НЕСКОЛЬКО СЛОВ ОБ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ…

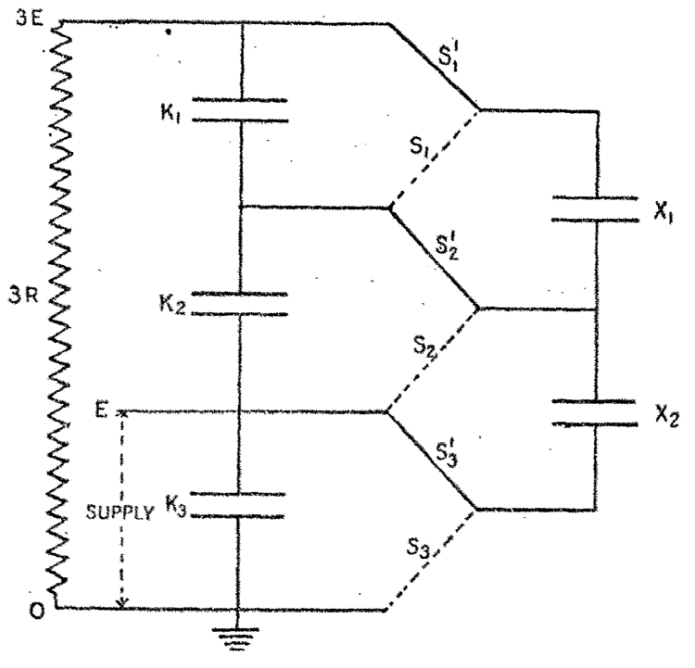
Первые ускорители…

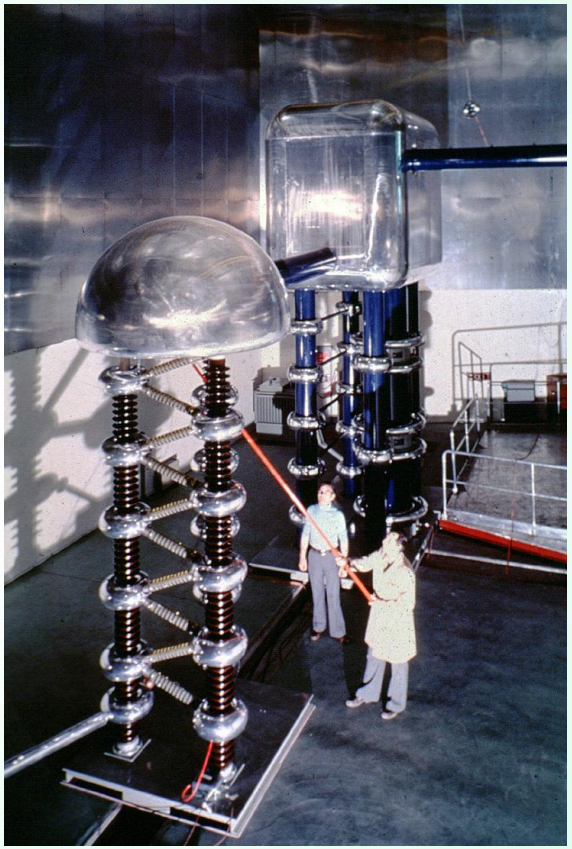
Предпосылки:

Р.Резерфорд, после нескольких успешных опытов по искусственному расщеплению ядер с помощью α-распада естественных радиоактивных источников, пришёл к выводу о необходимости иметь в своём распоряжении источник, способный давать а-частицы с энергией на порядок более высокой, чем те с которыми он имел дело прежде.
В 1928 г. **Г.А. Гамов** разработал теорию альфа-распада на основе туннельного эффекта. Это означало, что расщепить атом возможно и при меньшей энергии частиц, чем та, которую ожидал Резерфорд.

После этого Резерфорд поручил сотрудникам своей лаборатории создать генератор напряжения для ускорения частиц. Этими сотрудниками были **Кокрофт, Уолтон и Аллибон.**

Каскадная установка на энергию 300 кэВ была построена в 1930 г. Генератор Кокрофта-Уолтона представлял собой каскадный умножитель напряжения, в котором постоянный ток высокого напряжения получался за счёт выпрямления переменного тока низкого напряжения. Генератор строился из конденсаторов и диодов. С помощью этого генератора в том же 1930 г. ими были впервые искусственно ускорены протоны до энергии 200 кэВ.

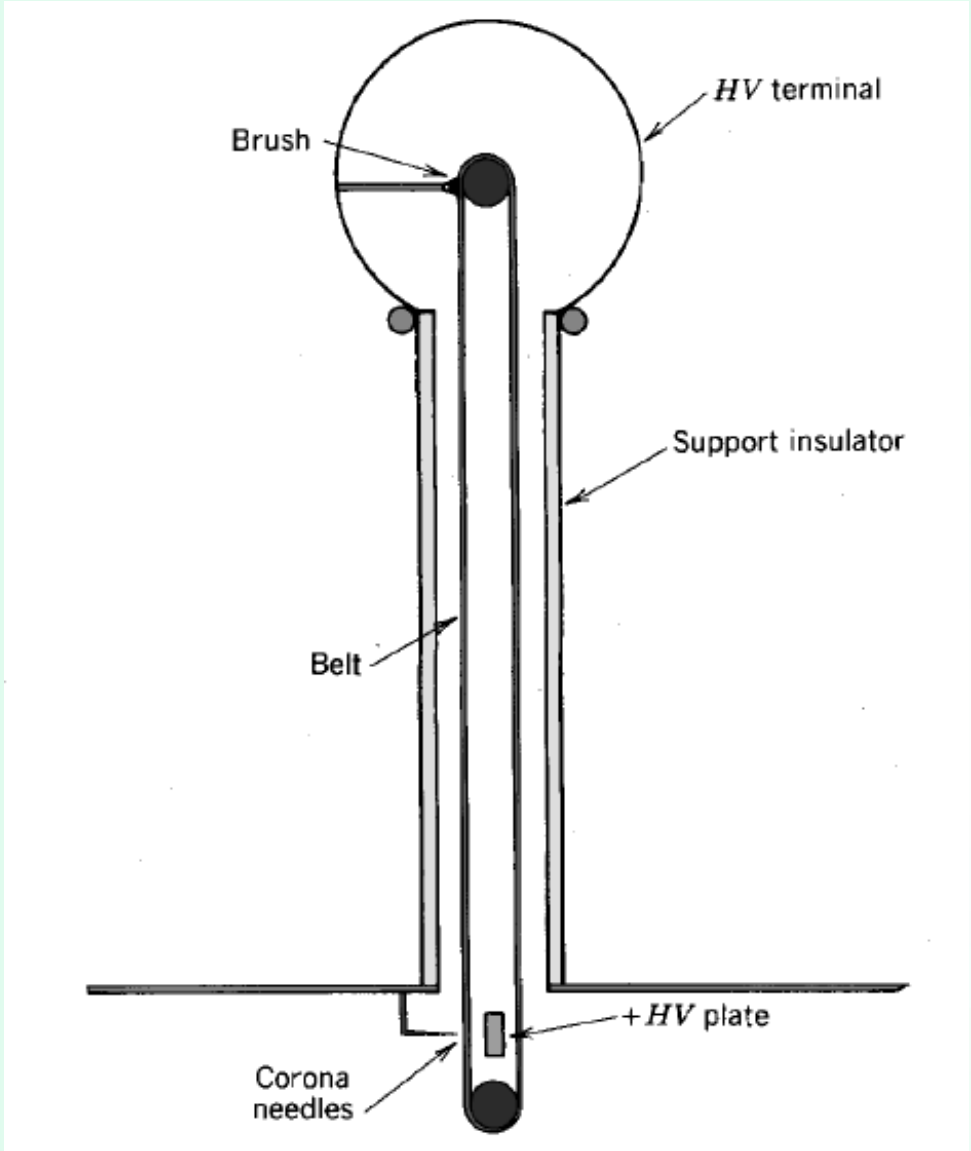


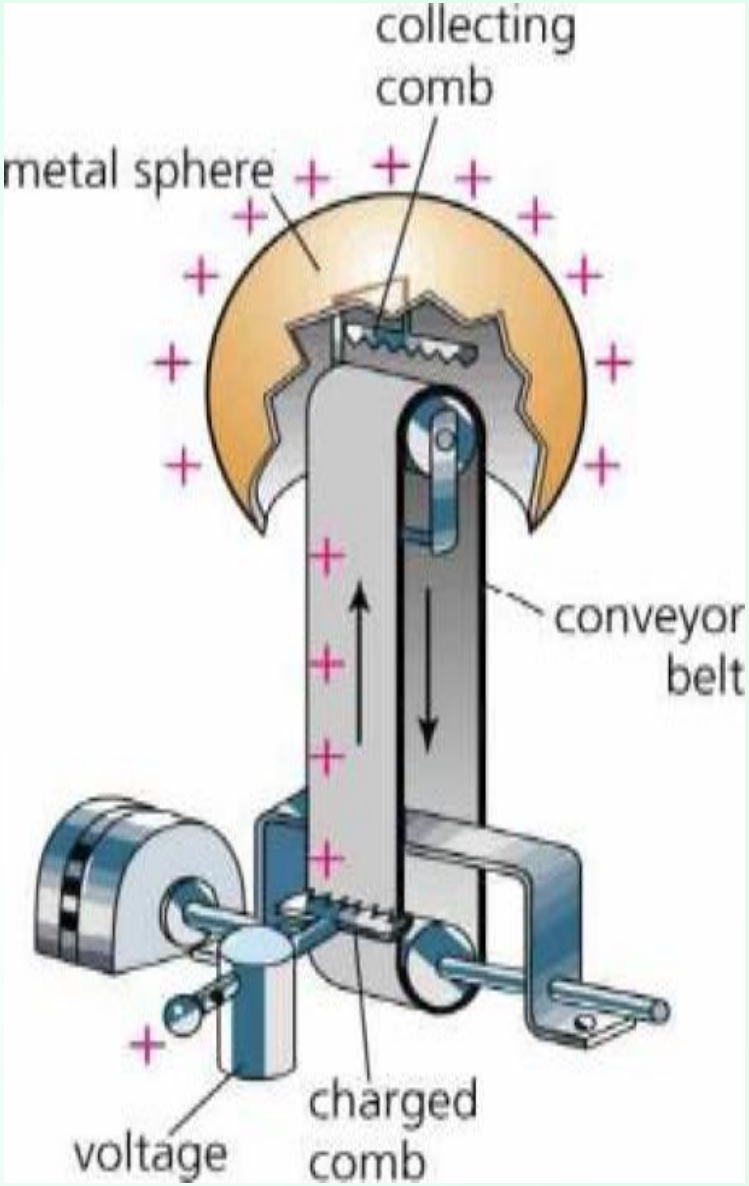


Генератор Кокрофта-Уолтона (CERN)

Именно **1930 г. принято считать началом** использования ускорителей заряженных частиц в качестве эффективного инструмента для исследования в области экспериментальной ядерной физики.
Согласно теории Гамова требовались пучки с энергией порядка 500 кэВ. Поставленная цель была достигнута в 1932 г. Новая установка позволяла получать напряжение в 800 кВ. С помощью данного генератора впервые удалось с помощью искусственно ускоренных протонов до энергии 600 кэВ вызвать расщепление ядра лития.

Ещё до Кокрофта и Уолтона американский физик **Ван-де-Грааф** в физической лабораторию им. Палмера Пристонского университета (США), построил первую работающую модель электростатического генератора. Принцип работы этого генератора заключается в том, что избыточный заряд, сообщается полому металлическому шару, называемому кондуктором и устанавливаемом на изолирующей колонне, от генератора в несколько десятков кВ, посредством движущейся ленты, т.е. за счёт механической работы, изготовленной из диэлектрического материала, и располагается по его внешней поверхности. Это позволяет получить высокие значения потенциала кондуктора.
В 1931 г. Ван-де-Граафу удалось прежде, чем Кокрофту и Уолтону, увеличить разность потенциалов, создаваемую генератором и используемую для ускорения ионов, до 1,5 МВ.


HV terminal
Brush
Support insulator
Belt
+HV plate
Corona needles


collecting comb
metal sphere
conveyor belt
charged comb
voltage

Ускоритель Ван-де Графа (ИЯФ, Алма-Ата)

Перезарядный ускоритель (C.N. Yang Institute for Theoretical Physics, State University of New York)

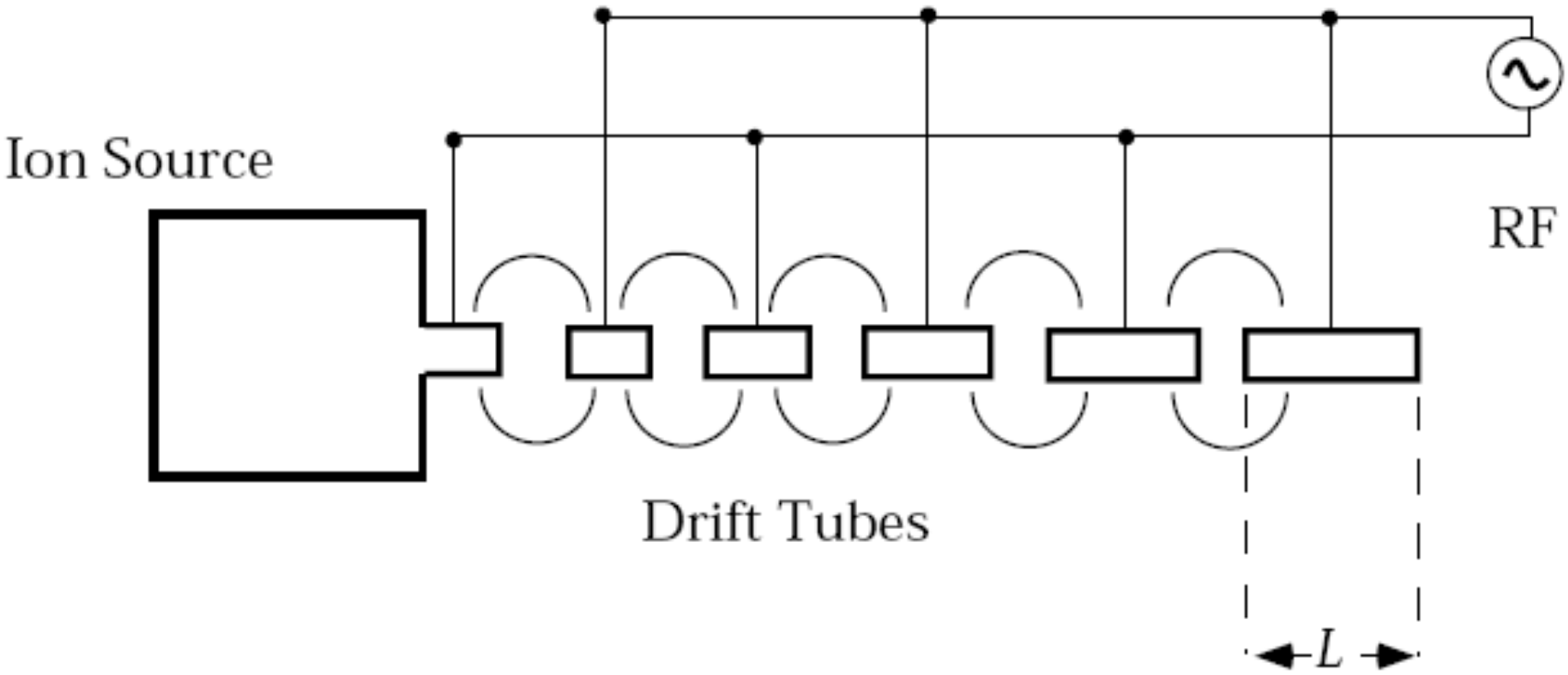
В 1933 г. **Хавенс, Керст и Херб** в Висконсинском университете (США) ускорили с помощью генератора Ван-де-Граафа протонный пучок до энергии 1 МэВ и повторили реакцию расщепления лития.

Дальнейшее увеличение напряжения требовало решения задачи по предотвращению возникновения коронного разряда. Херб решил эту задачу в 1935 г.

Следующая модификация генератора Ван-де-Граафа была предложена **Беннетом**, который предложил производить ускорение заряженных частиц в два этапа: при первом прохождении разности потенциалов ускоряются отрицательные ионы, а затем, после их обдирки в специальной газовой камере или посредством фольги, имеет место ускорение теперь уже положительных ионов. (**тандемный или перезарядный ускоритель**)

Высоковольтное ускорение, реализуемое ускорителями прямого действия, было первым методом ускорения, использованным для исследований ядерной физики. Однако ограниченные возможности этого метода не могли более удовлетворять требованиям бурно развивавшейся физики ядра. Требовалась альтернатива, поэтому качественно новым этапом в развитии ускорителей следует считать **появление резонансных методов ускорения**, не требующих высоких напряжений. Впервые идею такого метода ускорения высказал шведский учёный **Изинг** в 1924 г. Он предлагал для ускорения заряженных частиц использовать переменное электрическое поле, многократно прикладывая к частице одно и то же напряжение.

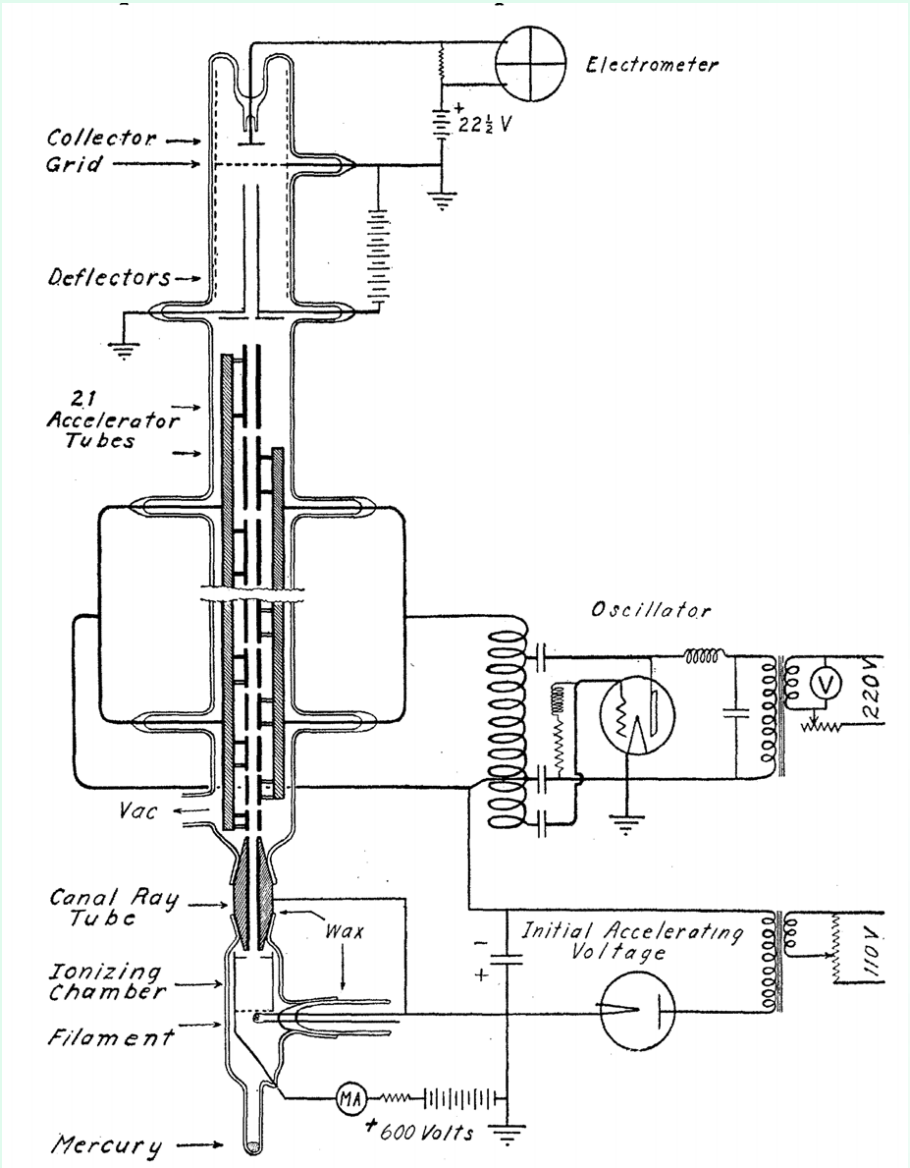
Первый опытный образец **резонансного линейного ускорителя** был реализован инженером-физиком **Р.Видероэ** в 1927 г. . Данный ускоритель состоял из трёх трубок дрейфа. Видероэ использовал непрерывное переменное напряжение с частотой 1 МГц и амплитудой 20 кВ. Данная установка позволила получить ионы калия с энергией 50 кэВ. Частота ускоряющего ВЧ-поля и длины трубок дрейфа подбирались таким образом, чтобы при движении ионов в межэлектродном зазоре они взаимодействовали с ускоряющим электрическим полем, а при замедляющей его фазе движение частиц происходило внутри трубок дрейфа.


Ion Source
RF
Drift Tubes
L

О. Лоуренс познакомился с идеей резонансного ускорения и схемой ускорителя Видероэ. В отличие от Видероэ, Лоуренс решил использовать ведущее постоянное во времени магнитное поле, способное искривлять траектории заряженных частиц, для того, чтобы заставить их многократно проходить одни и те же зазоры между электродами, которые стали называть дуантами.

Стоит отметить, что предложение об усовершенствовании резонансного метода с помощью искривления траектории частиц в магнитном поле было сделано и запатентовано Сцилардом.

О. Лоуренс и два его студента **Д. Слоан и С.М. Ливингстон** начали (в Калифорнийском университете в Беркли) работы по созданию линейного резонансного ускорителя и циклического резонансного ускорителя – **циклотрон**а.



Линейный ускоритель Лоуренса и Слоана

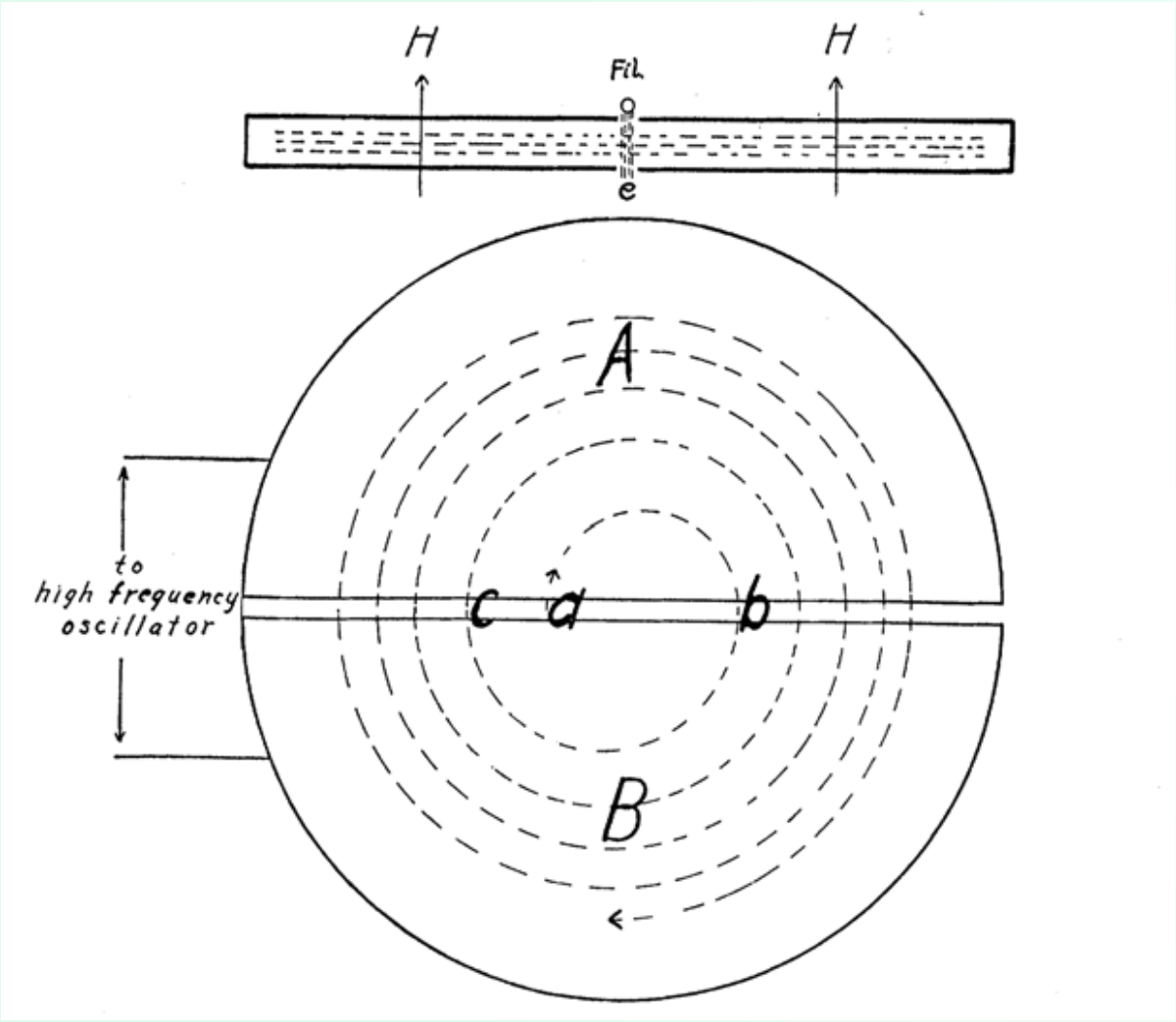


Схема первого циклотрона, предложенная Лоуренсом и Ливингстоном

Первый циклотрон

1931 – 1940 «Десятилетие циклотронов»

1931 г. Лоуренс и Ливингстон построили первый циклотрон, способный ускорять протоны до 80 кэВ

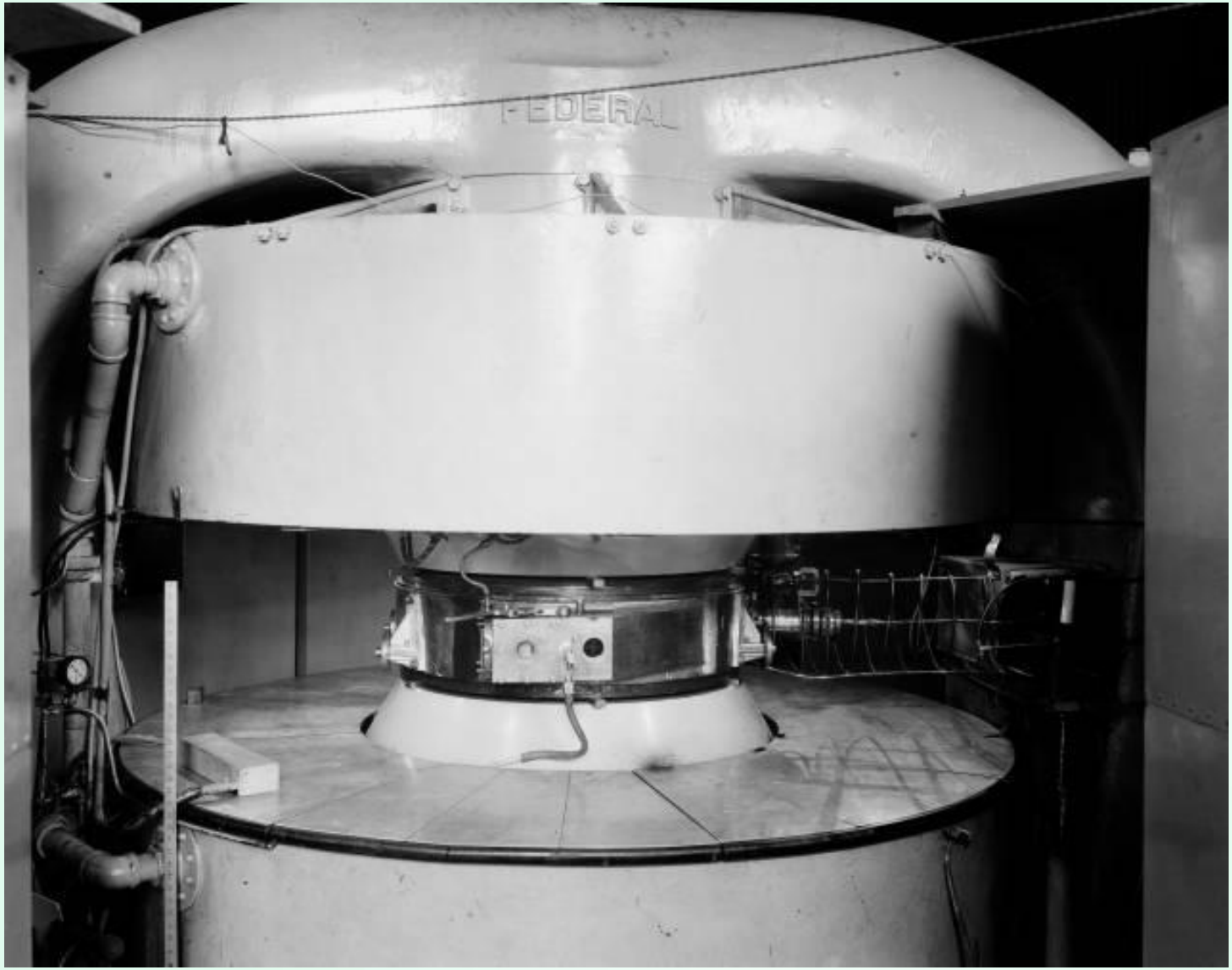
1932 г. - циклотрон на энергию протонов до 1,25 МэВ (Беркли)

1936 г. - первый в Европе циклотрон на 6 МэВ запущен в в Радиевом институте (Ленинград).

1937 г. – циклотрон в Берлинском университете

1939 г. - 1,5 м циклотрон, способный ускорять протоны до 20 МэВ (Беркли)

1939 г. - Д.Лоуренс получил **Нобелевскую** премию за изобретение и создание циклотрона и за получение искусственных радиоактивных элементов



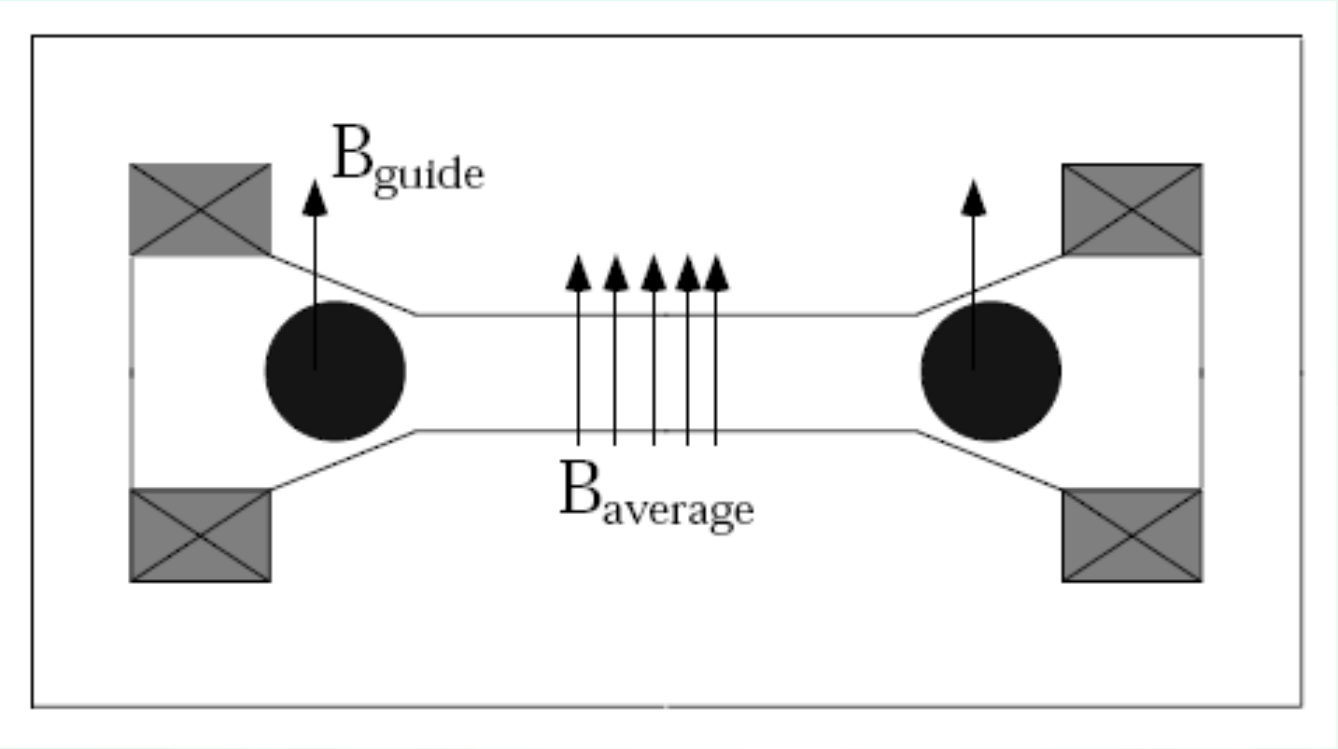
37’ циклотрон

60’ циклотрон

Проблема ускорения электронов не могла быть решена на пути развития циклотрона, принципиально не пригодного для ускорения релятивистских частиц.

Исторически первым не электростатическим ускорителем электронов является **бетатрон**. Первым, кто предложил идею по использованию электромагнитной индукции для ускорения был американский инженер **Слепян** в 1922 г., которую он заметил в работе трансформатора. В самом деле, если в качестве вторичной обмотки трансформатора использовать пучок частиц, то таким образом их можно ускорить до весьма высокой энергии. В 1927 г. Слепян запатентовал эту идею.

Независимо **Видероэ** в 1923 г., также рассматривал идею использования электромагнитной индукции для ускорения электронов, тогда же он получил основное условие, выполнение которого и обеспечивает возможность ускорения частиц в бетатроне. Это так называемое бетатронное условие, согласно которому скорость изменения магнитного поля на орбите пучка должна быть в двое меньшей скорости изменения среднего поля внутри орбиты. Первый бетатрон, рассчитанный на энергию 6,8 МэВ и построенный Видероэ в 1927 г., так и не удалось запустить.



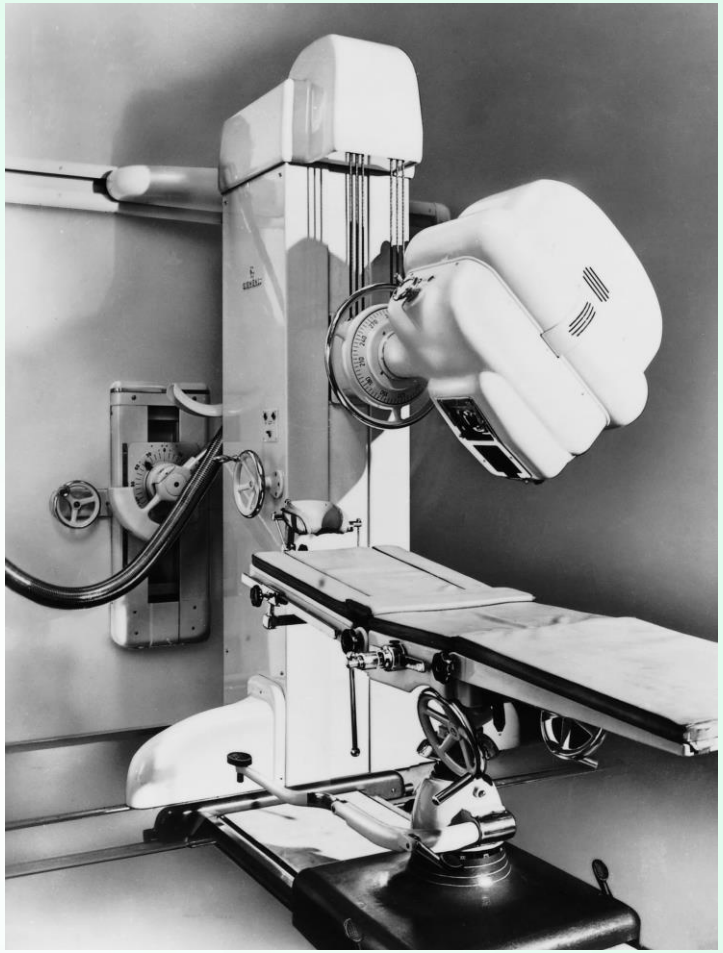
Уолтон в Британии также пытался построить бетатрон.

В 1939 г. **Керст** расширил работу Уолтона по теории движения электронов в пространственно-периодических и изменяющихся во времени полях и 15 июля 1940 г. им был запущен первый бетатрон, радиус которого составлял 7,5 см, а энергия ускоренных электронов 2,3 МэВ.

Максимальная энергия электронного пучка была достигнута на бетатроне, построенном Керстом в Иллинойском университете (США) в 1950г. и составила 300 МэВ.

Один из первых промышленных бетатронов фирмы Siemens

Современный промышленный бетатрон Global X-Ray & Testing Corporation



Медицинский бетатрон фирмы Siemens (1952)

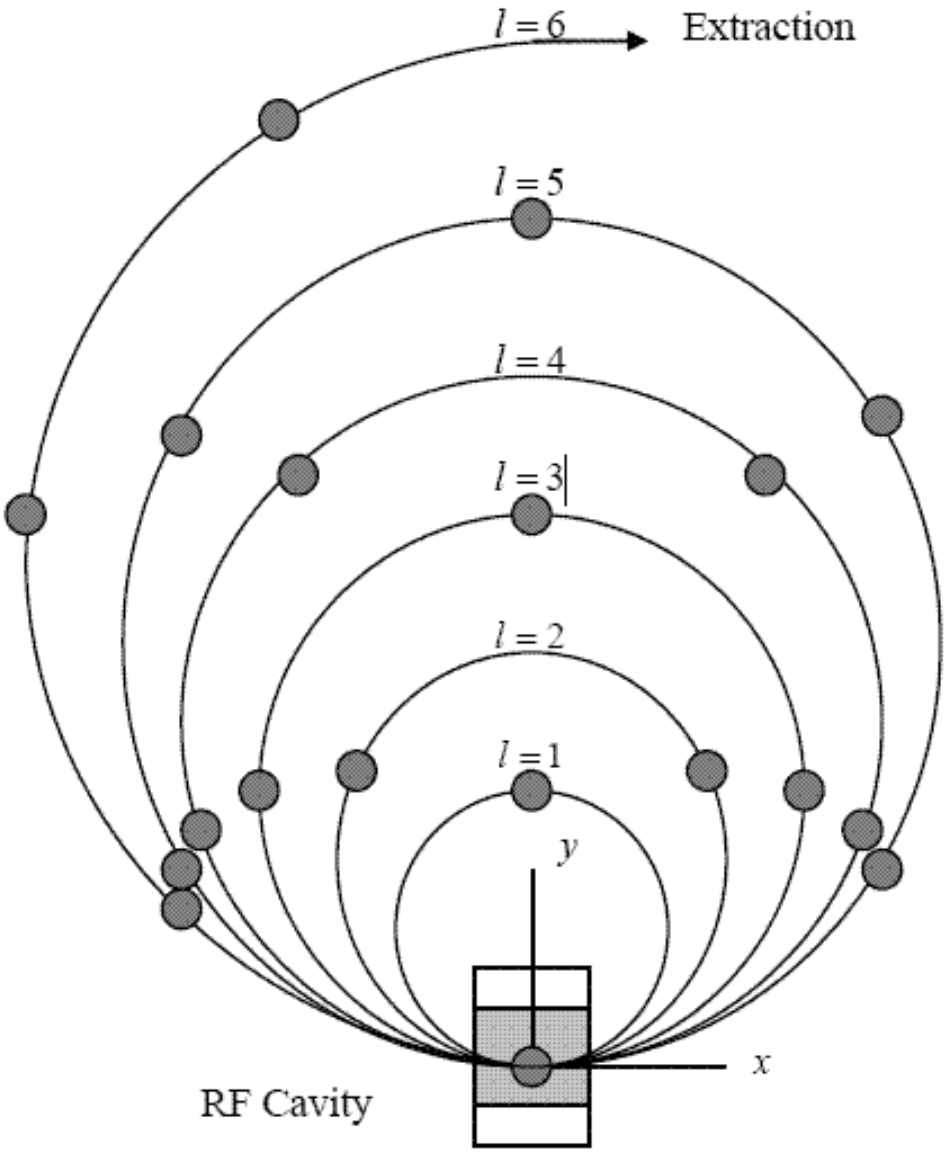
1944-45 – Принцип автофазировки

В 1944 г. **В. И. Векслер**, а ещё через год **Е.М.Мак-Миллан** независимо друг от друга предложили совершенно новый принцип ускорения заряженных частиц - **принцип автофазировки**, позволивший повысить их максимальную энергию на несколько порядков по сравнению с достигнутой к тому времени. Одновременно с принципом автофазировки Векслер предложил идею создания **микротрона** для ускорения электронов.

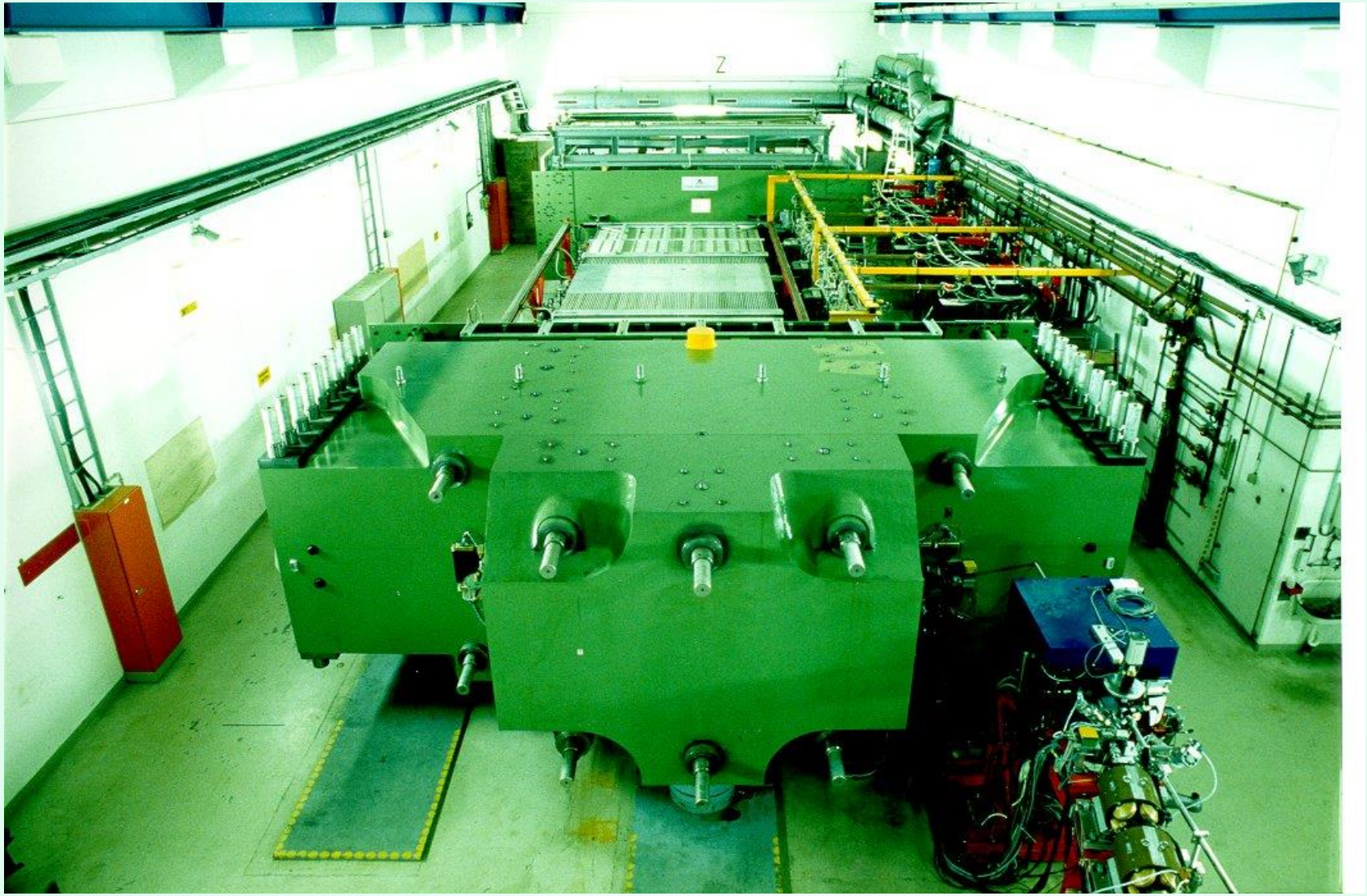
Первая действующая модель микротрона была сооружена в 1948 г. в Канаде.

Первый **разрезной микротрон** был запущен в 1960 г. в университете Онтарио (Канада).

Несколько позднее **В.И. Векслер** также предложил идею **синхротрона**.



Принцип работы микротрона



Крупнейший в мире микротрон Университета им. К.Гутенберга, Майнц, Германия (500 МэВ)

Существует два типа ускорителей тяжёлых частиц, основанных на использовании принципа автофазировки.

Один из них близок к обычному циклотрону - **фазотрон** (синхроциклотрон), другой представляет собой своеобразное сочетание синхротрона и фазотрона и называется **протонным синхротроном** (синхрофазотрон).

Фазотрон отличается от циклотрона тем, что в фазотроне частота электрического поля, ускоряющего частицы, меняется во времени.

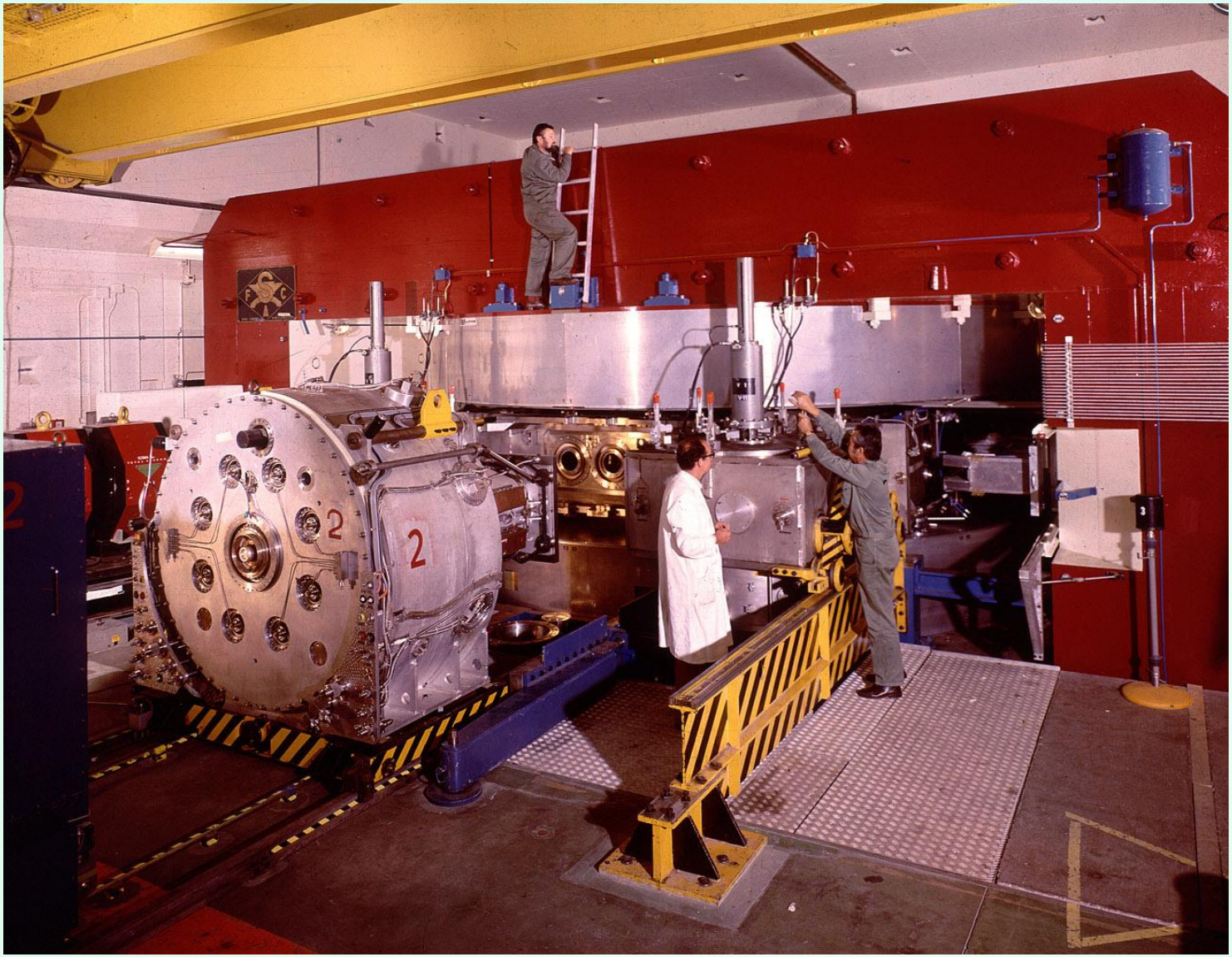
Первый фазотрон на энергию протонов 200 МэВ был построен в 1947 г. Лоуренсом.

В 1949 г. в Дубне был запущен фазотрон на энергию 680 МэВ.

Наибольшая энергия протонов 1 ГэВ при среднем ускоренном токе 0,5 мкА, была достигнута в 1968 г. в Гатчинском филиале Ленинградского физико-технического института.

Всего (с учетом прототипа Лоуренса) было построено 5 фазотронов.

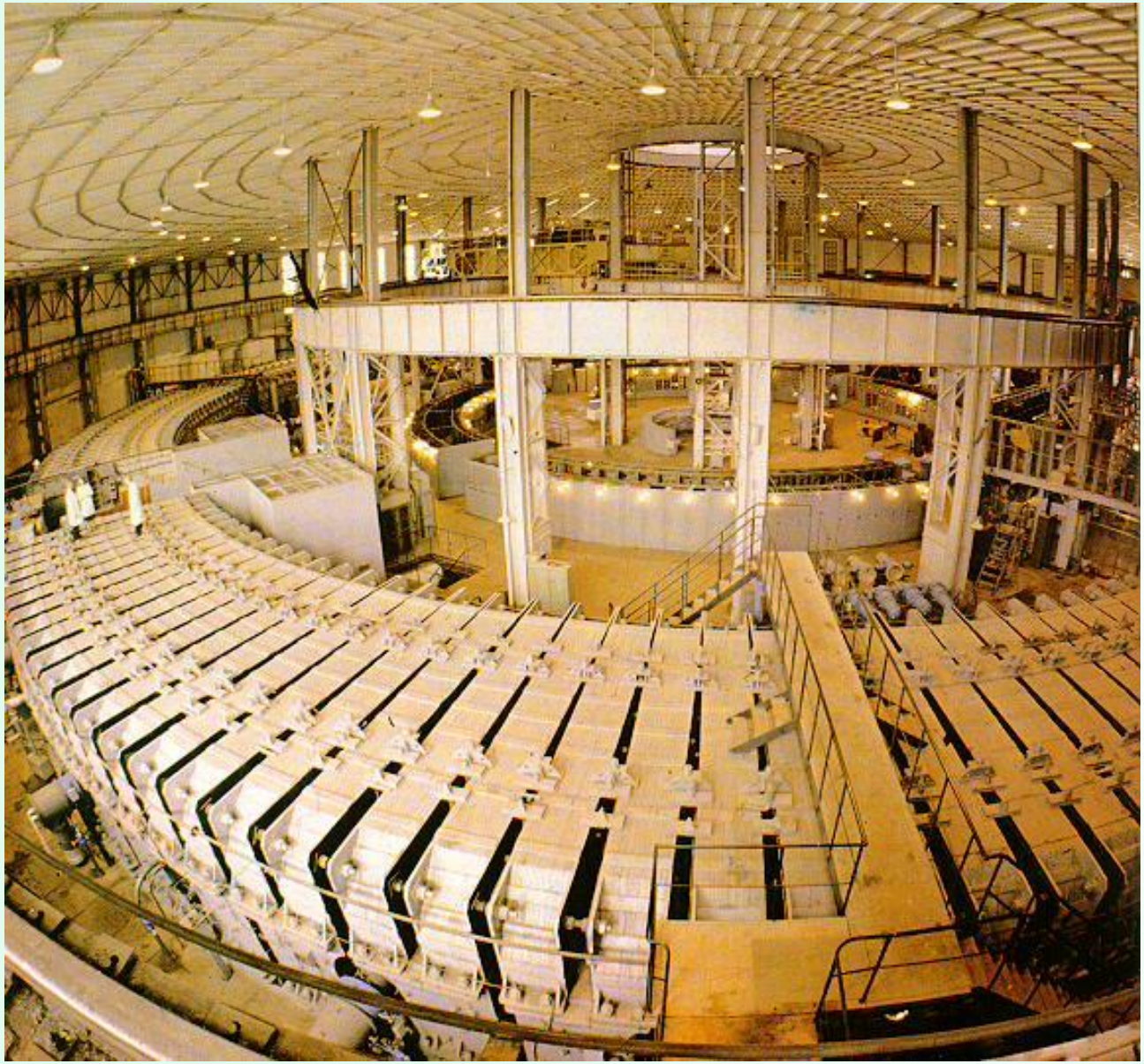
Фазотрон (синхроциклотрон) ИЯФ, Санкт-Петербург



600 МэВ синхроциклотрон (CERN)

Протонным синхротроном принято называть циклический ускоритель, в котором нарастающее во времени магнитное поле используется для управления траекторией частиц, а ускорение осуществляется переменным электрическим полем, частота которого также возрастает во времени.
Первый протонный синхротрон (космотрон) на энергию 3 ГэВбыл сооружён в 1952 г. в Брукхейвенской национальной лаборатории. Впоследствии подобные установки стали называть синхротронами со слабой фокусировкой. Максимальное значение энергии протонов, достигнутое в **слабофокусирующем** синхротроне, составило 10 ГэВ, которое было достигнуто на запущенном в 1957 г. синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна). Всего было построено 6 крупных протонных синхротронов со слабой фокусировкой.

Первый **электронный синхротрон** был запущен В.И. Векслером в ИЯИ (Москва) в 1948 г. Отличие протонного и электронного синхротронов состоит в том, что из-за быстрого достижения электронами релятивистских скоростей, в электронном синхротроне не требуется изменять частоту ВЧ поля. Самая большая энергия в слабофокусирующем электронном синхротроне была получена в ЕрИЯФ и составила 6 ГэВ.



Протонный синхротрон на 10 ГэВ ОИЯИ

(«Синхрофазотрон»)

В 1952 г. **Курант, Ливингстон и Снайдер** предложили новый способ фокусировки пучков заряженных частиц, получивший название **сильной (жёсткой, знакопеременной) фокусировки**. По некоторым сведениям, данная идея была предложена американским инженером Кристофилосом ещё в 1946 г.

Первый **сильнофокусирующий протонный синхротрон PS** был сооружён в 1959 г. в ЦЕРН (Швейцария). Его средний радиус составлял 100 м и он ускорял протоны до 28 ГэВ. В 1960 г. в Брукхэвенской национальной лаборатории был запущен протонный синхротрон **AGS** (**Alternating Gradient Synchrotron**) на энергию 30 ГэВ. В 1967 г. был осуществлён запуск протонного синхротрона с сильной фокусировкой на энергию 76 ГэВ У-70 в Институте физики высоких энергий. Крупнейшим в мире протонным синхротроном долгое время являлся построенный в 1983 г. **Tevatron** национальной лаборатории им. Э. Ферми (Чикаго, США). Он является первым ускорителем, в котором были использованы **сверхпроводящие** (СП) магниты (хотя первые СП квадруполи были использованы в 1979 г. для фокусировки частиц на установке ISR ЦЕРН) и позволяет ускорять протоны до **980 ГэВ**.

В 2009 г. после долгих и упорных работ был запущен **LHC** (CERN) на плановую энергию 7 ТэВ.

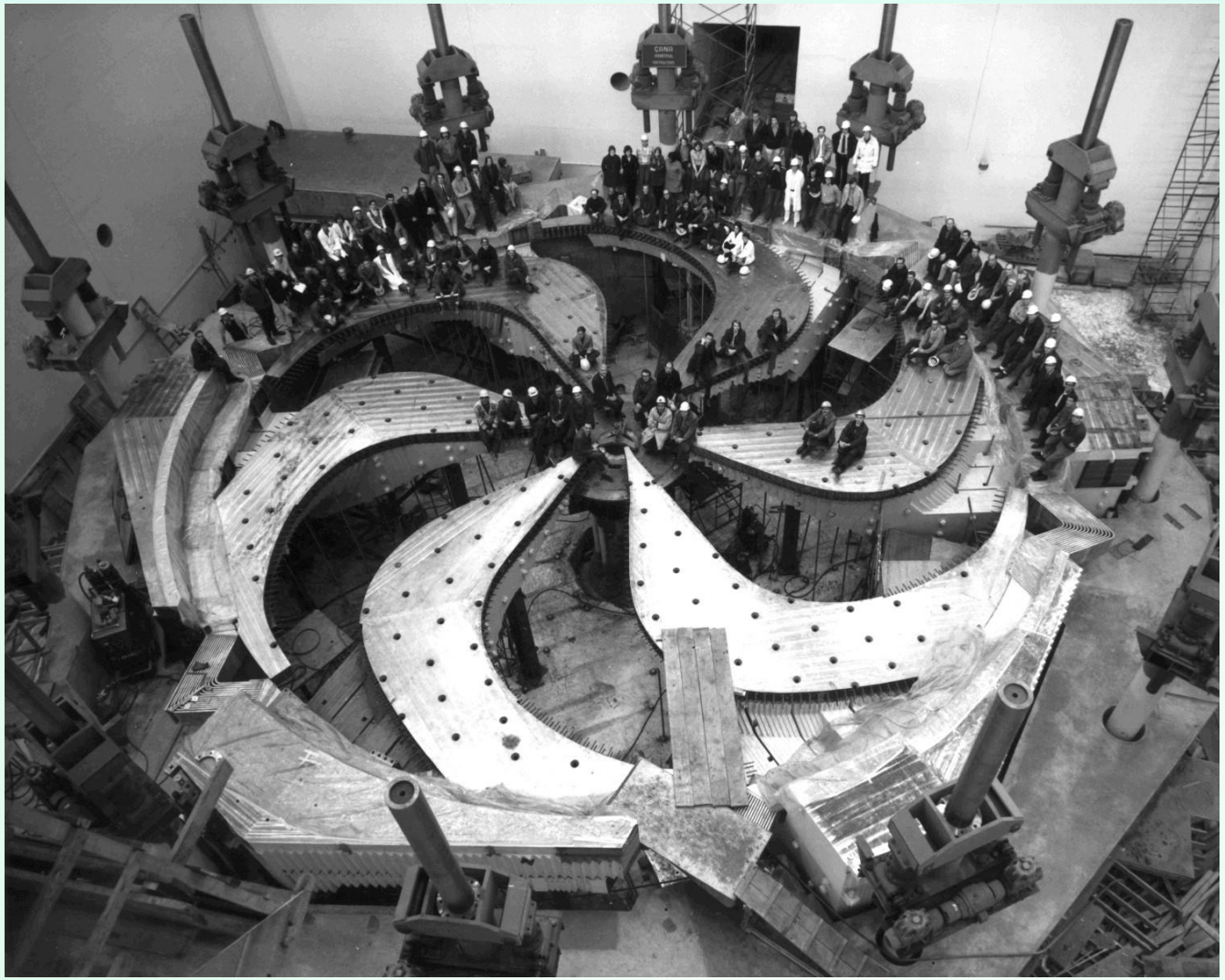
Следующим толчком для развития циклотронов (к 1970 г.) послужило возникновение идеи о сооружении так называемых мезонных фабрик. Появилась модификация циклотрона - **изохронный циклотрон** или циклотрон с разделёнными секторами, в котором для ускорения частиц используются не дуанты, а резонаторы.

Наиболее крупными и производительными машинами такого типа являются циклотрон на энергию 520 МэВ Канадского центра TRIUMF и 590 МэВ установка SIN института им. Пауля Шеррера в Швейцарии.

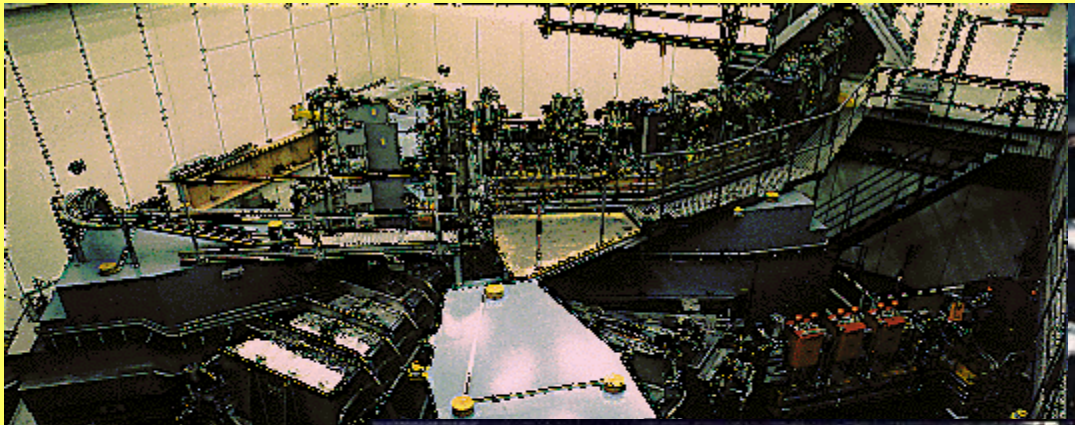
Большой вклад в развитие изохронных циклотронов внесли сотрудники ОИЯИ, в частности Ю.Ц. и Р.Ц. Оганесяны, предложившие систему вертикальной инжекции пучка в циклотрон и системы вывода пучка с разных орбит.

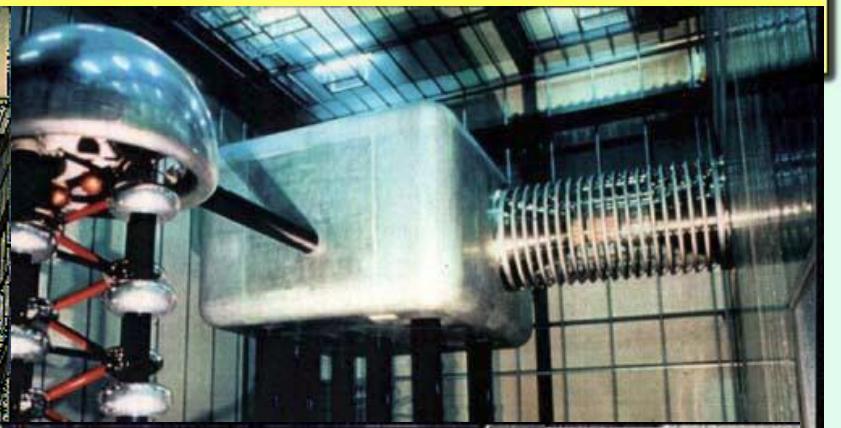
Циклотрон У-400, ОИЯИ

Циклотрон У-400, ОИЯИ



Сооружение изохронного циклотрона TRIUMF
январь 1972





Ring Cyc
590 MeV

«Циклотрон с разделенными орбитами» SIN (PSI, Швейцария)

После 1945 г. был достигнут колоссальный прогресс в создании мощных СВЧ генераторов, что привело к прогрессу в разработке линейных ускорителей заряженных частиц. Основной недостаток ускорителя Видероэ – низкая электродинамическая эффективность, был устранён в конструкции линейного ускорителя, предложенной **Альварецом** в 1946 г., который поместил трубки дрейфа в металлический кожух. Первый протонный линейный ускоритель, построенный Альварецом, работавший на частоте 200 МГц, имел диаметр 1 м, длину 12 м и был рассчитан на энергию 32 МэВ. Он был запущен в 1948 г. в Радиационной лаборатории Калифорнийского университета. Однако, из-за отсутствия подходящих средств фокусировки пучка его интенсивность оставалось слишком низкой. Коренным образом положение изменилось, когда в 1952 г. **Блюэтт** предложил использовать квадрупольную фокусировку в линейном ускорителе.

К сожалению, для инжекции в ускоритель Альвареца пучок должен иметь довольно высокую энергию (> 600 кэВ). Получить ее до 1970-х удавалось только при использовании электростатических ускорителей. Впоследствии была предложена **высокочастотная фокусировка** – т.е. идея использования ВЧ поля со специальным распределением в резонаторе не только для ускорения, но и для поперечной фокусировки пучка.

Ускоритель Альвареца

SUPERHILAC (BNL)

Использование ВЧ поля для одновременного ускорения и фокусировки пучка было, по-видимому, впервые предложено в работах **Я.Б. Файнберга** и **М.Гуда**. В этих работах предлагалось периодически изменять знак фазы синхронной частицы от зазора к зазору. Таким образом, на одном периоде ВЧ поля пучок фокусировался в поперечном направлении, при этом нарушалась устойчивость продольного движения. На следующем периоде, наоборот, продольное движение было устойчивым, а в поперечном направлении наблюдалась дефокусировка пучка. Предполагалось, что в результате будет достигнута устойчивость движения по всем направлениям. Такой тип фокусировки был назван **фазопеременной фокусировкой** (ФПФ). В дальнейшем этот принцип был существенно улучшен и реализован на практике в работах В.В. Кушина (ассиметричная фазопеременная фокусировка, АФПФ), Н.А. Хижняка (модифицированная фазопеременная фокусировка, МФПФ) и группы сотрудников МИФИ.

В настоящее время успешно развиваются системы, в которых высокочастотная фокусировка имеет квадрупольный характер. Впервые идея использования высокочастотных квадруполей была предложена В.В. Владимирским еще в 1956 г. Классической стала система с **пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой** (ПОКФ), предложенная **И.М. Капчинским** и **В.А. Тепляковым**. Этот ускоритель имеет ряд существенных достоинств: высокий коэффициент токопрохождения пучка, низкую (30 кэВ по протонам) энергию инжекции. В настоящее время системы с ПОКФ стали наиболее часто используемым вариантом ускорителя-группирователя для пучков протонов, легких и тяжелых ионов. Также успешно реализована система с **пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой** (ППФ), предложенная **В.А. Тепляковым** [11]. Она оказалась очень эффективна при энергиях протонов свыше 2-3 МэВ.

К настоящему времени предложено большое количество типов ВЧ фокусировки или комбинированной фокусировки. Наблюдается повсеместный переход к их использованию для ускорения протонов и ионов при низких и средних энергиях.

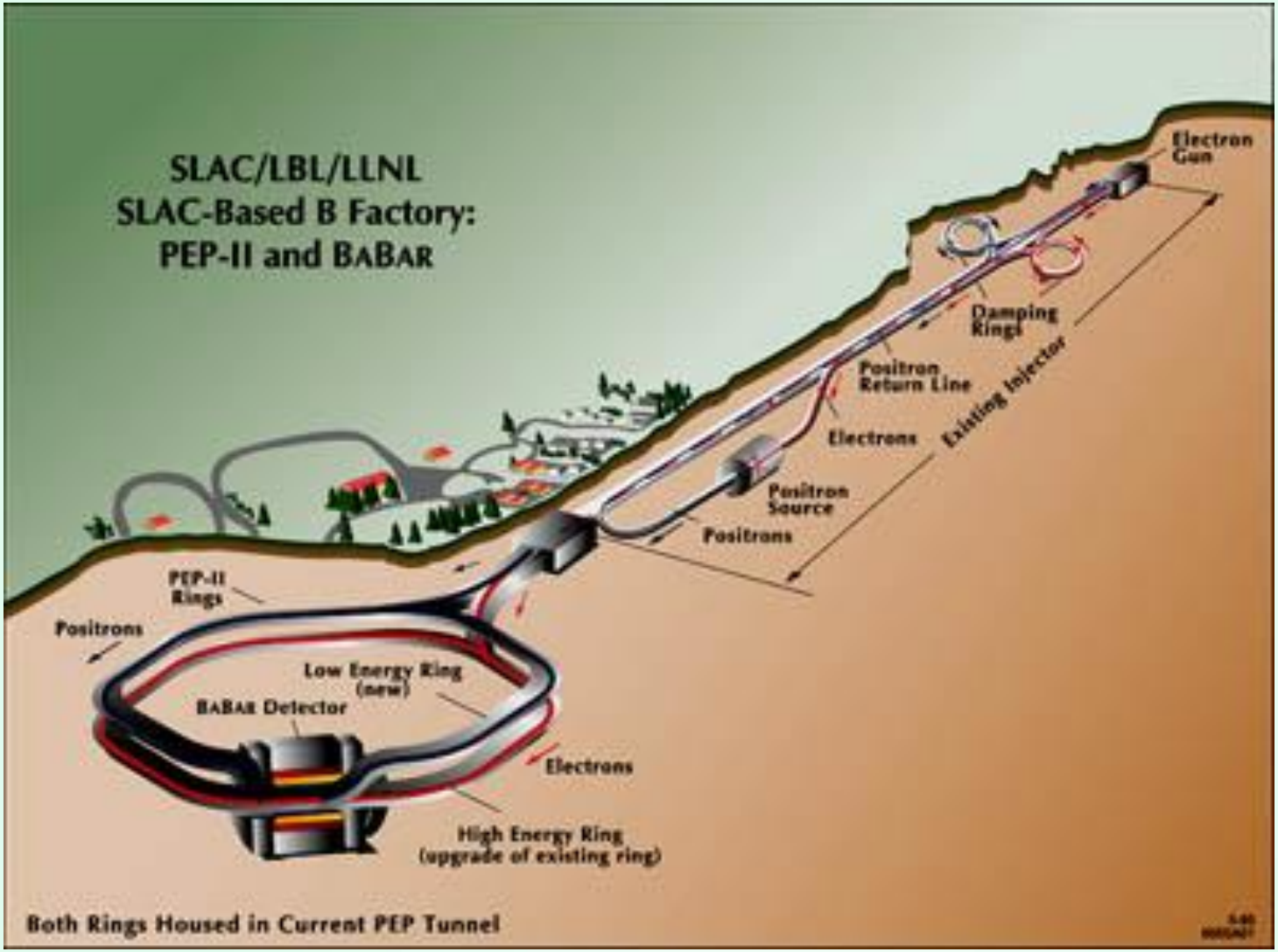
Ускоритель с ПОКФ

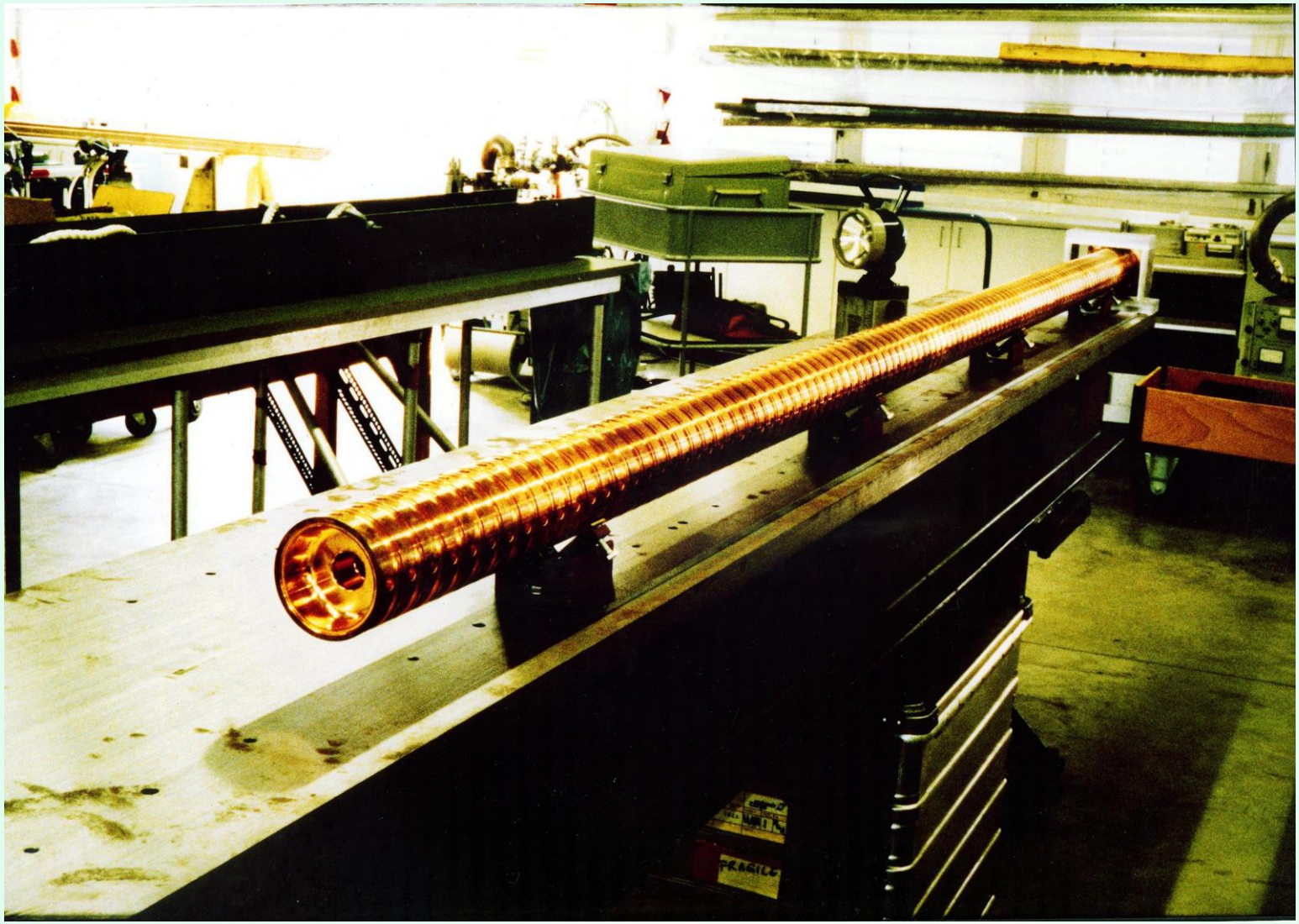
Ускоритель типа IH-DTL (университет в Хайдельберге, Германия)

В Стэнфорде (США) в 1947 г. был запущен первый **электронный линейный резонансный ускоритель** Mark-I на энергию 4,5 МэВ (**Хансен** и **Гинзтон**)

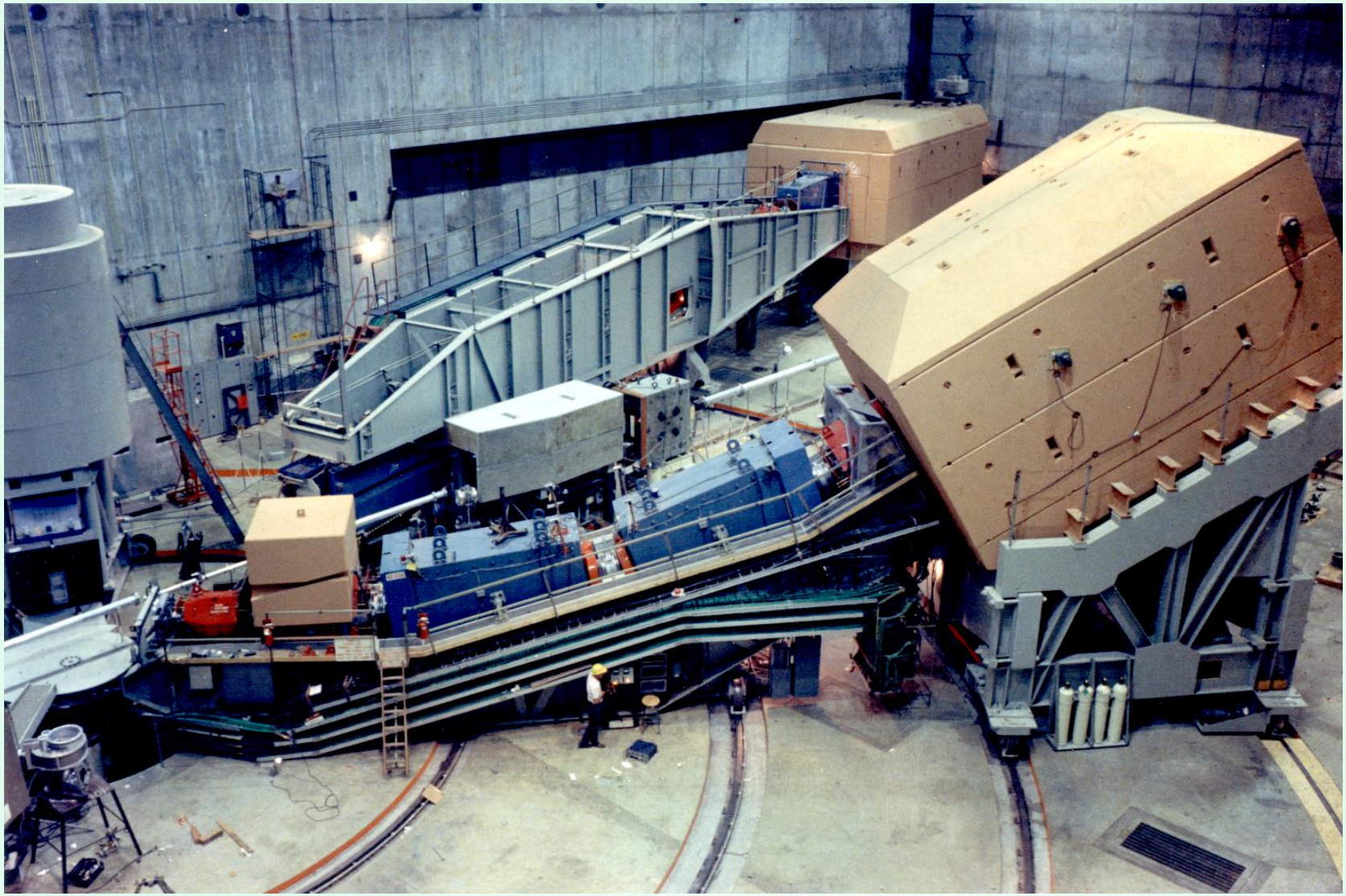
В Стэнфорде был построен целый ряд линейных электронных ускорителей, среди которых Mark-III, ускорявший электроны до 1 ГэВ.

В Стэнфордском университете был организован Стэнфордский центр по линейным ускорителям (SLAC), в котором в 1966 г. был построен более чем трёхкилометровый ускоритель электронов на 20 ГэВ. В 1980 г. с применением системы компрессии ВЧ-мощности SLED (а позднее и SLED-II), и впервые, СП резонаторов, на базе этого ускорителя был реализован первый и пока единственный в мире линейный коллайдер SLC на энергию 50ГэВ.


SLAC/LBL/LLNL
SLAC-Based B Factory:
PEP-II and BABAR
Electron Gun
Damping Rings
Positron Return Line
Existing Injector
Electrons
Positron Source
Positrons
PEP-II Rings
Positrons
Low Energy Ring (new)
BABAR Detector
Electrons
High Energy Ring (upgrade of existing ring)
Both Rings Housed in Current PEP Tunnel


FRAGILE

SECTOR 29
EXIT
EXIT
235



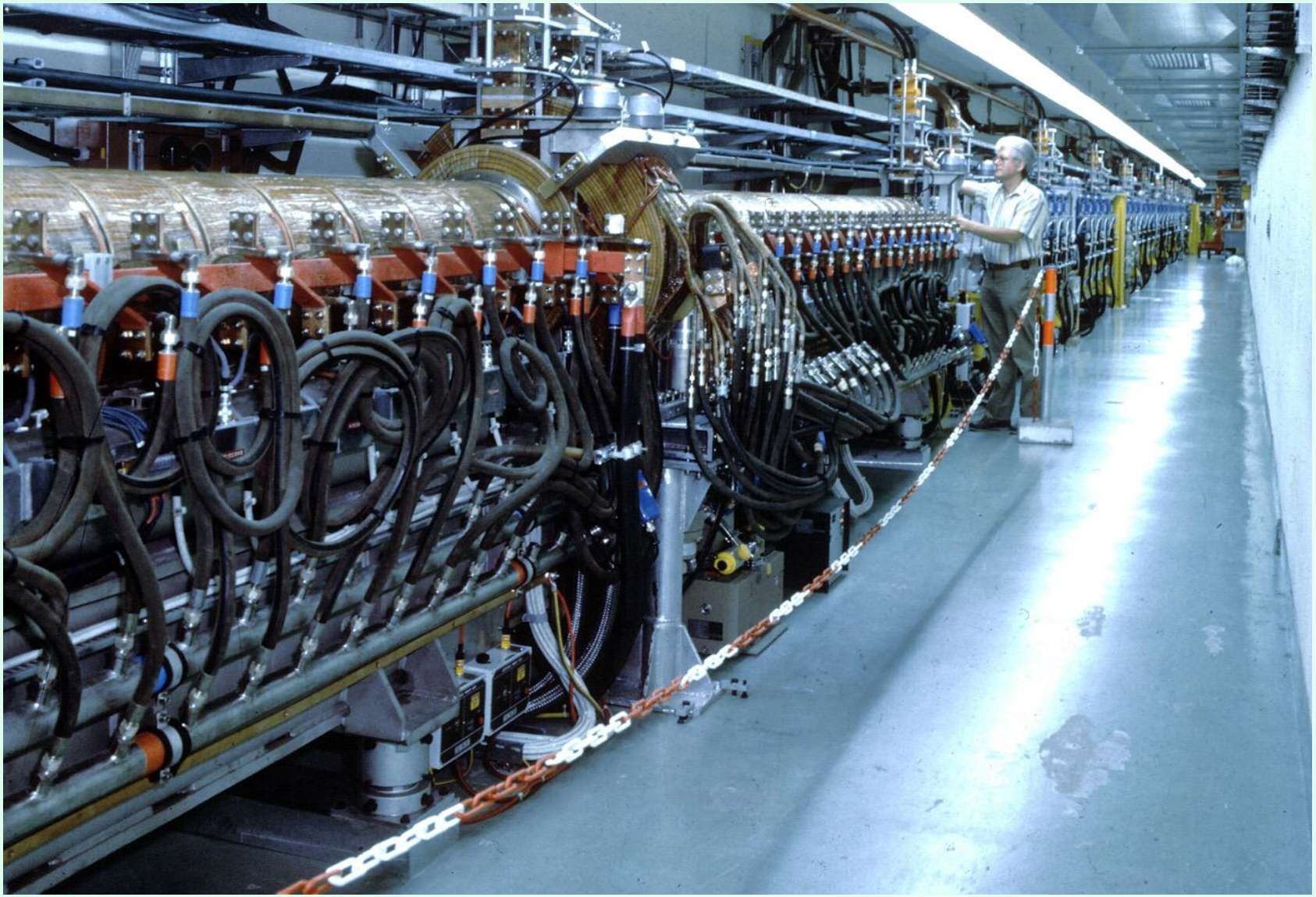
Создание **коллайдер**ов, позволивших наиболее эффективным способом использовать энергию ускоренных частиц, явилось следующим шагом в развитии кольцевых ускорителей. Идею осуществления ядерных реакций на встречных пучках высказал в 1956 г. **Керст**. В 1961 г. **Тушек**ом был построен первый электрон-позитронный коллайдер во LNF INFN, Фраскати (Италия), который назывался AdA. В этом же году в Новосибирском институте ядерной физики им. Будкера был запущен электрон-электронный коллайдер ВЭП-1 с энергией сталкивающихся пучков 160 МэВ. В 1976 г. в DESY (Гамбург, Германия) вступил в строй электрон-позитронный коллайдер **PETRA**, в котором сталкиваемые пучки обладали энергией 7 ГэВ.

Самым крупным в мире коллайдером лёгких частиц был электрон-позитронный коллайдер **LEP**, построенный в 1989 г. в ЦЕРН, со встречными пучками, ускорявшимися до энергии 208 ГэВ в системе центра масс. В 2000 г. LEP полностью исчерпав программу физических экспериментов, был демонтирован.

В настоящее время крупнейшими циклическим коллайдерами являются комплекс **КЕК** в Японии (2х30 ГэВ) и ВЭПП-4 в ИЯФ им. Г.И. Будкера (2х23 ГэВ).

Дальнейшее развитие циклических электронных коллайдеров, по-видимому, невозможно из-за невозможности преодоления проблем, связанных с излучением частиц.

Магнит коллайдера AdA в LNF INFN

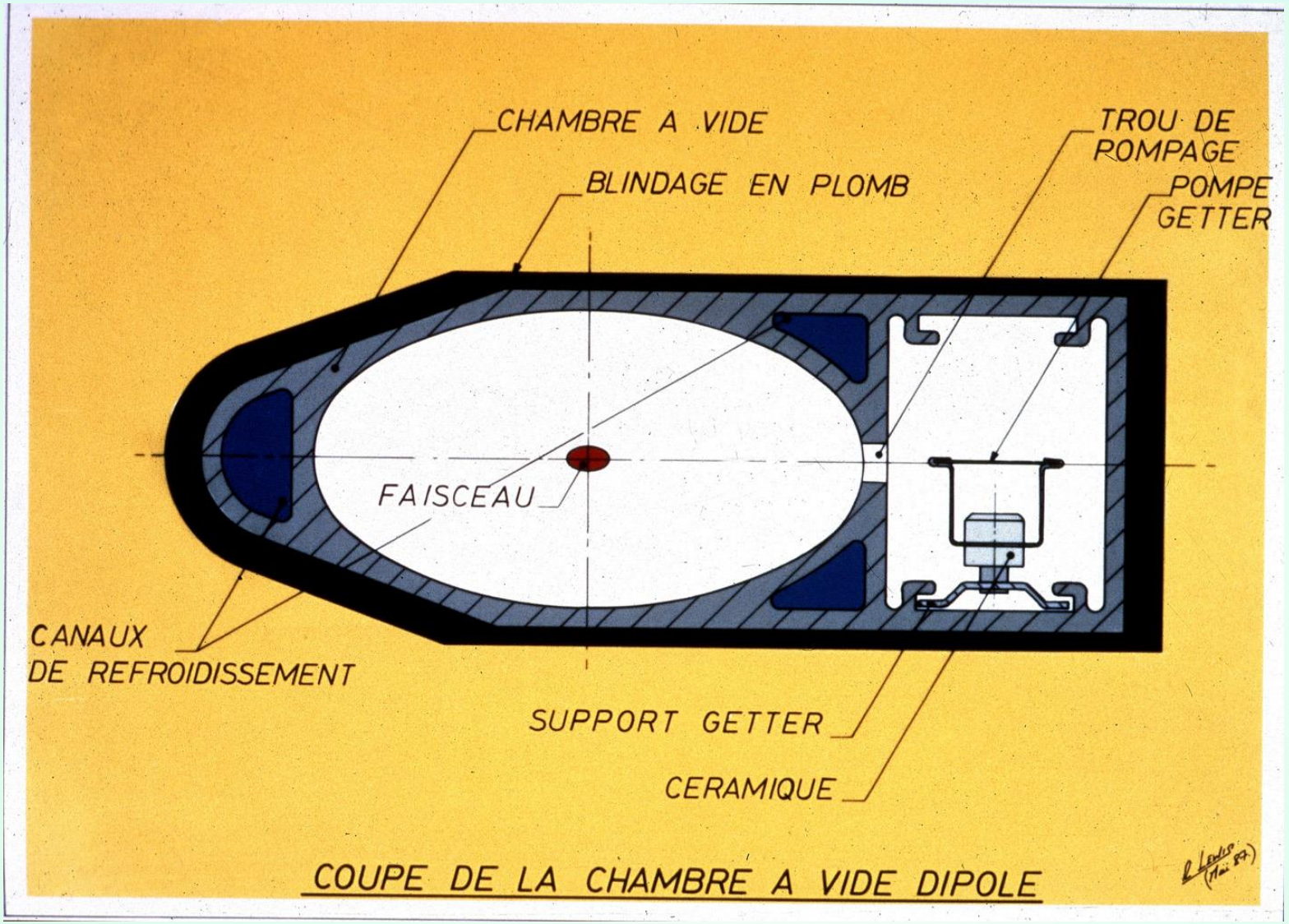


LINAC Injector for LEP (LIL)

LEP tunnel, inside

LEP collider tunnel

LEP monorail train



Вакуумная система LEP

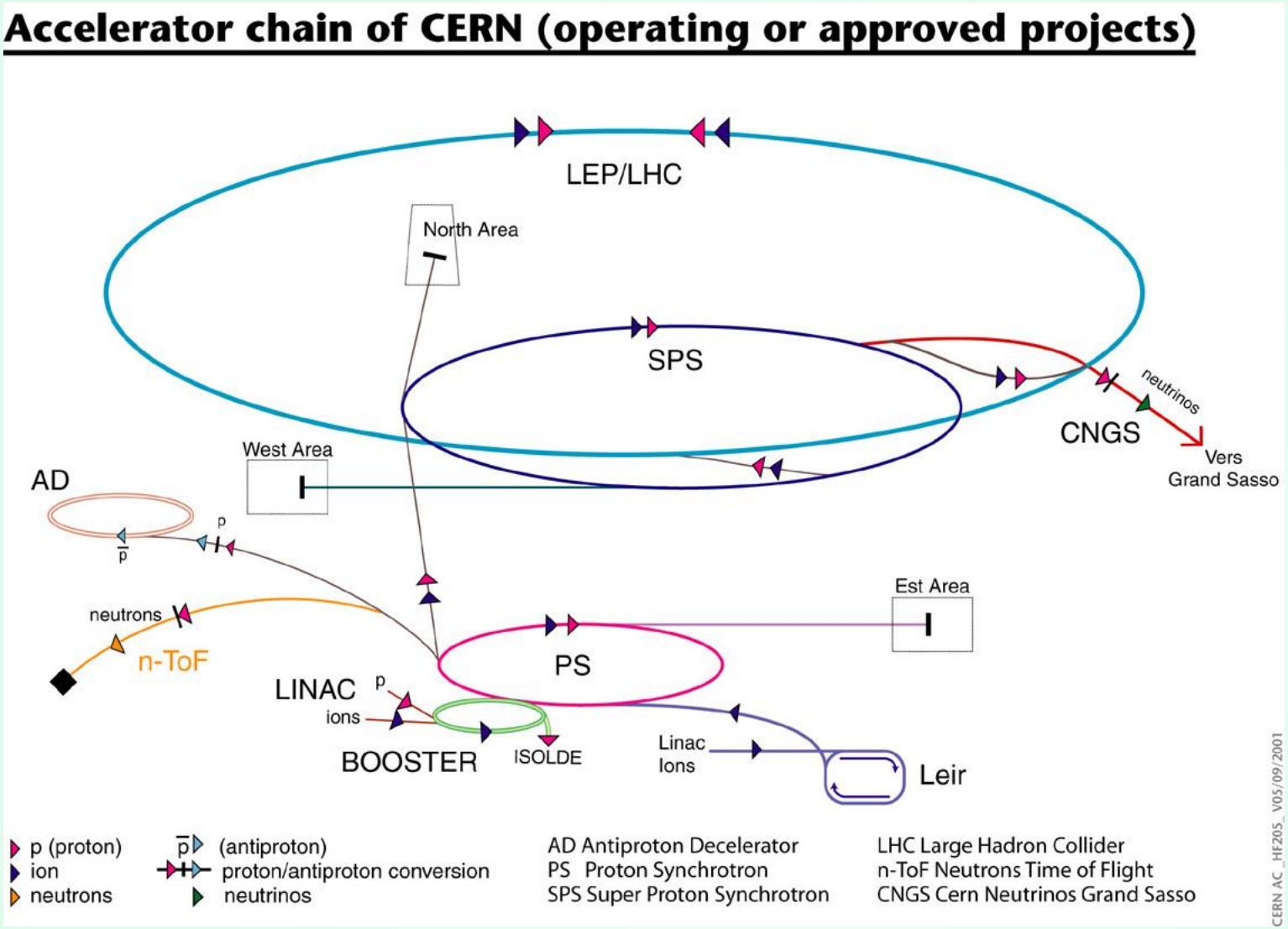
Труднее развивались работы по встречным пучкам тяжёлых частиц, при работе с которыми не удавалось достичь требуемых величин **светимости**. В адронных коллайдерах синхротронное излучение частиц пренебрежимо мало, поэтому в них для уменьшения поперечных размеров пучков (охлаждения), что повышает светимость установки, голландским учёным **С. Ван дер Меером** было предложено использовать **стохастический метод охлаждения**, основанный на использовании отрицательной обратной связи. Благодаря этому методу в 1971 г. в ЦЕРНе было запущено протон-протонное кольцо на энергию 25 ГэВ. Другой метод охлаждения ионных пучков был предложен в 1966 г. **Г.И. Будкером** - метод **электронного охлаждения**, суть которого заключается в уменьшении внутренней энергии пучка ионов в результате их кулоновских столкновений с холодными электронами.

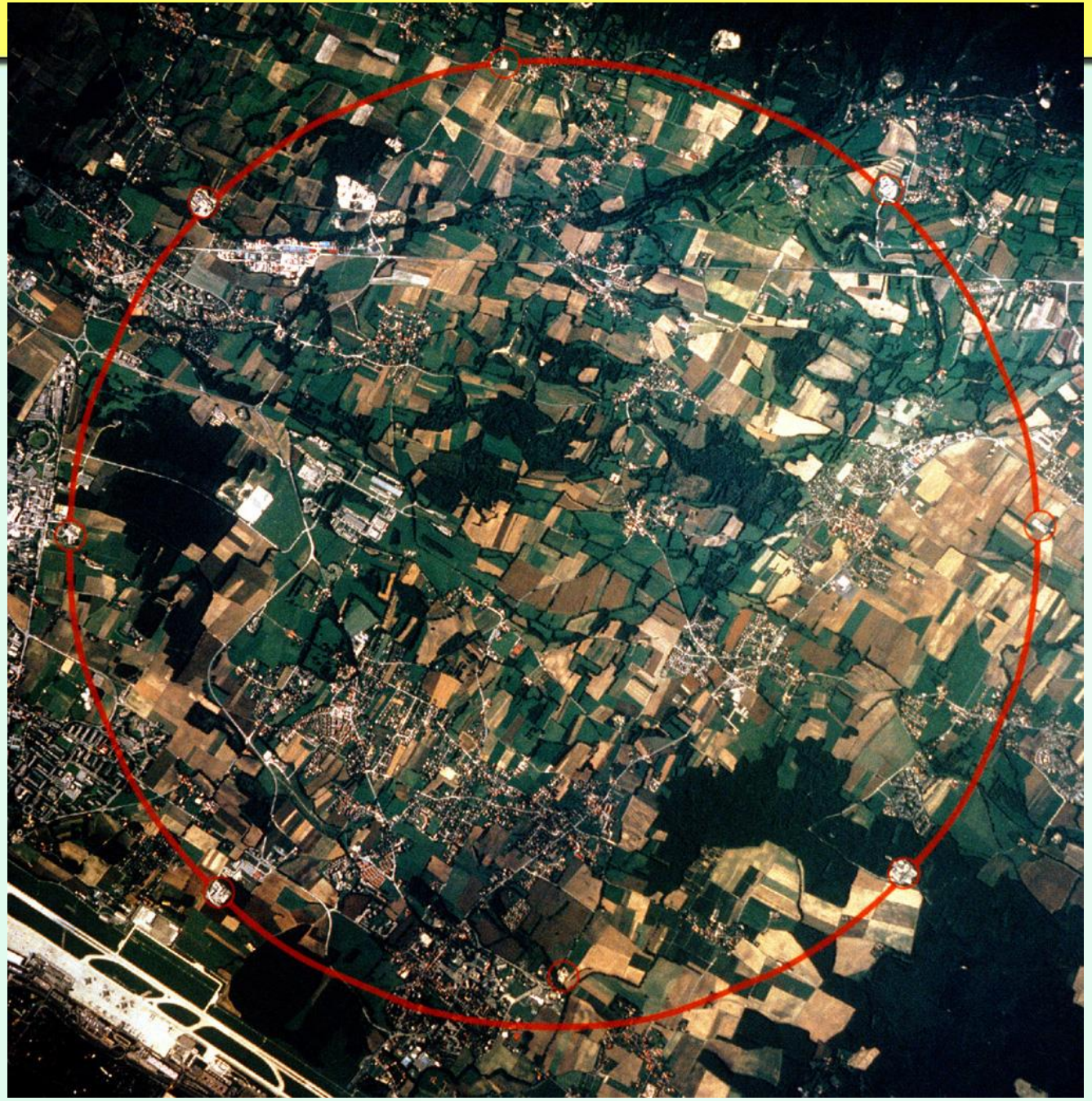
Крупнейшие адронные коллайдеры:

LHC (CERN)	2x7 ТэВ, ионы свинца
TEVATRON (FNAL)	2x0.98 ТэВ
HERA+PETRA (DESY)	820 ГэВ $p^+ \leftrightarrow$ 10 ГэВ e^-
RHIC (BNL)	до 100 ГэВ/нуклон для тяжелых ионов
Проект УНК (ИФВЭ)	2x3 ТэВ
Проект SSC	2x20 ТэВ

LHC

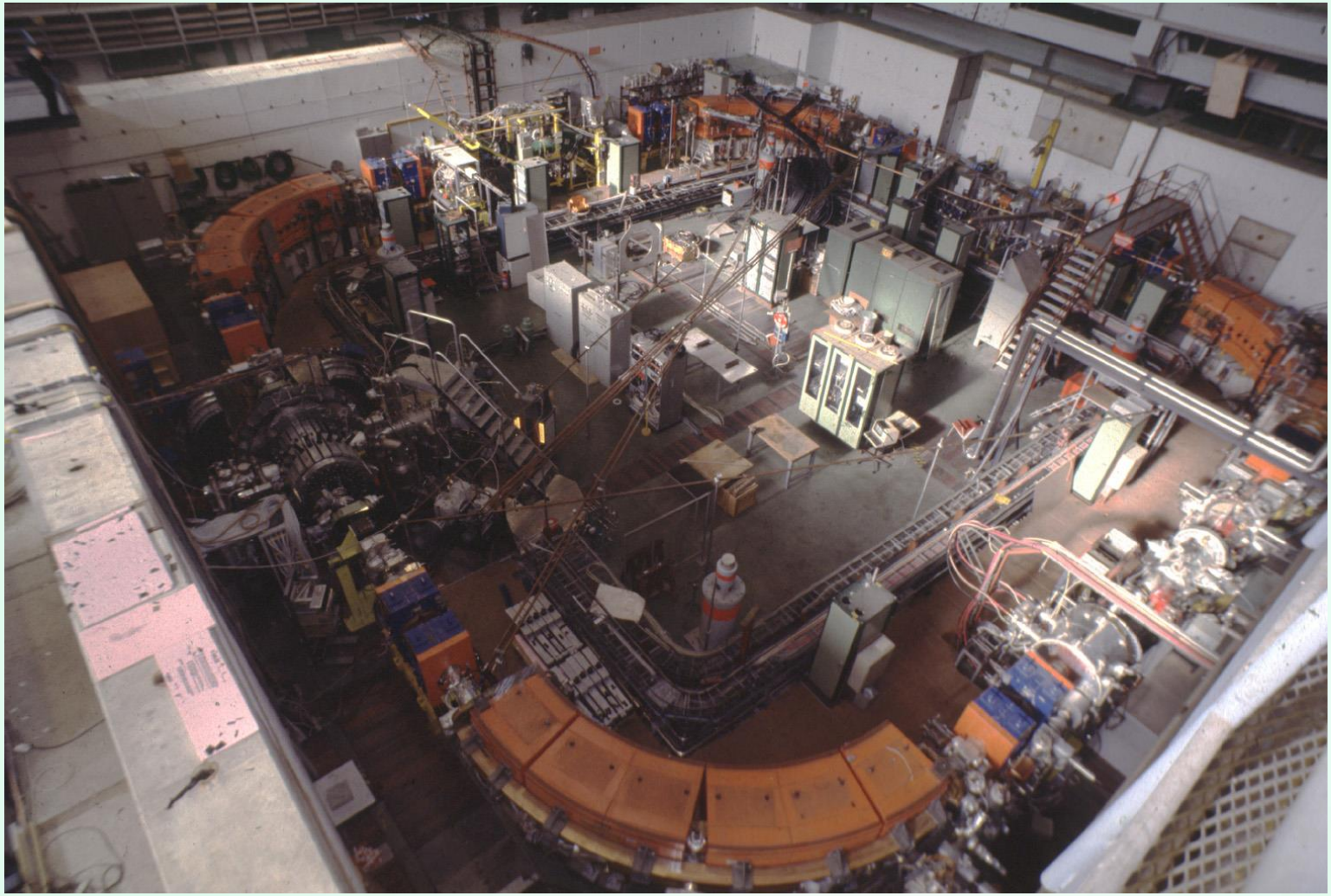
Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



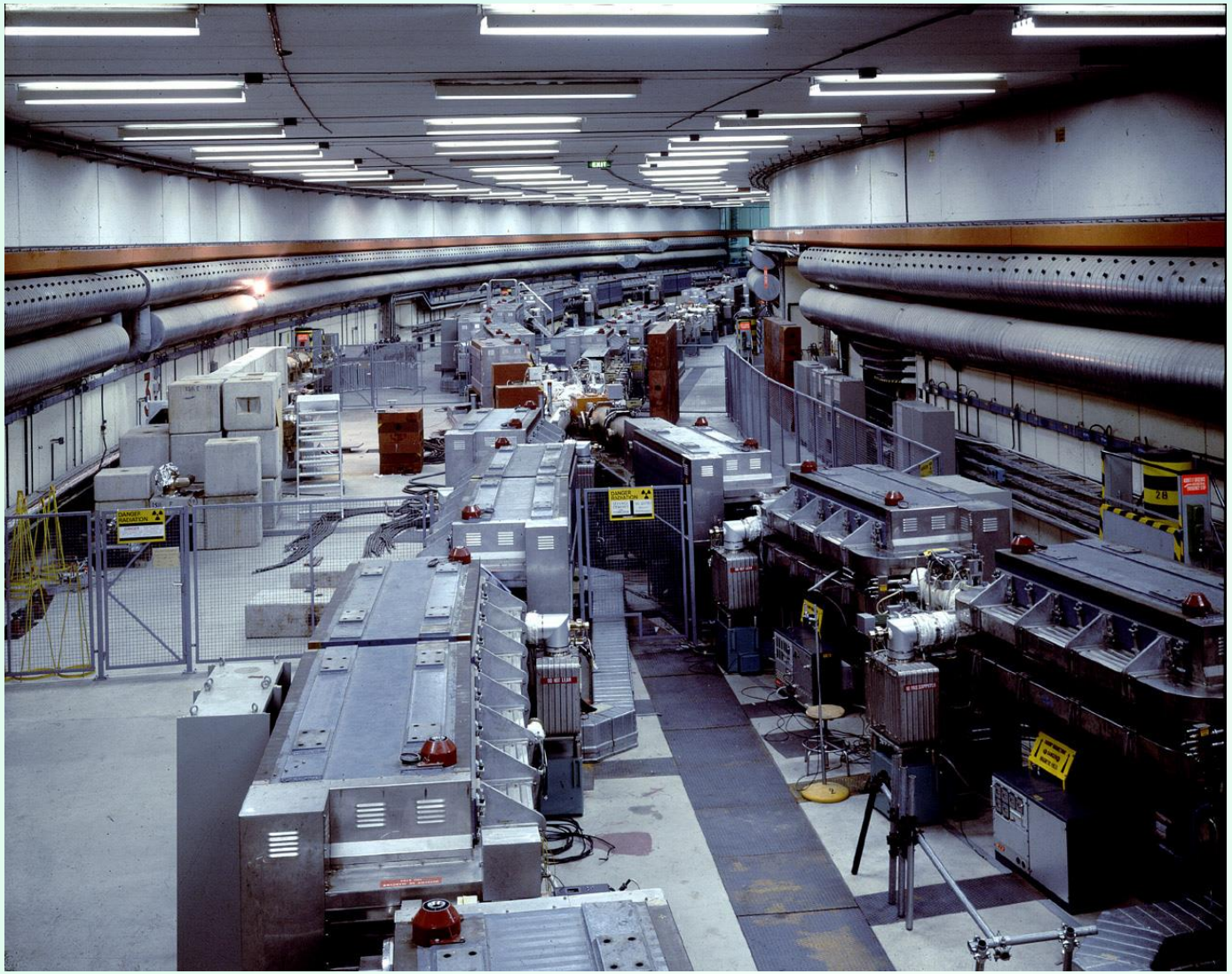


PS (Proton Synchrotron)

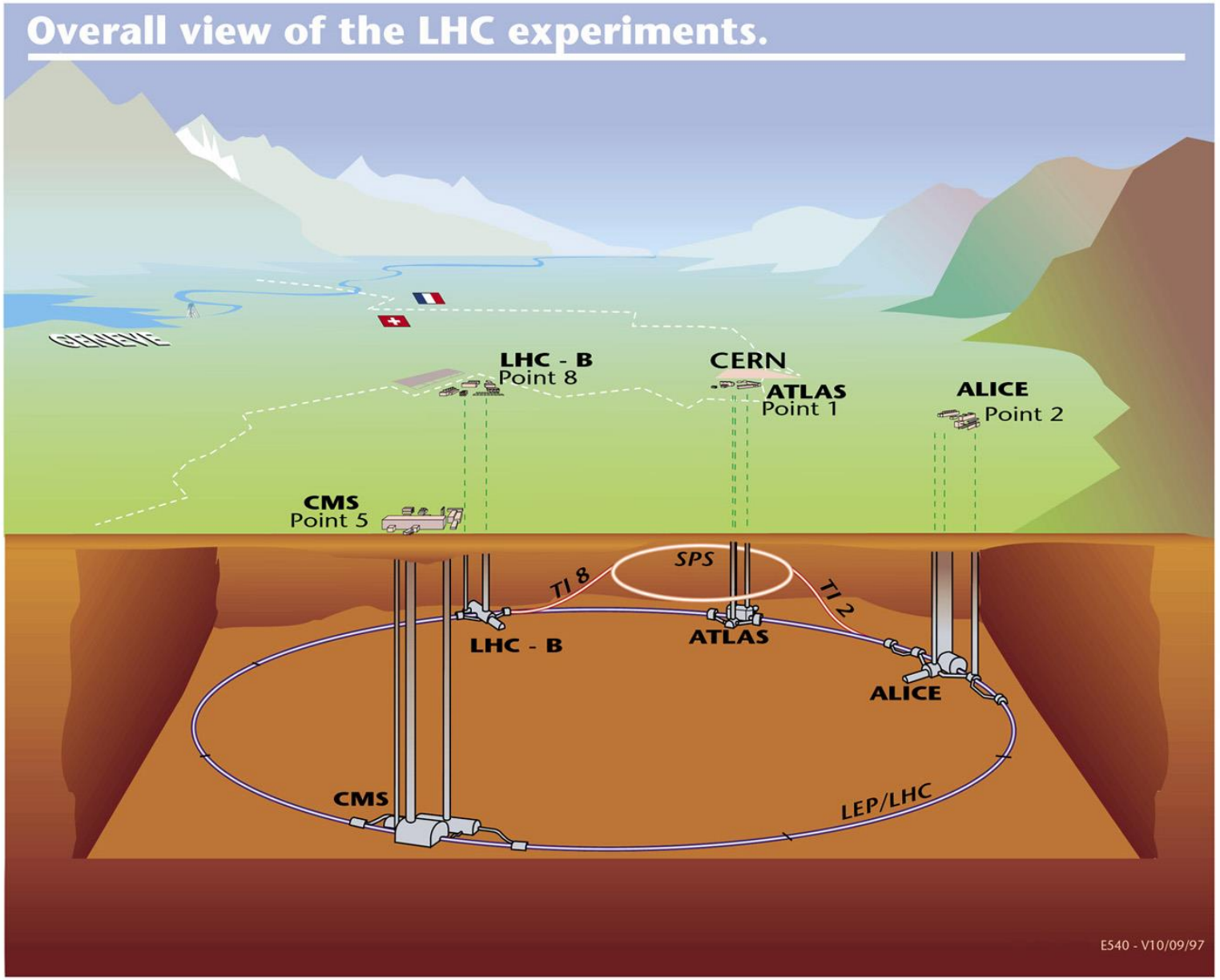
SPS

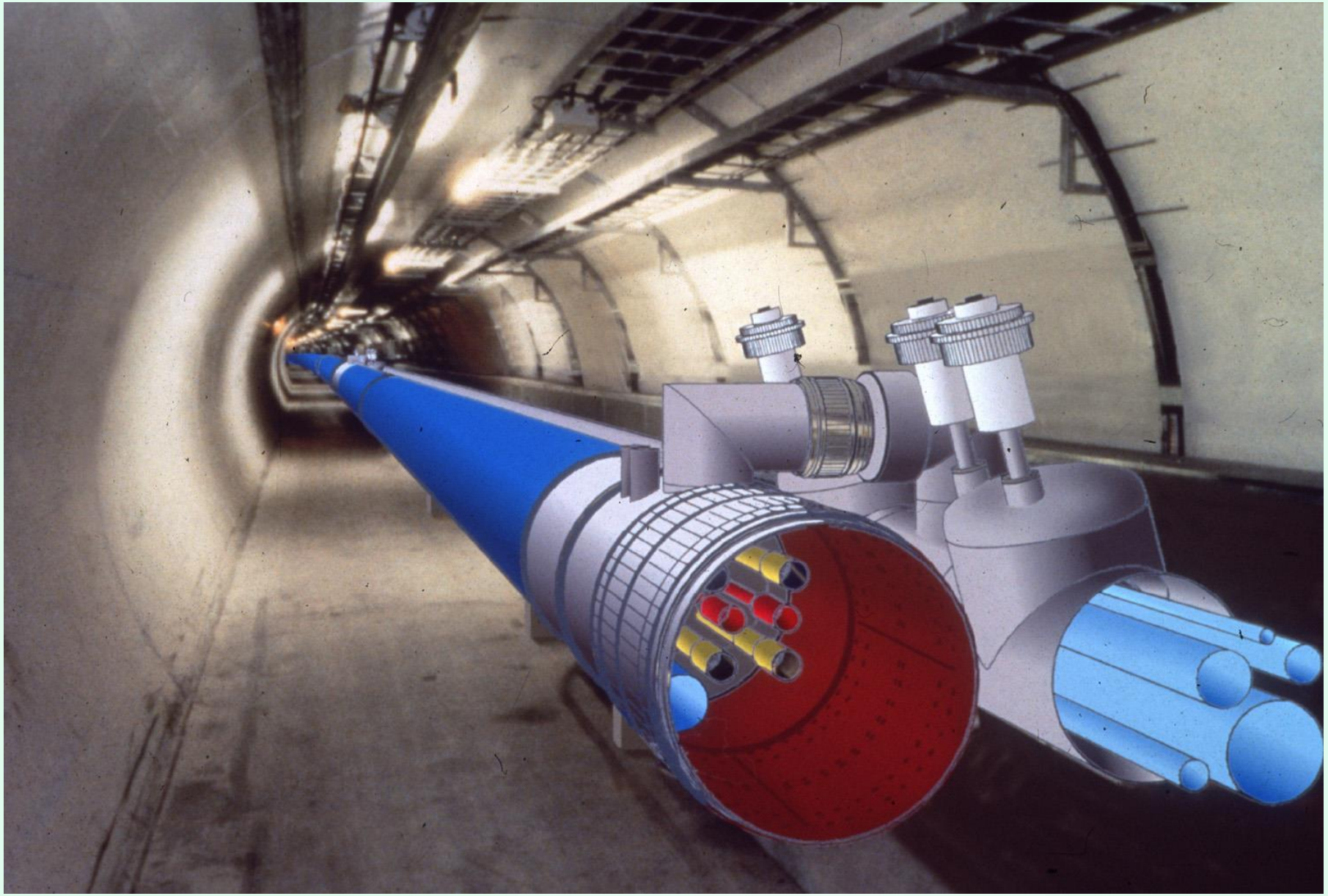


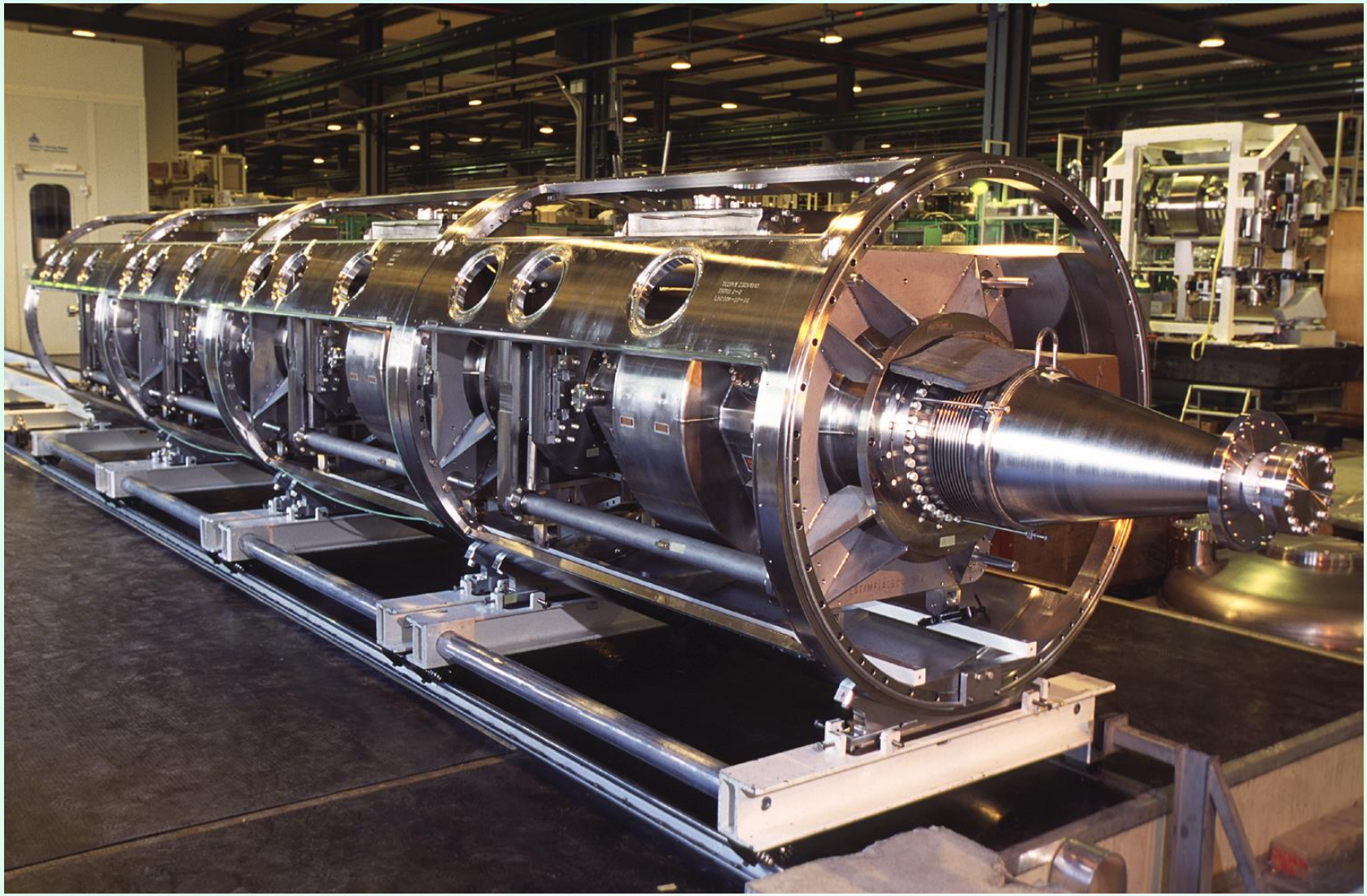
LEAR Low Energy Antiproton Ring



ISR (Intersecting Storage Rings)
первый коллайдер адронных пучков

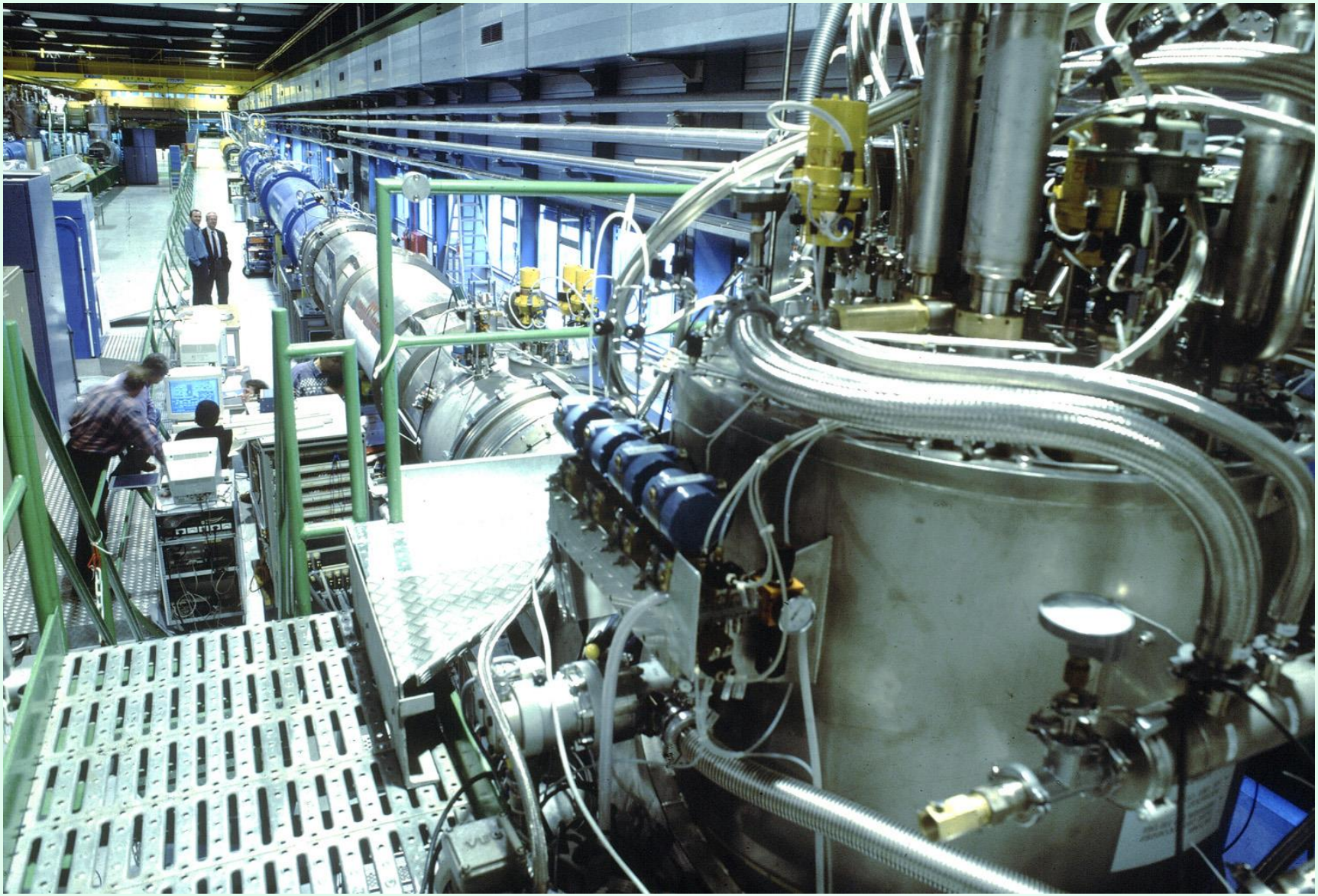

Overall view of the LHC experiments.
GENEVE
LHC - B
Point 8
CERN
ATLAS
Point 1
ALICE
Point 2
CMS
Point 5
SPS
TI 8
TI 2
LHC - B
ATLAS
ALICE
CMS
LEP/LHC
E540 - V10/09/97





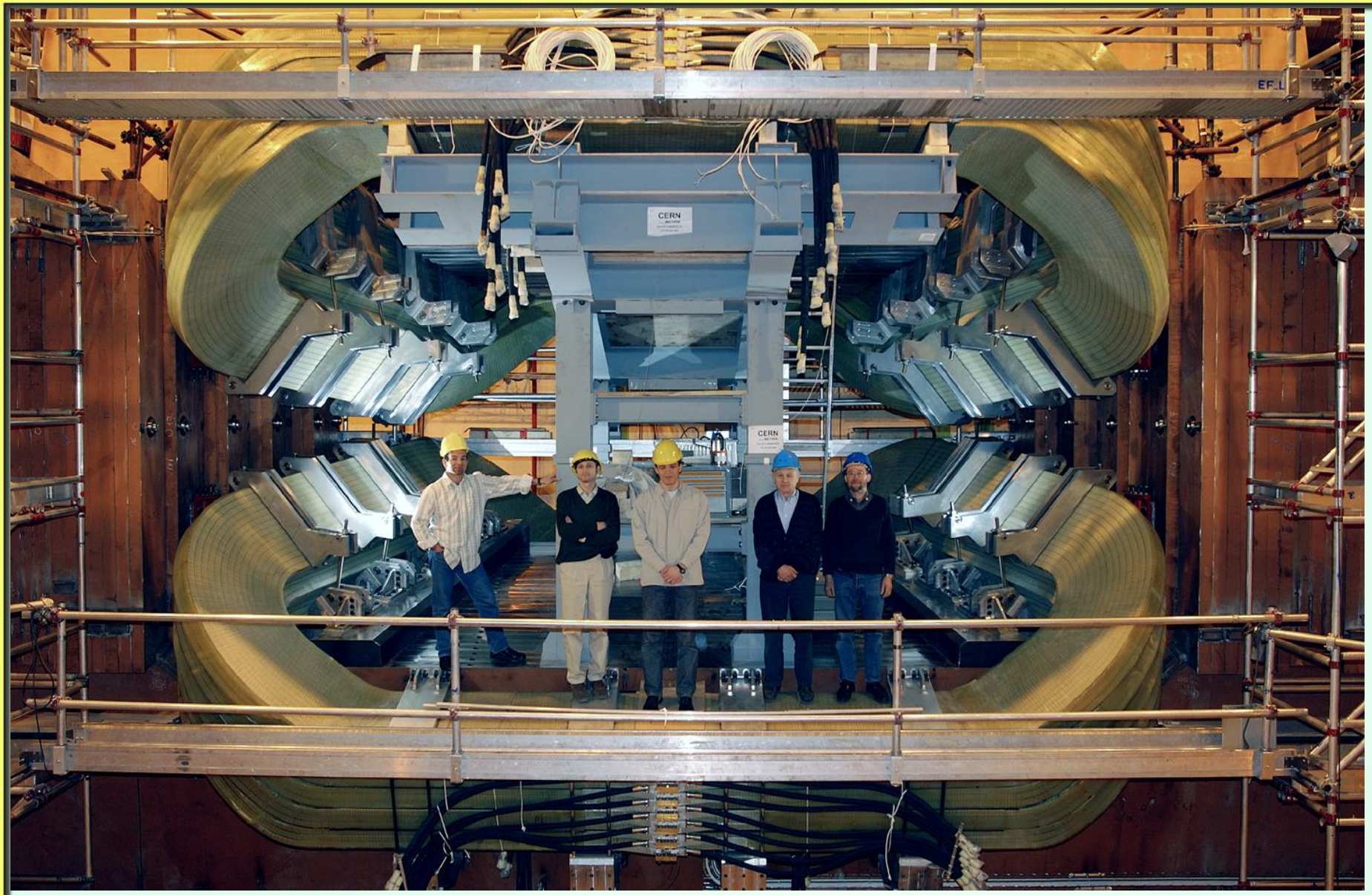
Первый модуль LHC

VELAN



Настройка модуля LHC

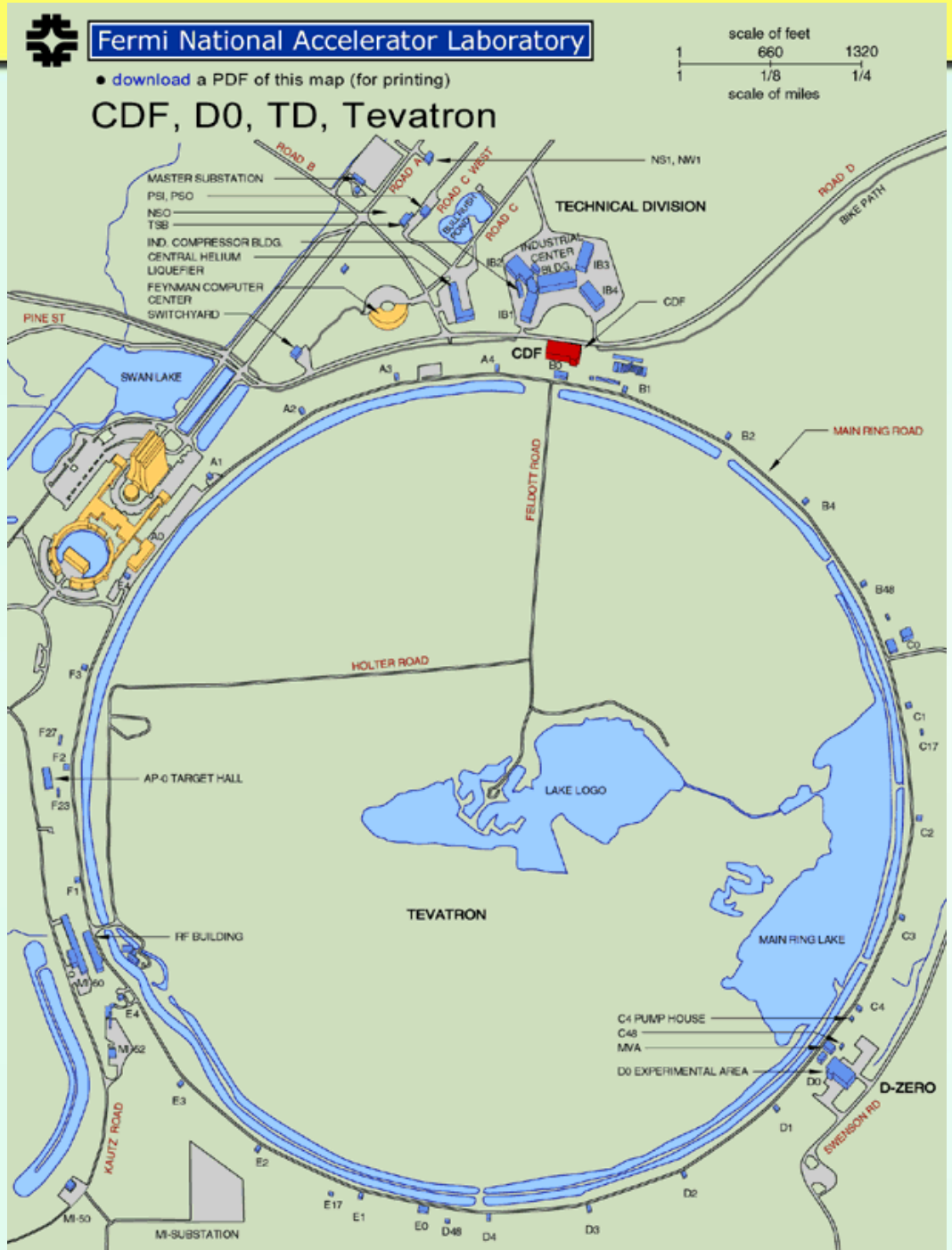
Тестирование сверхпроводящих дипольных магнитов



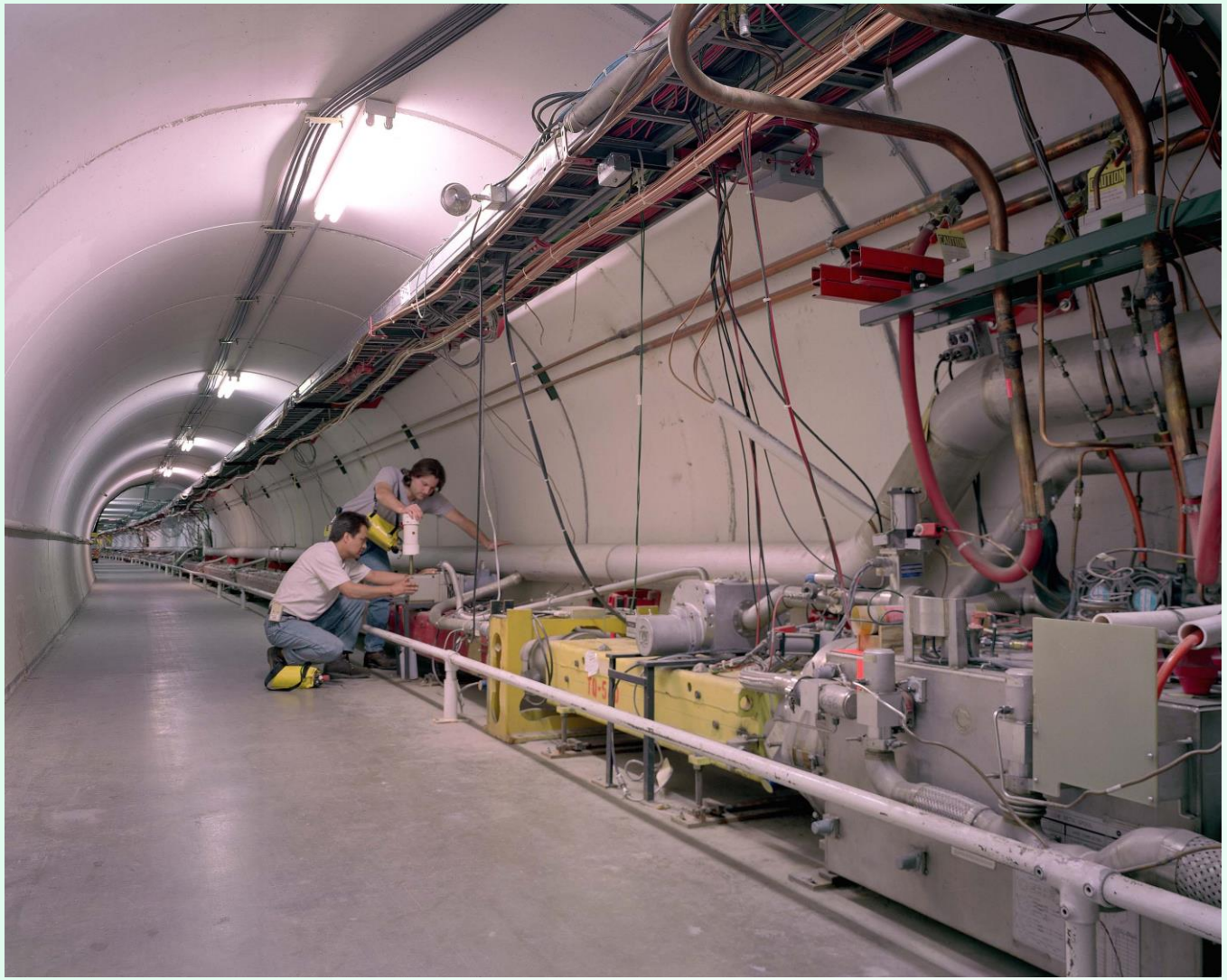
магнит LHCb

HCAL , hadronic calorimeter

FNAL


Fermi National Accelerator Laboratory
download a PDF of this map (for printing)
scale of feet
1 660 1320
1 1/8 1/4
scale of miles
CDF, D0, TD, Tevatron
ROAD B
ROAD A
ROAD C WEST
ROAD C
BULLRUSH ROAD
NS1, NW1
MASTER SUBSTATION
PSI, PSO
NSO
TSB
IND. COMPRESSOR BLDG.
CENTRAL HELIUM LIQUEFIER
FEYNMAN COMPUTER CENTER
SWITCHYARD
TECHNICAL DIVISION
INDUSTRIAL CENTER BLDG.
IB1
IB2
IB3
IB4
CDF
ROAD D
BIKE PATH
PINE ST
SWAN LAKE
A1
A2
A3
A4
A5
A0
B0
B1
B2
B4
B48
C0
C1
C17
C2
C3
C4
MAIN RING ROAD
FELDOTT ROAD
HOLTER ROAD
F1
F2
F23
F27
F3
AP-0 TARGET HALL
RF BUILDING
LAKE LOGO
TEVATRON
MAIN RING LAKE
C4 PUMP HOUSE
C48
MVA
D0 EXPERIMENTAL AREA
D0
D-ZERO
D1
D2
D3
D4
D48
E0
E1
E17
E2
E3
E4
MI60
MI52
MI-50
MI-SUBSTATION
KAUTZ ROAD
SWENSON RD

The Main Injector Tunnel showing the Main Injector



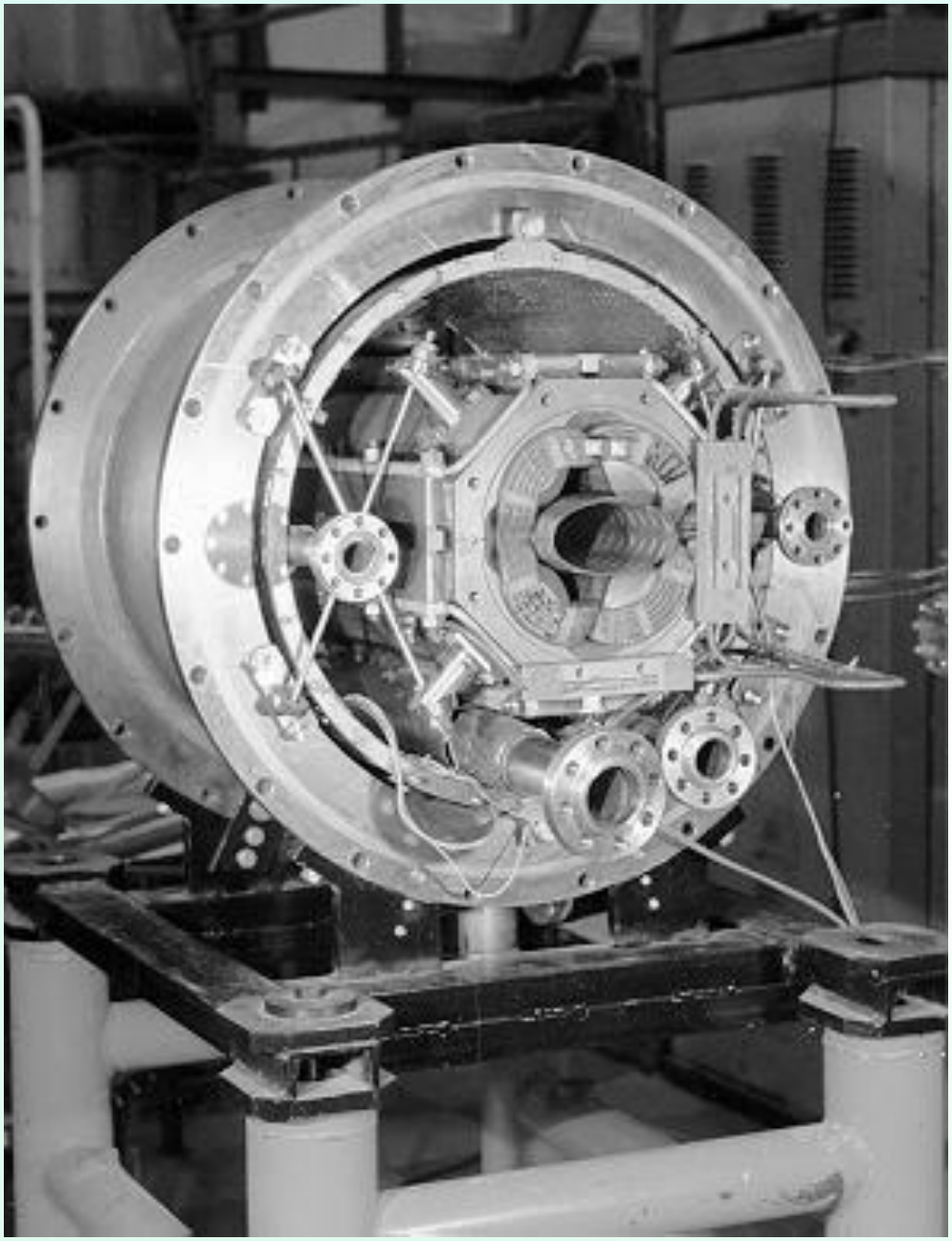
View of Tevatron in A-Sector inside the Main Ring Tunnel

Электронное охлаждение TEVATRON

Relativistic Heavy Ion Collider (BNL)

Relativistic Heavy Ion Collider (BNL)

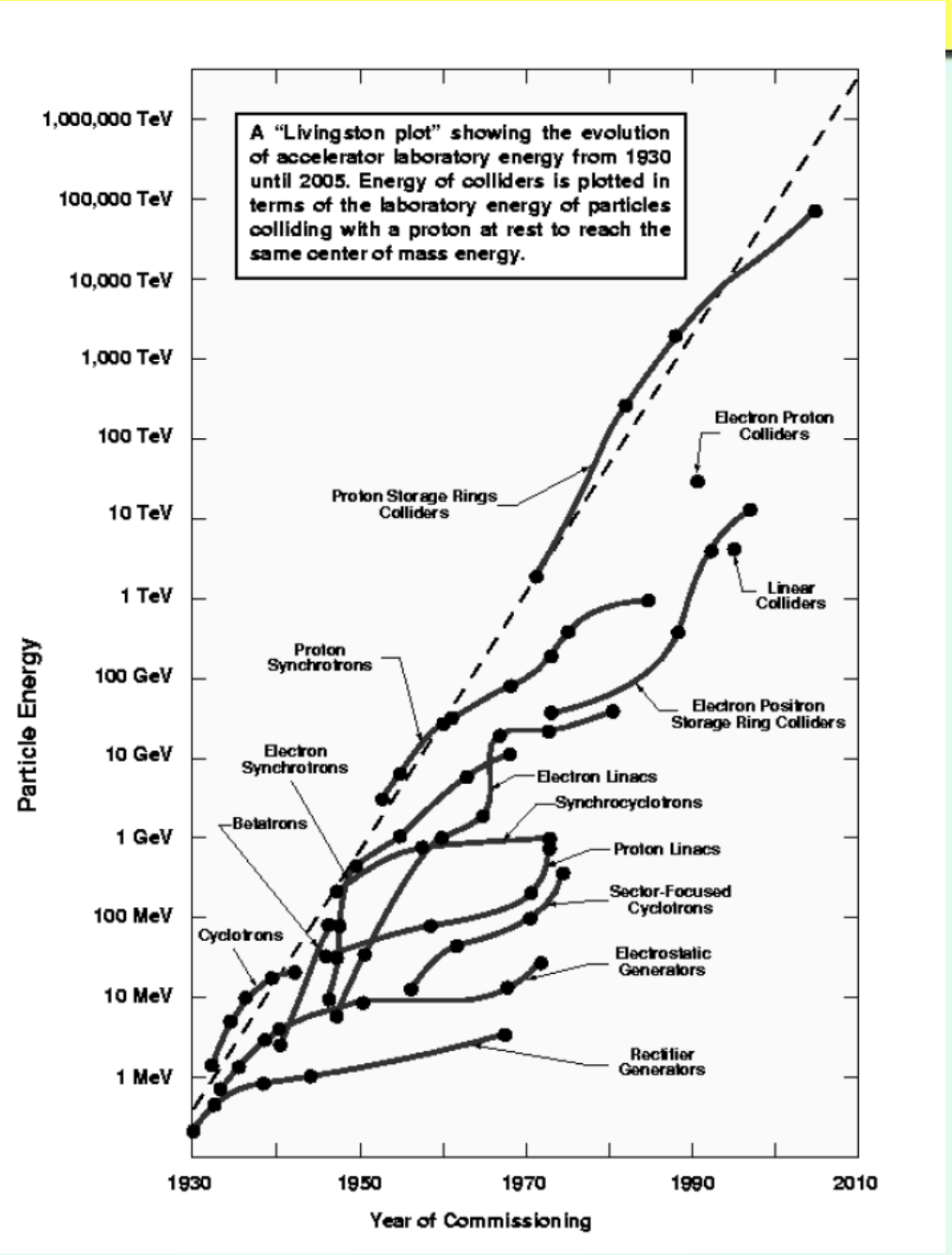
Нуклотрон (ОИЯИ)

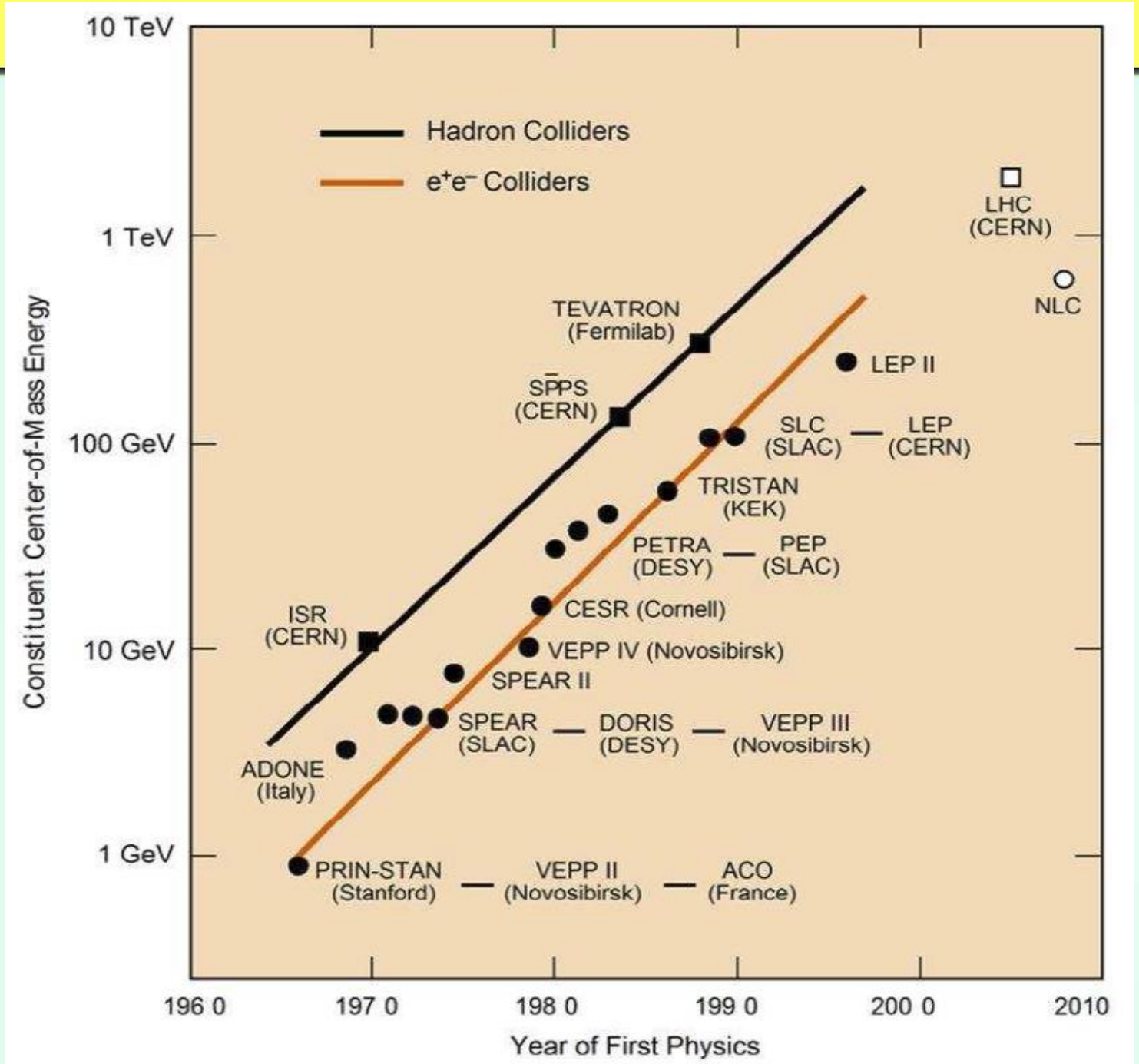


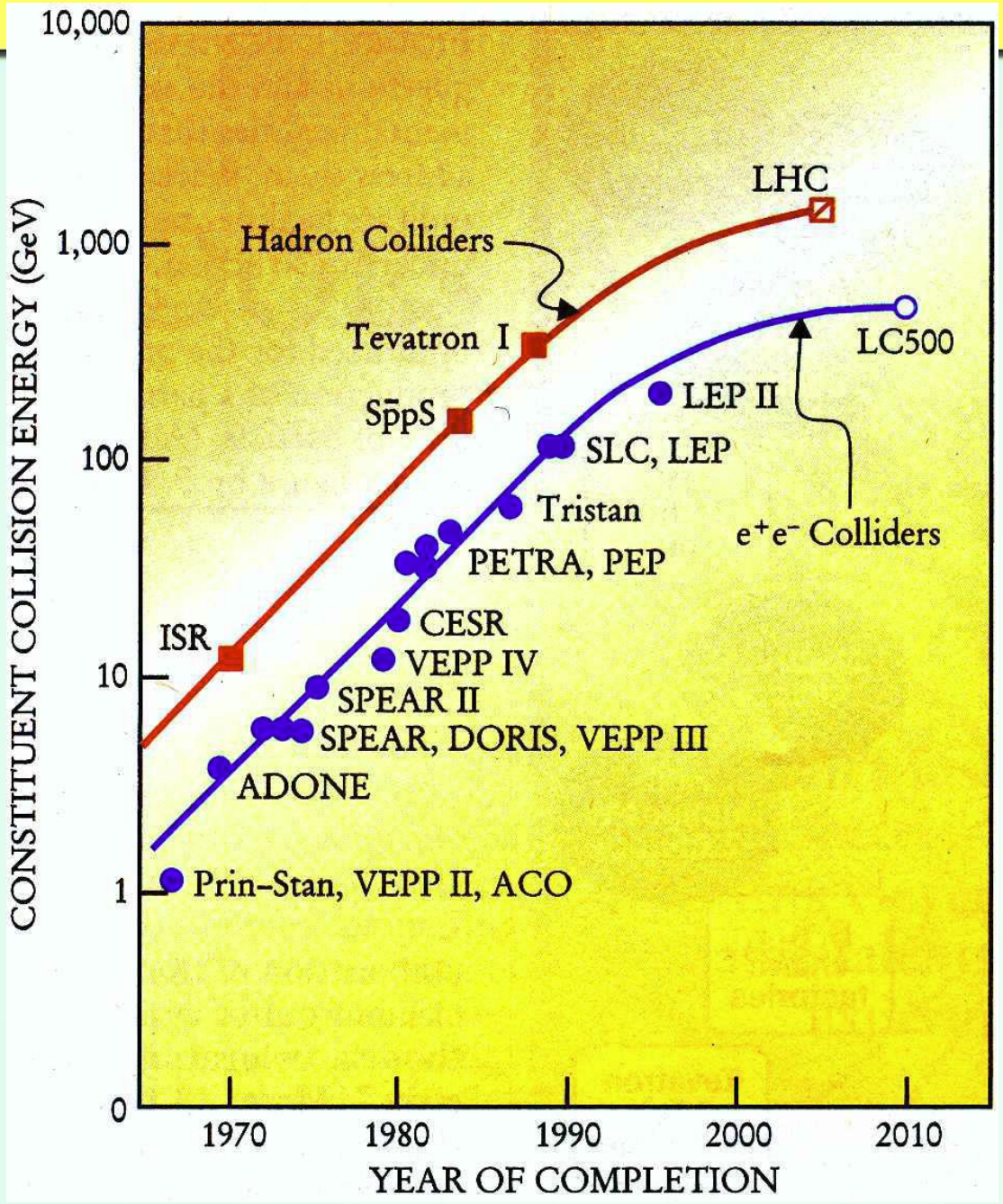
Нуклотрон

(ОИЯИ)

Диаграмма Ливингстона



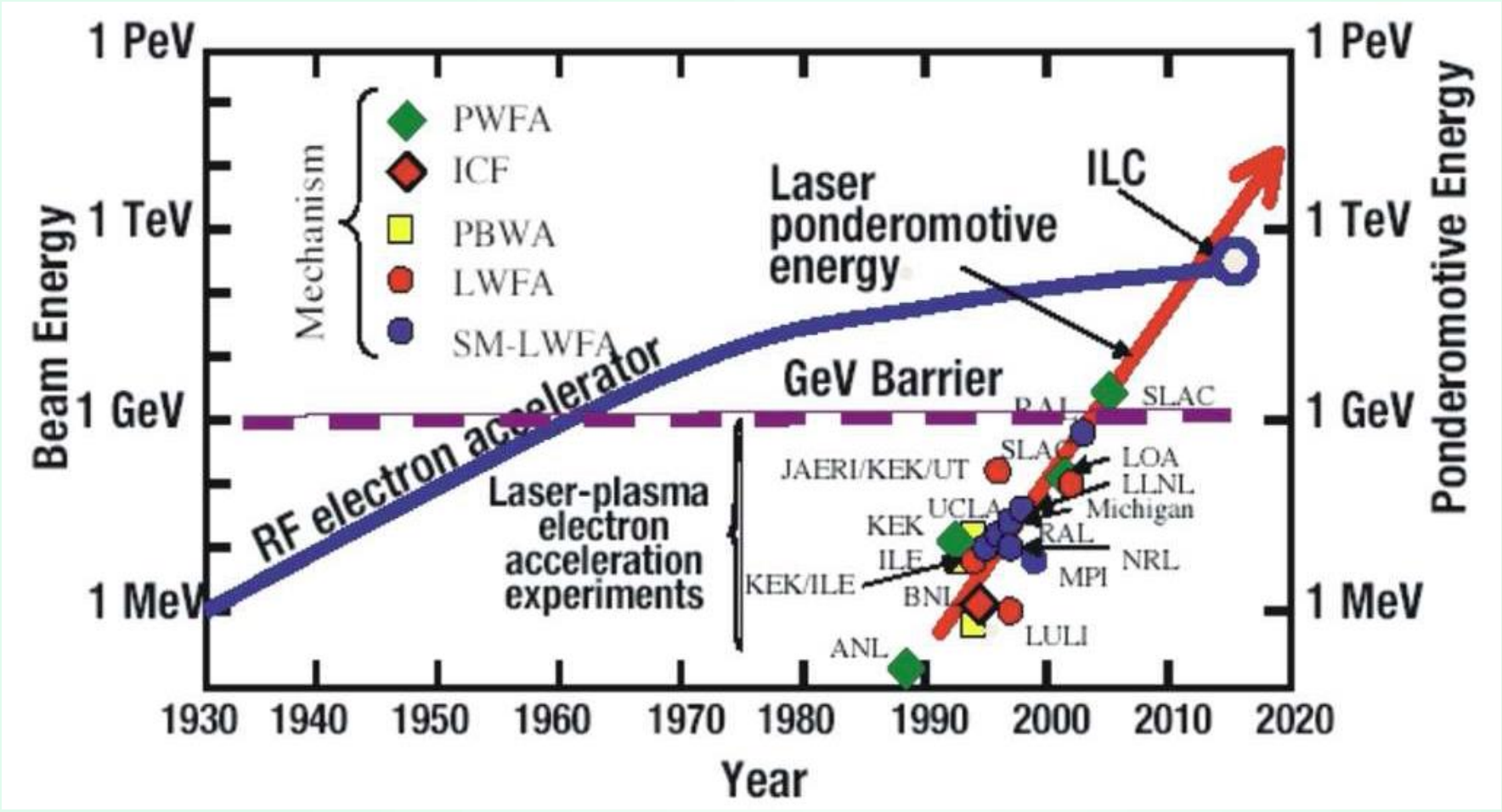

10 TeV
1 TeV
100 GeV
10 GeV
1 GeV
Constituent Center-of-Mass Energy
Hadron Colliders
e+e− Colliders
LHC
(CERN)
NLC
TEVATRON
(Fermilab)
SPPS
(CERN)
LEP II
SLC
(SLAC)
LEP
(CERN)
TRISTAN
(KEK)
PETRA
(DESY)
PEP
(SLAC)
CESR (Cornell)
ISR
(CERN)
VEPP IV (Novosibirsk)
SPEAR II
SPEAR
(SLAC)
DORIS
(DESY)
VEPP III
(Novosibirsk)
ADONE
(Italy)
PRIN-STAN
(Stanford)
VEPP II
(Novosibirsk)
ACO
(France)
196 0
197 0
198 0
199 0
200 0
2010
Year of First Physics


10,000
1,000
100
10
1
0
CONSTITUENT COLLISION ENERGY (GeV)
LHC
Hadron Colliders
Tevatron I
LC500
SppS
LEP II
SLC, LEP
Tristan
e+e− Colliders
PETRA, PEP
CESR
ISR
VEPP IV
SPEAR II
SPEAR, DORIS, VEPP III
ADONE
Prin-Stan, VEPP II, ACO
1970
1980
1990
2000
2010
YEAR OF COMPLETION

Что дальше?

1. Линейный электронный коллайдер (ILC) или мюонный коллайдер (FNAL) ?
2. Коллайдеры тяжелых ионов RHIC, LHC, FAIR, NICA
3. Источники СИ 3го (SLS, ALC, CLC, ANKA, MAX VI и др.)
   и 4го (EuroX-FEL, FLASH, SLS II, Diamond и др.?) поколений
4. Мощные МВт протонные пучки (LANCE, SNS, ENS, LINAC4, TRASCO и др.)
5. Прикладные ускорители

Новые методы ускорения и фокусировки ???


1 PeV
1 TeV
1 GeV
1 MeV
Beam Energy
Ponderomotive Energy
Mechanism
PWFA
ICF
PBWA
LWFA
SM-LWFA
Laser ponderomotive energy
ILC
GeV Barrier
RF electron accelerator
Laser-plasma electron acceleration experiments
SLAC
RAL
JAERI/KEK/UT
SLAC
LOA
LLNL
Michigan
UCLA
KEK
RAL
ILE
NRL
KEK/ILE
MPI
BNL
LULI
ANL
1930
1940
1950
1960
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Year