
Accelerators briefly

Part II

LHC

Ерохин Александр

ЦЕРН, ИЯФ СО РАН

2019г.

Часть II

Европейский Центр Ядерных Исследований и Большой Адронный Коллайдер

Основные этапы проектировки и строительства

Устройство БАК

Испытания и запуск коллайдера

Участие России в проекте БАК

Европейский Центр Ядерных Исследований и Большой Адронный Коллайдер



В начале 1980-х годов был предложен проект ускорителя, осуществляющего столкновения электронов и их антиподов – позитронов, – большой электрон-позитронный коллайдер (LEP). Осенью 1983 года началось строительство LEP. В долине Женевского озера на глубине ста метров был вырыт кольцевой туннель общей длиной 27 километров. Качество подземных работ было столь высоким, что, когда в 1988 году два конца туннеля соединились, расхождение между ними составило всего один сантиметр.

Симпозиум в Лозанне, Швейцария, **в 1984 году** стал точкой старта для проекта. Были определены рабочие группы для рассмотрения различных аспектов физики, которые могут быть изучены на новом протонном коллайдере. Большой Адронный Коллайдер (Large Hadron Collider) становится приоритетным проектом для ЦЕРН. С конца восьмидесятых годов по середину девяностых годов прошлого века было проведено множество семинаров, посвященных концептуальному дизайну коллайдера.

В итоге **в декабре 1994** года реализация проекта БАК получила полное одобрение Совета ЦЕРН. Для БАК был не нужен новый туннель – вполне годился и старый, тот, что был вырыт для LEP. Решено было, что ускорители PS и SPS также не останутся без работы – они будут придавать частицам первоначальную энергию.

1995 - Опубликован первый дизайн-проект БАК, содержащий детали архитектуры будущего ускорителя.

1996 - Окончательно одобрены эксперименты CMS и ATLAS. Оба эксперимента предназначены для поисков бозона Хиггса.

1998 - Успешно испытан первый дипольный магнит длиной 15 метров. Достигнуто поле величиной 8.3 Тесла, являющееся номинальным для БАК. При этом ток в обмотках магнитов составляет порядка 13 килоампер.

CERN & LHC

1999 г. - В ЦЕРН поставлены из ИЯФ (Новосибирск) первые «теплые» магниты для перепускных каналов. В последующие годы ИЯФ поставил около 540 магнитов для перепускных каналов.

2000г. - Успешно испытаны первые квадрупольные магниты, необходимые для фокусировки пучка.

2001 – 2002 гг. - Начато серийное производство дипольных и квадрупольных магнитов. Получены первые прототипы корректирующих магнитов. К концу 2002 года из тоннеля извлечены последние компоненты LEP, в итоге за 14 месяцев демонтажа LEP из 27 километрового тоннеля было извлечено более 40 000 тонн оборудования.

2003 г. - В ЦЕРН поставлен первый американский магнит, предназначенный для финальной фокусировки пучка в местах экспериментов. Всего за последующие годы будет поставлено 20 таких магнитов. Это явилось вкладом США в проект БАК.

2004 – 2005 гг. - Закончено строительство подземных залов для детекторов CMS и ATLAS, закончена вся подземная инфраструктура. Размеры зала для детектора CMS составили 53 метра длиной, 27 метров шириной и 24 метра высотой, сам зал находится на глубине 100 метров под землей.

В эти же годы продолжается серийное производство всех сверхпроводящих магнитов. В производство вовлечены следующие страны: Финляндия, Италия, Франция, Россия. Сборка магнитов осуществляется в Словакии и Италии.

CERN & LHC

2006 г. - Построен новый центр управления, объединяющий пульты для систем криогеники, накопительного кольца SPS, основного кольца коллайдера и всех инженерных систем. С 2006 года управление испытаниями криогенной и магнитной систем БАК ведется отсюда.

2007 г. - Завершена установка в тоннель и последующий монтаж всех магнитов БАК. Завершен монтаж систем питания и всех систем защит, включая системы вывода энергии.

2008 г. - В январе-марте завершен монтаж детекторов CMS и ATLAS.

2006 – 2008 гг. – процедура запуска БАК (commissioning).

Осень 2008 – авария в месте соединения сверхпроводящих дипольных магнитов.

2009 г. – восстановление после аварии и повторный commissioning.

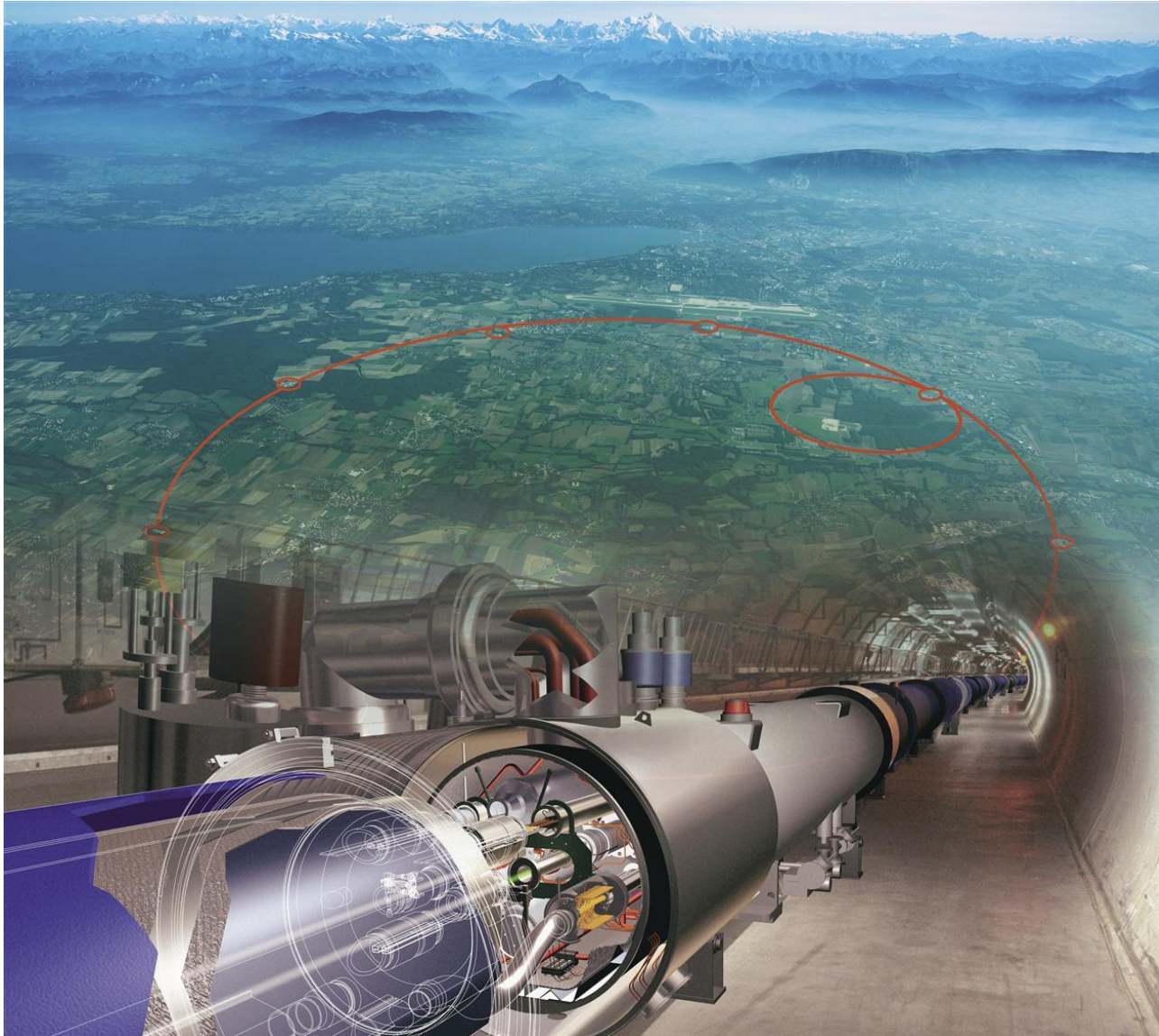
2010 г. – официальный запуск коллайдера, плавное повышение энергии, первые столкновения.

2013-2015гг. – Длинный «шатдаун» (LS1), запуск коллайдера на энергию 6.5ТэВ.

2016г. - подъем светимости до номинальной, **2017г.** – до теоретически возможной $2 \cdot 10^{34}$!

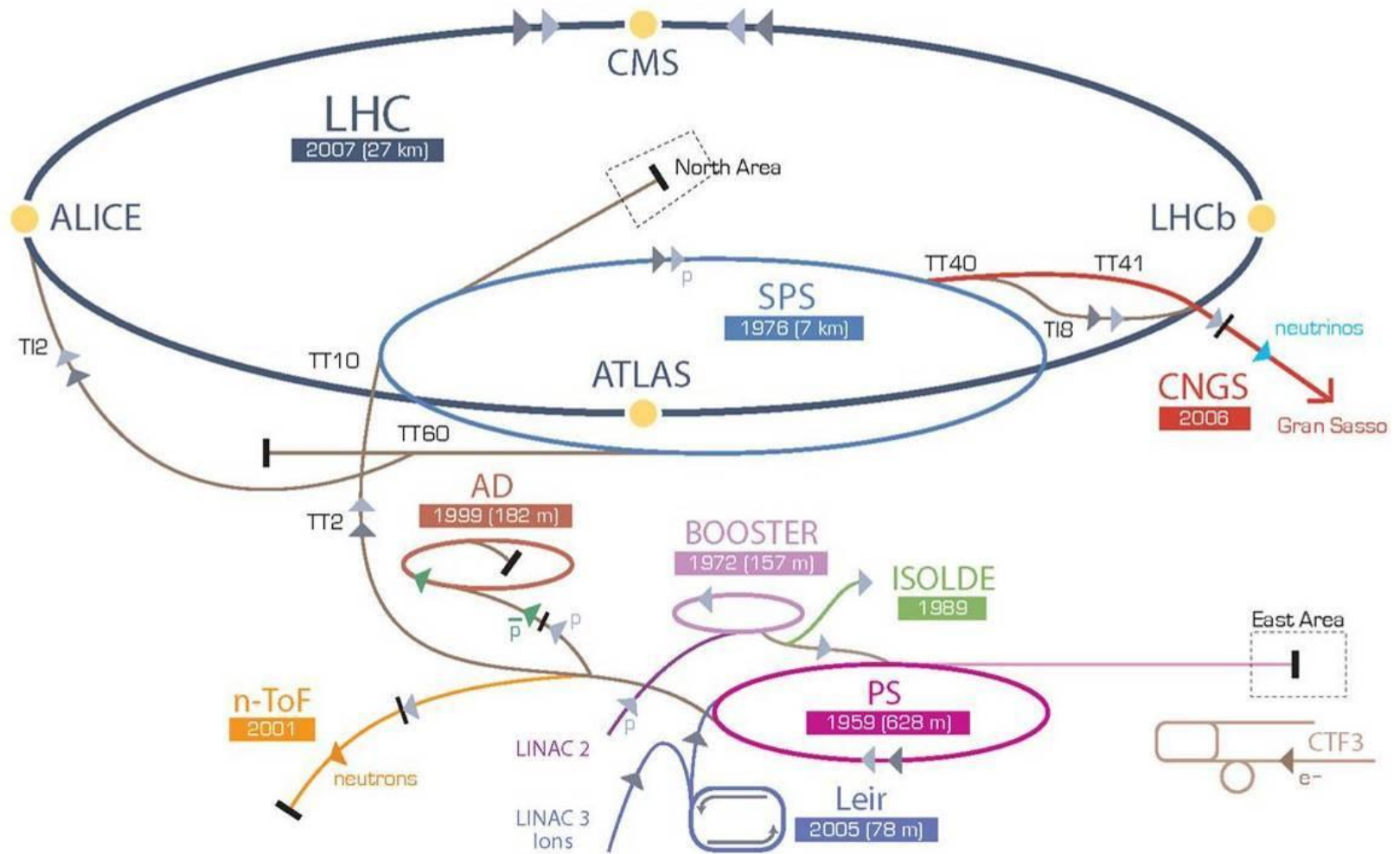
2019-2020гг. – LS2

LHC & CERN Accelerator Complex



CERN Accelerator Complex

CERN Accelerator Complex



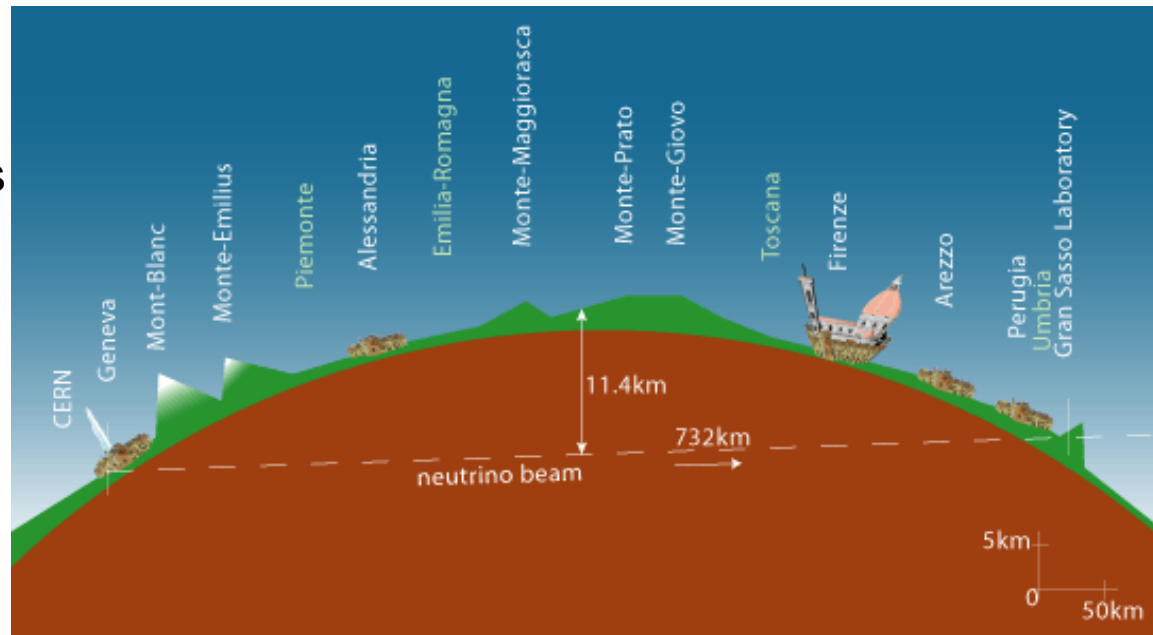
CERN Accelerator Complex

- **LINAC2** – линейный ускоритель протонов (протоны ускоряются до энергии 50 МэВ)
- **Booster** – бустерный накопитель для PS, ускоряет протоны с энергии 50 МэВ до на энергии 1.4 ТэВ. LINAC2 и Booster являются инжектором для протонного синхротрона PS
- **PS** - протонный синхротрон на энергию 26 ТэВ, периметром 628 м. PS, запущенный в 1959г., являлся самым большим протонным синхротроном на тот момент.
- **SPS** – Super Proton Synchrotron. Супер-протонный синхротрон на энергию 450 ТэВ. Весь комплекс от LINAC2 до SPS является инжекционным для LHC.
- **LINAC3** - линейный ускоритель ионов свинца (4.2 МэВ/нуклон)
- **LEIR** – Low Energy Ion Ring, ионное кольцо низких энергий (72 МэВ/нуклон). LINAC3 и LEIR являются инжектором для PS при работе PS, SPS и LHC в ионной моде

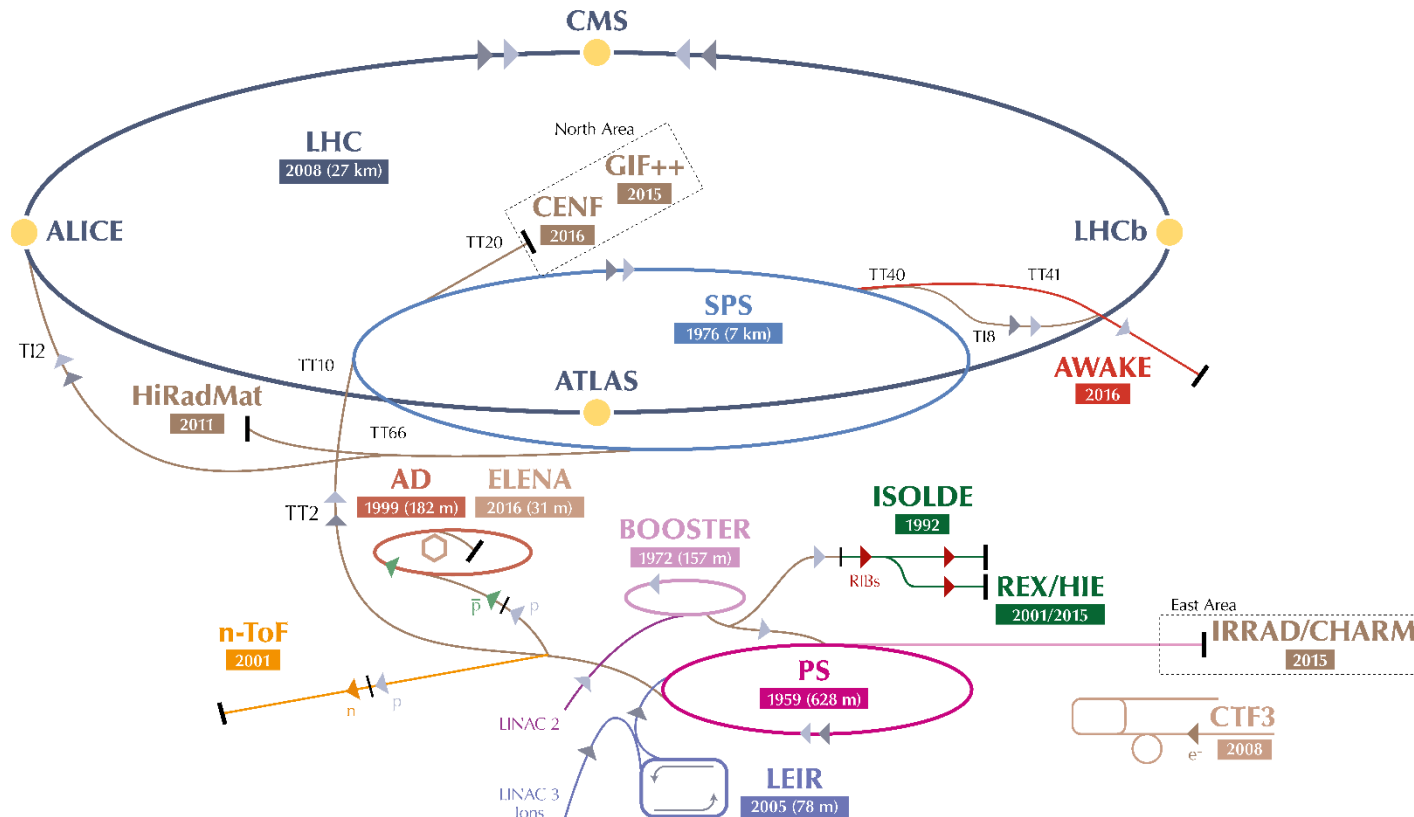
CERN Accelerator Complex

- **ISOLDE** – Isotope Separator On-Line, радиационные ионные пучки
- **n_TOF** - neutron time-of-flight facility, источник нейтронов
- **AD** – Antiproton Decelerator. Машина, обеспечивающая низкоэнергетические антипротоны для получения атомов антиводорода.

- **CNGS** – CERN neutrinos to Gran Sasso - нейтрино для лаборатории в Гран Сассо (Италия)



CERN Accelerator Complex



▶ p (protons)
 ▶ ions
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
 ▶ n (neutrons)
 ▶ \bar{p} (antiprotons)
 ▶ e^- (electrons)

LHC Large Hadron Collider
 SPS Super Proton Synchrotron
 PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator
 CTF3 Clic Test Facility

AWAKE Advanced WAKEfield Experiment
 ISOLDE Isotope Separator OnLine
 REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE

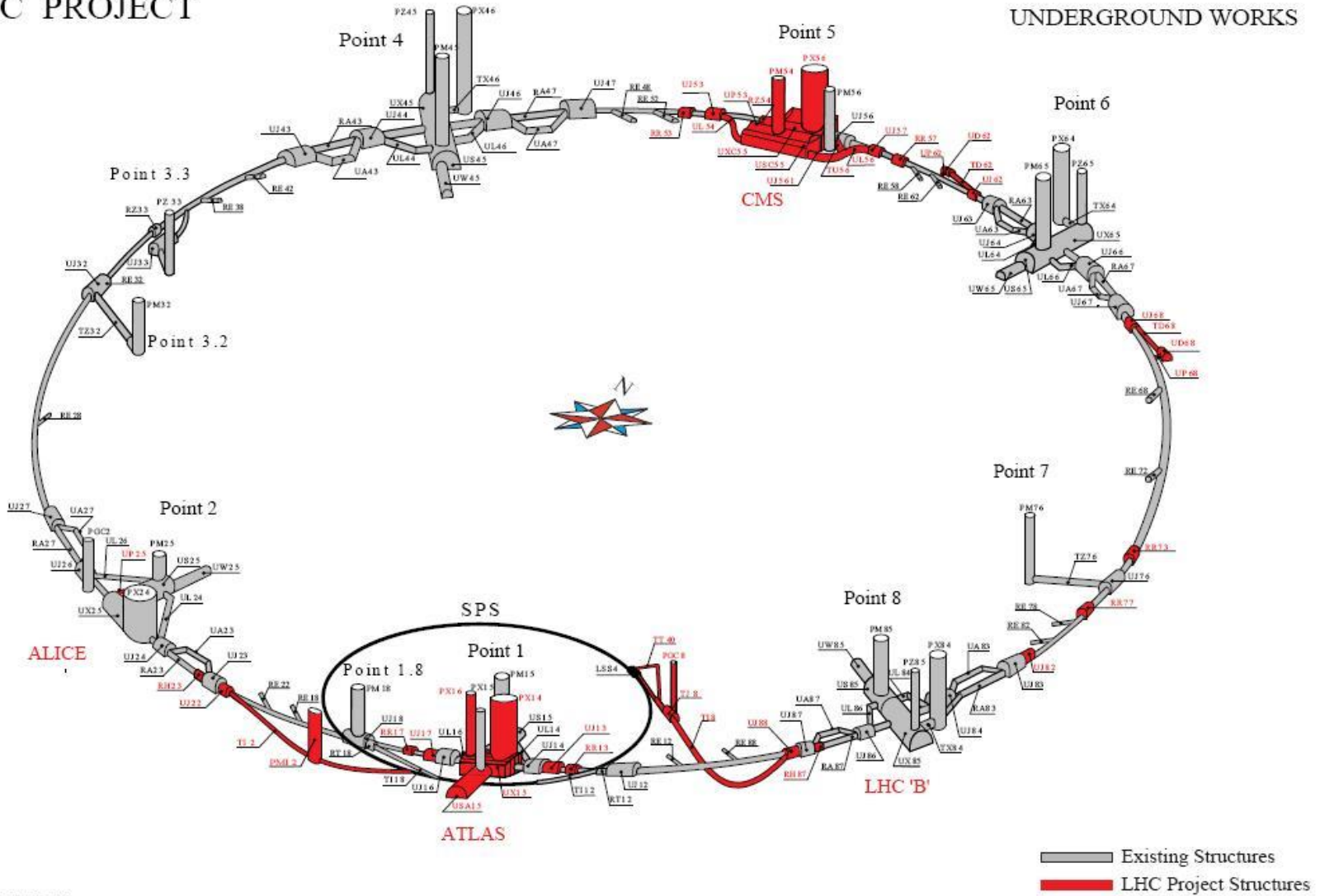
LEIR Low Energy Ion Ring
 LINAC LINear ACcelerator
 n-ToF Neutrons Time Of Flight
 HiRadMat High-Radiation to Materials

CHARM Cern High energy AccelRator Mixed field facility
 IRRAD proton IRRADIation facility
 GIF++ Gamma Irradiation Facility

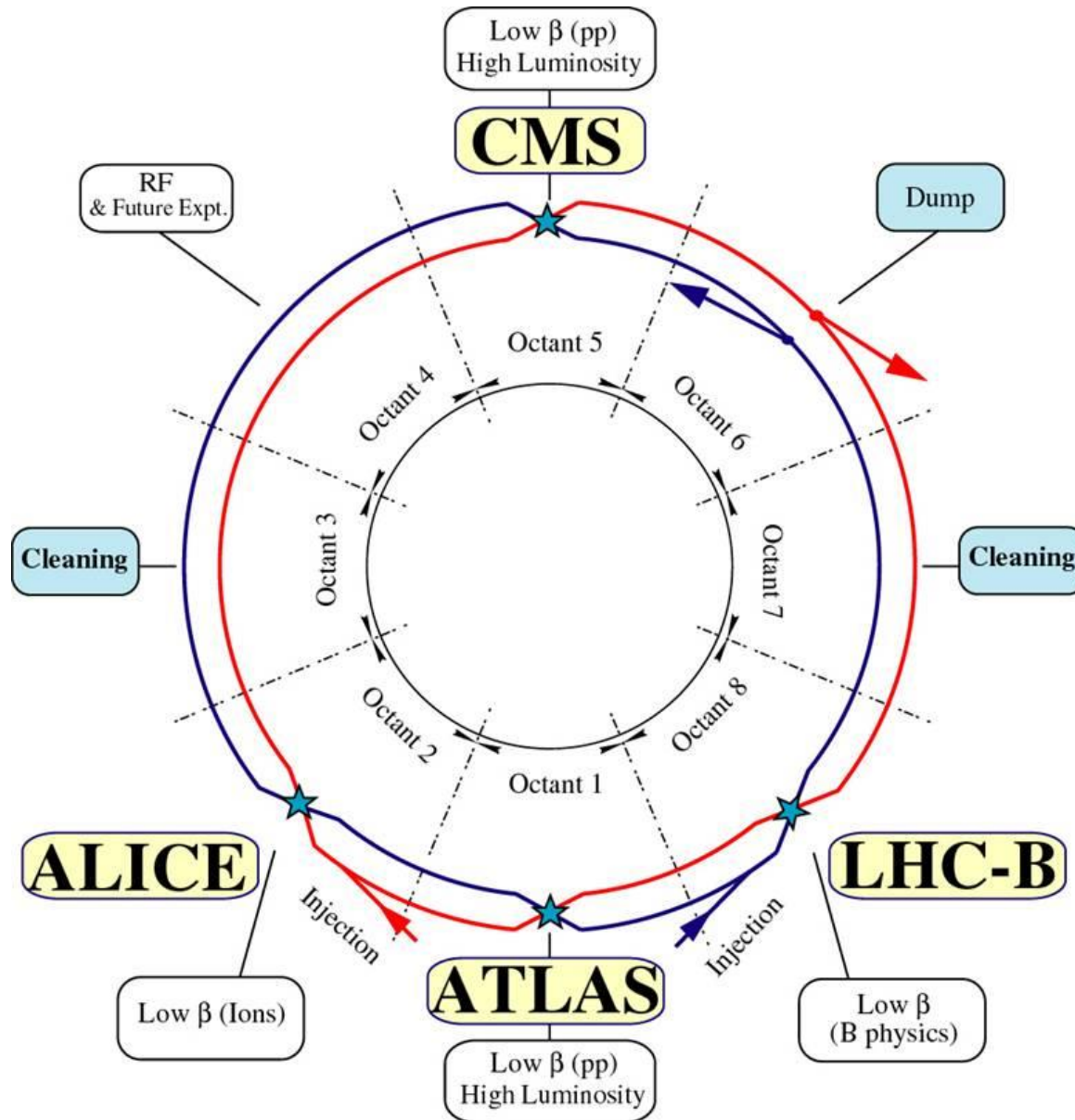
CENF CERN Neutrino platform

LHC

LHC PROJECT



ST-CE/JLB-hlm
18/04/2003



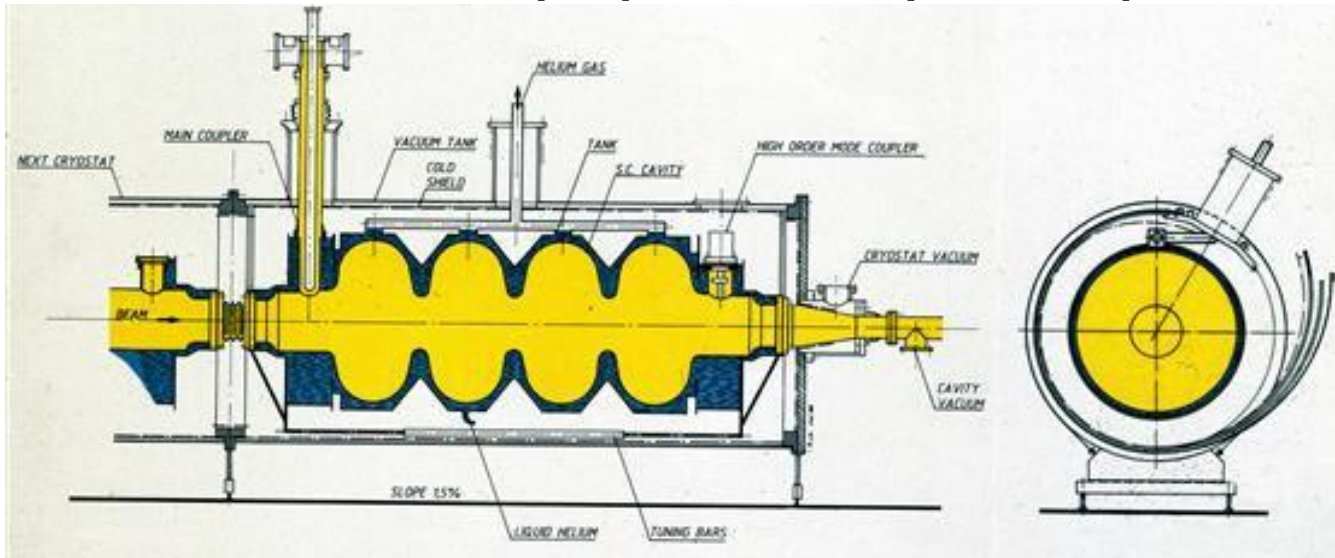
Основные параметры БАК

Параметр	Единицы	Величина
Энергия, максимальная	ТэВ	2x7(6.5)
Энергия инжекции	ТэВ	0.45
Количество частиц в сгустке		1.15×10^{11}
Количество сгустков		2808
Пиковая светимость в точках IP1 IP5	$\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$	$1(2) \times 10^{34}$
Частота обращения	кГц	11.245
Частота ускоряющей структуры	МГц	400.8
Дипольное поле на энергии 7 ТэВ	Тл	8.36
Дипольное поле на энергии инжекции	Тл	0.54

Криостат со сверхпроводящими резонаторами



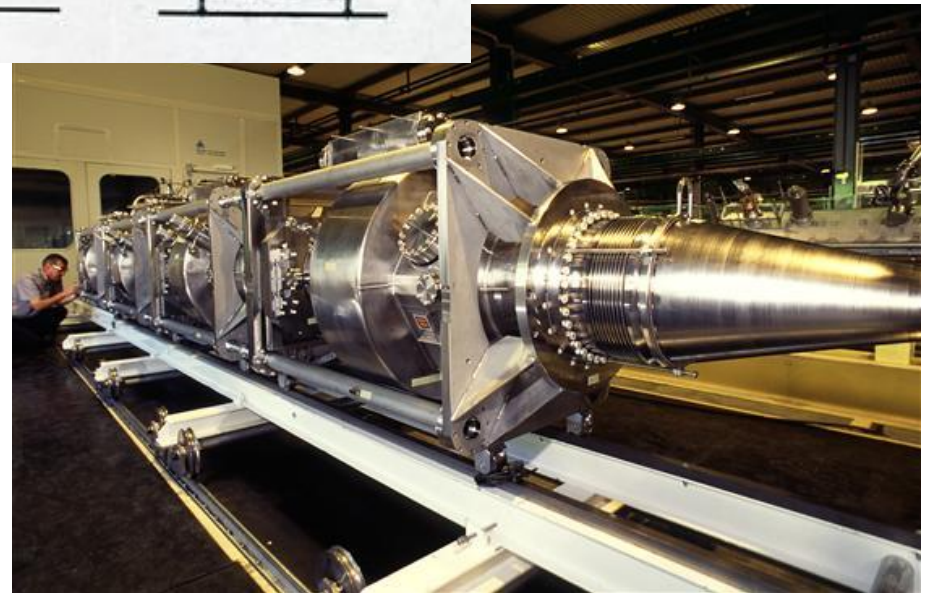
Сверхпроводящие резонаторы



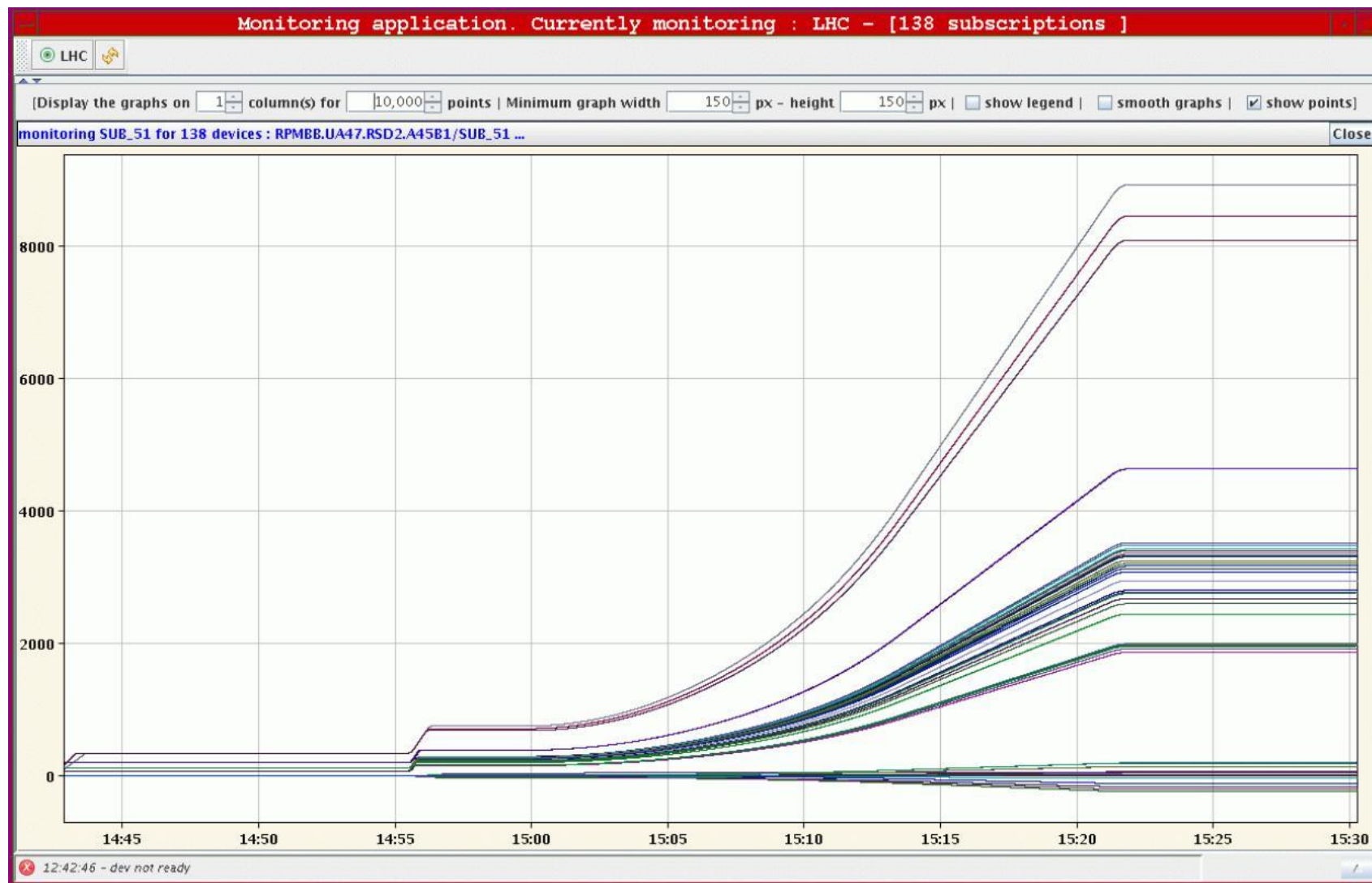
Приращение энергии 485 кэВ на каждый оборот => ~15 млн. оборотов.

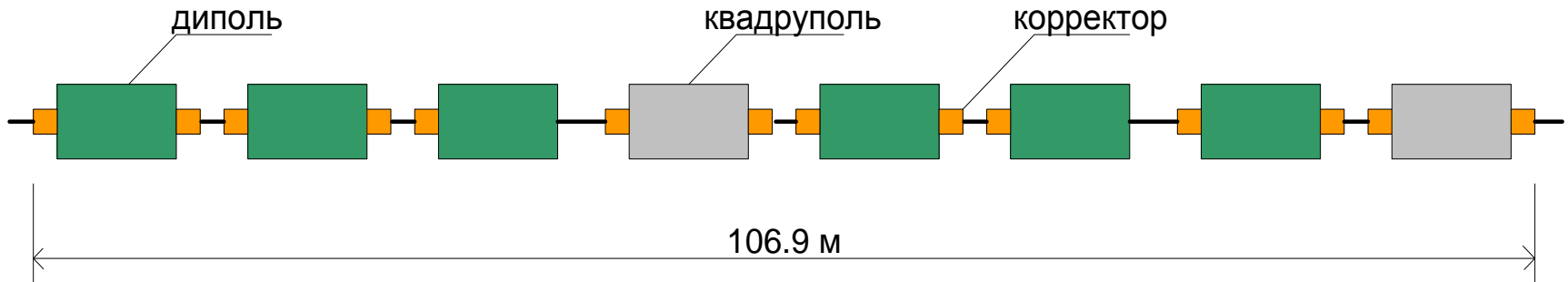
При частоте 11 тыс. оборотов в секунду, учитывая потери, подъем энергии

~30 мин.



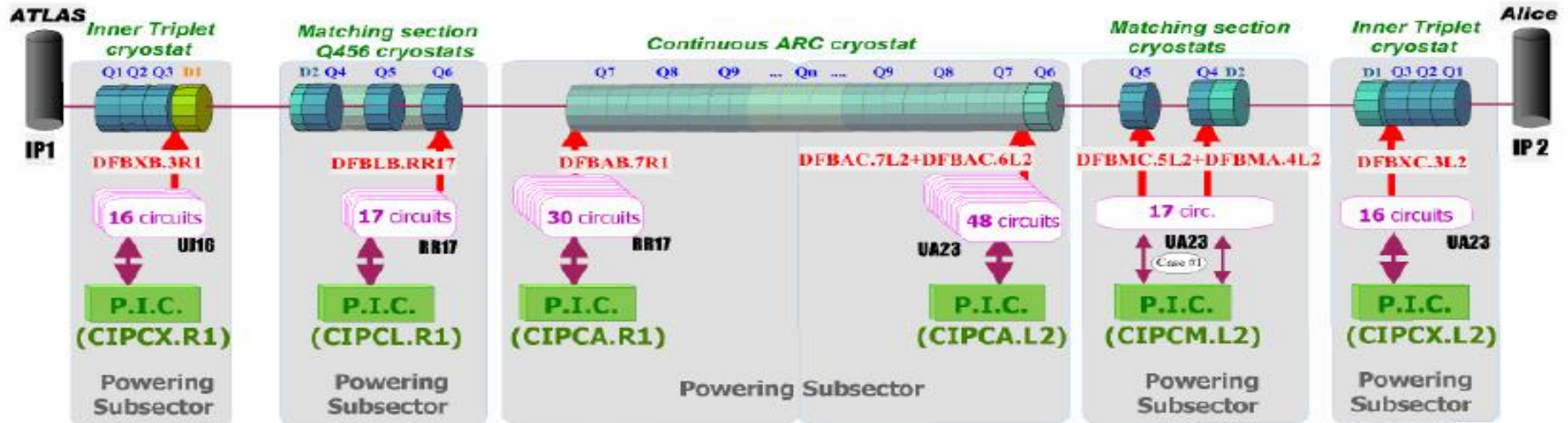
Подъем энергии





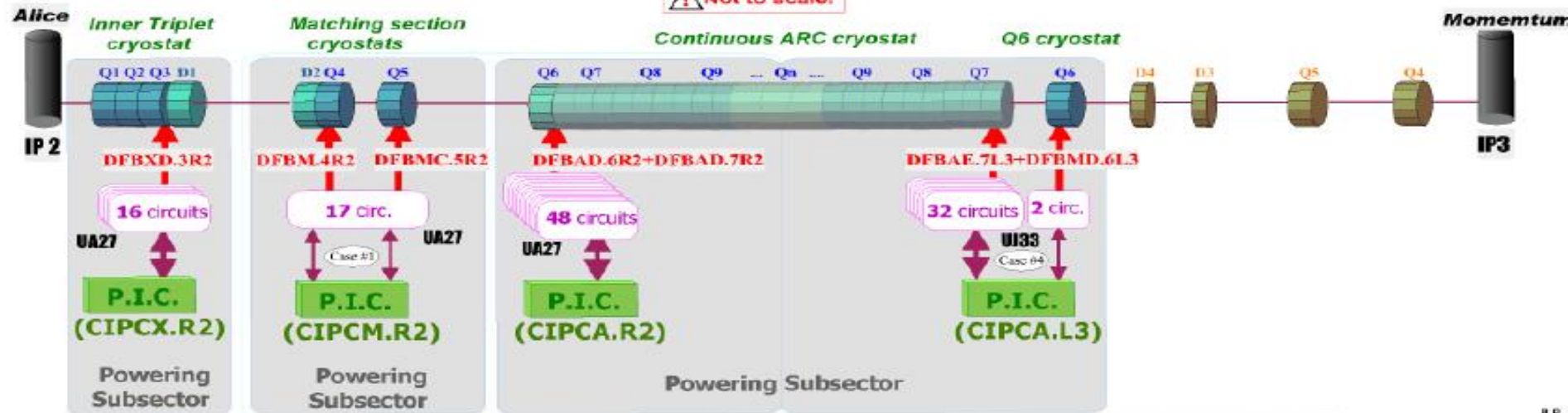
Типы магнитов	Рабочая температура, К	Макс. ток	Кол-во магнитов
Основные диполи	1.9	13 kA	1232
Основные квадруполи	1.9	13 kA	392
Индивидуально запитываемые квадруполи	4.5	4 – 6 kA	110
Разделительные диполи	4.5	6 kA	18
Квадруполи финальной фокусировки	1.9	11 kA	32
Корректирующие магниты	1.9	60 - 600A	> 4000

Структуры секторов 1_2 и 2_3



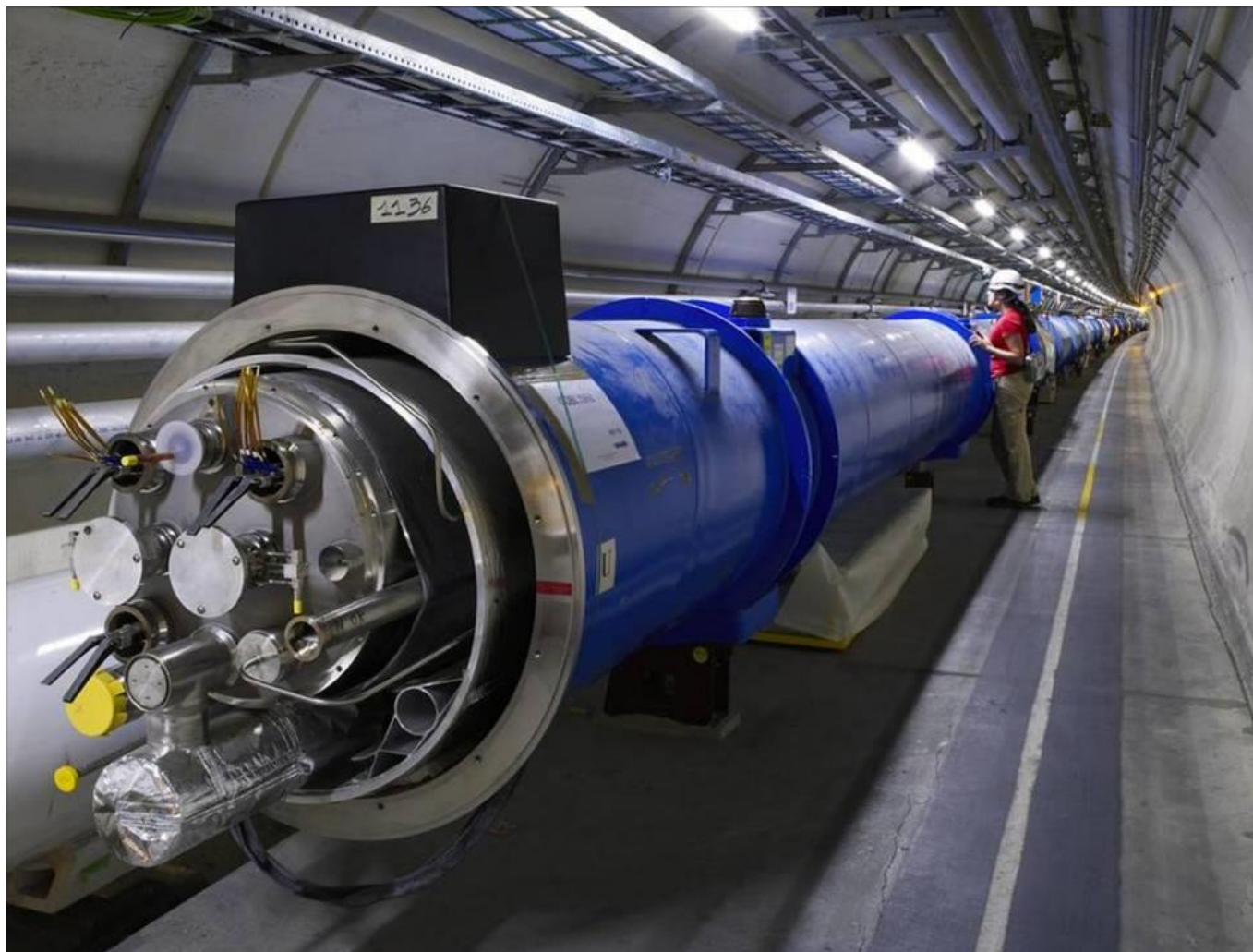
POWERING SUBSECTORS for the Sector between IP1 and IP2

⚠ Not to scale!



POWERING SUBSECTORS for the Sector between IP2 and IP3

Основные дипольные магниты

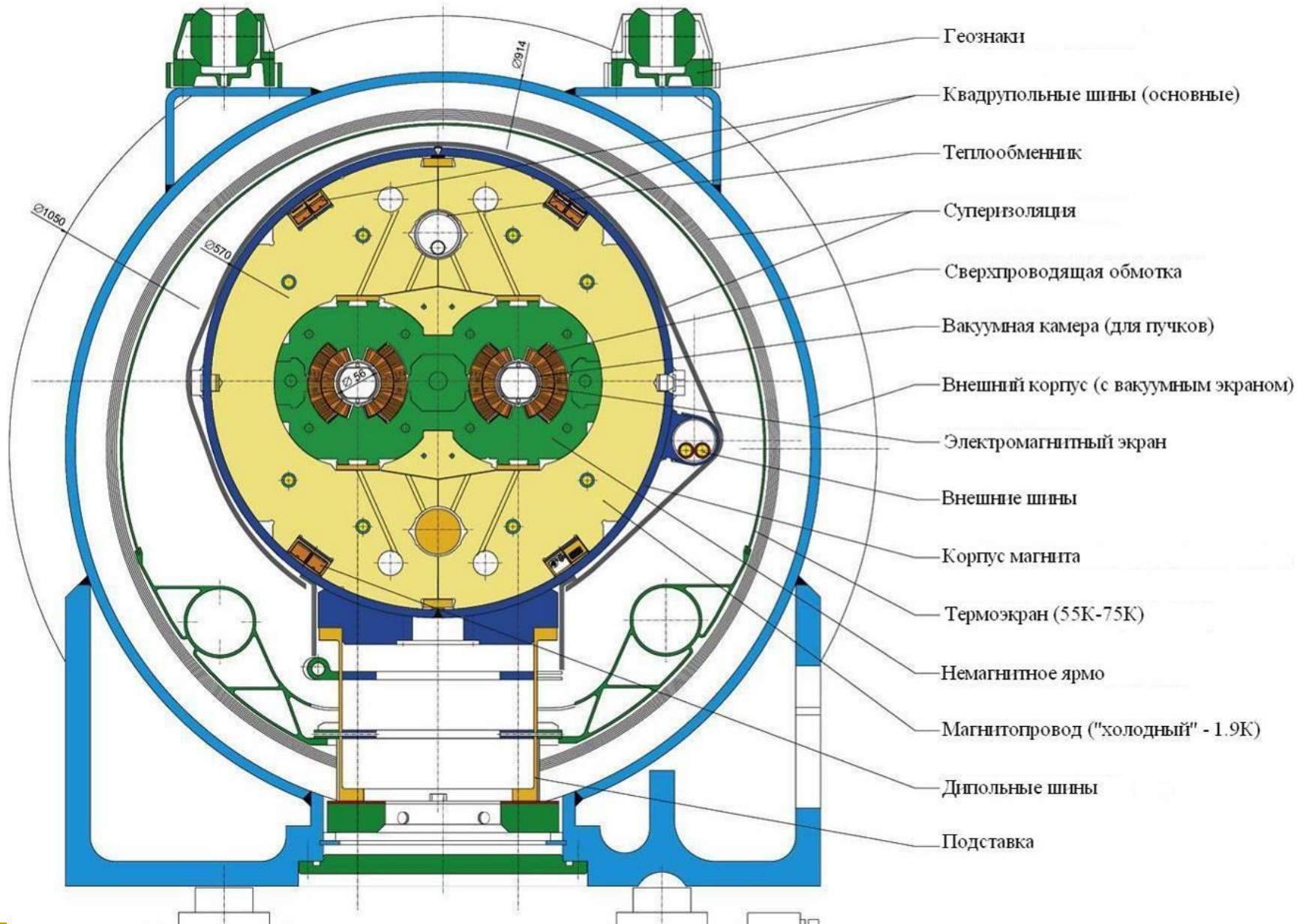


Параметры:

Рабочий ток до 11,8кА
Рабочее поле до 8.33Тл
Длина магнита: 15м

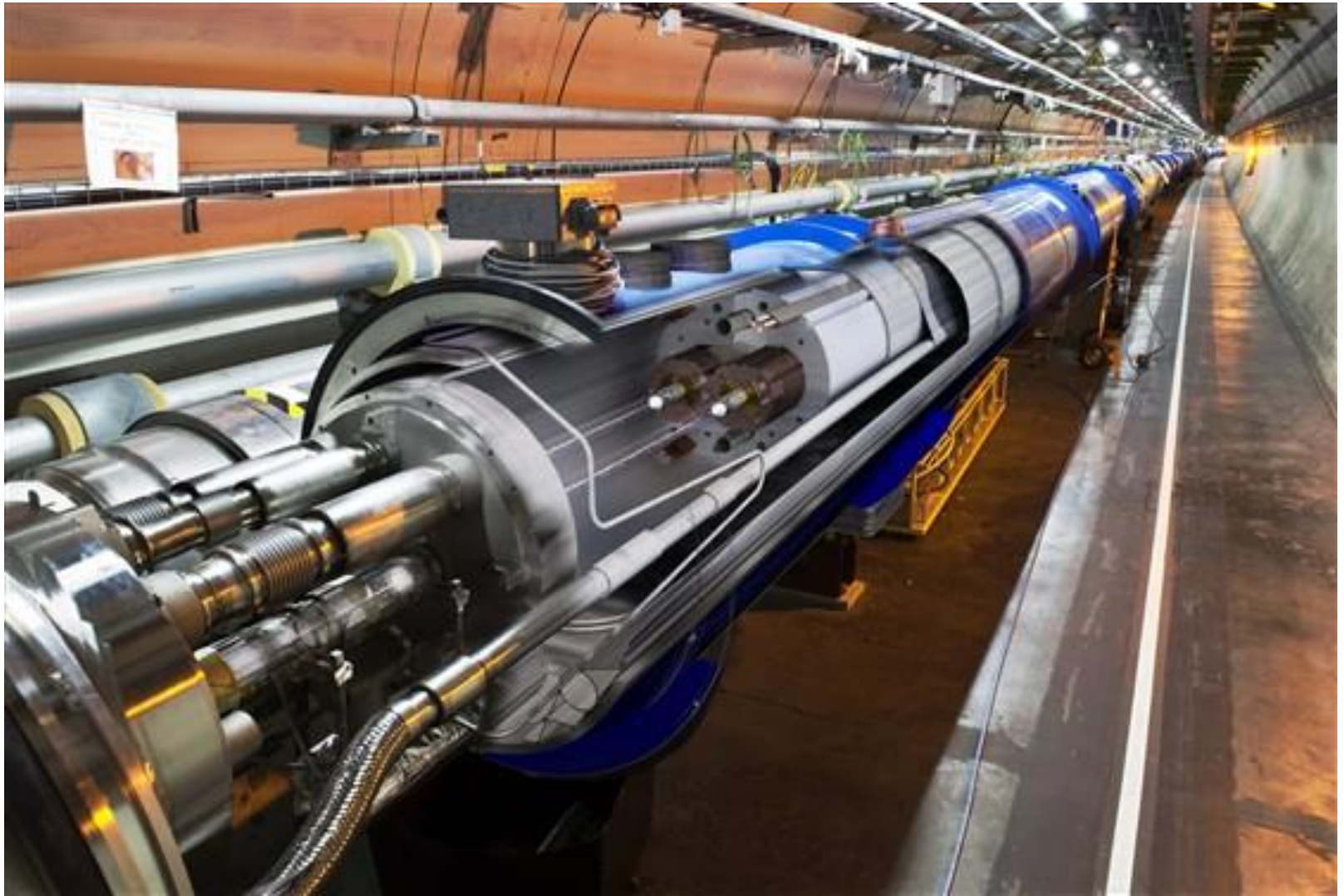
Количество в одном
секторе (одной цепи):
154шт.!

Запасенная энергия
в одной цепи: **1.1ГДж !**



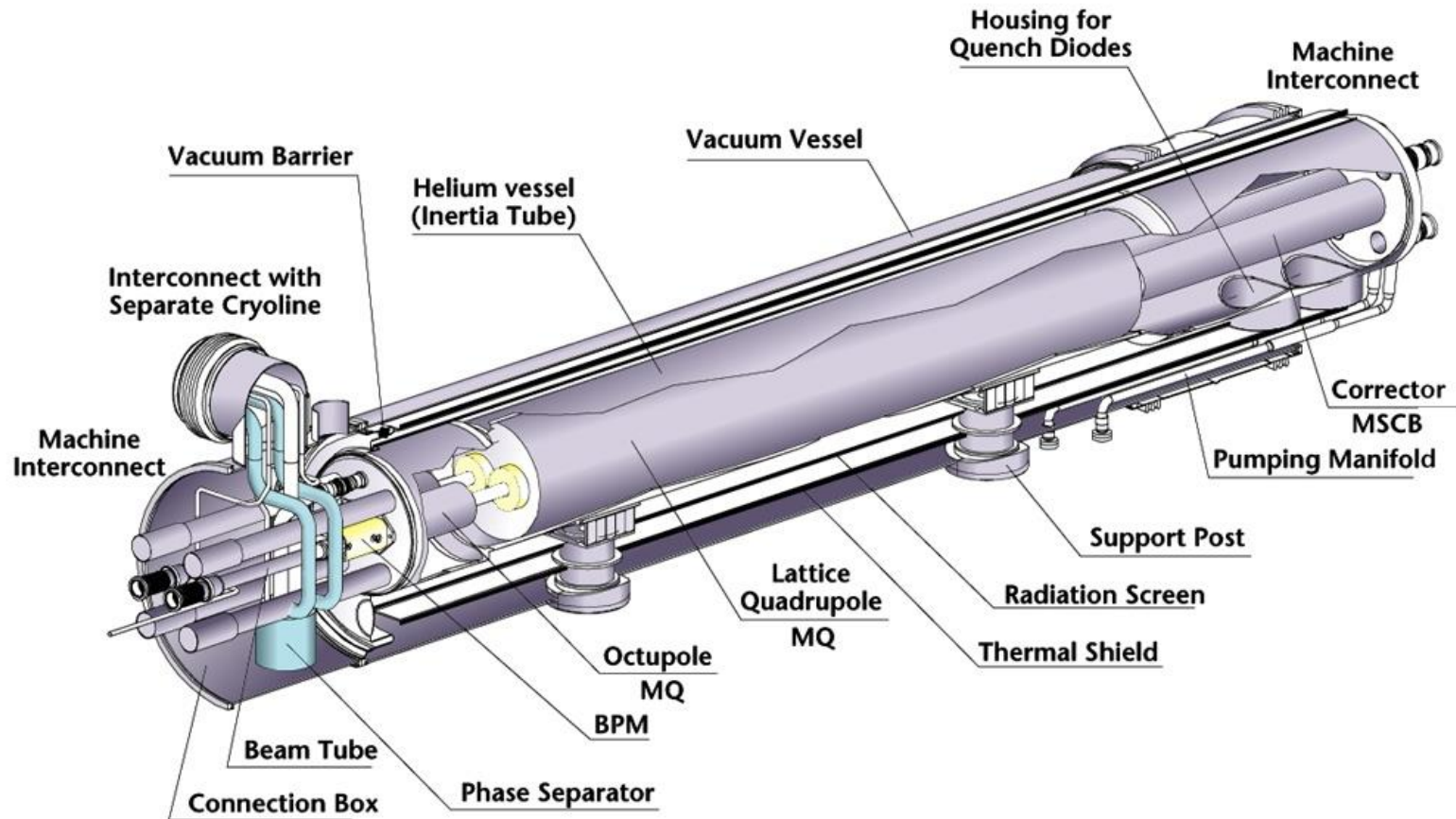
- Геознаки
- Квадрупольные шины (основные)
- Теплообменник
- Суперизоляция
- Сверхпроводящая обмотка
- Вакуумная камера (для пучков)
- Внешний корпус (с вакуумным экраном)
- Электромагнитный экран
- Внешние шины
- Корпус магнита
- Термоэкран (55К-75К)
- Немагнитное ярмо
- Магнитопровод ("холодный" - 1.9К)
- Дипольные шины
- Подставка

Магнитная система



Основные квадрупольные магниты

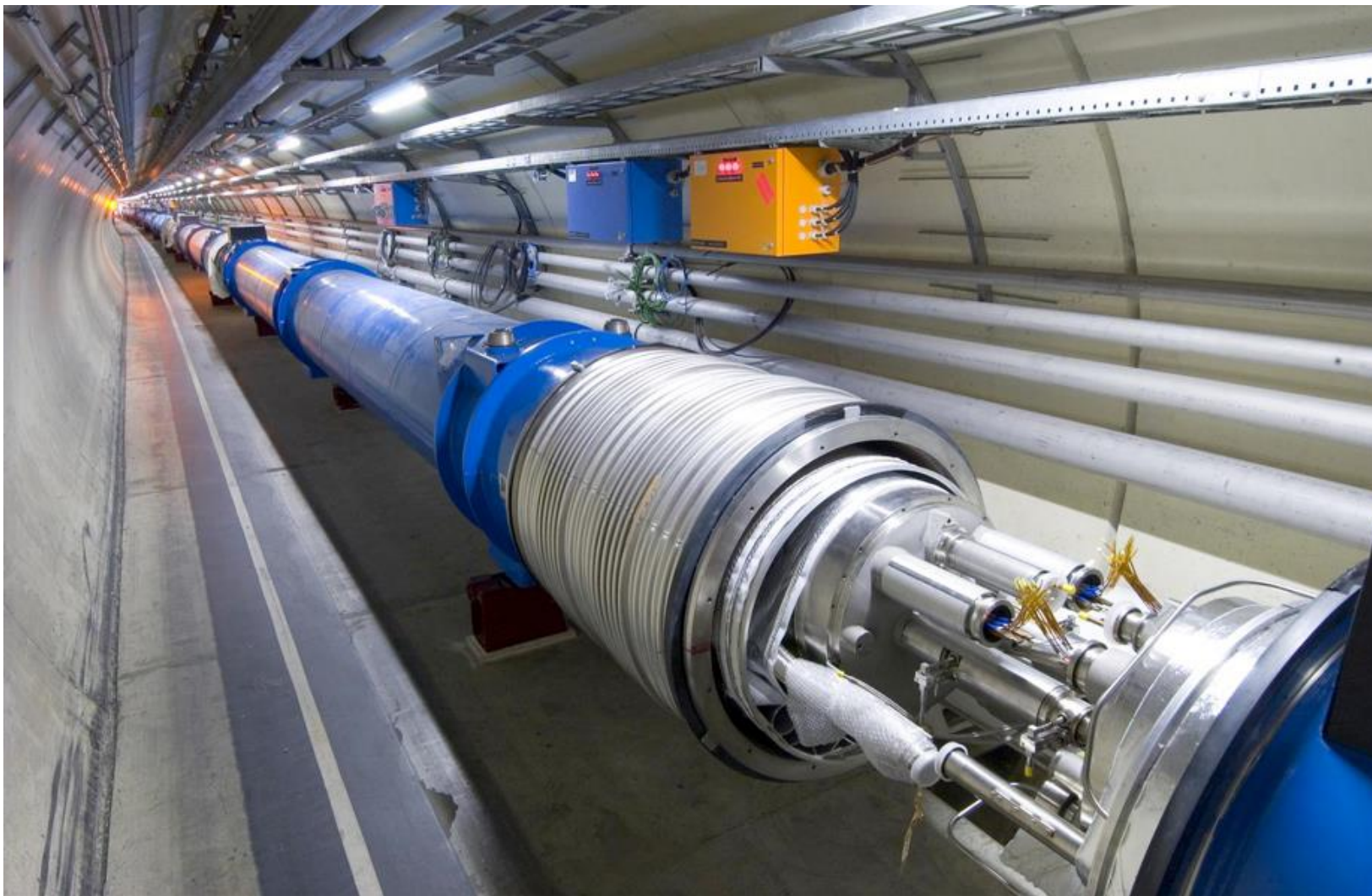
LHC Short Straight Section



CERN AC _ EI2-10E

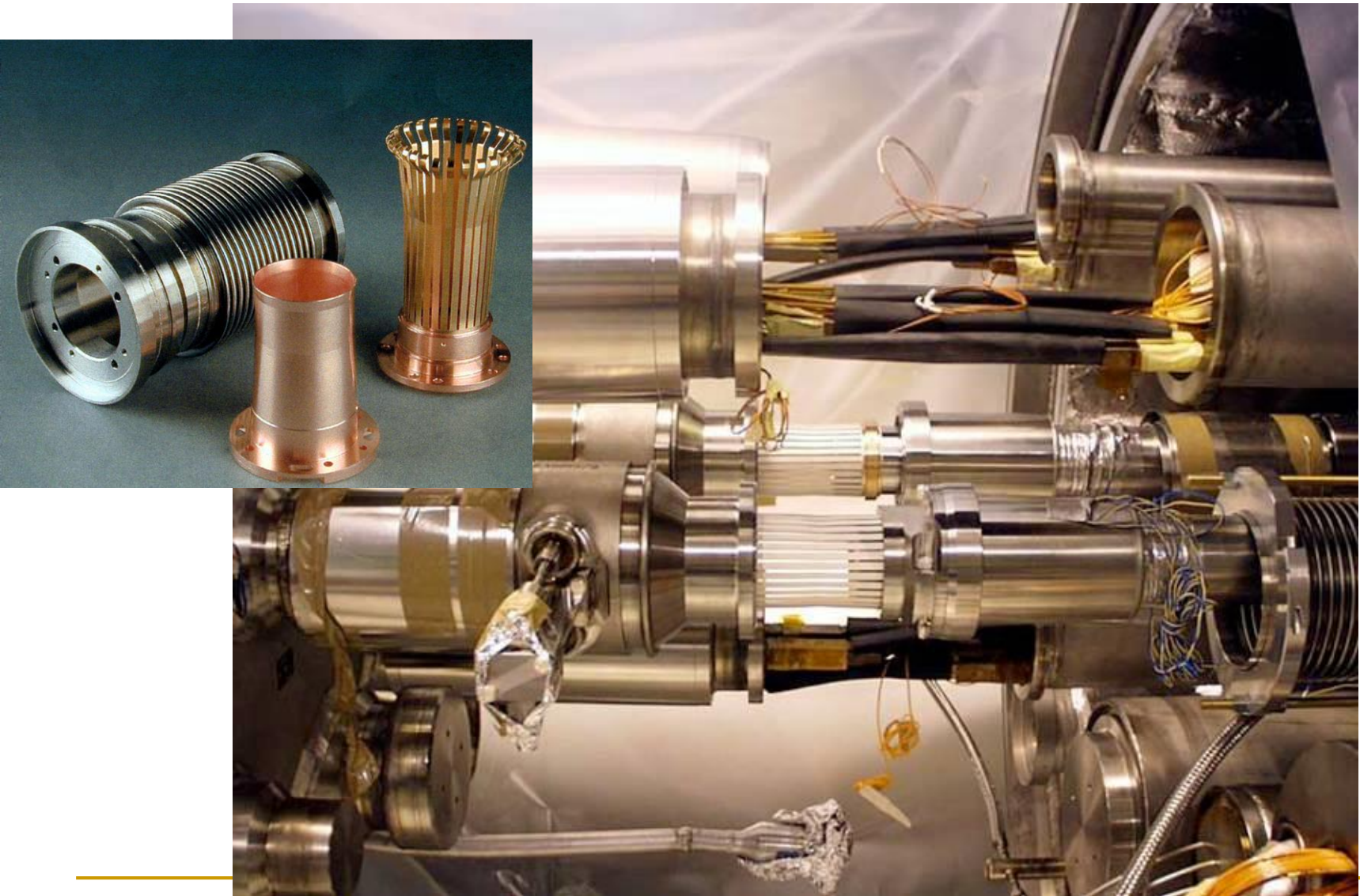
Магнитная система

Соединения сверхпроводящих шин между магнитами



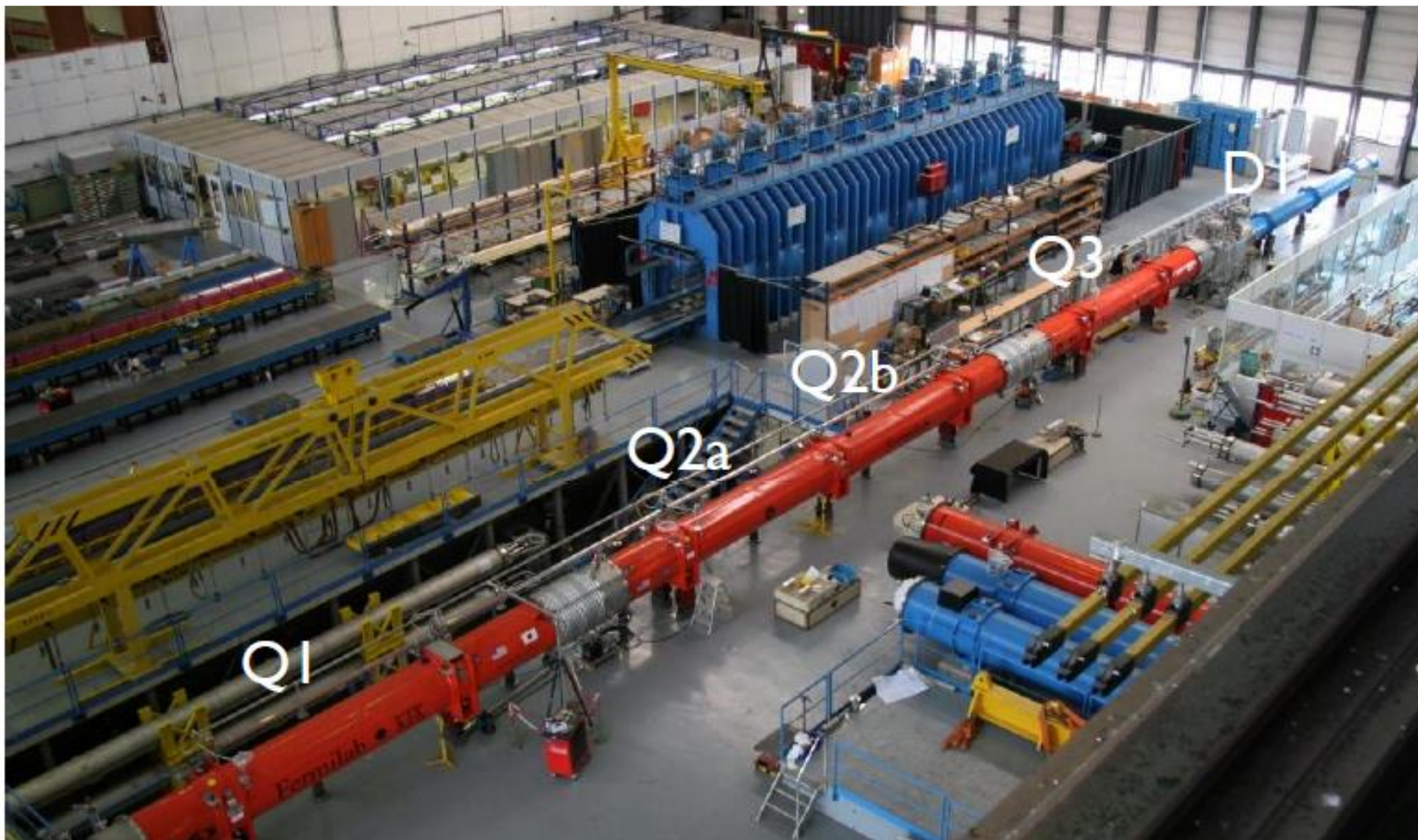
Магнитная система

Соединения вакуумных камер между магнитами



Магнитная система

Триплеты (inner triplet magnets) – магниты финальной фокусировки



Commissioning

Испытания и запуск коллайдера.



Commissioning

На испытания и запуск коллайдера в **2006–2008 гг.** были командированы более 100 сотрудников профильных научных институтов и лабораторий всего мира.

По мере завершения монтажа отдельных секторов основного кольца решено было начать их испытания. **В январе 2007** года началась процедура охлаждения единой криогенной системы первого смонтированного сектора (сектор 7-8). Уже в мае того же года почти три с половиной километра магнитной системы находились при температуре сверхтекучего гелия, что оказалось мировым рекордом по объему криогенной системы. В силу уникальности и сложности работ испытания первого сектора, а также исправление выявленных слабых мест, продлились до ноября 2007 года. Тем не менее, уже в ноябре был подготовлен следующий сектор, и испытания стали проводиться в режиме сектор за сектором. **К весне 2008 года** испытания перешли в режим параллельной работы на двух, а далее и на трех секторах одновременно. И к августу **2008 г.** почти все 27- километровое кольцо коллайдера прошло процедуру испытания магнитной системы.

10 сентября был произведён официальный запуск коллайдера, и через два дня пучок циркулировал уже непрерывно. На этом задача по получению циркулирующего пучка завершилась, и физики продолжили испытания магнитной системы.

19 сентября, в ходе испытаний магнитной системы при токе 9 килоампер, что близко к проектному значению, в секторе 3-4 (последний сектор по ходу испытаний) произошёл инцидент, в результате которого коллайдер LHC вышел из строя.

Run 1 – Run 2

Несмотря на тяжелейшие последствия аварии, в течение первой половины 2009 года были отремонтированы и поставлены на свое место более 50 магнитов, проверены все соединения между магнитами (одно из таких соединений и послужило причиной аварии) и установлены новые каналы защиты (мониторинга) этих соединений, что позволит предотвратить подобные аварии в будущем.

К концу 2009 года произошел повторный запуск коллайдера, а 23 ноября LHC официально стал «коллайдером»: самые первые протон-протонные столкновения были зарегистрированы всеми четырьмя детекторами. В конце ноября достигнута энергия протонов 1,18 ТэВ, и тем самым был побит рекорд американского коллайдера Тэватрон (0,98 ТэВ). В середине декабря столкновения проходят с энергией 2,36 ТэВ в режиме 4 сгустка на пучок.

30 марта 2010 года на Большом адронном коллайдере начались столкновения протонов с полной энергией в месте встречи 7 ТэВ. В течение всего 2010 года в коллайдере постепенно наращивалась интенсивность протонных пучков — как за счет увеличения количества сгустков в пучке, так и за счет повышения интенсивности каждого сгустка до номинального значения.

2011 год стал первым годом полноценной работы БАК.

2013-2014 годы – техническая остановка коллайдера (LS1).

2014-2015 годы – commissioning

Март 2015 – Machine checkout, beam commissioning

Июнь 2015 – н.вр. **RUN 2! 6.5TeV, номинальная светимость!**

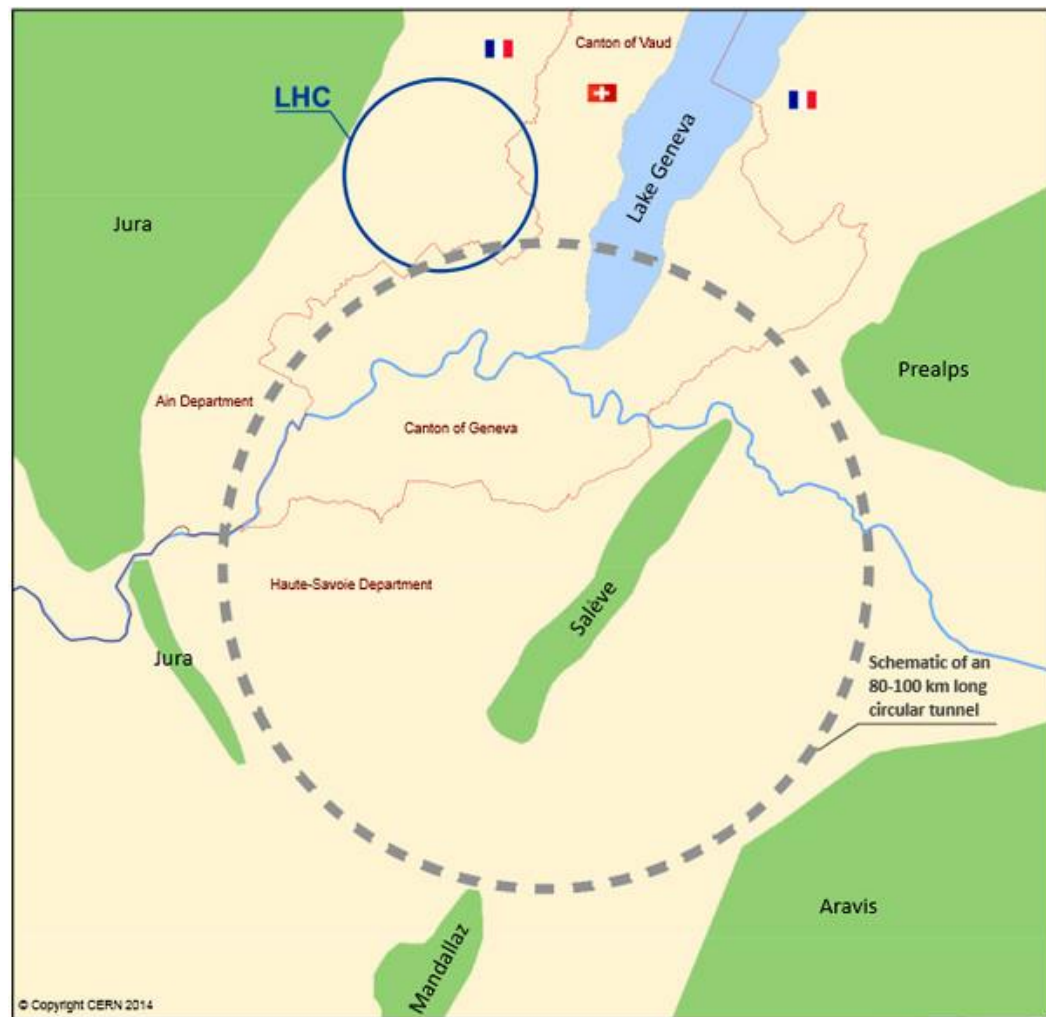
2018-2020гг. – LS2. Введение в строй Linac 4

Future

Main parameters	LHC	HL-LHC	HE-LHC	FCC
Energy [TeV]	14	14	33	100
Circumference [km]	26.7	26.7	26.7	100
Dipole field	8.33	8.33	20	16
Injection energy [TeV]	0.45	0.45	>1	3.3
peak luminosity [$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1	10	5	5
Number of bunches n at				
- 25 ns	2808	2808	2808	10600
- 5 ns				53000
Bunch population N [10^{11}], with				
- 25 ns	1.15	2.2	1	1
- 5 ns				0.2
Nominal transverse normalized emittance [μm], with				
- 25 ns	3.75	2.5	1.38	2.2
- 5 ns				0.44

Главный интерес у ЦЕРН вызывает сейчас FCC. На территории Франции и Швейцарии планируется прокопать новый кольцевой туннель длиной 80–100 км, в котором будет размещен новый протонный коллайдер с энергией 100 ТэВ. Ожидается, что технологии создания магнитов позволят повысить магнитное поле ~ в 2 раза, что даст возможность удерживать на орбите протоны таких энергий.

Реализация такой установки займет порядка 20 лет. Поэтому если этот коллайдер планируется запускать после LHC (то есть в районе 2035–2040 года), работать над ним надо уже сейчас. Изучается также вариант, при котором вначале в этом туннеле будет установлен электрон-позитронный ускоритель на небольшую энергию, который технически изготовить будет проще, а затем ему на смену придет 100-тэВный протонный.



Некоторые интересные факты

При полной проектной мощности триллионы протонов будут обращаться по основному кольцу коллайдера с частотой 11 245 раз в секунду, имея при этом скорость на уровне 99.99% от скорости света.

Два пучка протонов, каждый с энергией 7ТэВ, обеспечивают энергию столкновения 14ТэВ. При этом каждую секунду будет происходить около 600 миллионов столкновений.

Энергия, запасенная в пучке протонов, равна кинетической энергии скоростного поезда TGV (скоростные электропоезда во Франции, скорость которых достигает трехсот километров в час). При этом энергия одного протона в пучке примерно равна кинетической энергии летящего комара.

БАК – установка с экстремально высокими и экстремально низкими температурами. В момент столкновения температура достигает величин в 100 000 больше температуры ядра Солнца. Однако при этом рабочая температура сверхпроводящих магнитов, обеспечиваемая криогенной системой, составляет -271.3°C (1.9 K). Такая температура поддерживается почти на всем периметре коллайдера.

Участие России в БАК

Наша страна являлась одной из основных участников проекта БАК, осуществляла поставку высокотехнологичного оборудования как для самого коллайдера, так и для экспериментальных установок – детекторов частиц.

Стоимость Большого адронного коллайдера (не включая стоимости детекторов) составила примерно 5 миллиардов швейцарских франков, при этом Россия выполнила работы на сумму более 150 миллионов швейцарских франков.

Участие России в LHC

Резистивные электромагниты применяются в коллайдере LHC в прямолинейных промежутках и предназначены: для разделения пучков, для компенсации влияния двух больших спектрометров, для коррекции орбиты пучков заряженных частиц, а также для формирования, так называемых «очищающих вставок». Также резистивные дипольные и квадрупольные магниты применяются в каналах транспортировки пучков в коллайдер.



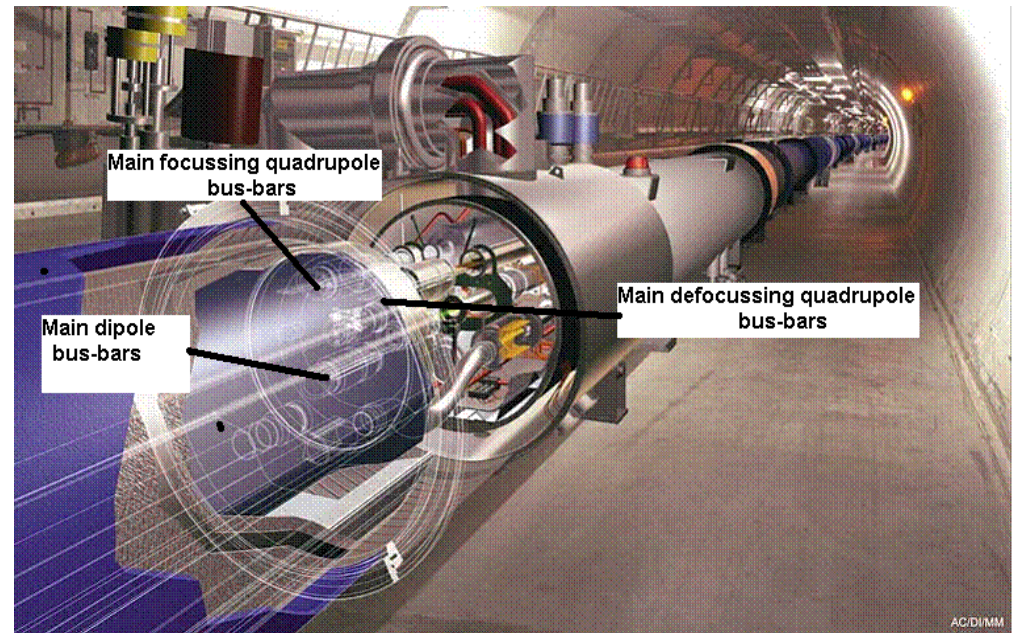
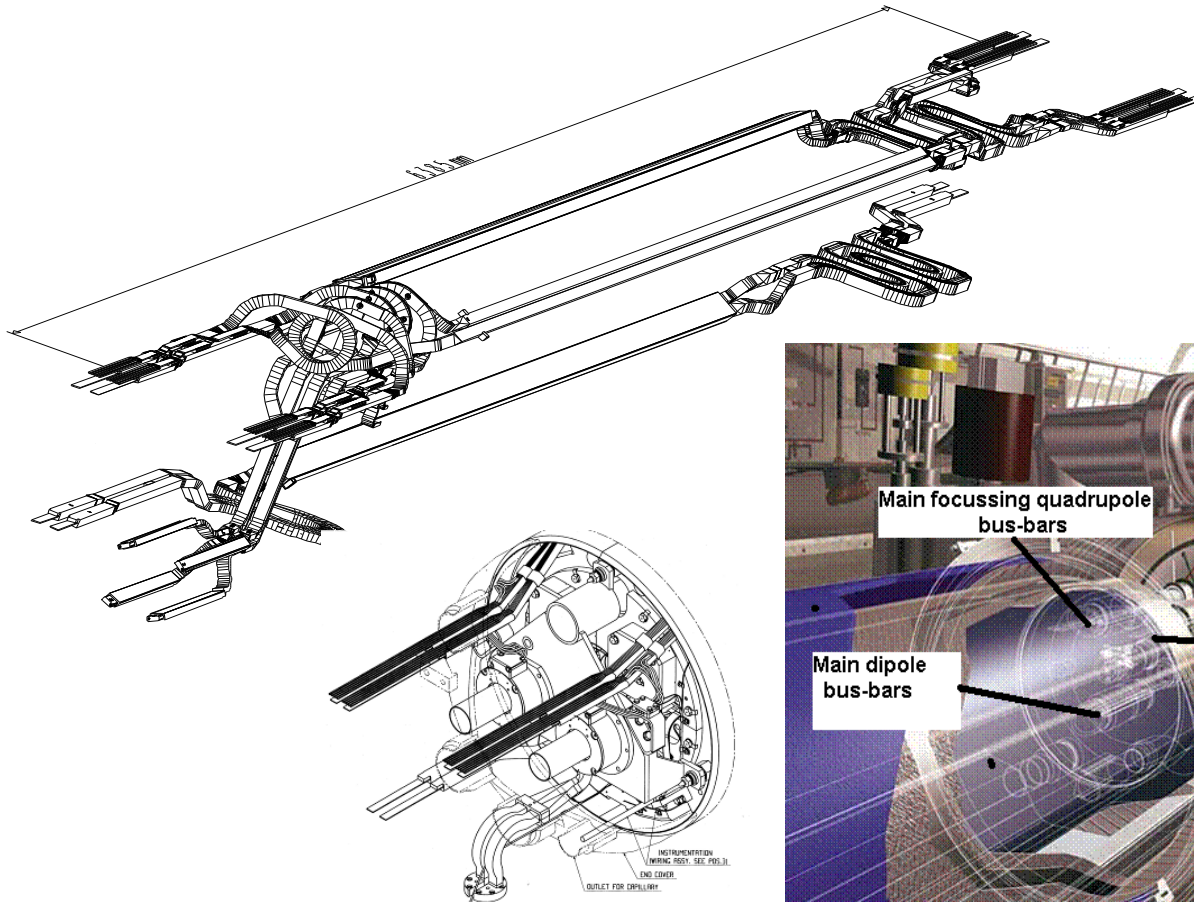
Для транспортировки пучков с энергией 450 ГэВ из протонного синхротрона SPS в коллайдер LHC построены два канала транспортировки пучка, T12 и T18, протяженностью около 2.5 км каждый. В рамках участия Российской Федерации в проекте LHC Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера поставил в ЦЕРН 360 дипольных магнитов (MBI), 180 квадрупольных магнитов (MQI) и 100 корректирующих магнитов для формирования траектории пучков при их перепуске из SPS в основное кольцо коллайдера.

Участие России в LHC

Протонный пучок инжектируется из SPS (через описанные выше каналы транспортировки) в LHC с энергией 450 ГэВ с помощью вертикальных отклоняющих магнитов (кикеров) и горизонтальных отклоняющих септум-магнитов MSI. Сброс же пучка, так называемый дамп пучка, происходит с помощью горизонтальных отклоняющих кикеров и вертикальных отклоняющих септум-магнитов MSD. Септум магниты MSI и MSD были разработаны и произведены в ГНЦ ИФВЭ (совместно с ЦЕРН) в 2003 г.



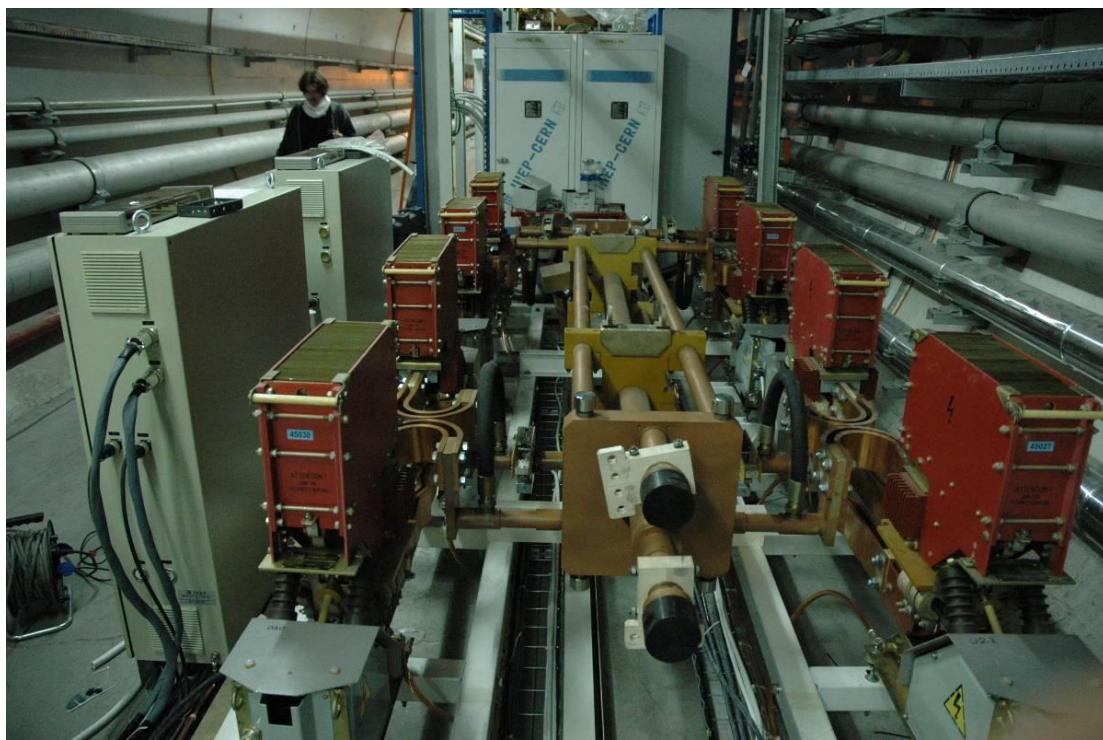
Коммутирующие сверхпроводящие шины (bus-bars).



Участие России в ЛHC

Энергия, запасенная во всей магнитной системе, составляет порядка 10 ГДж (более 1 ГДж в одном секторе), а максимальный ток варьируется от сотен ампер в цепи корректирующих магнитов до 13 кА в цепи основных магнитов. Большинство сверхпроводящих магнитов коллайдера ЛHC требуют защиты в случае перехода проводника в резистивное состояние (срыв сверхпроводимости). При этом основным элементом защиты является система вывода энергии из сверхпроводящих магнитов.

Системы вывода энергии из основных магнитов БАК (поставлены ИФВЭ и ИЯФ СО РАН)



Участие России в ЛHC

Системы вывода энергии из корректирующих магнитов БАК (поставлены ИЯФ СО РАН)



Поставлено 225
таких систем!

Участие России в ЛHC

Электрические распределительные боксы (DFB) обеспечивают буферный переход от "теплой" части электрической цепи питания магнитов к "холодной", т.е. сверхпроводящей части. Боксы представляют собой криостат, в который устанавливаются токовводы, непосредственно обеспечивающие переход высокотемпературной части к сверхпроводящей (токовводы описаны ниже).

В ГНЦ ИФВЭ было изготовлено 52 криогенных DFB для ЛHC. ИЯФ СО РАН поставил токовводы: на 13кА (64 шт.), 6кА (258 шт.) и 600А (708 шт.).



Установка электронного охлаждения

В 2004 г. в ИЯФ была заказана установка для накопления и охлаждения тяжелых ионов свинца в накопителе LEIR, необходимых для LHC. Высокое качество электронного пучка позволили накопить нужное количество ионов свинца и обеспечить высокую светимость LHC в режиме ион-ионных столкновений.



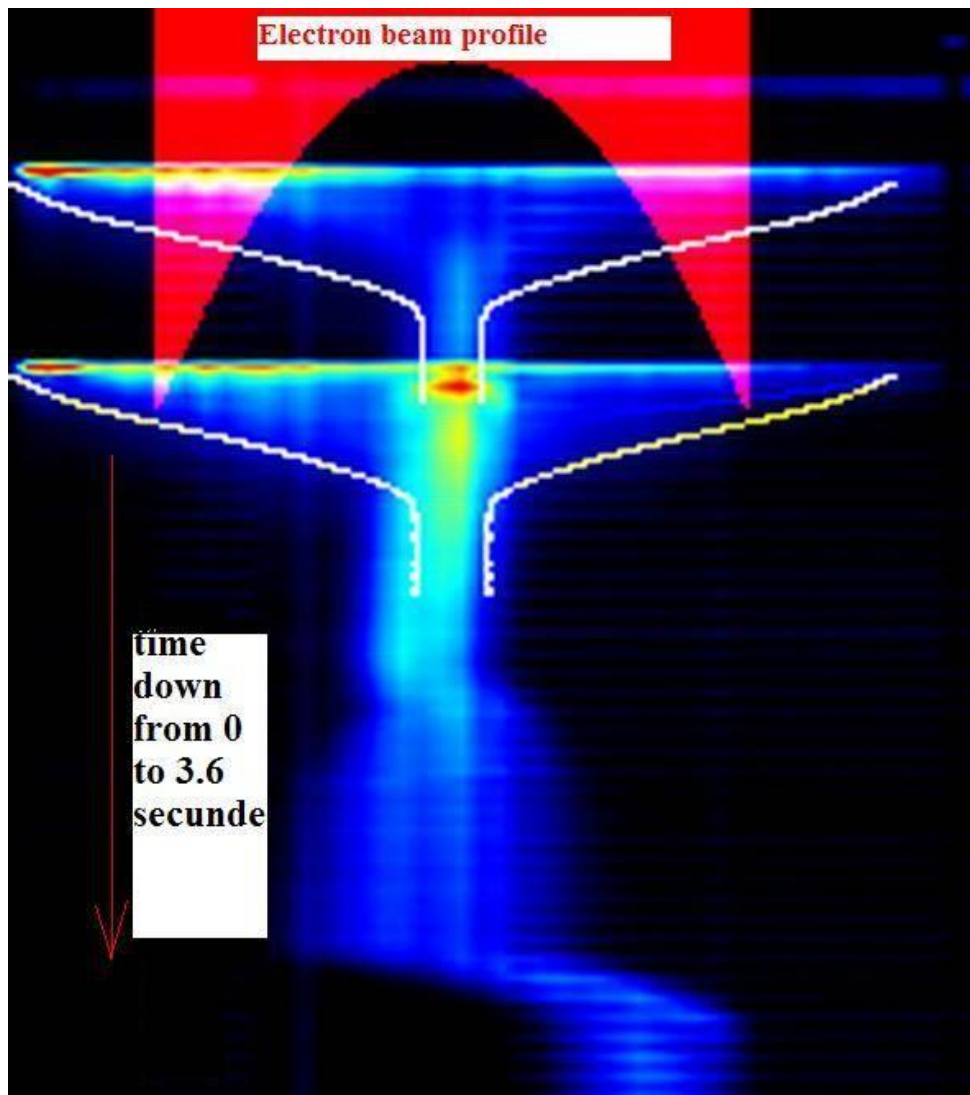


Рисунок демонстрирует измеренный профиль ионного пучка (сигнал с профилометра). Первоначально широкий ионный пучок инжектируется в LEIR и занимает практически всю разрешенную апертуру 50 мм. Затем пучок быстро охлаждается до размера около 2 мм, через 0.2 сек. происходит новая инжекция широкого (горячего) пучка, и он опять охлаждается. Далее охлаждаемый ток выключается, и накопленный пучок немного расширяется из-за внутривидеопучкового рассеяния.

Экономическая эффективность участия России после запуска коллайдера ЛНС и выхода его на реализацию физической программы чрезвычайно высока, поскольку российские высококвалифицированные ученые и инженеры имеют доступ к уникальному дорогостоящему оборудованию, к самым современным компьютерным технологиям, используют опыт и разработки мирового уровня при минимальных затратах бюджетных средств. Безусловно, это участие будет способствовать развитию критических технологий и инновационной деятельности, привлечет новые инвестиции в научные организации и промышленность.

Очевидно, что результаты данного международного сотрудничества в области физики частиц будут использоваться для развития научных исследований и высоких технологий во многих приоритетных направлениях в силу их масштабности и универсальности.

Спасибо за внимание!

Литература

Lyndon Evans. LHC Machine.

CERN: The accelerator complex

<http://public.web.cern.ch/public/en/Research/AccelComplex-en.html>

Simone Gilardoni (CERN-BE/ABP): Introduction to CERN/accelerators/LHC

LHC Project Illustrations

<http://cdsweb.cern.ch>

А.И. Ерохин. Вывод и рекуперация энергии в индуктивных и емкостных накопителях. Диссертация.