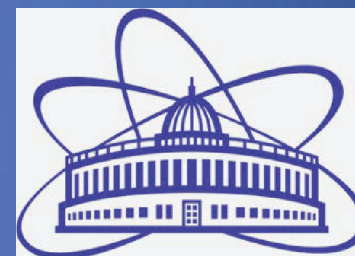


РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ для ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ, ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕДИЦИНЫ

Б.Ю.Шарков ОИЯИ

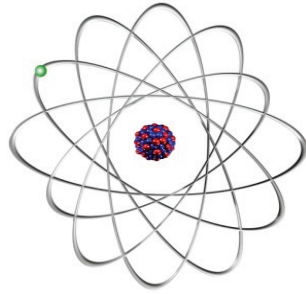


INTERNATIONAL INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION
МЕЖДУНАРОДНАЯ МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

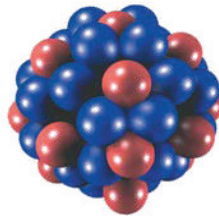
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Ускорители заряженных частиц – один из основных инструментов современной ядерной физики и физики элементарных частиц



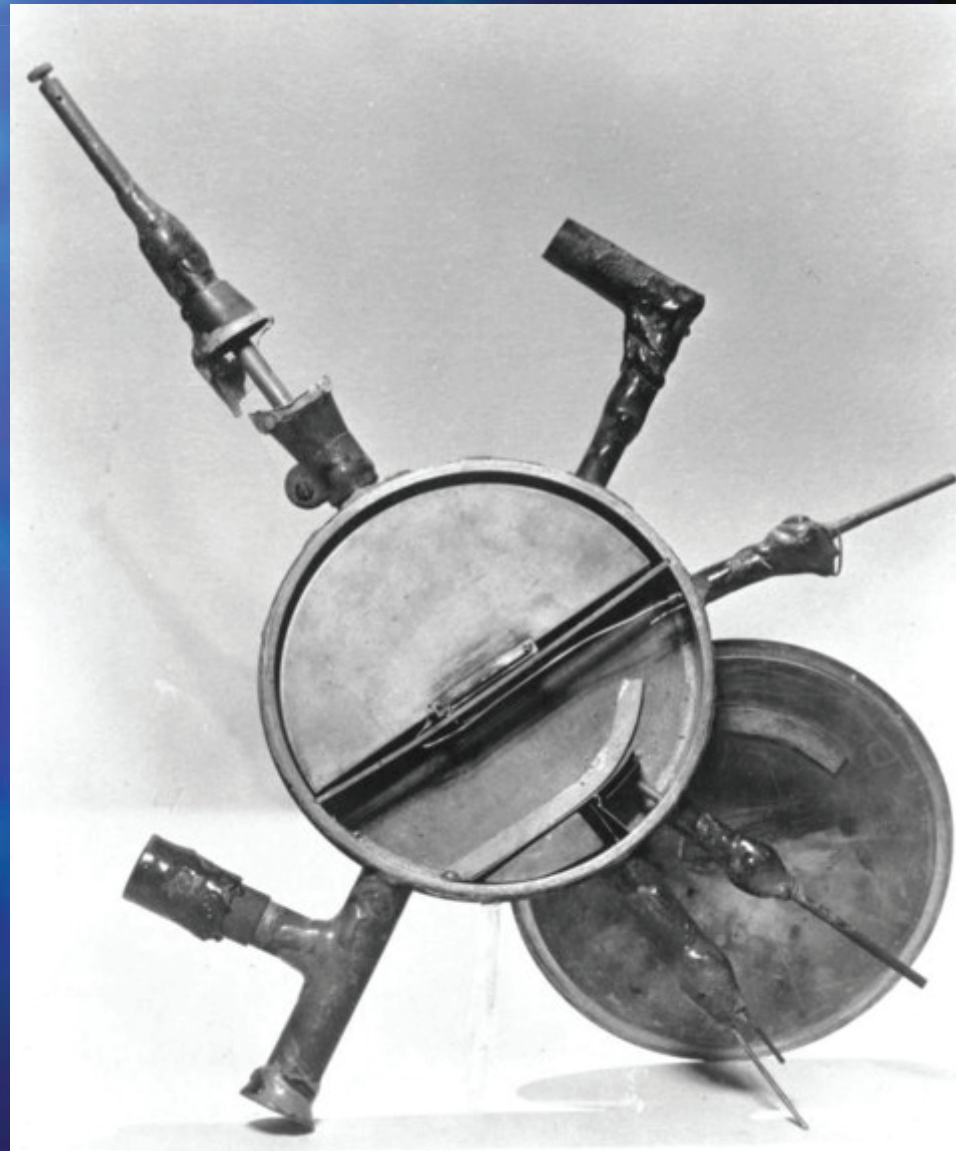
Непосредственным толчком к созданию первых ускорителей заряженных частиц послужили исследования строения атомного ядра, требовавшие потока заряженных частиц высокой энергии



Подавляющее большинство результатов фундаментального характера в физике частиц и в ядерной физике получено в экспериментах на ускорителях

Эрнест Орландо Лоуренс — создатель первого циклотрона. (1931г.)

Действующий циклотрон Лоуренса помещался на ладони. 1МэВ, р+.

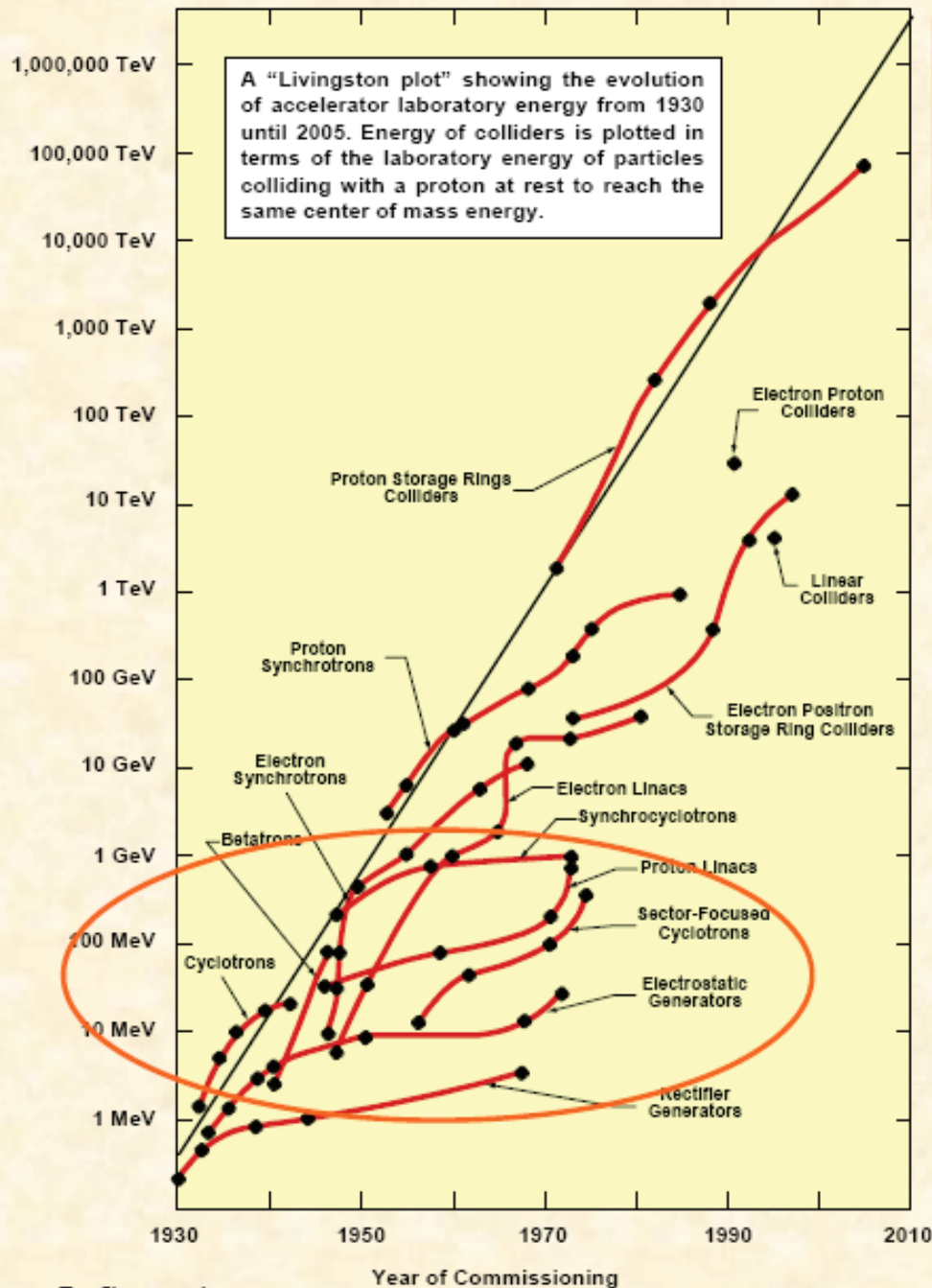


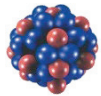
Большой Адронный Коллайдер, ЦЕРН



Livingston chart

A "Livingston plot" showing the evolution of accelerator laboratory energy from 1930 until 2005. Energy of colliders is plotted in terms of the laboratory energy of particles colliding with a proton at rest to reach the same center of mass energy.





Современные ускорители высоких энергий – огромные дорогостоящие комплексы, создаваемые в рамках международных проектов. Такие проекты ускорителей на предельно высокие энергии требуют финансирования, которое, как правило, является результатом межгосударственного сотрудничества большого числа стран.

Участие в таких проектах обеспечивает отечественным учёным постоянное информирование и получение доступа к самым передовым технологиям в области физики и техники ускорителей. Опираясь на опыт участия РФ в проектах LHC, FAIR и XFEL, необходимо сохранять российское участие в ведущих научных проектах, в частности, в проекте Future Circular Collider (FCC), разрабатываемом в ЦЕРН.

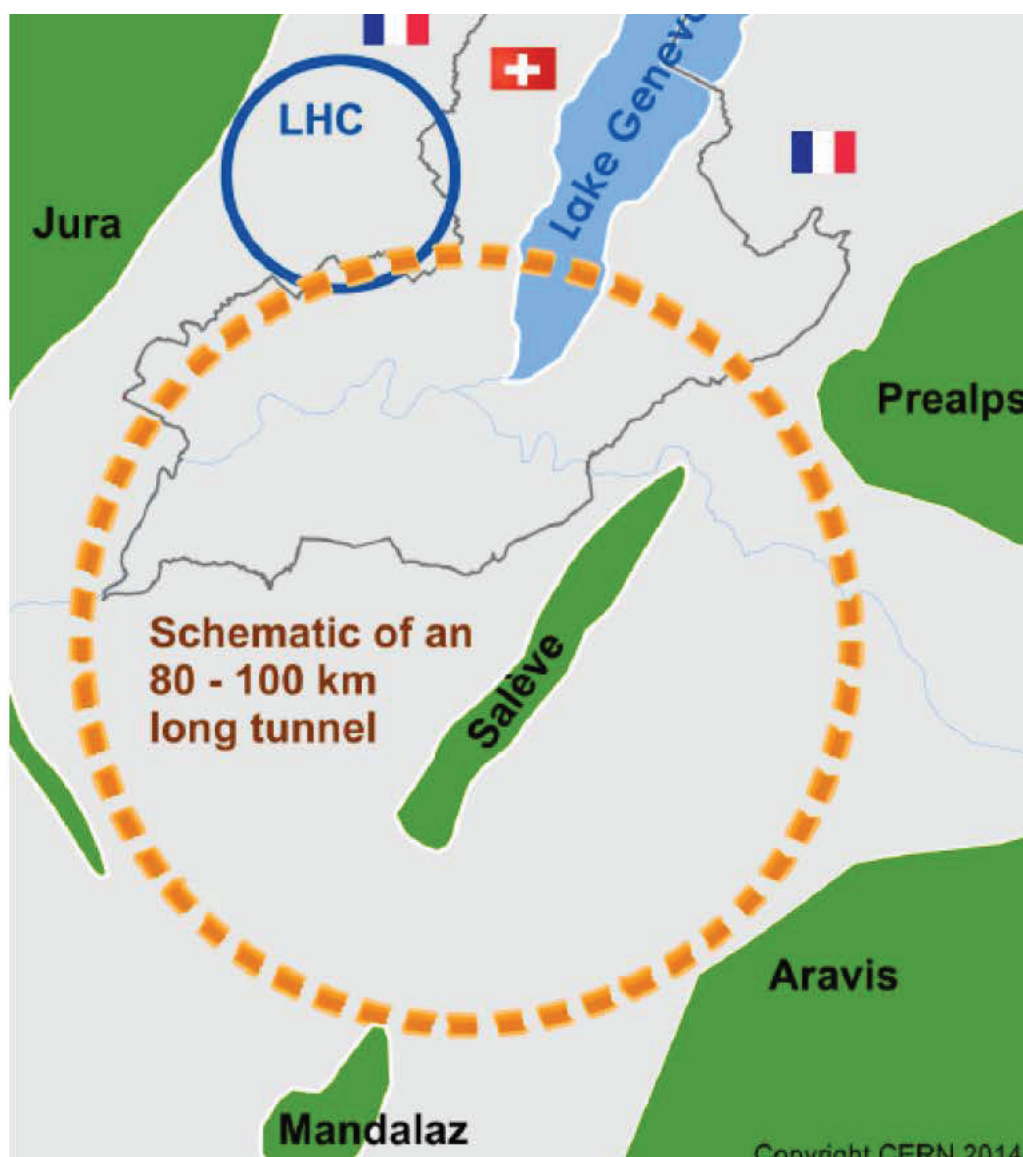


Future Circular Colliders



FCC – CERN

CepC – SppC – IHEP, China



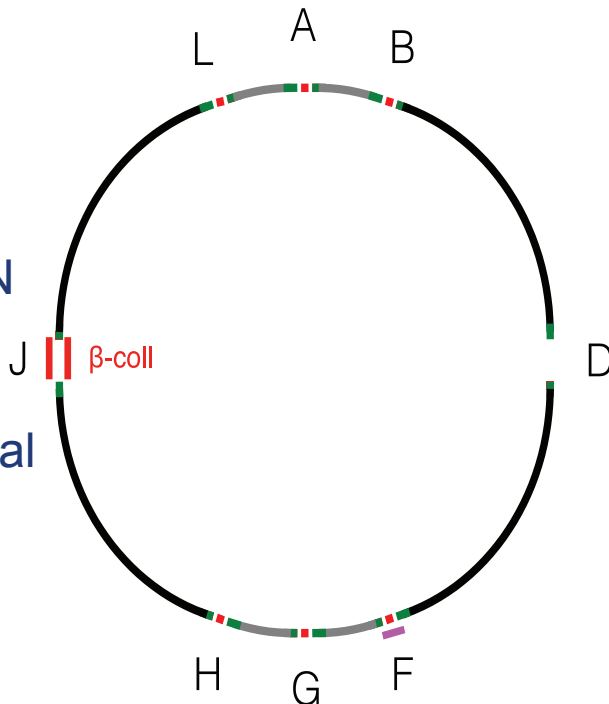
Circular hadron colliders: FCC-hh and SppC

circumference ~ 100 km, two high-luminosity experiments up to $3 (1) \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, two additional experiments possibly combined with injection section, collimation insertions (betatron and momentum cleaning), extraction/dump insertion, RF insertion,

FCC-hh

based on existing CERN injector chain, J

Luminosity goal $\sim 20 \text{ ab}^{-1}$ per main IP within 25 years

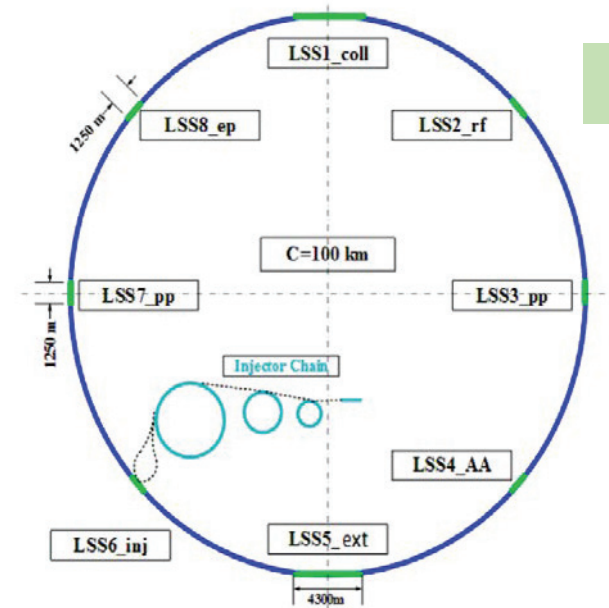


SppC

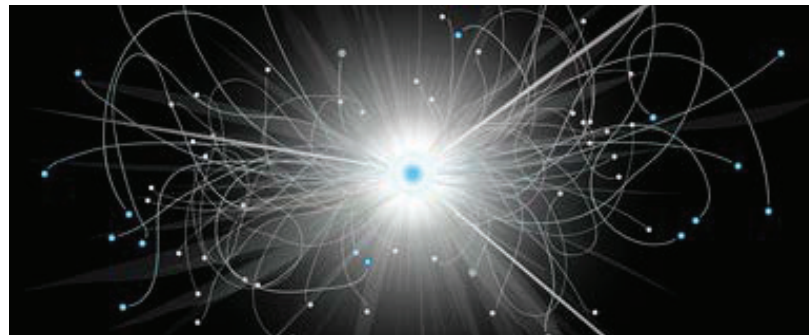
values in brackets refer to CEPC

new injector chain,

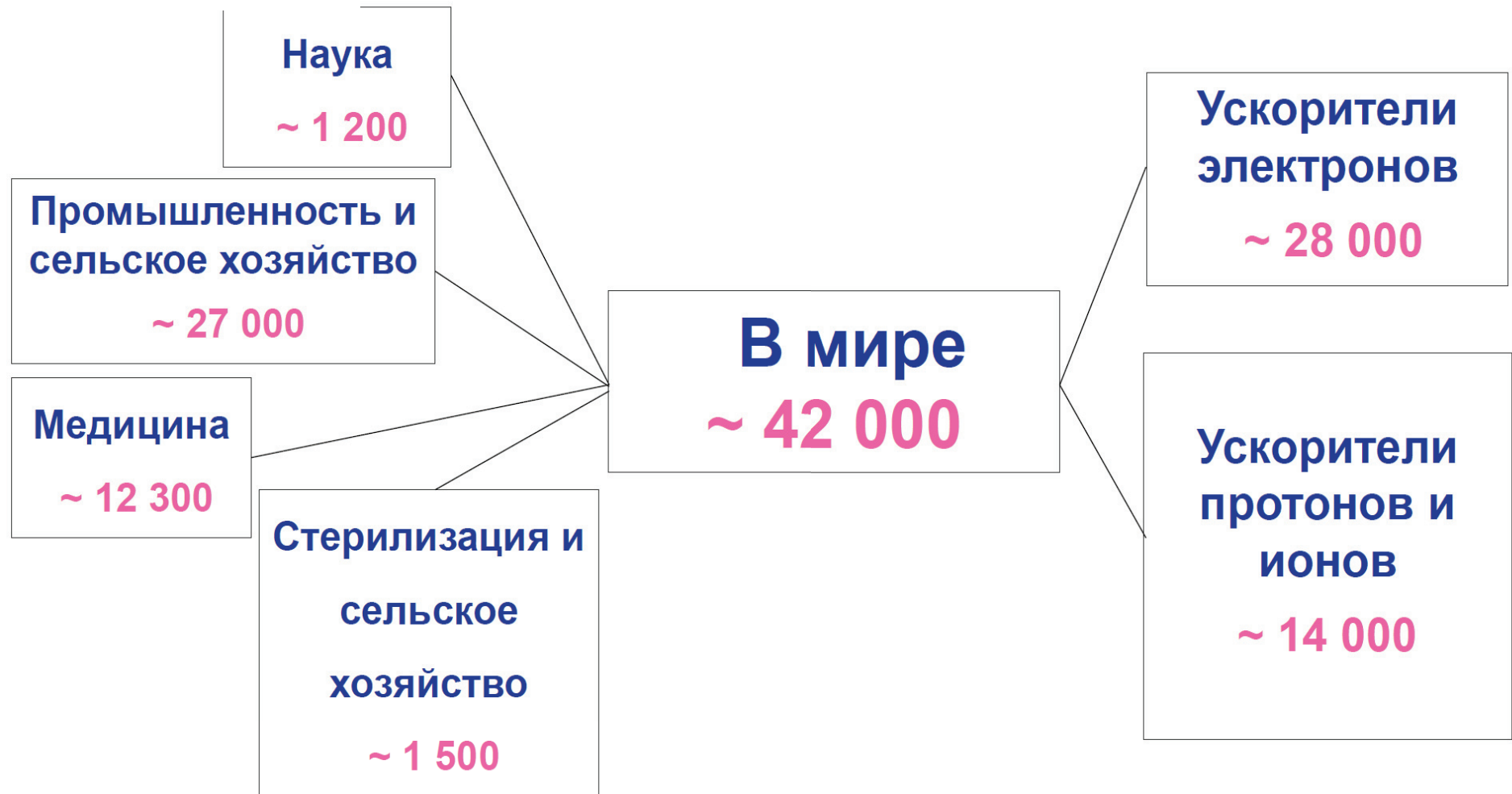
simultaneous operation with e^+e^- collider



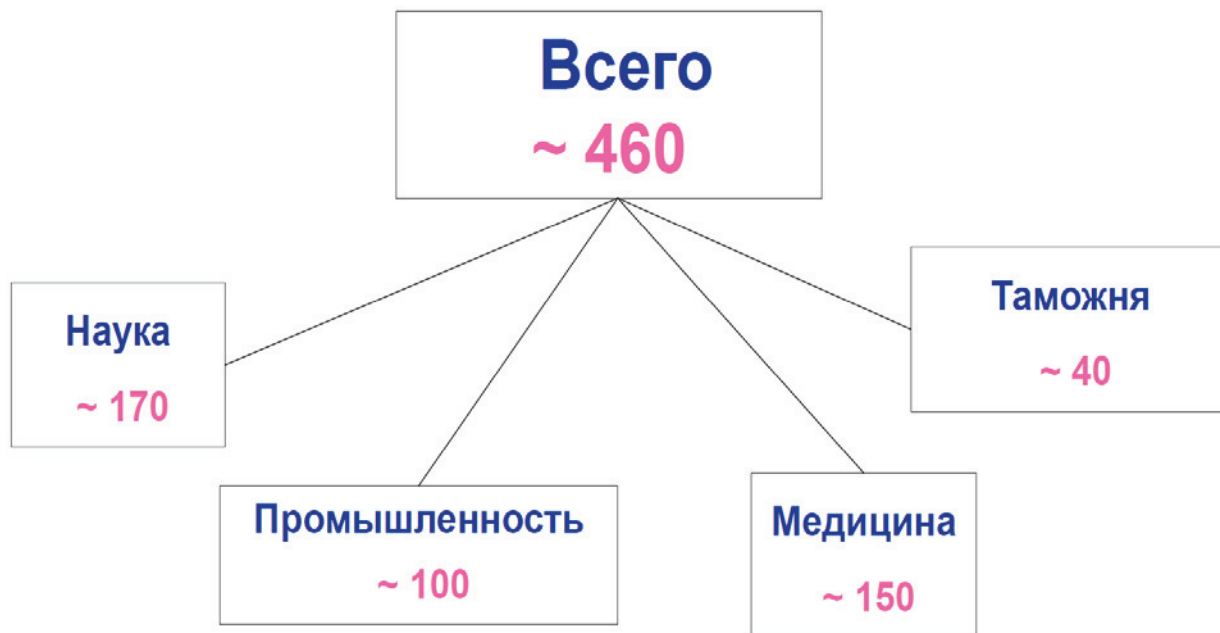
Ускорители являются источниками как первичных заряженных частиц, существующих в окружающей нас природе – электронов, протонов, ионов, так и вторичных частиц, рождающихся при взаимодействии первичных ускоренных частиц с веществом мишеней, - мезонов, нейтронов, фотонов, позитронов, антипротонов и др.



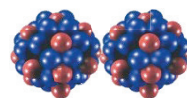
В настоящее время в мире действуют около 40 000 ускорителей. Из них около 2% имеют энергию около 1 ГэВ и выше и используются для фундаментальных исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц



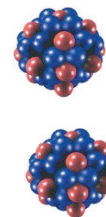
Ускорители в России



Российские и советские ученые внесли огромный вклад в развитие физики ускорителей и в развитие ускорительных технологий



Российские и советские ученые внесли огромный вклад в развитие физики ускорителей и в развитие ускорительных технологий



Достаточно назвать принцип автофазировки и первый синхротрон (В.И.Векслер, 1944 г.), первый коллайдер (Г.И.Будкер, А.Н.Скринский, 1965 г.), линейный ускоритель с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (В.В.Владимирский, И.М.Капчинский, В.А.Тепляков, 1969 г.), динамика поляризованных частиц в коллайдерах - теория и эксперимент (Я.С.Дербенёв, А.Н.Скринский, Ю.М.Шатунов, И.А.Кооп, 1971 г.), метод электронного охлаждения пучков тяжёлых заряженных частиц (Г.И.Будкер, А.Н.Скринский, Н.С.Диканский, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, 1974 г.). В.И.Векслер, В.П.Саранцев, Я.Б.Файнберг инициировали проведение исследований по коллективным методам ускорения (1960 г.).

В СССР были созданы крупные ускорители мирового класса – синхроциклотрон «Фазотрон» (ИЯП АН СССР, 1949 г.), протонные синхротроны «Синхрофазотрон» (10 ГэВ, ОИЯИ, 1958 г.), первый в СССР синхротрон с жесткой фокусировкой У7 (7 ГэВ, ИТЭФ, 1961 г.), синхротрон У70 (ИФВЭ, 1967 г.), комплекс электрон-позитронных коллайдеров (ИЯФ СО РАН, 1967 г.), сильноточный линейный ускоритель протонов мезонной фабрики (ИЯИ РАН, 1991 г.).

Эти ускорители послужили базовыми экспериментальными установками таких всемирно известных научных центров как ОИЯИ, ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН, а также НИЦ КИ - ИФВЭ, ИТЭФ, ПИЯФ.

Протонный ускоритель У-70 НИЦ КИ – ИФВЭ в Протвино



Ускорительный центр ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ~720 m



1. **Линейный ускоритель**
2. **Нейтронный комплекс**
 - Нейтронный источник РАДЭКС
 - Импульсный источник ИН-06
 - Спектрометр по времени замедления СВЗ-100
3. **Радиоизотопный комплекс**
4. **Комплекс лучевой терапии**

Курчатовский источник синхротронного излучения "КИСИ-Курчатов"



Единственный специализированный источник СИ на постсоветском пространстве "КИСИ - Курчатов" это научная установка класса «мегасайенс», внесенная в федеральный реестр уникальных научных установок

НУКЛОТРОН ЛФВЭ ОИЯИ

Сверхпроводящий адронный синхротрон (1993)

протоны 12,5 ГэВ, тяжелые ионы 4.5 АГэВ, поляризованные
дейтроны 6.2 АГэВ



Комплекс циклотронов ЛЯР ОИЯИ

DC-280
SHE factory

U-400
Heavy and superheavy
nuclei

U-400M
Light exotic
nuclei

IC-100
Applied research

NanoLab

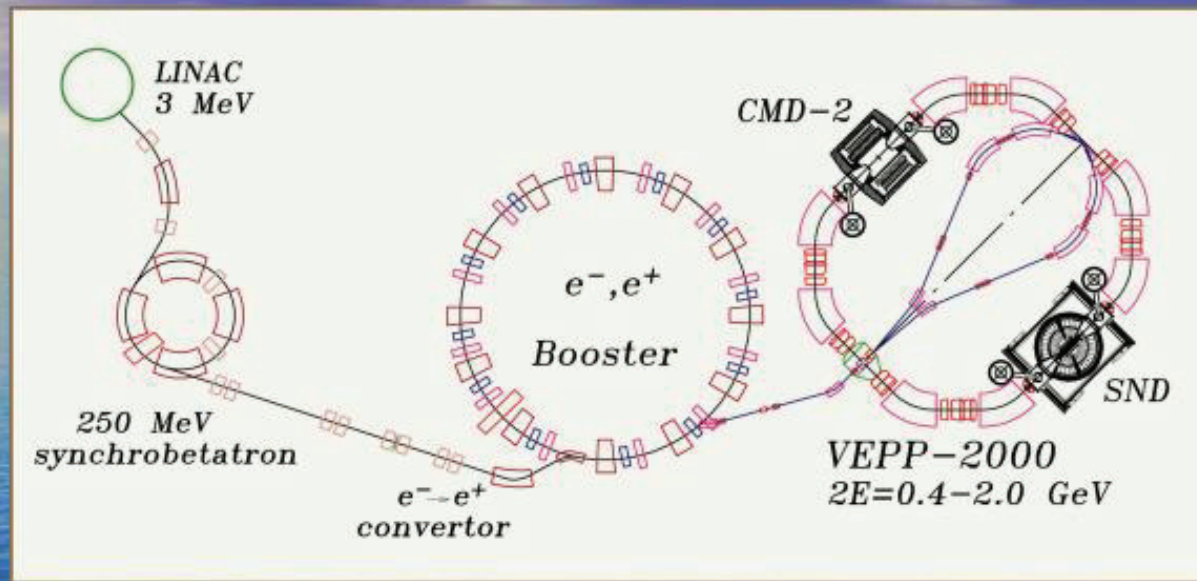
DRIBs gallery

MT-25
Microtron



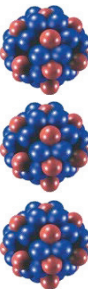
Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000 ИЯФ СО РАН

Комплекс ВЭПП-2000



- ВЭПП-2М (1974 – 2000)
- $2E_{max}=1400$ МэВ
- $L=4 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при $E=510$ МэВ

- ВЭПП-2000
- $2E_{max}=2000$ МэВ
- $L=10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при $E=510$ МэВ
- $L=10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ при $E=1000$ МэВ





В настоящее время в научных центрах РФ сохранились выдающиеся школы ускорительной физики и технологий, действуют крупные ускорительные комплексы, обеспечивающие высокий уровень фундаментальных и прикладных исследований в стране.

Одновременно, ученые и инженеры-ускорительщики РФ активно сотрудничают в передовых зарубежных ускорительных центрах – на ускорителях LHC (CERN), RHIC (BNL), SEBAF (JNL), Spiral1 (GANIL), в лабораториях RIKEN, JPARC, KEK, FNAL, FAIR/GSI, XFEL и др., внося весомый вклад в развитие новейших ускорительных систем.

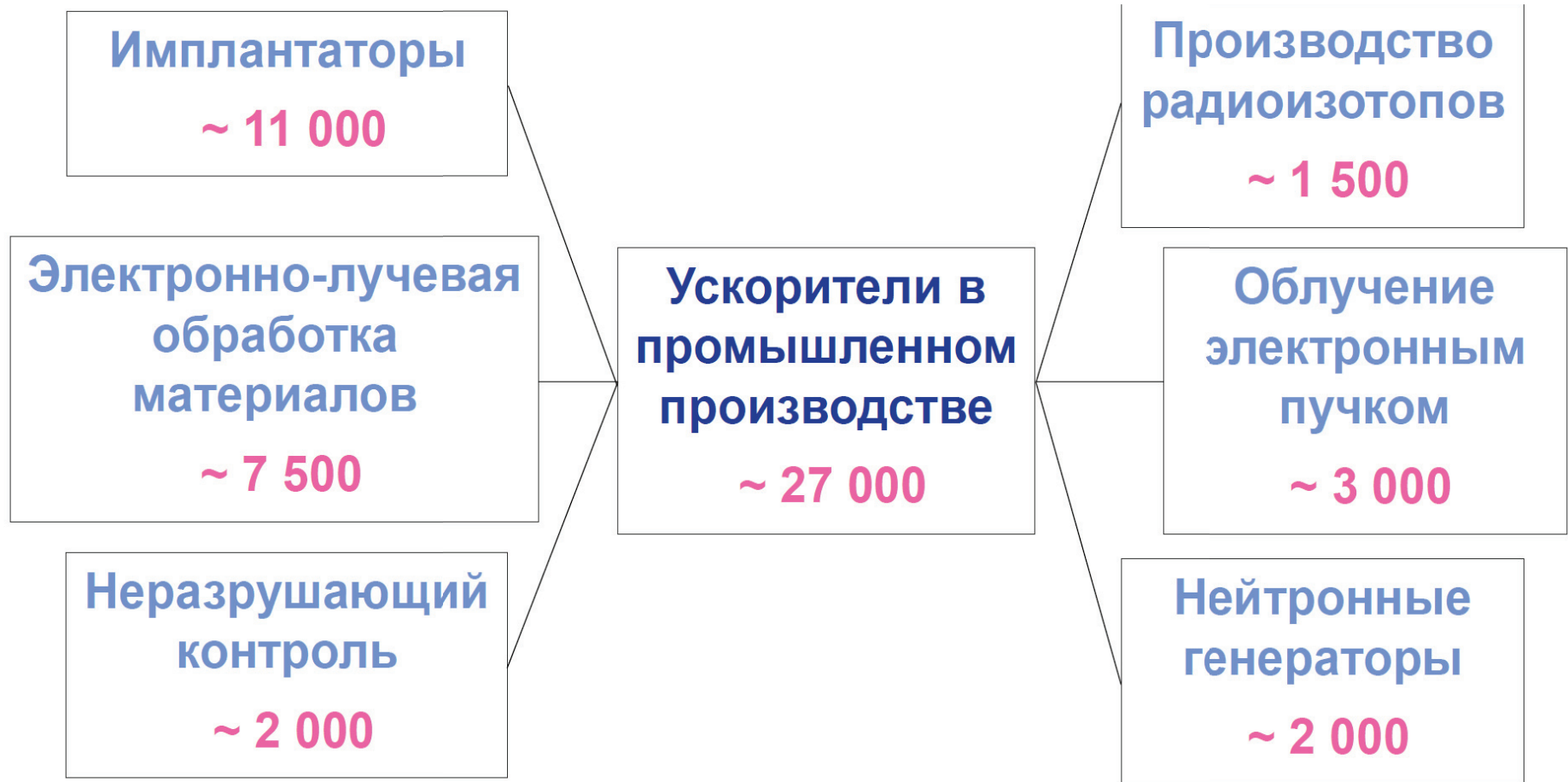




Однако, за прошедшие 30 лет наметилась тенденция на сокращение доли работ, выполняемых в исследовательских центрах Российской Федерации. В первую очередь это связано с отсутствием в стране современной экспериментальной базы, обусловленной старением и выводом из эксплуатации установок, построенных еще во времена Советского Союза. На фоне общего депрессивного состояния фундаментальной науки в стране создание крупных научных ускорительных установок затормозилось. Это привело к тому, что наметилось существенное отставание в развитии отечественных ускорительных технологий по целому ряду важнейших направлений, а также к ощутимым кадровым потерям в ускорительных центрах – многие молодые талантливые физики-ускорительщики уехали на работу в передовые зарубежные научные центры. Фактически сегодня в России осталось только несколько центров мирового уровня, ведущих фундаментальные исследования на ускорителях – ОИЯИ, ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН и НИЦ КИ-ИФВЭ. **Как результат, сегодня многие жизненно важные для страны прикладные направления (такие как, ядерная медицина, материаловедение, полупроводниковая промышленность) зависят от иностранных поставщиков.**

Ускорители в мировой индустрии

ускорители, применяемые в медицине и в ряде технологий,
производятся серийно большим числом коммерческих фирм в
развитых и развивающихся странах мира



Практические применения ускорителей



Стерилизация и обеззараживание медицинских изделий

Обработка продуктов питания

Модификация полимеров

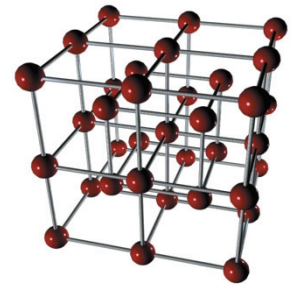
Гражданская безопасность

Радиационная обработка в химической промышленности

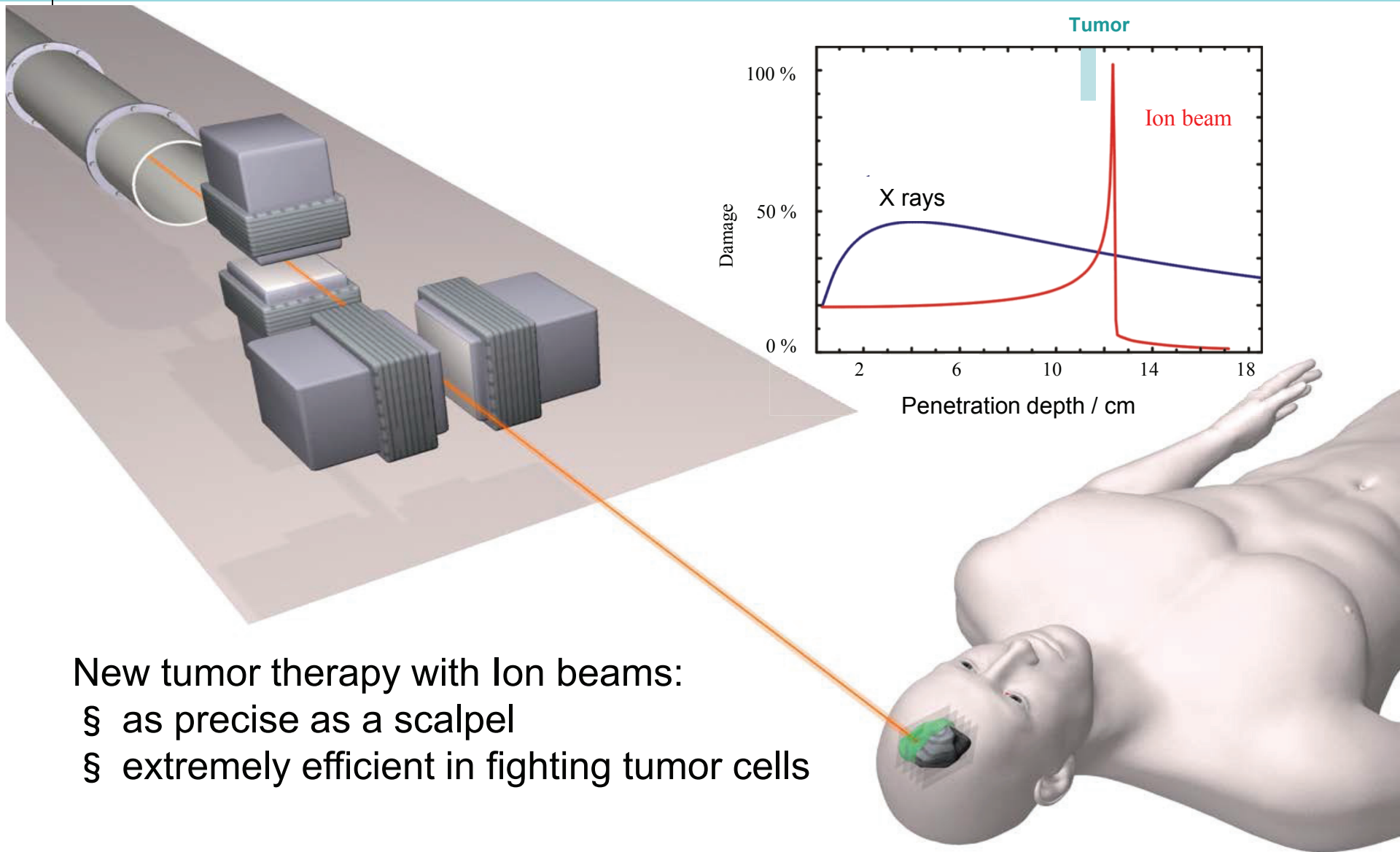
Обработка драгоценных камней

Обработка полупроводников

Радиационная сшивка изоляции кабелей

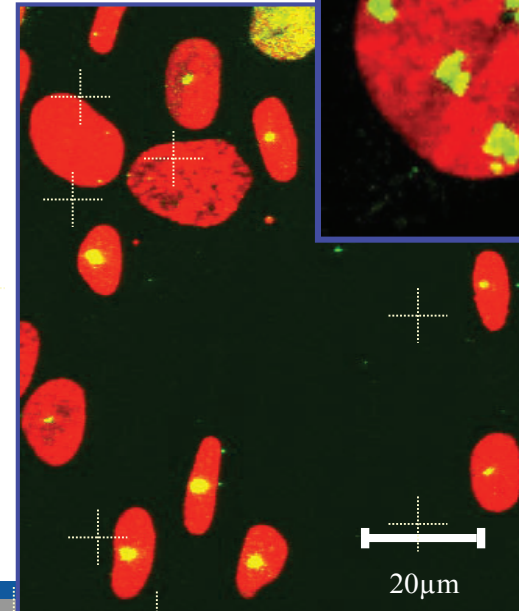
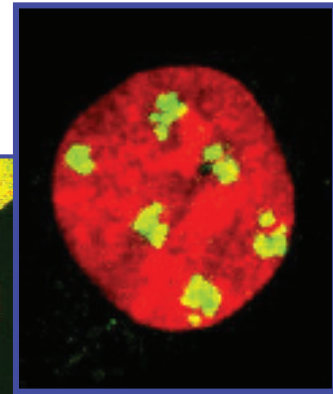
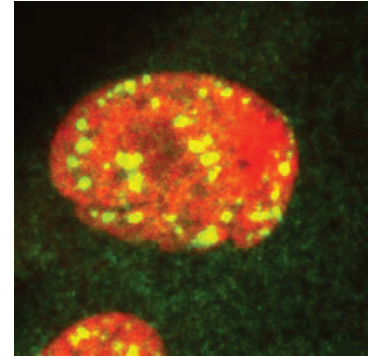


Ядерная медицина



Взаимодействие ускоренных тяжелых ионов с биологическими материалами и радиационное материаловедение

Роскосмос, ESA



Санкционная политика в отношении высоких технологий для РФ заставляет по новому взглянуть на необходимость развивать ускорители для социально значимых прикладных применений и, прежде всего, для ядерной медицины.

Развитие ускорительной техники для ряда важнейших прикладных применений даст весомый положительный мультипликативный эффект в индустрии высоких технологий в РФ.

Т.к. продвижение прикладных ускорителей на внутреннем рынке должно сопровождаться ростом производства отечественных ускорителей и развитием связанных технологий (микроэлектроника, СВЧ и вакуумная техника, СП и т.п.), без которых невозможно построить современный ускоритель.

Заседание секции ядерной физики ОФН , Новосибирск, март 2020

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ и ТЕХНОЛОГИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

**редакторы-составители
Б.Ю. Шарков и И.Н. Мешков**

Материал подготовлен при участии:

**С.Л.Богомолов, Б.Н.Гикал, Л.В.Григоренко, Е.Е.Донец, И.Н.Мешков, А.О.Сидорин,
Г.В.Трубников, В.В.Фимушкин, Б.Ю.Шарков (ОИЯИ),
Н.В.Завьялов, В.Е.Костюков, А.В.Тельнов, О.Н. Шубин В.С. Гордеев, Ю.П.Куропаткин,
Г.А. Мысков, В.Д.Селемир (РФЯЦ ВНИИЭФ),
Т.В. Кулевой (НИЦ КИ-ИТЭФ),
С.М. Полозов (НИЯУ МИФИ),
С.В. Иванов (НИЦ КИ-ИФВЭ),
Л.В. Кравчук, А.В.Фещенко, А.С.Белов (ИЯИ РАН),
Е.Б. Левичев, Е.Б.Левичев, В.В. Пархомчук, А.Е.Бондарь, И.Н. А.А. Брызгин,
Д.И.Сковородин, С.Н. Фадеев, К.В. Лотов, Н.А. Винокуров (ИЯФ СО РАН).**

В связи с наметившимся поворотом страны к экономике высоких технологий и связанным с этим увеличением государственной поддержки фундаментальной и прикладной науки физики РАН, ОИЯИ, НИЦ КИ выступают с предложениями по ряду направлений научных исследований, которые используют ускорители в качестве основного инструмента для экспериментов, а также способны стать локомотивом высокотехнологического развития гражданской, оборонной промышленности, медицины, сельского хозяйства и др.

Программа развития передовых ускорительных технологий в Российской Федерации охватывает весь спектр современных технологий

- Ускорители и коллайдеры протонов и тяжелых ионов,
- Ускорители и коллайдеры электронов и позитронов,
- Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах,
- Ускорители для промышленных применений,
- Коллективные методы ускорения,
- Технологии высокочастотной сверхпроводимости и производства сверхпроводящих ускорительных резонаторов,
- Источники высокочастотного и сверхвысокочастотного питания для ускорителей заряженных частиц,
- Разработку программного обеспечения для проектирования ускорителей заряженных частиц.
- Развитие и совершенствование системы подготовки кадров для проектирования и эксплуатации современных ускорителей заряженных частиц.

Введение. Тенденции развития ускорительных технологий в мире

Часть I. Ускорители в России и в мире сегодня

1. Ускорители протонов и тяжелых ионов
2. Ускорители и коллайдеры лептонов
3. Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах
4. Развитие ускорительных технологий
5. Ускорители для прикладных целей
6. Коллективные методы ускорения
7. Разработка программного обеспечения для проектирования ускорителей заряженных частиц и моделирования динамики частиц в них
8. Центры компетенций

Часть II. Проекты на основе ускорителей, которые предлагается развивать в РФ в 2020 – 2030 гг.

1. Ускорительный комплекс на встречных пучках NICA
2. Электрон-позитронный коллайдер «Супер Чарм-Тау Фабрика»
3. Электрон-ионный коллайдер для ядерной физики низких энергий - проект DERICA
4. Ускорительный Нейтронный Комплекс ИЯИ РАН
5. Развитие комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ – ИФВЭ
6. Центр коллективного пользования «Сибирский Кольцевой Источник Фотонов» (ЦКП СКИФ)
7. Синхротронный комплекс РФЯЦ ВНИИЭФ

Часть III. Подготовка кадров

Заключение



JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR
RESEARCH
1956

NICA в ОИЯИ Основные объекты Комплекса

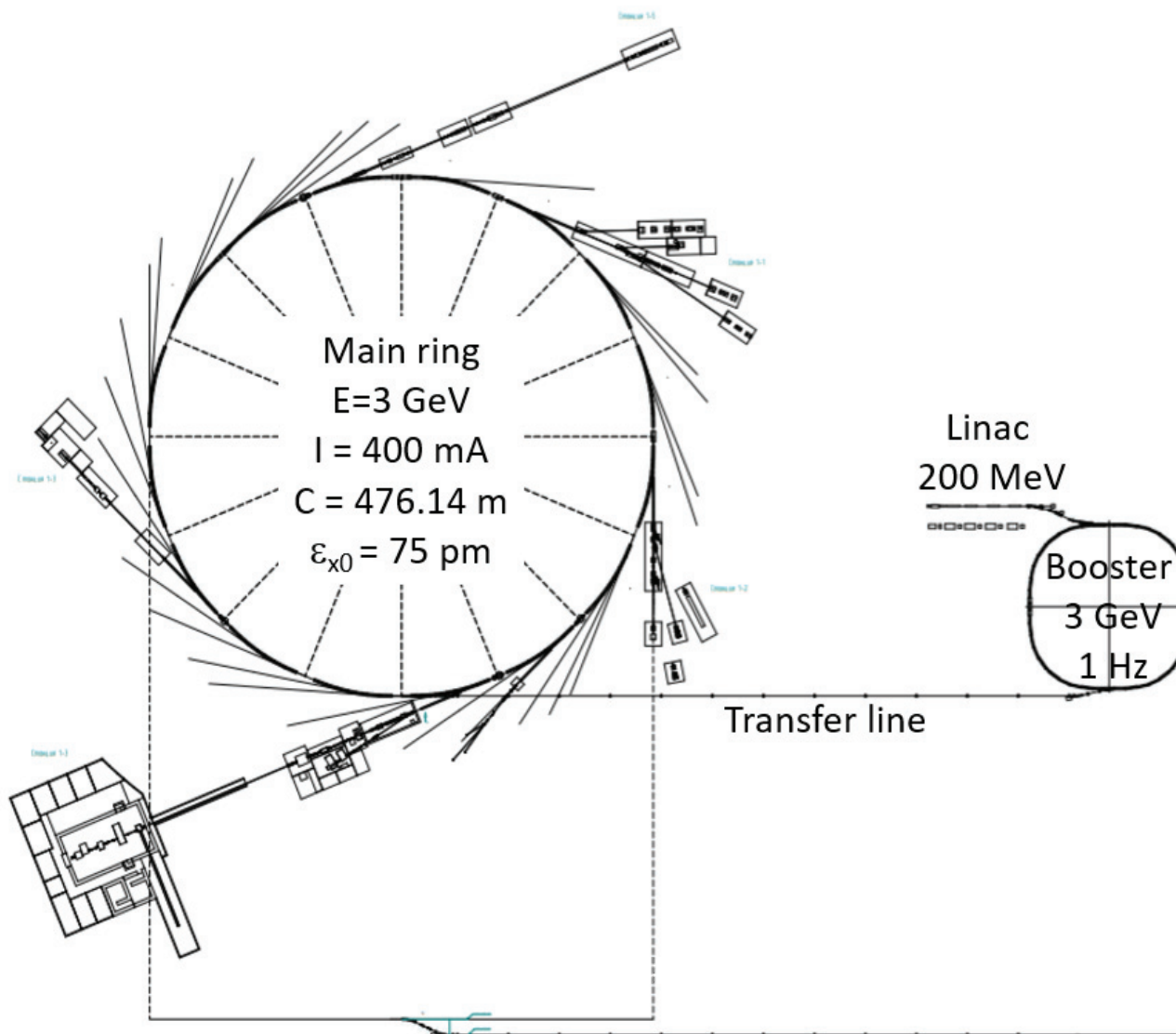
Каскад ускорителей: **2 инжектора**, **Бустер**, **Нуклотрон**, **Коллайдер**

3 исследовательские установки: **BM@N, MPD, SPD**



Сибирский Кольцевой Источник Фотонов

источник синхротронного излучения поколения 4+
с энергией пучка 3 ГэВ



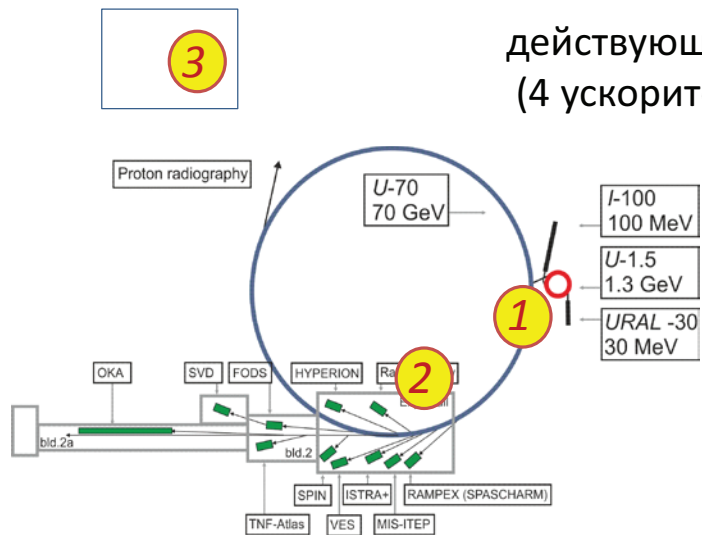
Синхротронный комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ

для испытаний радиационно-стойкой электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства

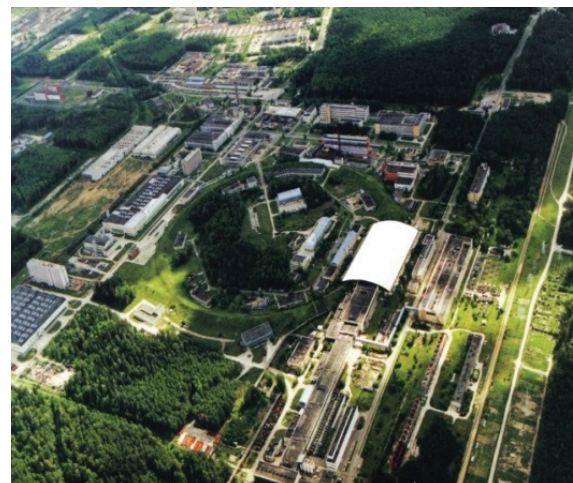




Развитие комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ – ИФВЭ (г. Протвино Московской области)



действующий Ускорительный комплекс У-70 НИЦ КИ – ИФВЭ
(4 ускорителя)



Постановление Правительств РФ от 16 марта 2020 г. № 287.

ФНТП развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019- 2027 годы (в составе Национального проекта “Наука и университеты”). Три объекта:

- 1 • импульсный нейтронный источник на основе реакции испарительно-скалывающего типа на ускорителе У-1.5
- 2 • экспериментальный комплекс ионной лучевой терапии на У-70
- 3 • синхротрон для ускорения ядер углерода – прототип отечественного клинического центра ионной углеродной терапии

«Megascience» на территории России. Этап – II (2030 и далее)

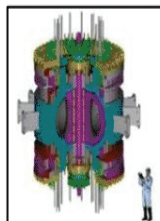
ФНТП «Синхротронные и нейтронные исследования (Координатор - НИЦ КИ)

Санкт-Петербург,
Гатчина

Реактор
«ПИК»



СИНП, НИЦ КИ



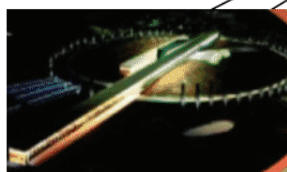
Токамак
IGNITOR
(Троицк)



Синхротрон
«USSR-4»
Протвино



Коллайдер
NICA
Дубна



Испарительно-
скалывающий
источник OMEGA
Протвино

Нижний Новгород



Центр исследований
экстремальных
световых полей
(ЦИЭС)

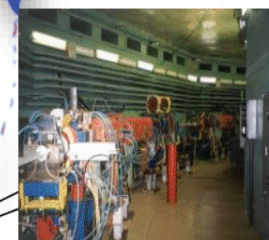
Новосибирск



Супер Чарм-тау
фабрика



Сибирский Кольцевой
Источник Фотонов (СКИФ)

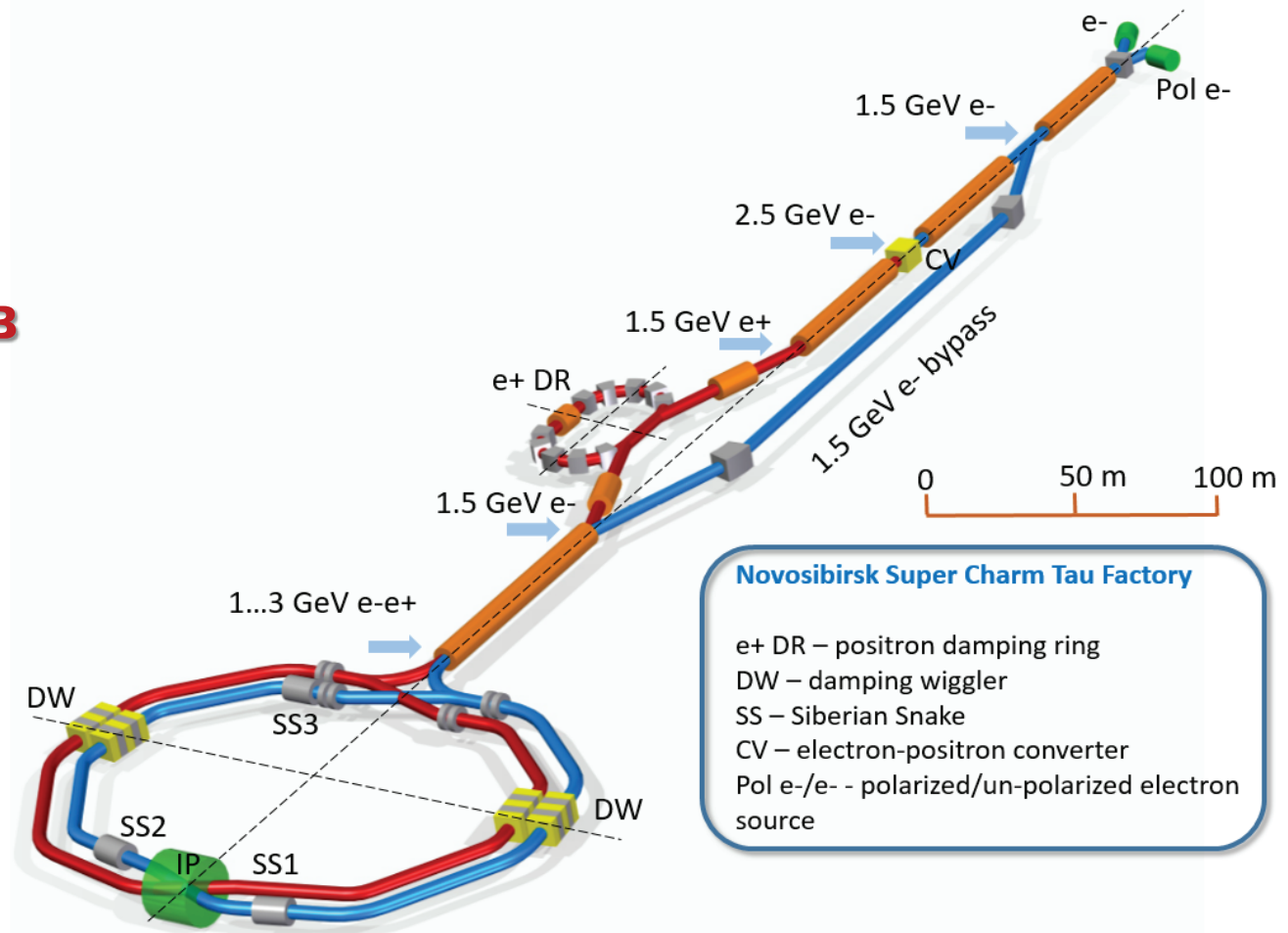


Источник
фотонов «РИФ»

Владивосток,
о. Русский

Электрон-позитронный коллайдер «Супер Чарм-Тау Фабрика» (ИЯФ СО РАН)

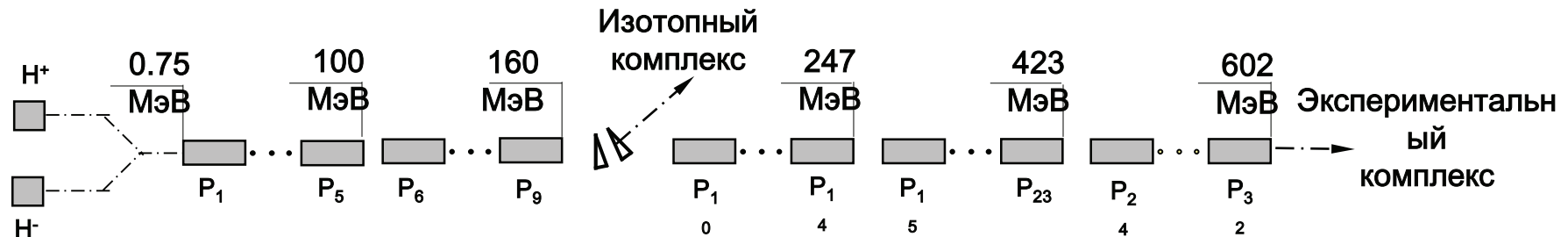
НЦФМ г. Саров



Цели проекта

Супер Чарм-Тау Фабрика – оптимизирована для работы с энергией в системе центра масс сталкивающихся частиц $\sim 3\div 7$ ГэВ и со светимостью, существенно превышающей достигнутую на установках в этом диапазоне энергий. В этом диапазоне рождаются практически все состояния чармониев, очарованных мезонов и барионов, содержащих один с-кварк или один с-антикварк.

Мощный Ускорительный Нейтронный Комплекс ИЯИ РАН

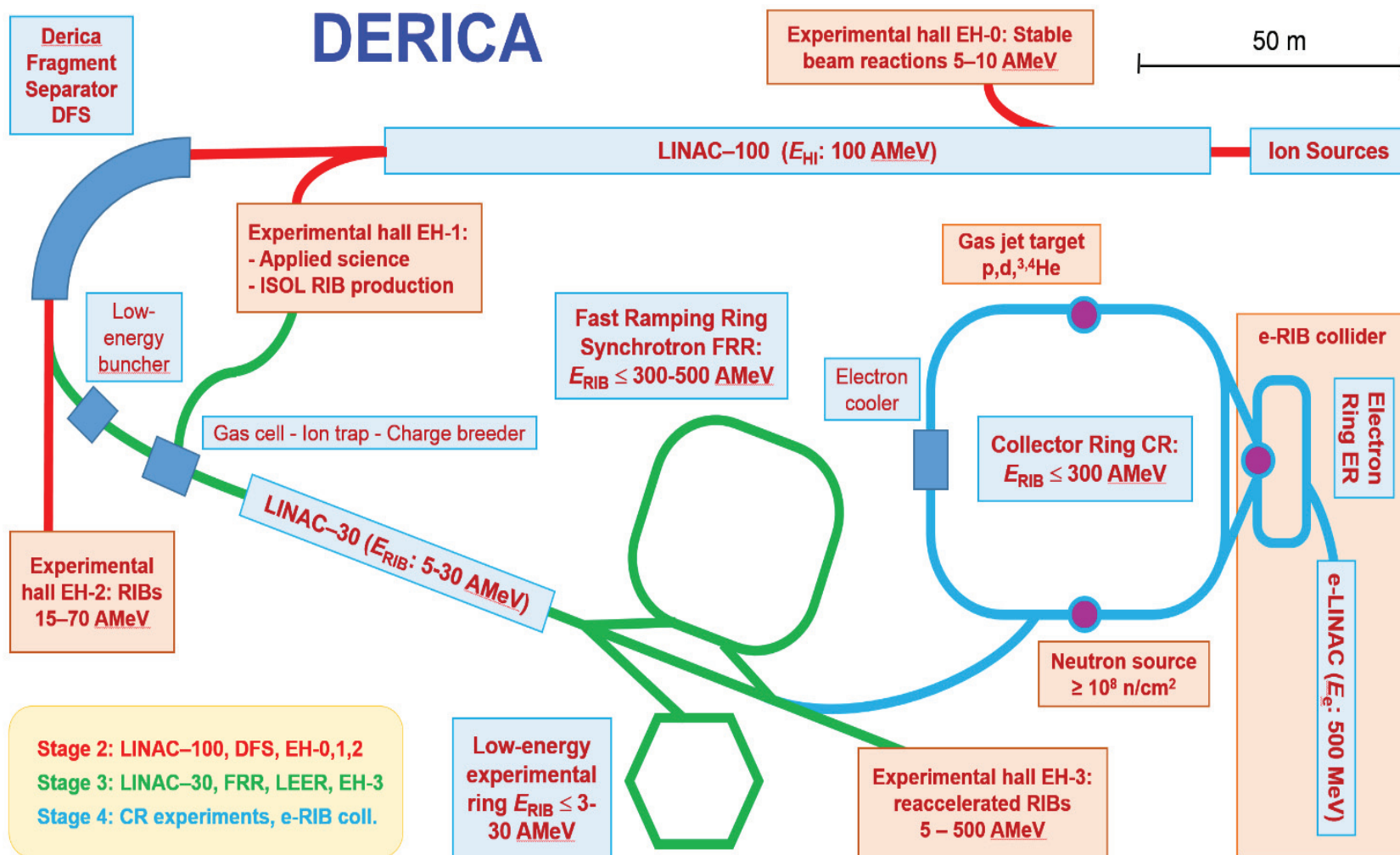


Цель проекта МУНК – создание сверхпроводящего (СП) линейного ускорителя протонов - **1 мА, 1 ГэВ** - и замены им существующего «теплого» (НП) ускорителя ММФ в ИЯИ РАН, Троицк, Москва.

Назначение Линака:

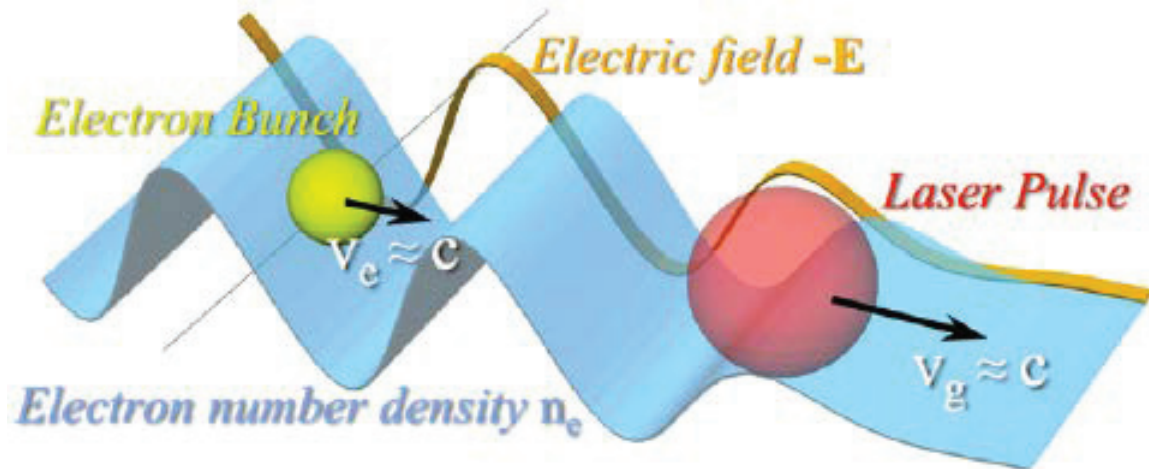
- импульсный источник нейтронов Spallation neutron source
- подкритический ядерный реактор с ускорителем ADS
- нейтринная фабрика - *важна средняя мощность в пучке,*
- производство радиоизотопов - *важна средняя мощность в пучке.*

Проект DERICA – электрон-ионный коллайдер для ядерной физики средних и низких энергий



Коллективные методы ускорения

Кильватерное ускорение - поле в плазме создается движущимся сквозь нее сгустком частиц или лазерным импульсом.



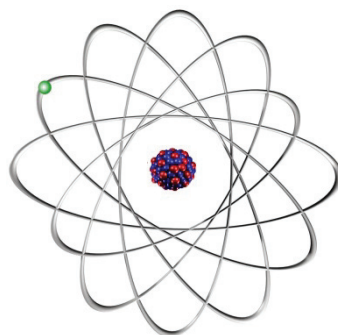
Лазерное кильватерное ускорение

$n10 \text{ МэВ/м}$ $\longrightarrow$ $n10 \text{ ГэВ/м}$

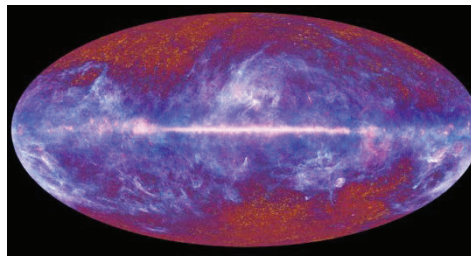
Кильватерное ускорение с электронными и позитронными драйверами

Кильватерное ускорение с протонными драйверами (ЦЕРН)

Некильватерные плазменные методы ускорения

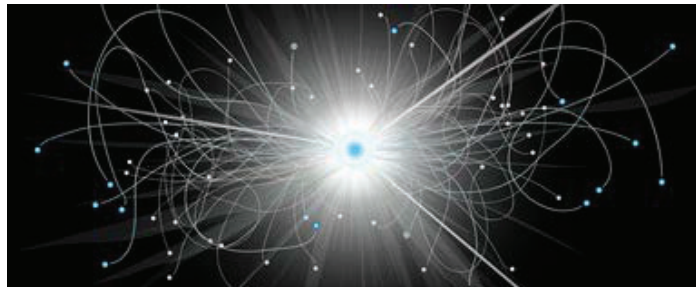


Предлагаемая программа призвана восстановить в России и поднять на современный уровень экспериментальную базу исследований по ядерной физике и физике частиц на основе ускорителей, создать условия для ее непрерывного технологического развития, позволяющего оперативно и адекватно отвечать на вызовы современного мира, а также сохранить активное международное сотрудничество.



Предлагаемая программа развития физики и технологии ускорителей в РФ соответствует Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 -2030 годы) –

Раздел 1.3.3.5. фундаментальных и поисковых исследований (Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов и др.), являясь составной частью направления 1.3.3. «Ядерная физика и физика элементарных частиц».



14 сентября 2021 Президиум РАН

Развитие физики ускорителей заряженных частиц в России и в мире
для фундаментальной науки, медицины и высоких технологий

Б.Ю.Шарков, И.Н. Мешков, А.Е.Благов, Е.Б.Левичев,
С.М. Полозов, Н.В.Завьялов,Т.В.Кулевой

Из Постановления Президиума РАН

Подготовить и представить руководству РАН предложения

- по модернизации сильноточного **линейного ускорителя протонов ИЯИ** на базе существующего туннеля и инженерной инфраструктуры;
- по реализации пилотного проекта создания компактного источника нейтронов **DARIA** в г. Екатеринбурге;
- по развитию работ в области новых методов ускорения заряженных частиц и компактных источников нейтронов;
- по включению в программу до 2030 года дополнительных мероприятий по развитию **ядерной медицины** и радиологии, включающие, в том числе создание новых ускорительных установок для медицинских исследований, проведение их сертификации, организацию производства необходимого стране количества таких ускорителей и подготовку высококвалифицированных кадров для направления в Минздрав России и НИЦ «Курчатовский институт».
- по развитию **кадрового потенциала** в области физики и техники ускорителей заряженных частиц для направления в Минобрнауки России;

- Считать необходимыми и обоснованными работы по проектированию, изготовлению и строительству ЦКП «Сибирский кольцевой источник фотонов», позволяющих достигнуть рекордного горизонтального эмиттанса 75 пм для существующих и сооружающихся в настоящее время источников синхротронного излучения с энергией 3 ГэВ.
- представить руководству РАН предложения по механизмам финансирования участия в экспериментальной программе на **ускорительном комплексе NICA** ученых из научных организаций и образовательных организаций высшего образования вне зависимости от их ведомственной принадлежности для направления в Минобрнауки России.
- Поддержать создание в ВНИИЭФ Федерального **центра радиационных испытаний** электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры на воздействие ионизирующих излучений космического пространства и сопутствующих факторов радиационной природы с использованием тяжело-ионного синхротронного комплекса.
- Считать целесообразным создание установки мирового уровня «**Супер С-тау фабрики**» как ключевого элемента Национального центра физики и математики на территории городского округа Саров и муниципального округа Дивеево Нижегородской области.

Реализация предлагаемых проектов

Обеспечит научное, технологическое лидерство в ряде областей ядерной физики и физики частиц

Ожидаемый высокий потенциал новых научных открытий, привлечет к участию международное научное сообщество ученых и специалистов

Станет драйвером развития фундаментальной науки, высоких технологий и человеческого капитала страны

