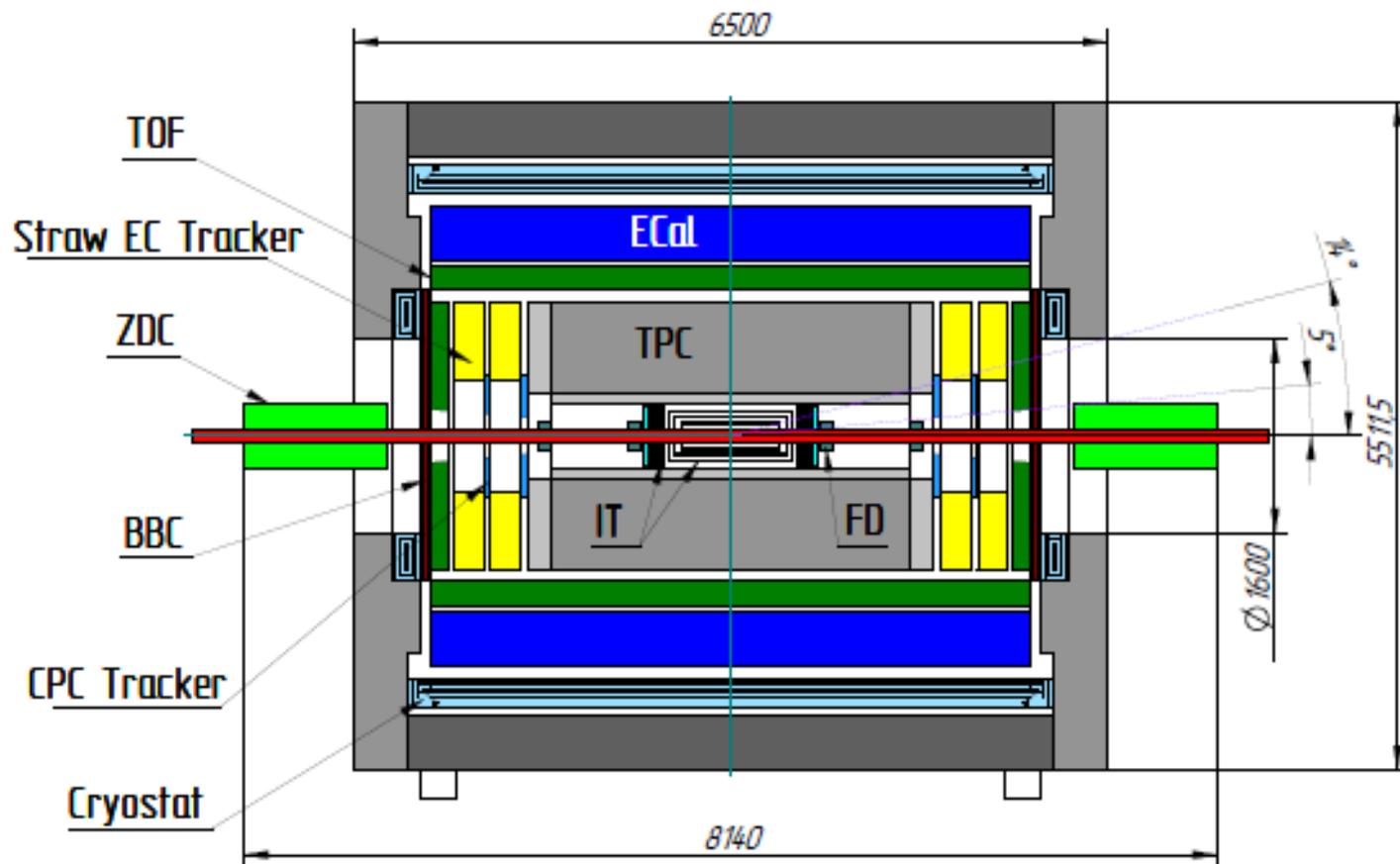
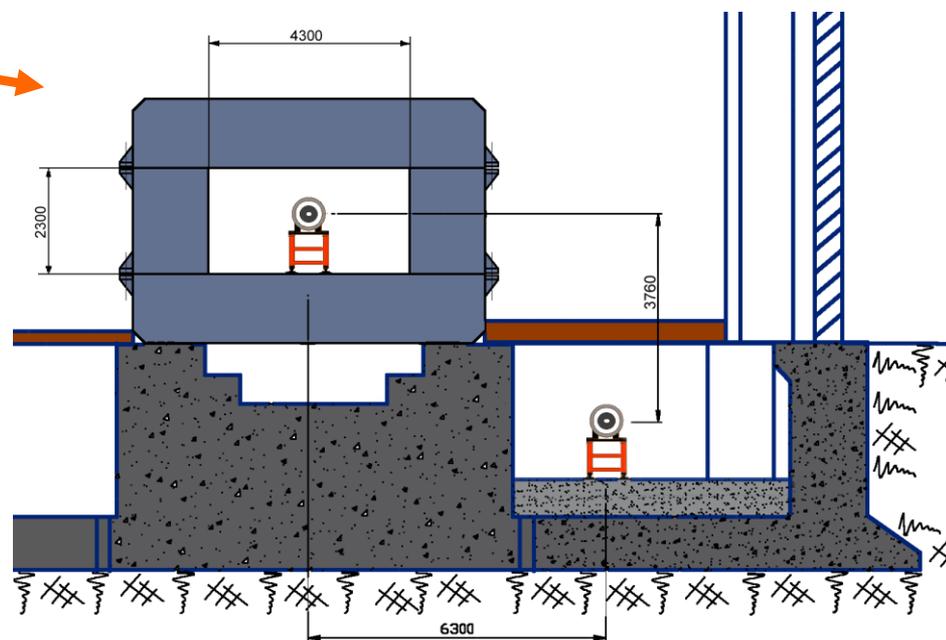


Рис. 2.2: Расположение подсистем в центральной части MPD и их габаритные размеры.

Расположение



Synchrotron yoke



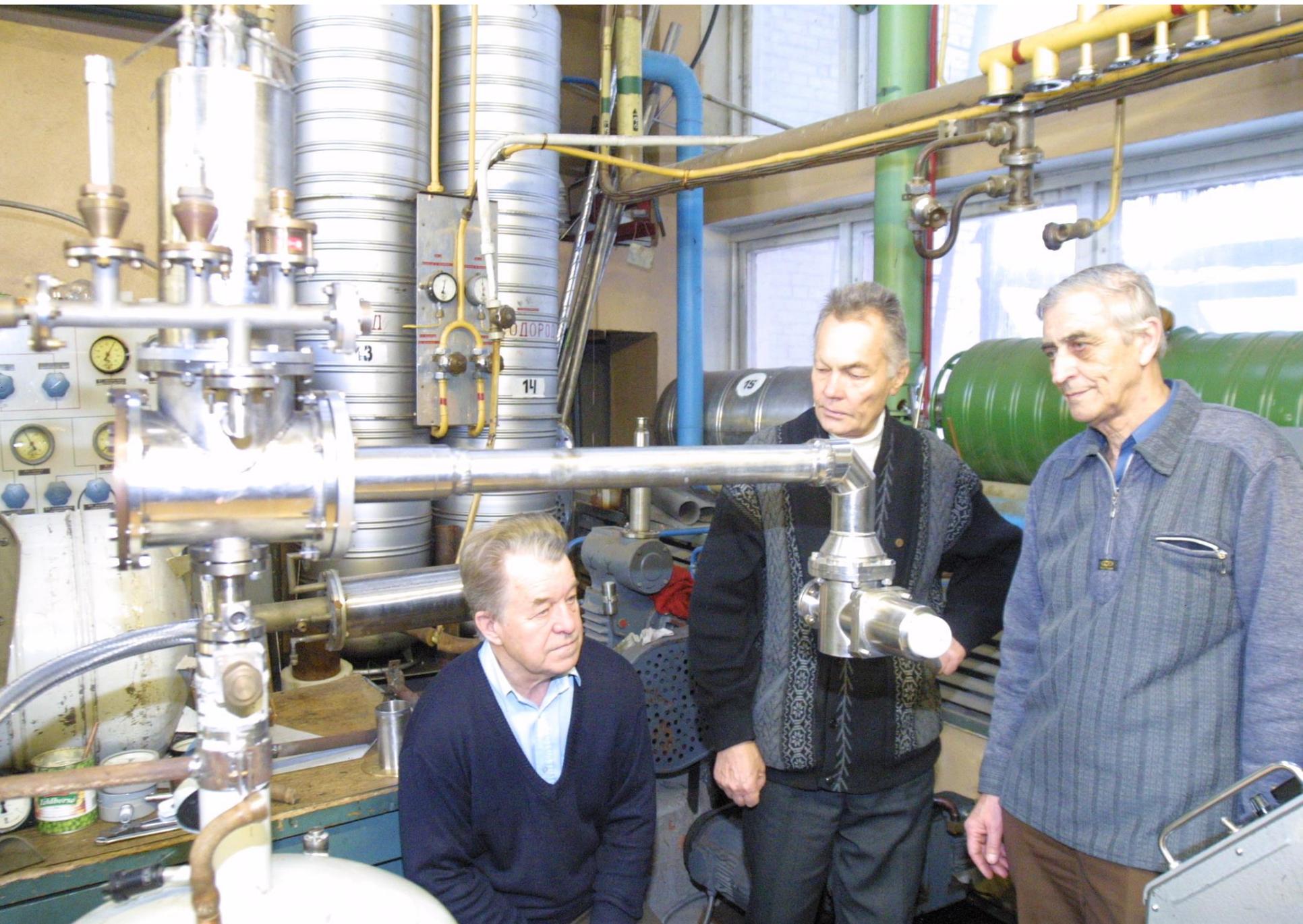
ПРИЛОЖЕНИЯ

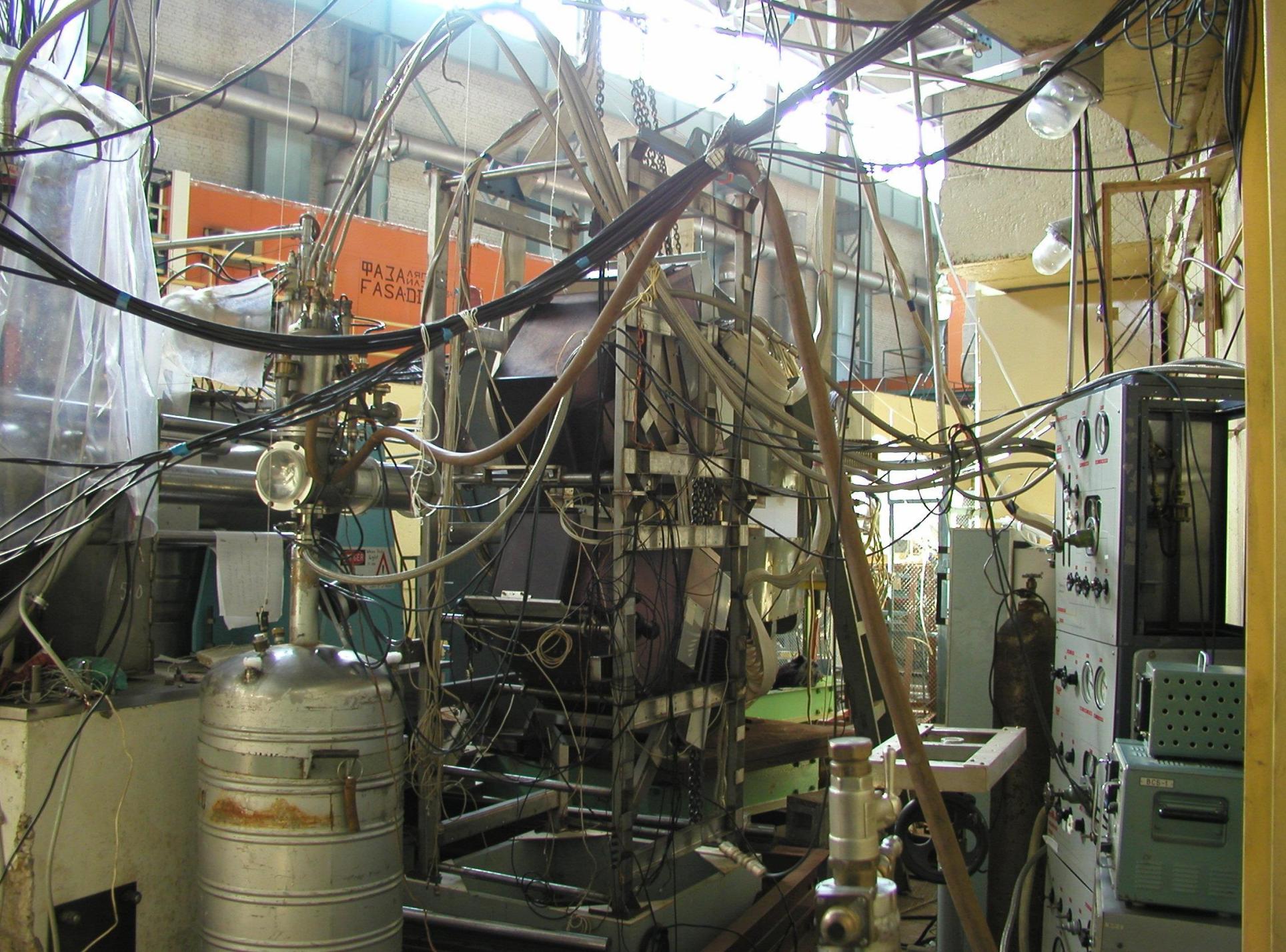
В ЛФВЭ ОИЯИ была разработана технология создания криогенных мишеней, которые могут заполняться жидкими водородом, дейтерием или гелием. С этими мишенями в ОИЯИ и других центрах проводятся уникальные эксперименты. Мишени изготовлены из лавсановой плёнки и пенопласта. И имеют рекордно низкий вес. Что особенно важно для топливных баков необходимых для использования в качестве топлива экологически чистых горючих. Таковыми являются водород и пропан.

Был создан самолёт Ту-155 имевший один двигатель для работе на водороде или пропане. По технологии разработанной для изготовления мишеней в ЛФВЭ (руководитель группы Л.Б. Голованов) был изготовлен топливный бак для Ту-155, который использовался в успешных испытаниях возможности использовать двигатели с экологически чистым топливом.

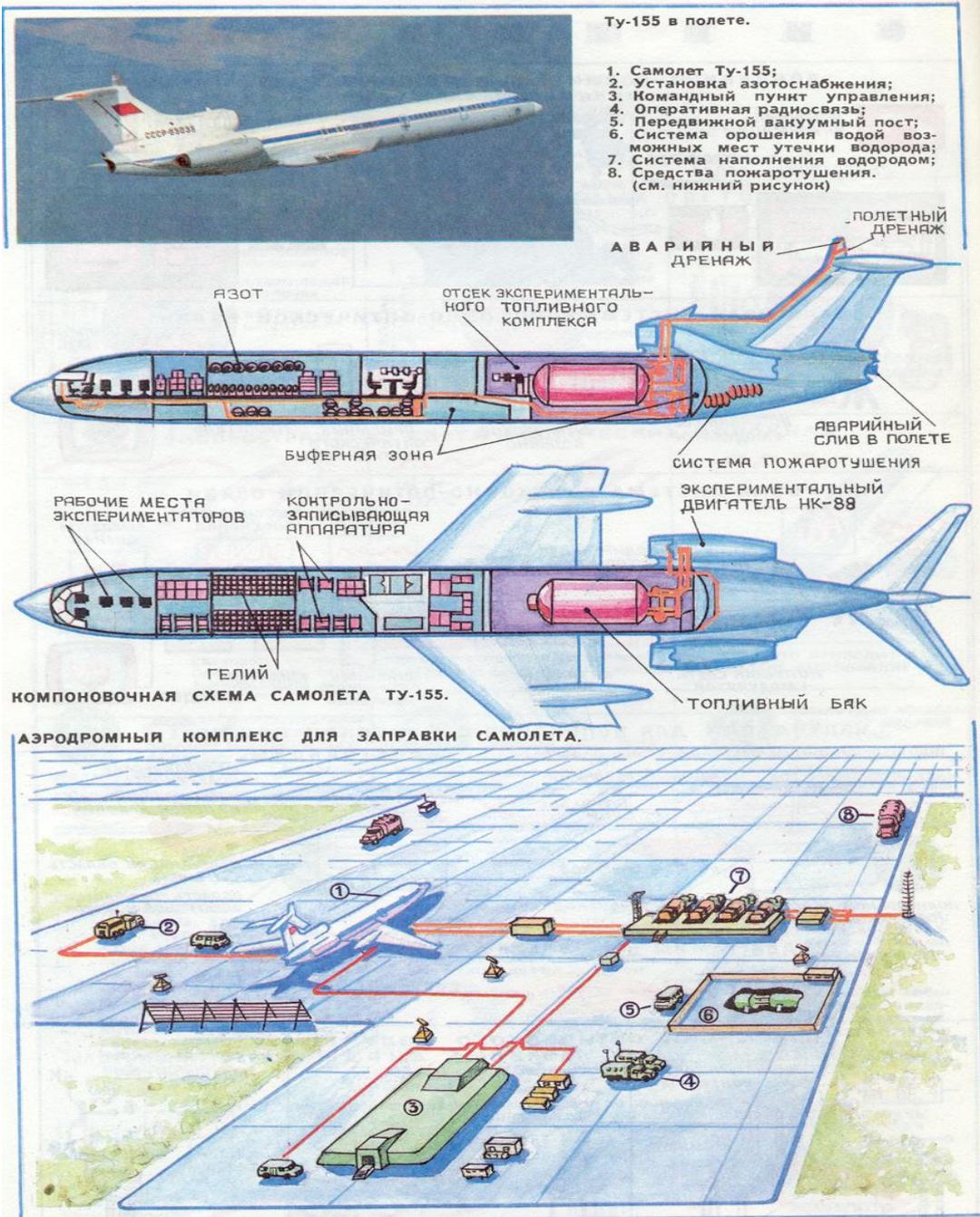
В настоящее время Ту-155 можно увидеть в музее Монино под Москвой.

На следующих слайдах показаны различные мишени и постер о самолёте Ту-155.





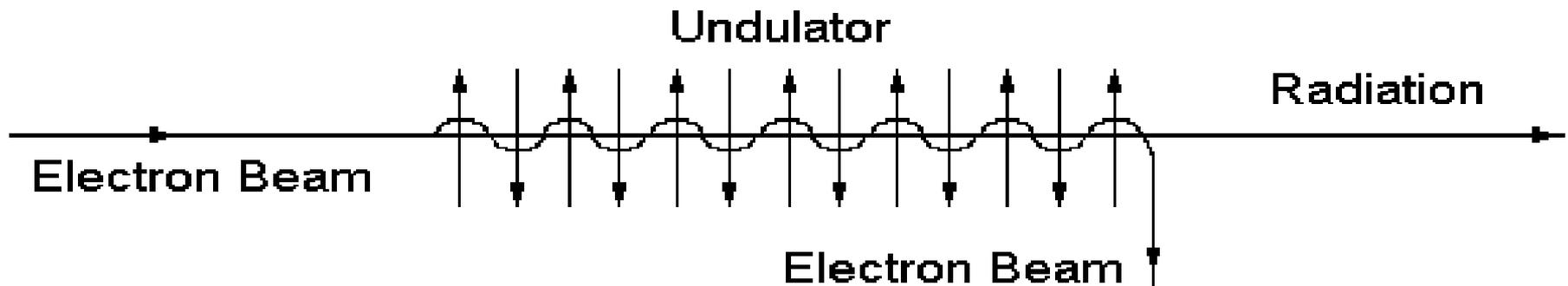
Ту-155 самолёт с двигателем на газовом топливе



FEL

Используя ускорительные технологии создаются лазеры на свободных электронах (FEL). Эти установки могут создавать монохроматического излучения огромной мощности с длиной волны в нанометровом диапазоне и формировать фемтосекундные сгустки. Потребителями этих пучков являются, например, исследователи медико-биологических направлений и полупроводниковая промышленность.

Принцип работы FEL показан ниже. Ускоренный пучок электронов проходит через установку с переменным по направлению (верх-низ) магнитным полем, в которой совершая движение по изогнутой траектории и излучает фотоны.

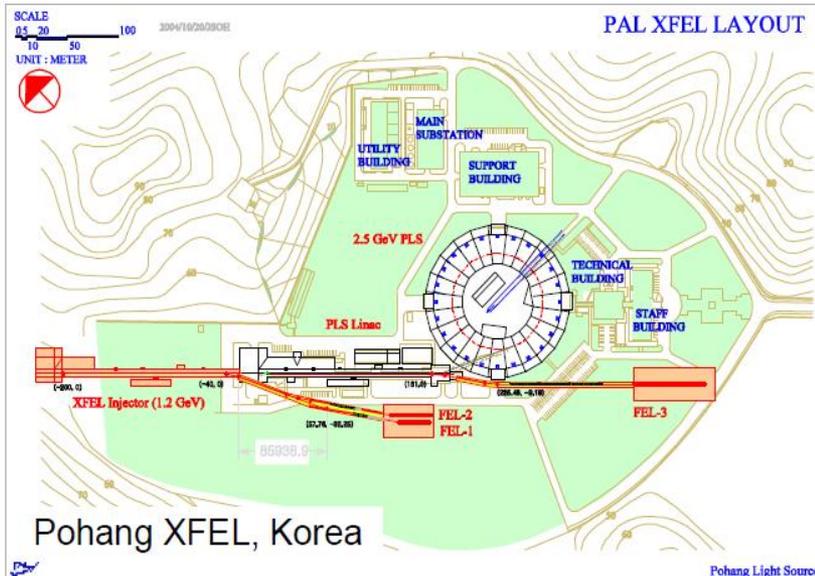


Бум строительства лазеров на свободных электронах (XFEL projects).

The Linac Coherent Light Source (LCLS) at SLAC



SPring-8 Compact SASE Source (SCSS), Japan

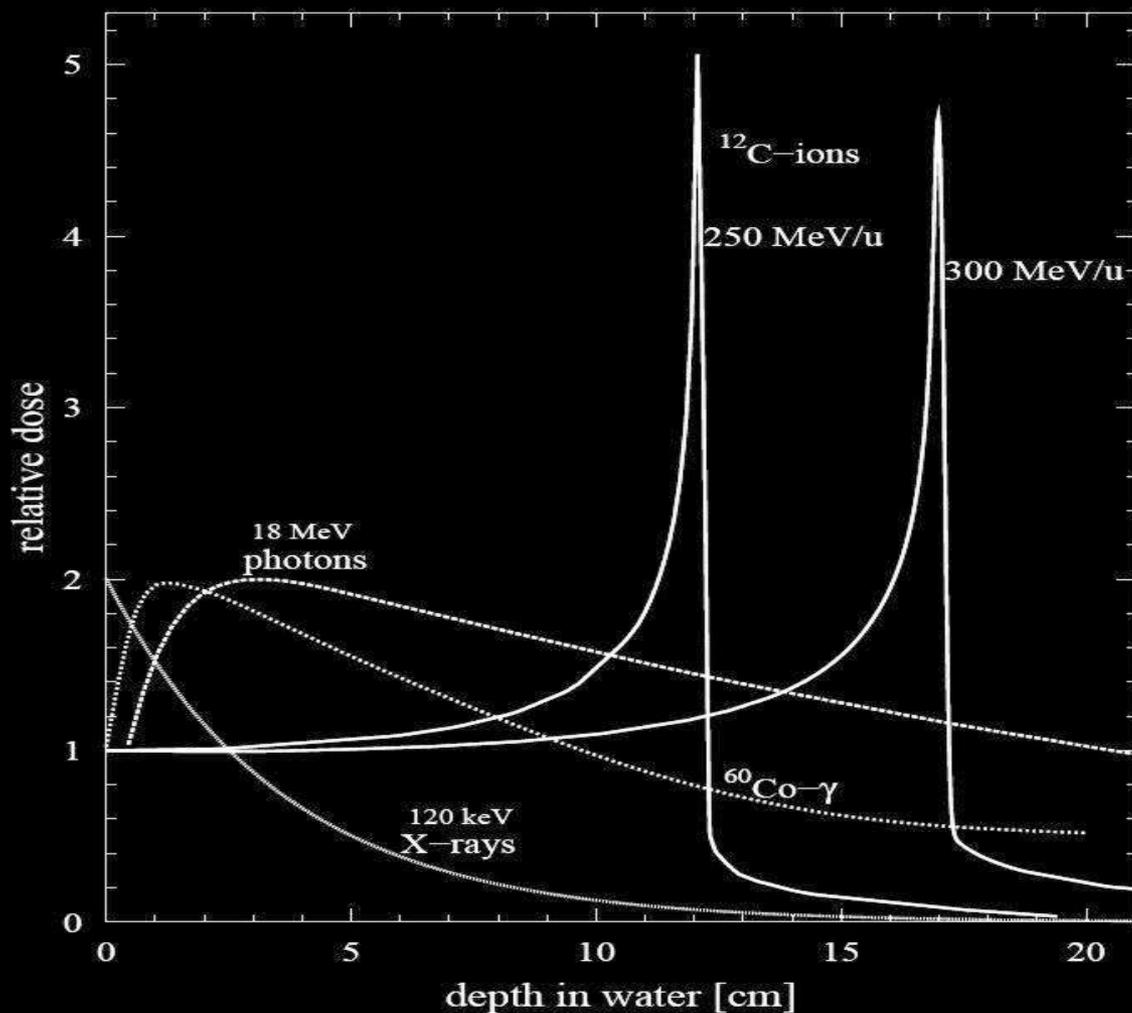


FERMI@ELETTRA. Trieste, Italy



Пучковая терапия

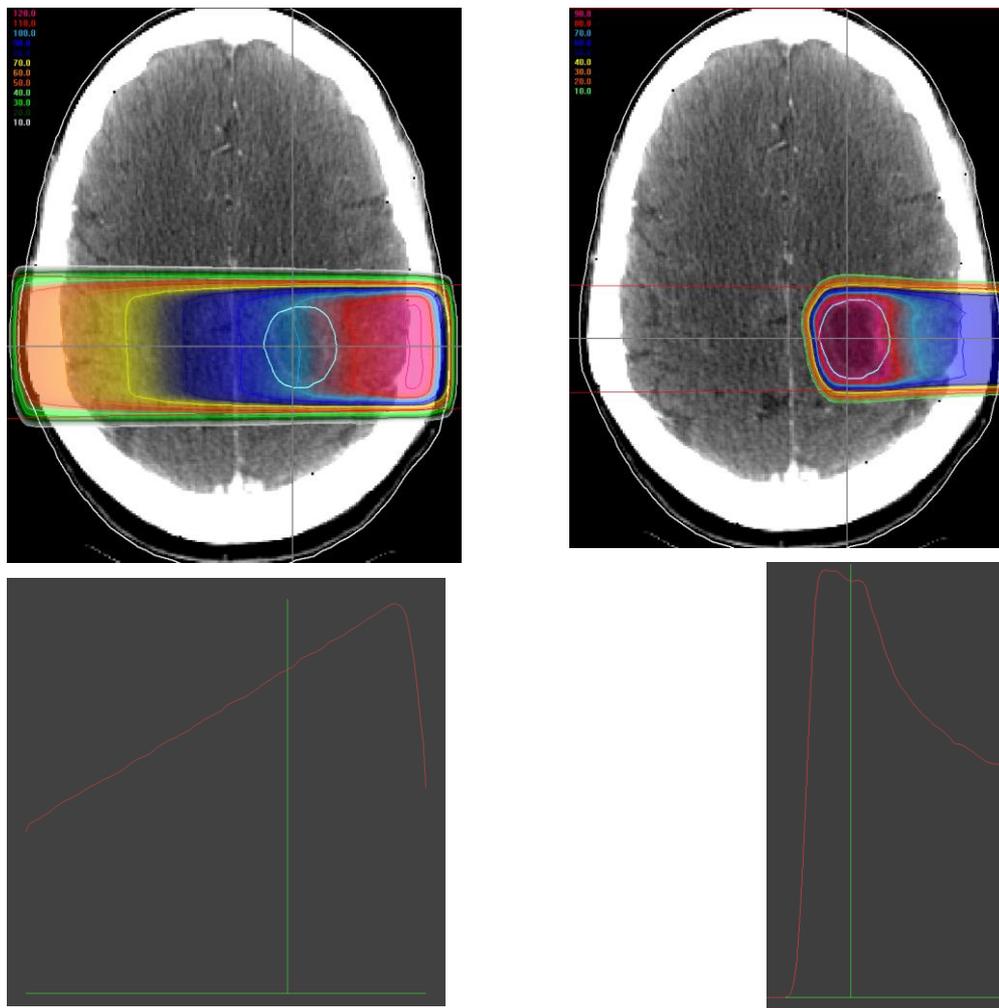
Облучение ионами углерода подобно прецизионной хирургии без скальпеля



Преимущество пучков адронов перед другими средствами радиотерапии заключается в том, что, благодаря наличию пика Брэгга, они дают четко очерченное дозное поле с высоким градиентом дозы на его границах и позволяют облучать опухоль в глубине тела без сопутствующего повреждения здоровых тканей и органов.

[U.Weber]

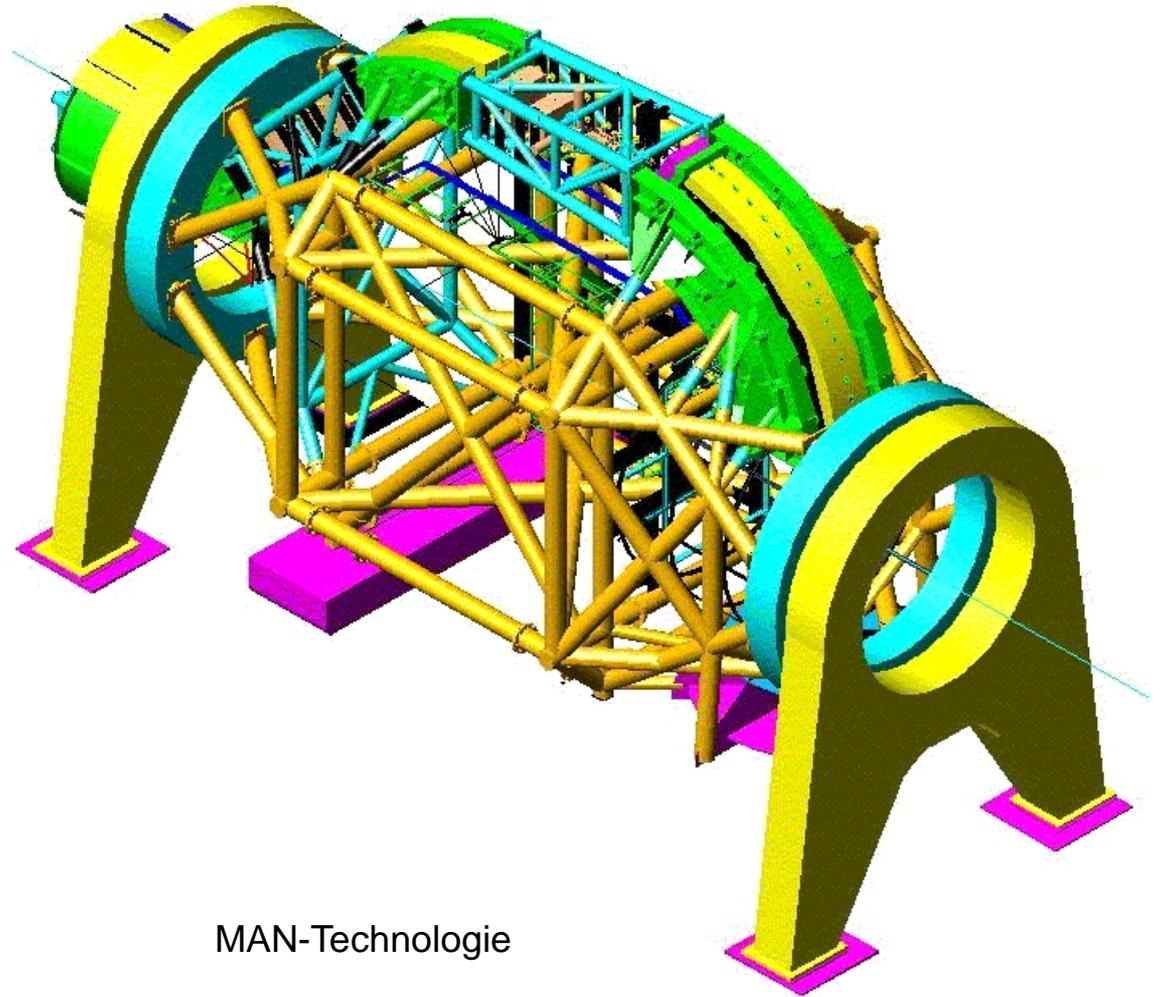
Сравнение дозных распределений фотонного с энергией 6 МэВ («Новалис») (слева) и протонного (справа) пучков. Глубинные дозные кривые показаны внизу. Протоны облучают нормальные ткани примерно в 3 раза меньше чем фотоны.



Сканирующий ионный Gantry (GSI)

применение
оптимальных доз

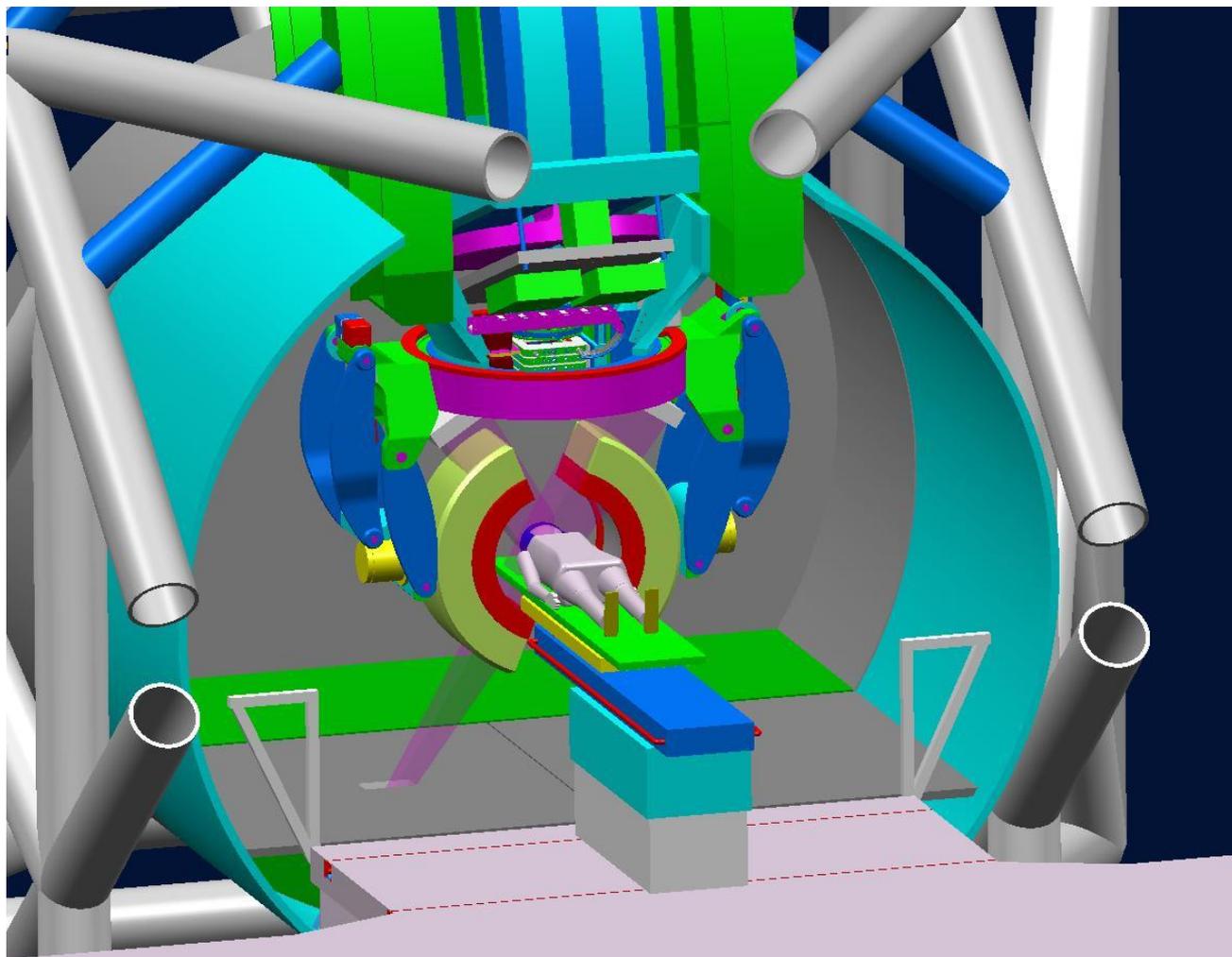
- первый в мире
- включает и первое в мире сканирование пучка
- 13m в диаметре
25m длиной
600 тонн полный вес
420 тонн вес поворотной части
0,5mm max. деформация
- прототип (сегмент)
испытан в GSI



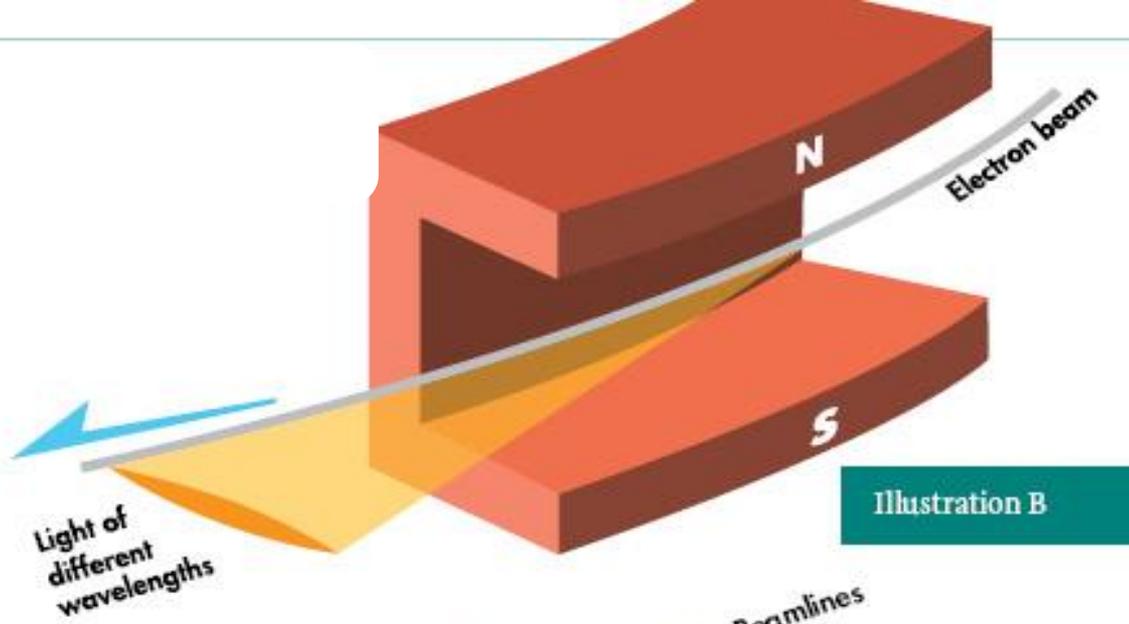
MAN-Technologie

Укладка пациента внутри гантри

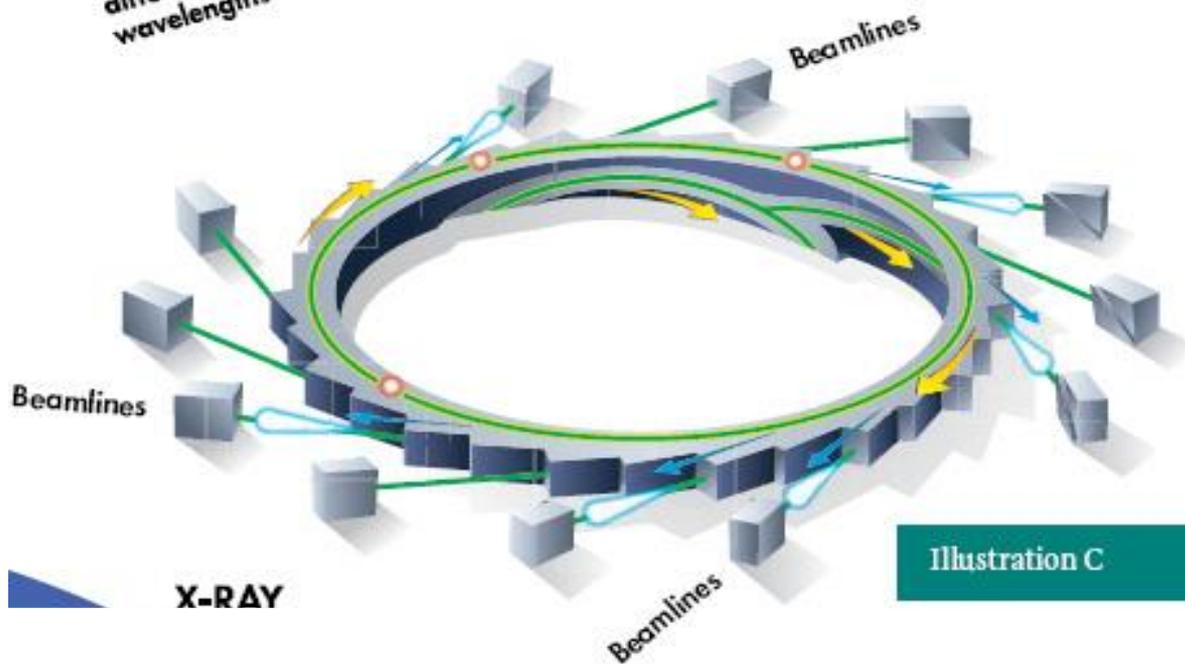
- специальное
• позиционирование
- интеграция
PET
и
цифровых X-ray
систем и
стереотактич. оборудования



Использование синхротронного излучения (СИ)

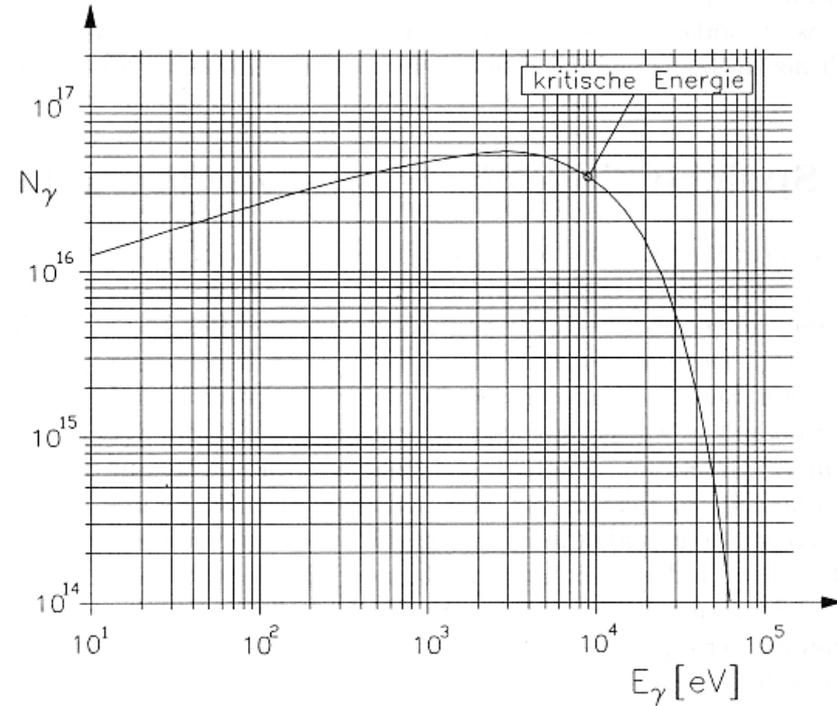
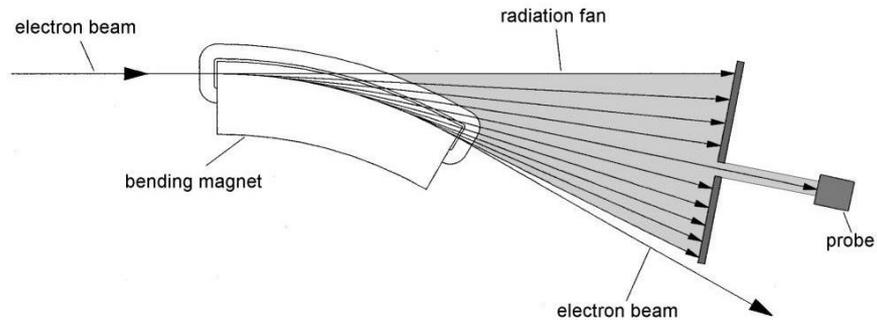


Ускорители
для прикладных
исследований.



Получение
синхротронного
излучения
для прикладных
исследований.

Электронные Накопительные Кольца Получение синхротронного излучения.



$$P_s = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} * \frac{1}{(m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R^4}$$

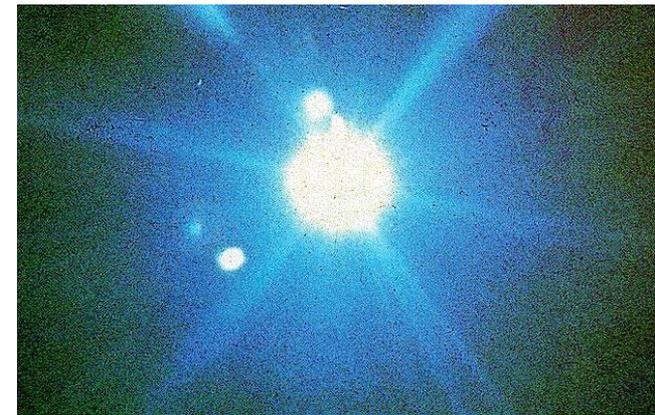
*Мощность
излучения*

$$\Delta E = \frac{e^2}{3\epsilon_0 (m_0 c^2)^4} \frac{E^4}{R}$$

*Потери энергии на
Одном обороте*

$$\omega_c = \frac{3c\gamma^3}{2R}$$

*„Характерная Частота“
излучения*



Использую СИ проводится изучение структуры различных объектов, в том числе пространственной, высокомолекулярных соединений

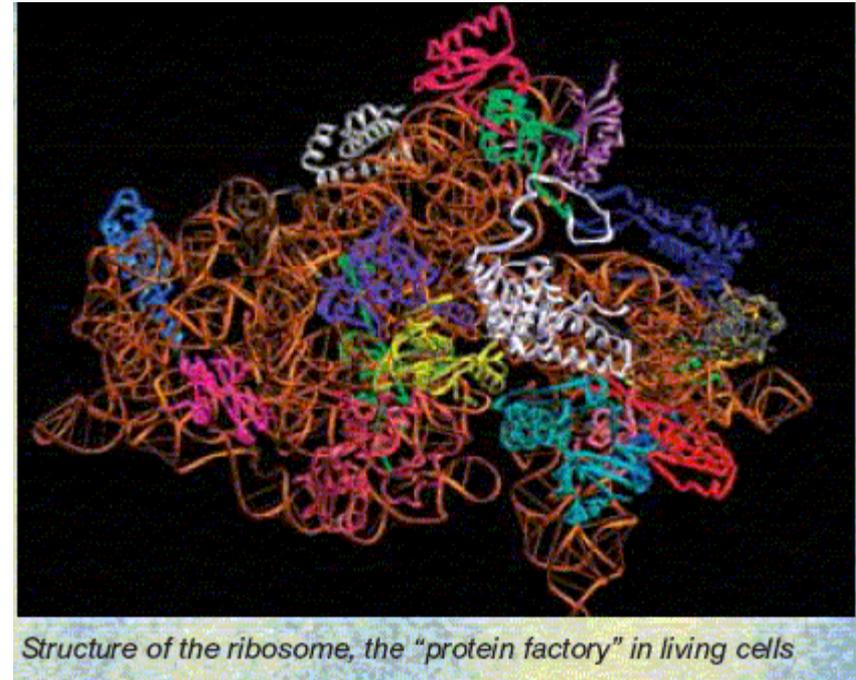
Analysis of Cell structures

Structure of a Ribosom

Ribosomen are responsible for the protein production in living cells.

The structure of these Ribosom molecules can be analysed using brilliant synchrotron light from electron storage rings

(Quelle: Max-Planck-Arbeitsgruppen für Strukturelle Molekularbiologie)



Angiographie

x-ray method applicable for the imaging of coronar heart arteria

Ну, вот и все!