

---

# Accelerators today and tomorrow: new challenges

---

*Ерохин Александр*

ЦЕРН, ИЯФ СО РАН

2015

г.

## Часть III

### **Ожидаемые новые установки (направления)**

***Synchrotron light sources (photon science)***

***Heavy ions and neutrons***

***Lepton and hadron colliders***

### ***Synchrotron light sources (photon science):***

**NSLSII** – первый пучок (~25мА) получен весной 2014, идет commissioning  
(ИЯФ СО РАН поставил Бустер «под ключ»)

**XFEL** – запуск в ~2017 (Россия является участником проекта)

**MAX-IV** – запуск в ~2016 (Россия является участником проекта)

### ***Heavy ions and neutrons:***

**FAIR** (Россия является участником проекта) – первые сверхпроводящие магниты в  
2016 г., запуск ~ 2018г?

**ESS** – запуск в ~ 2025г.

**NICA** – Дубна, mega-science project, проект есть, начато финансирование, запуск..?

### ***Lepton and hadron colliders:***

**HL LHC** – long shutdown II, через 3-4 года работы на «проектных» параметрах

**FCC** – прозрачных сроков нет, стадия проработки концепции

**c-tau** - ИЯФ СО РАН, mega-science project, проект есть, финансирования нет!

**CLIC** – есть дизайн-проект, определена коллаборация, есть сроки



**Цель** – обеспечить ультра-яркое излучение в рентгеновском диапазоне для фундаментальных и прикладных исследований в биологии и медицине, химии, материаловедении, геологии, нанотехнологиях.

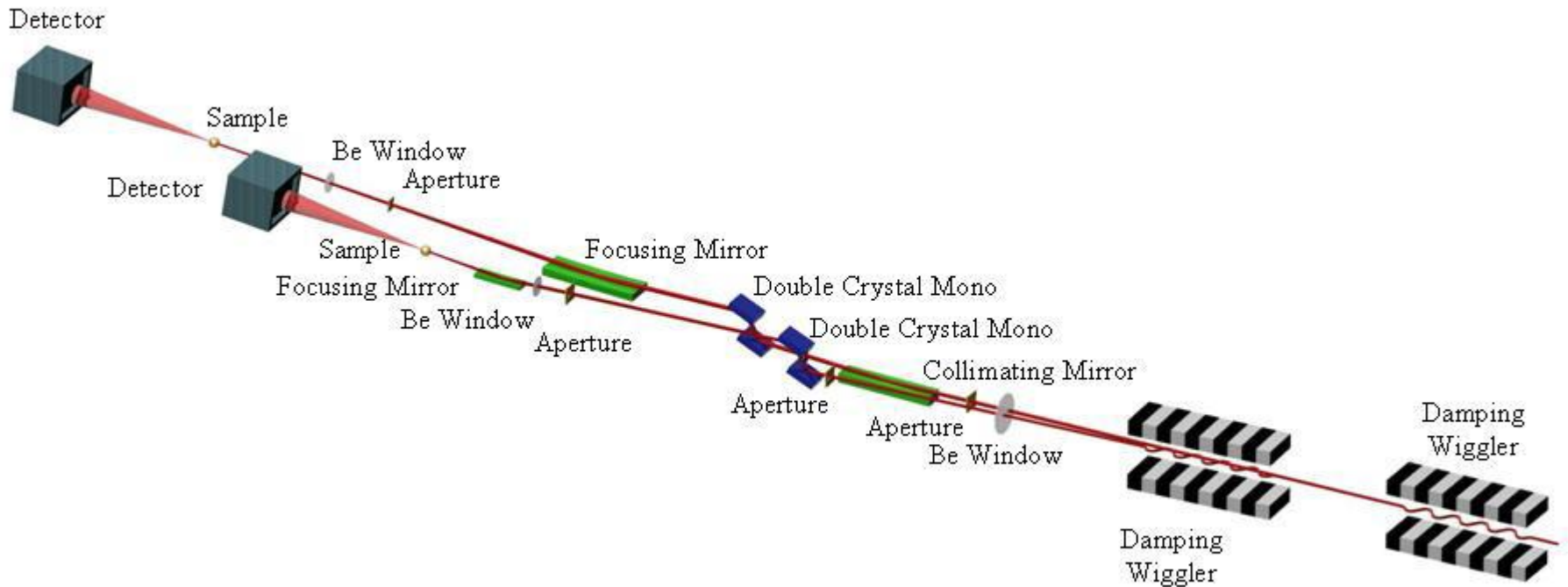
**Инвестор** - U.S. Department of Energy (DOE), стоимость ~ \$1 миллиард

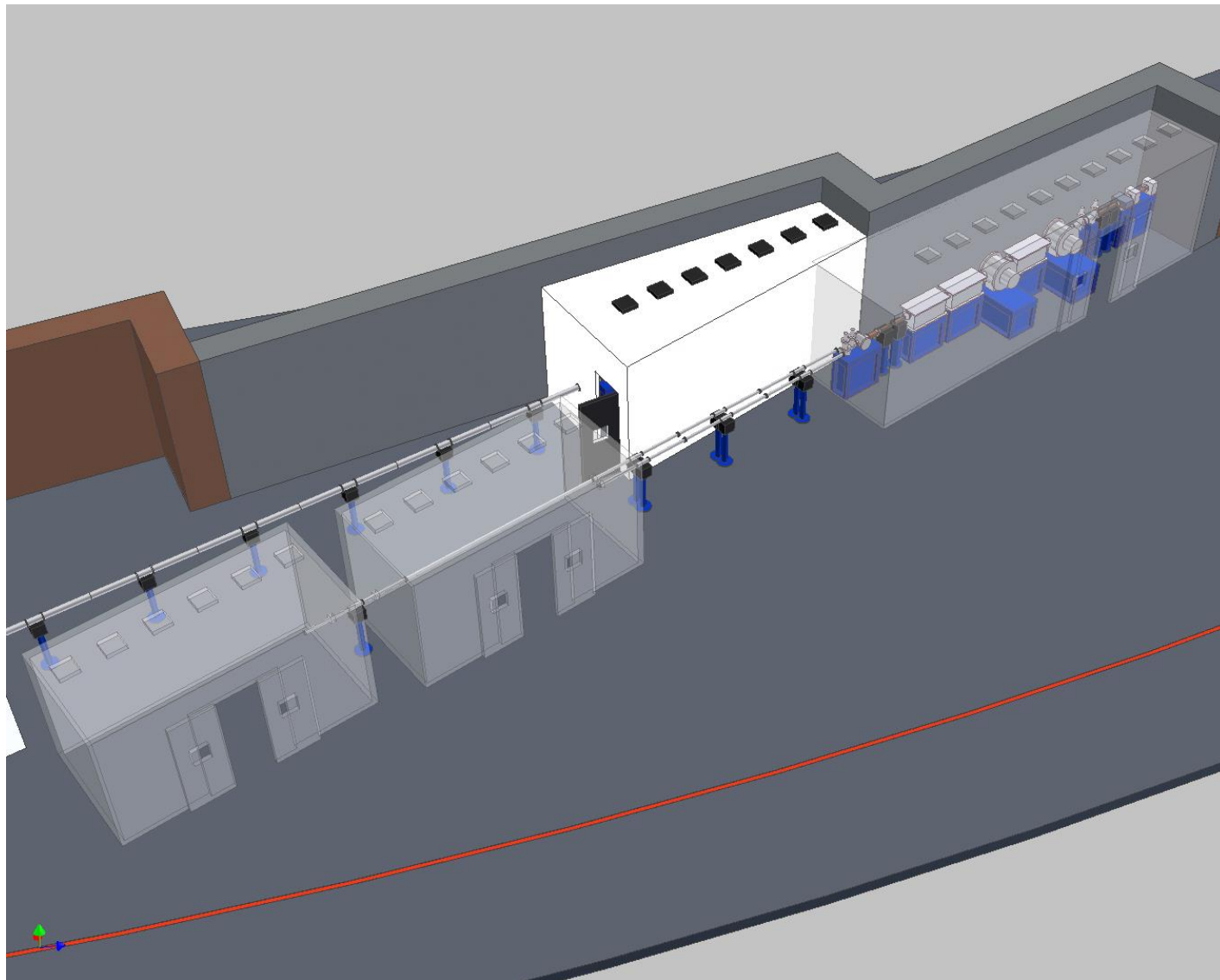
**Пользователи** - исследователи со всего мира

На предыдущем проекте NSLS каждый год работали около 2200 исследователи из 400 университетов, правительственных лабораторий и компаний над исследованиями в таких областях, как биология, медицина, химия, науки об окружающей среде, физики и материаловедения. Более чем 900 публикаций в год.

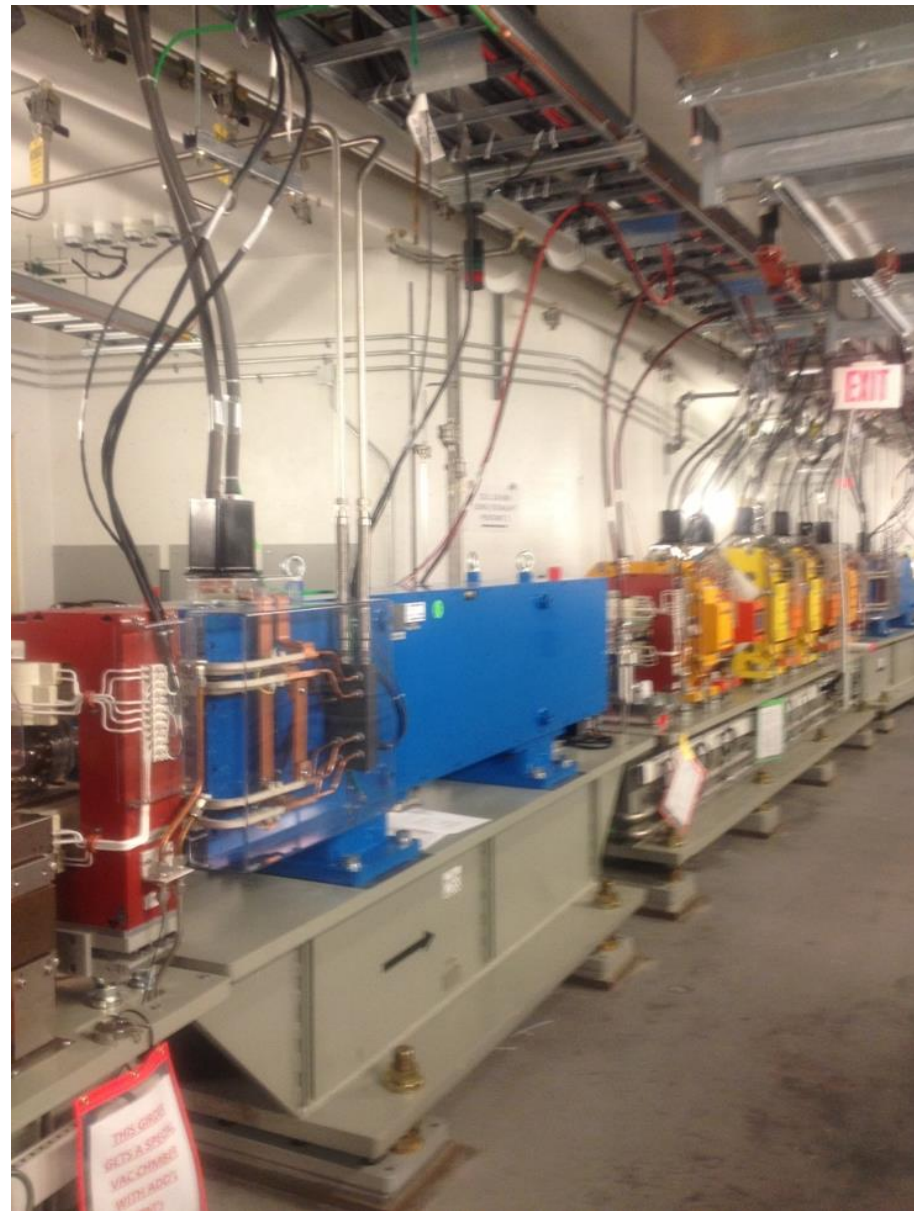
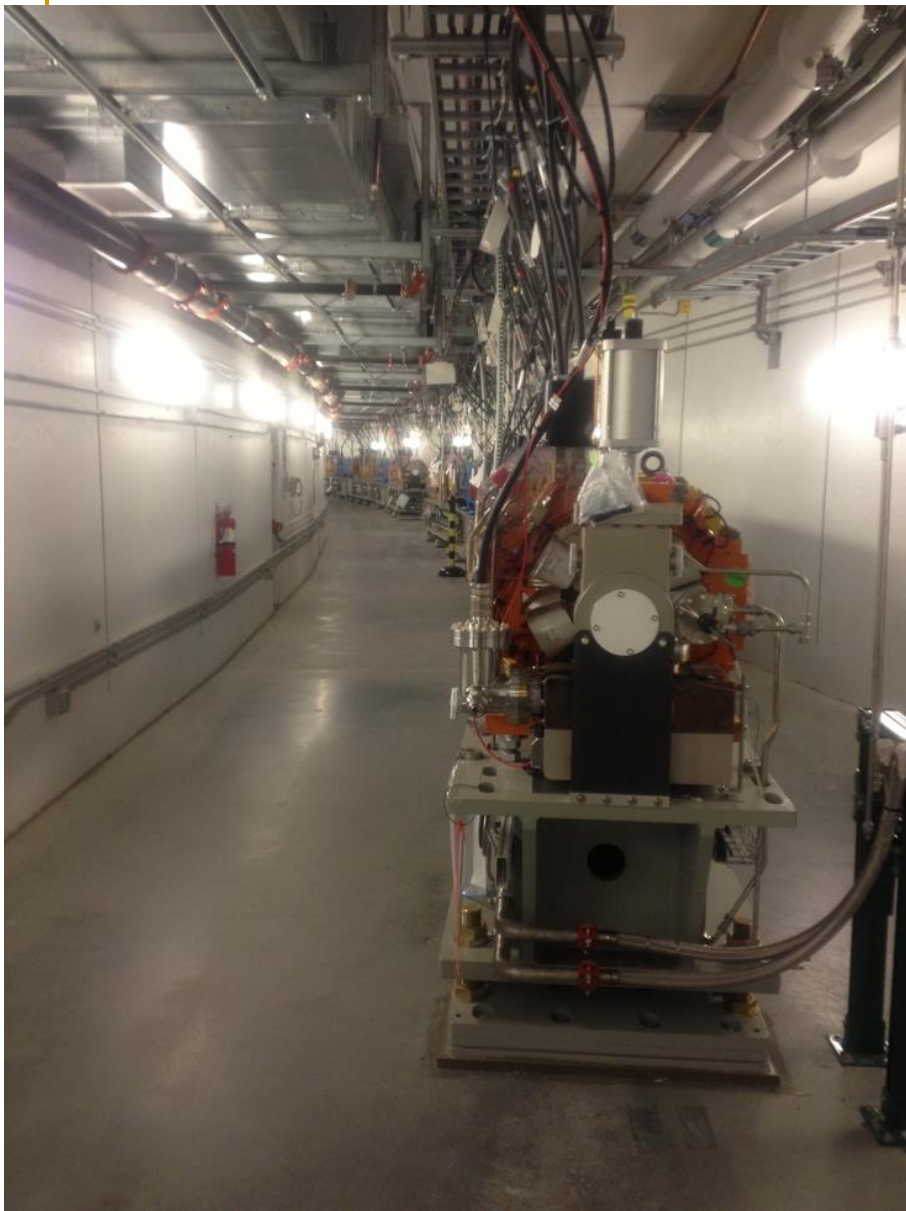
NSLS-II с энергией электронов 3ГэВ, рентгеновские лучи более, чем в 10000 раз ярче по сравнению с NSLS.

Энергия электронов - 3.0 ГэВ  
Ток пучка – 500 мА  
Горизонтальный размер пучка 38 мкм  
Вертикальный размер пучка 3 мкм

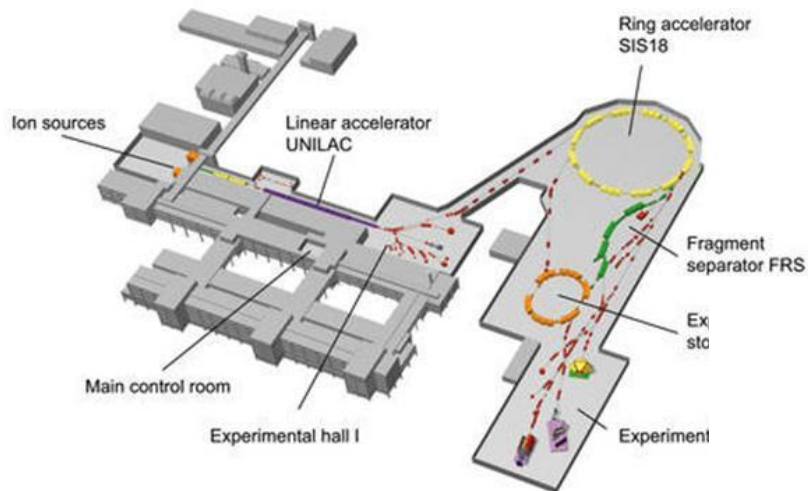






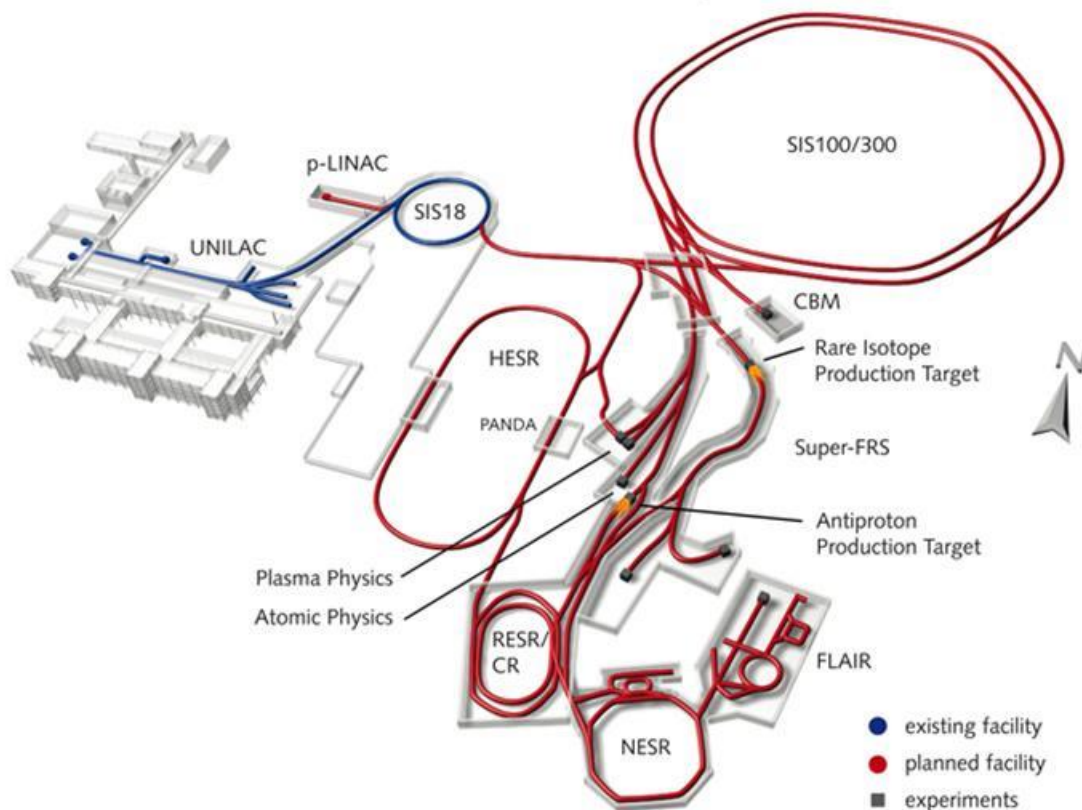


# FAIR

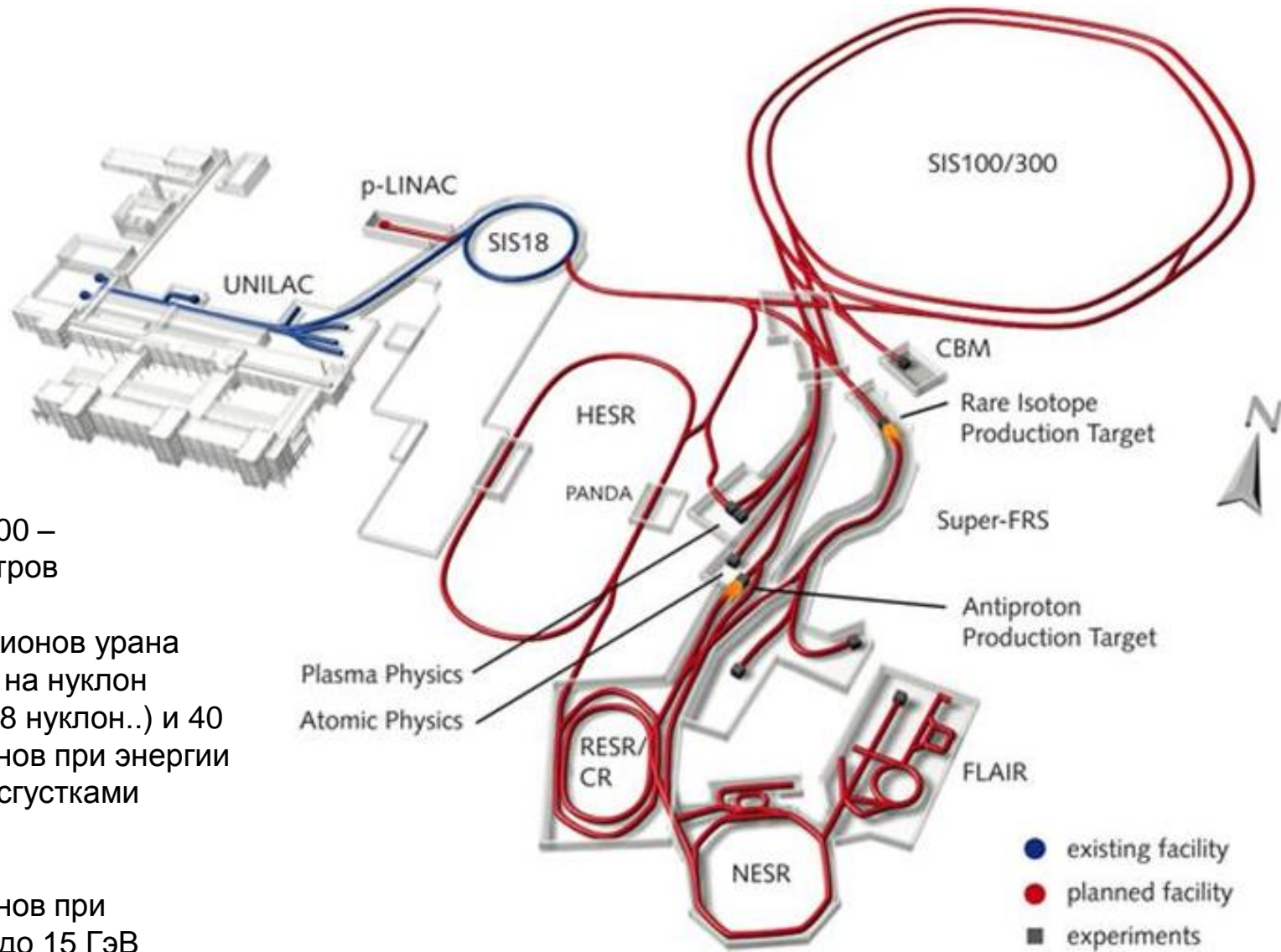


Международный ускорительный комплекс **FAIR** сегодня в стадии строительства – продолжение существующих установок в GSI (Дармштадт, Германия)

Тематика проекта – работа с пучками тяжелых ионов и изотопами







- синхротрон SIS100 – периметр 1100 метров

- 500 миллиардов ионов урана при энергии 1 ГэВ на нуклон (уран содержит 238 нуклон..) и 40 триллионов протонов при энергии 29 ГэВ короткими сгустками длиной ~10нс

- Пучок антипротонов при энергиях от 1 ГэВ до 15 ГэВ

### Будущее LHC

Следующим шагом для Большого адронного коллайдера - модернизация к 2020 году - увеличение светимости в 10 раз к проектному значению. Проект, БАК с высокой светимостью (HL-LHC), будет опираться на ряд ключевых инновационных технологий:

**сверхпроводящие магниты** (inner triplets) с полем до 13 тесла, позволяющие существенно ограничить  $\beta$  функцию пучка в точке столкновения

**сверхпроводящие токопроводы** от источников питания к магнитам, что позволит избежать радиационного повреждения электроники источников тока и облегчит установку и в без того переполненный тоннель.

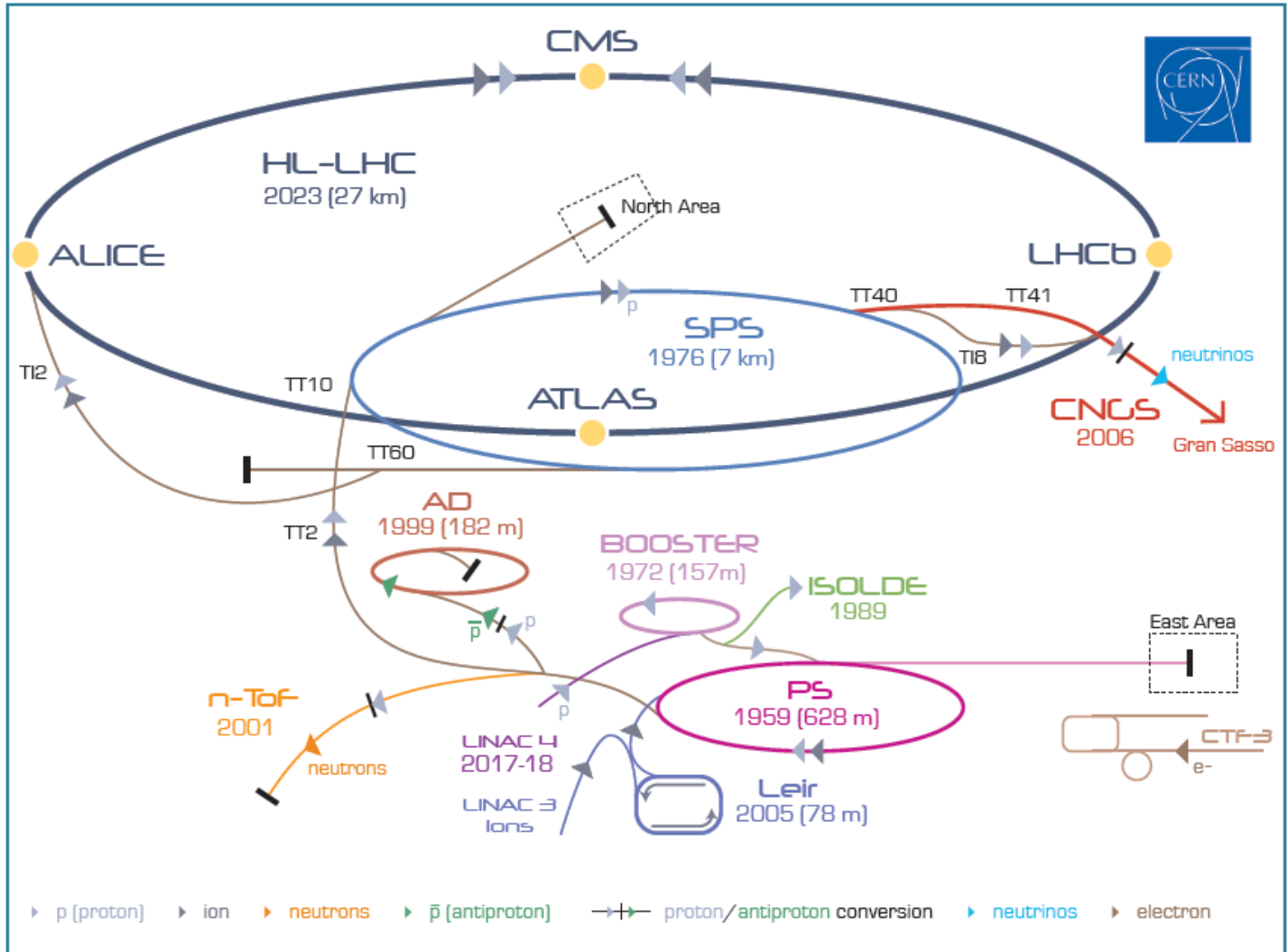
**новые коллиматоры**, необходимые для защиты магнитов от рассеянной энергии пучка.

**новый линак** (Linac 4).

Список участников HiLumi LHC также включает институты вне стран членов ЦЕРН, такие как Россия, Япония и США.

**Статус – проект принят, сроки до 2020г., работы идут полным ходом!**

# Future of LHC



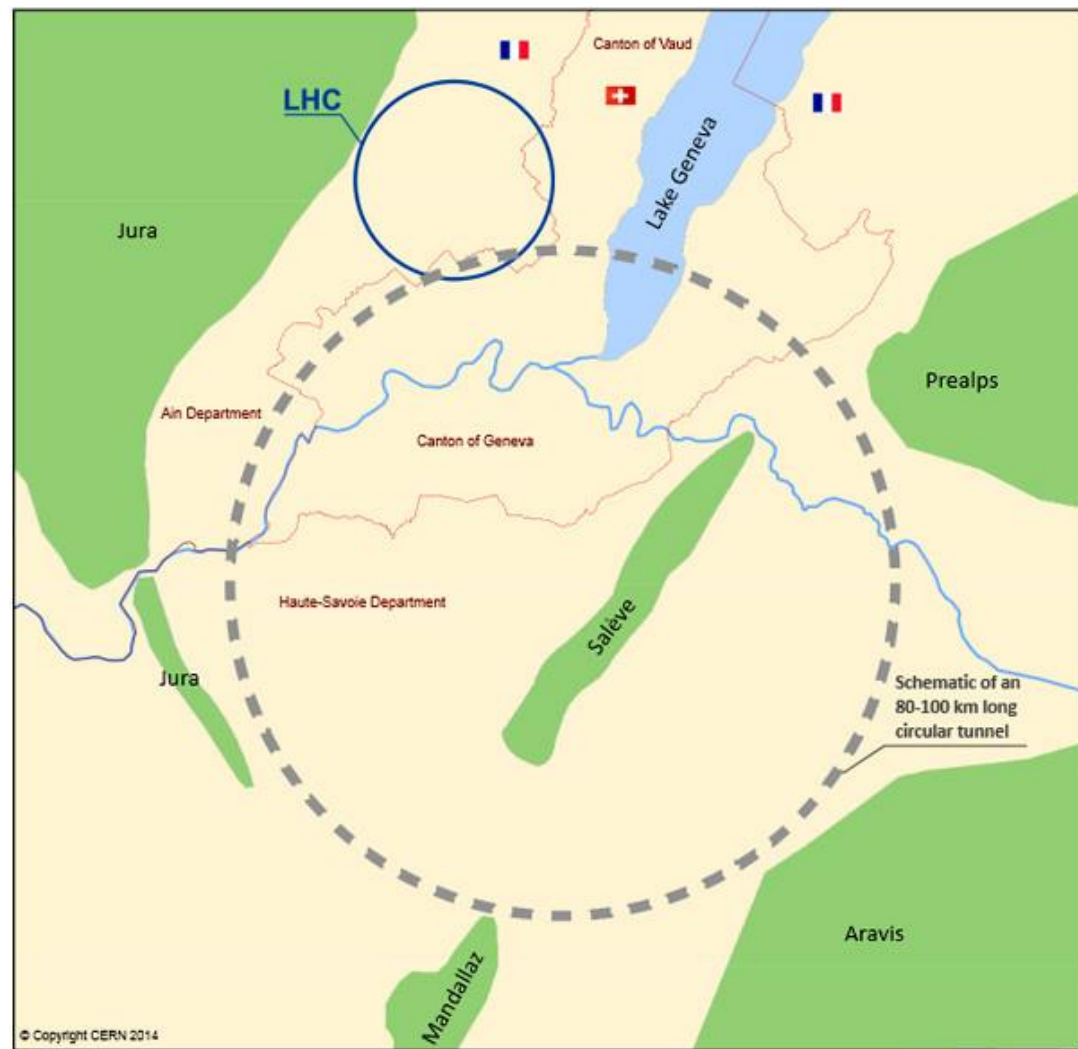
Future CERN Accelerator Complex

## Future of LHC

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	5	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 [ $\mu\text{m}$ ], 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.





## Что хотят физики от FCC

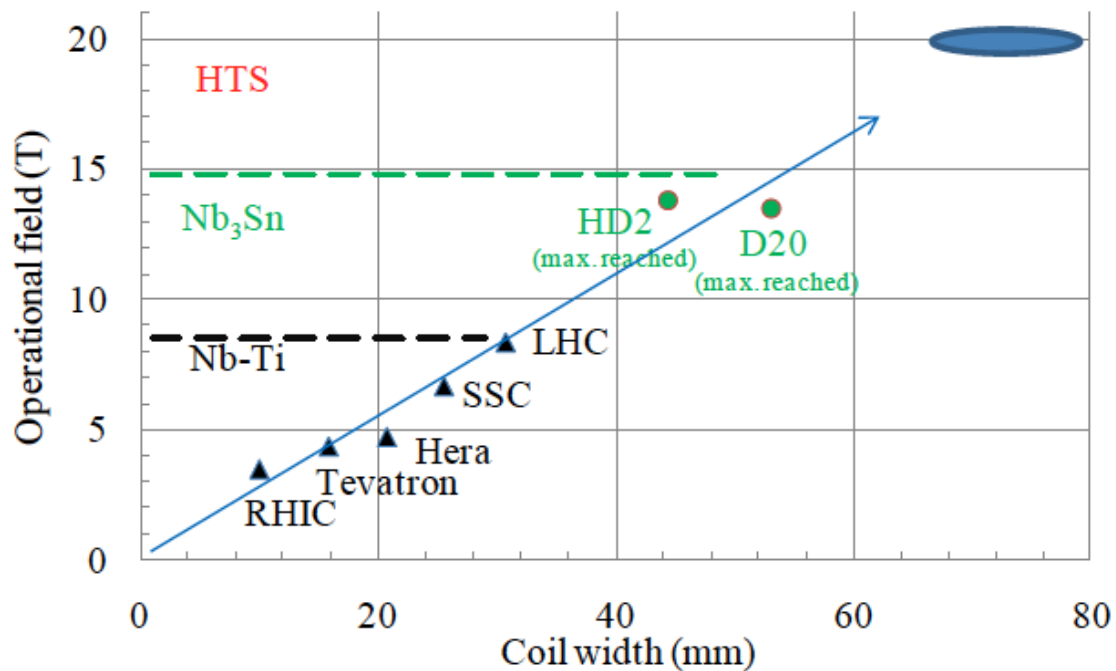
Даже если никаких новых частиц не будет открыто, то есть еще плохо изученный хиггсовский бозон. Если ориентироваться на протонный коллайдер с энергией 100 ТэВ, то хиггсовские бозоны там будут рождаться тысячами в день, а значит, появляется возможность изучить его во всех подробностях.

Поскольку хиггсовский бозон станет рядовой частицей, цель будет состоять не в том, чтобы просто увидеть его в данных, а в обнаружении какого-то необычного процесса с его участием. Это могут быть экзотические распады, рождение нескольких бозонов Хиггса, невидимые распады бозона Хиггса, которые будут намекать на его связь с частицами темной материи, и т. п., таким образом, хиггсовский бозон превратится из самоцели в инструмент для изучения физики. ((с) [elementy.ru](http://elementy.ru))

## Возможные топологии коллайдера:

1. Похожая на LHC - арки равной длины, разделенные прямолинейными промежутками.
2. "Racetrack" топология, где есть две арки почти по 180 градусов каждая и два прямолинейных промежутка (подобная топология была принята когда-то в недостроенном проекте SSC - Superconducting Super Collider, 87км периметр, 20ТэВ энергия).

Суммарная длина арок составит 82.9 км для варианта с 16 Тл и 66.3 км для варианта с 20 Тл. Прямые промежутки должны включать: два основных эксперимента, два вспомогательных, инжекцию и экстракцию, ВЧ промежутки и колиматорные вставки.



Сверхпроводящие магниты с полем до 16Тл являются ключевой технологией для коллайдера FCC при периметре в 100км., сокращение же периода до 80км. потребует поля в 20Тл!

### **Разрабатываемые технологии:**

Расширение возможностей для низкотемпературных сверхпроводников (**LTS**) до 16Тл на основе Niobium-Tin (**Nb<sub>3</sub>Sn**)

Поиск возможностей использования высокотемпературных сверхпроводников (**HTS**) с полем до 20Тл. Речь идет о материалах из редких элементов, как YBCO-123, и висмут-содержащих BSCCO-2212

И первое и второе требуют существенного улучшения материала, существенного улучшения механического дизайна, электроизоляции и защиты магнитов при срыве сверхпроводимости (быстрое детектирование срыва сверхпроводимости и сверхбыстрый вывод энергии!)

## CLIC

**Акроним CLIC (Компактный линейный коллайдер)** указывает на ключевой аспект проекта: компактность, т.е. малые апертуры магнитов и ограниченное пространство для магнитных систем в целом.

CLIC R&D на сегодняшний день направлены на демонстрацию технологий, необходимых для строительства 3ТэВ линейного коллайдера.

Parameter	Symbol	Value	Unit
<b>Overall Parameters</b>			
Centre-of-mass energy	$E_{CMS}$	3000	GeV
Main Linac RF frequency	$f_{rf}$	11.994	GHz
Luminosity	$L$	5.9	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Luminosity (in 1% of energy)	$L_{99\%}$	2	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Linac repetition rate	$f_{rep}$	50	Hz
No. of particles / bunch	$N$	3.72	$10^9$
No. of bunches / pulse	$N_b$	312	
Bunch separation	$\Delta t_b$	0.5 (6 periods)	ns
Bunch train length	$\tau_{train}$	156	ns
Beam power / beam	$P_b$	14	MW
Unloaded / loaded gradient	$G_{unl/l}$	120 / 100	MV/m
Overall two linac length	$l_{linac}$	42.16	km
Total beam delivery length	$l_{BD}$	2 x 2.75	km
Proposed site length	$l_{tot}$	48.4	km
Total site AC power	$P_{tot}$	582	MW
Wall-plug-to-Main-Beam-power efficiency	$\eta_{tot}$	4.8	%

### **Основные трудности:**

- Достижение градиента при ускорении вплоть до 100МВ/м.
- Генерация «ведущего» пучка, получение ВЧ мощности с высоким КПД при замедлении пучка.
- Получение ультра-низкого эммитанса основного пучка, что требует, в том числе, и очень точной выставки магнитов с последующим активным подавлением вибраций.
- Системы защиты.

### **Принцип работы:**

Два основных линейных ускорителя комплекса ускоряют электроны и позитроны с 9ГэВ до 1.5ТэВ за один проход. Ускоряющая структура выбрана обычная, не сверхпроводящая, ибо последняя сильно ограничена полями. Детальная оптимизация, принимающая во внимание максимум светимости, стоимость установки (длина тунеля), стабильность пучка, а также КПД всей установки привела к требованиям на градиент ускоряющей структуры в 100МВ/м и рабочую частоту ВЧ в 12ГГц! Все это приводит к ~ 9.2ТВт импульсной мощности на оба линака, что не может быть достижимо в непрерывном режиме. Достижимо – каждый ускоряемый «bunch train» может иметь длину не более 156нс с периодичностью 50Гц. Грубые подсчеты показывают необходимость ~ 35000 клистронов с импульсной мощностью ~50МВт. Это скорее даже не «непривлекательное», а невозможное решение!

Вместо этого предложена двух-пучковая схема, где мощность для ускоряющей структуры доставляется вспомогательным пучком – драйвером, параллельным основному пучку. Энергия пучка-драйвера отбирается специальными ВЧ устройствами PET (Power Extraction and Transfer Structures) и доставляется к ВЧ структуре основного пучка.

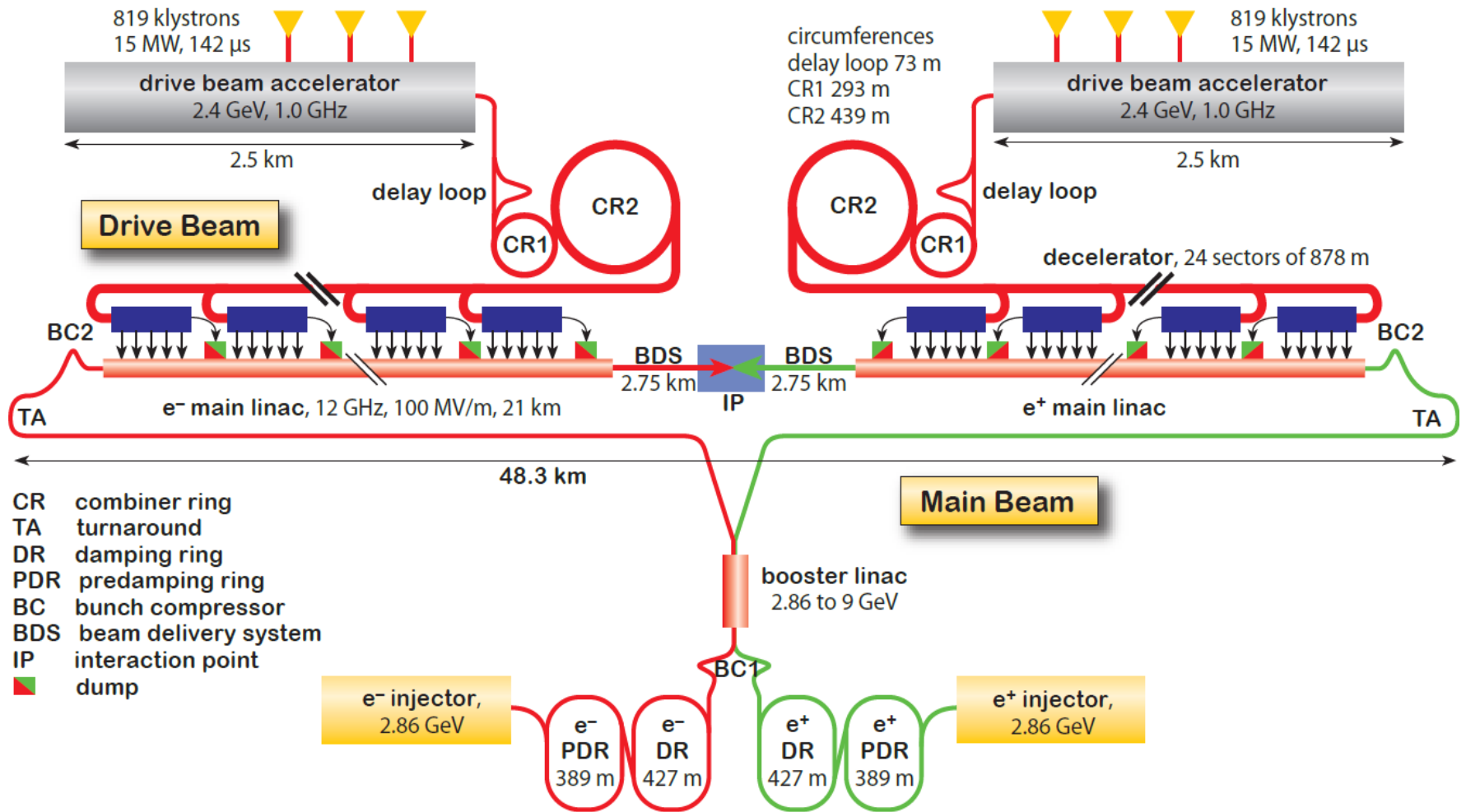
CLIC поделен на сектора длиной ~878м каждый, при чем каждый сектор состоит из 3000 структур, ускоряющих основной пучок на 62ГэВ. Пучок-драйвер состоит из сгустков, так, что каждый сгусток питает одну структуру.

Параметры драйвера: 2.4ГэВ, пиковый ток ~100А, а импульсная мощность 240ГВт! Порядка 84% энергии драйвера передается в ВЧ, остальные 16% уходят в дампы. Но, учитывая, что импульсы ВЧ всего 244нс (чуть больше, чем длина сгустка), а частота повторения 50Гц, то средняя мощность, отдаваемая основному пучку, всего лишь 2.9МВт.

Более 70000 источников питания (силовых преобразователей) необходимо для всех магнитов и клистронов! При огромном разбросе по таким параметрам, как номинальные токи и напряжения, рабочая частота и т.д. Огромное количество систем защит и блокировок.

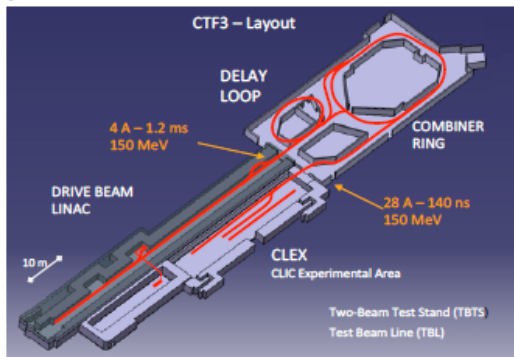


# CLIC



## 2012-16 Development Phase

Develop a Project Plan for a staged implementation in agreement with LHC findings; further technical developments with industry, performance studies for accelerator parts and systems, as well as for detectors.



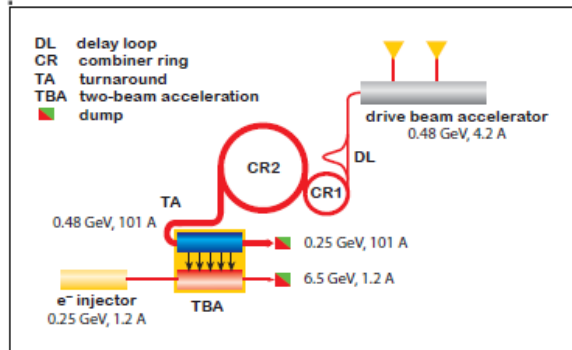
## 2016-17 Decisions

On the basis of LHC data and Project Plans (for CLIC and other potential projects), take decisions about next project(s) at the Energy Frontier.

## 2017-22 Preparation Phase

Finalise implementation parameters, Drive Beam Facility and other system verifications, site authorisation and preparation for industrial procurement.

Prepare detailed Technical Proposals for the detector-systems.

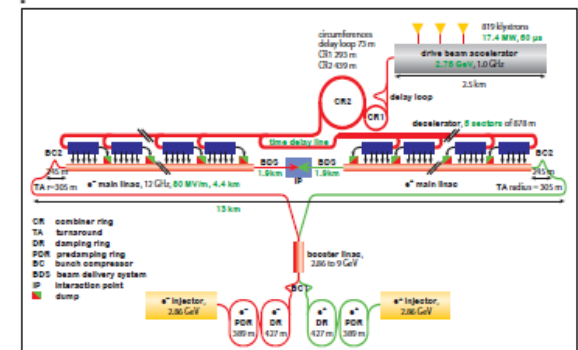


## 2022-23 Construction Start

Ready for full construction and main tunnel excavation.

## 2023-2030 Construction Phase

Stage 1 construction of a 500 GeV CLIC, in parallel with detector construction. Preparation for implementation of further stages.



## 2030 Commissioning

From 2030, becoming ready for data-taking as the LHC programme reaches completion.

---

**Спасибо за внимание!**

## Литература

The Compact Linear Collider Study. Collaborations <http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/Collaborations.htm>

CLIC CONCEPTUAL DESIGN REPORT, Vol 1: <http://clic-study.org/accelerator/CLIC-ConceptDesignRep.php>

FAIR project: [https://www.gsi.de/forschung\\_beschleuniger/fair.htm](https://www.gsi.de/forschung_beschleuniger/fair.htm)

NSLS-II\_Conceptual\_Design\_Report: <http://www.bnl.gov/nsls2/project/CDR/>

HL LHC studies: <http://hilumilhc.web.cern.ch/>

**Future Circular Collider Study** <https://espace2013.cern.ch/fcc/Pages/default.aspx>

**http://www.elementy.ru** – очень полезный сайт!