Въведение в ускорителите и тяхното бъдеще

Владимир Ангелов

ИЯИЯЕ-БАН

Предистория на ускорителите

- През 1911 г. Ръдърфорд открива атомното ядро при експерименти на разсейване на снопове α-частици от златно фолио.
- Енергията на α-частиците е ограничена до 10 MeV и не може да преодолее електростатичното отблъскване на повечето от ядрата
- През 1927 г., като президент на Кралското дружество той отправя следния апел:

" It has long been my ambition to have available for study a copious supply of atoms and electrons which have an individual energy far transcending that of the α and β particles from radioactive bodies. I am hopeful that I may yet have my wish fulfilled."

Ernest Rutherford

Ускорителите и фундаменталните изследвания

- Голяма част от знанията, които имаме за микросвета, дължим на експериментите проведени с ускорители
- Първият ускорител, построен от Cockroft и Walton е бил веднага използван за изследване на атомните ядра. Те предизвикват първата изкуствена ядрена реакция:

$$p + Li \rightarrow 2\ He$$

- До 60-те години на миналия век ускорителите са били използвани за изследвания в ядрената физика, но достигайки достатъчно високи енергии, те стават главен инструмент за изследване във физиката на високите енергии.
- ……

Последните две важни открития в ЦЕРН:

- март 2013, хигс бозона
- юли 2015, пентакварка

За какво се използват ускорителите на заредени частици?

Ускорителите на заредени частици създават снопове частици с висока енергия с цел:

- Изследване на фундаменталните частици, изграждащи Вселената и силите, с които те си взаимодействат.
- Изследване на структурата и поведението на материалите и техните свойства
- Източници на синхротронно лъчение
- Лъчетерапия
- Производство на изотопи
- Стерилизация
- Йонна имплантация
- Трансмутация на отработено ядрено гориво
- Контрол на активната зона на ядрени реактори
- ……..

Класификация на ускорителите

- По тип ускоряващо поле:

  - Ускоряване със **статично** електростатично поле

  - Ускоряване с електричното поле на **променлив магнитен поток**

  - Ускоряване с променливото електрично поле в **радиочестотни резонатори**

- По тип ускорявани частици:

  - Ускорители на **електрони**

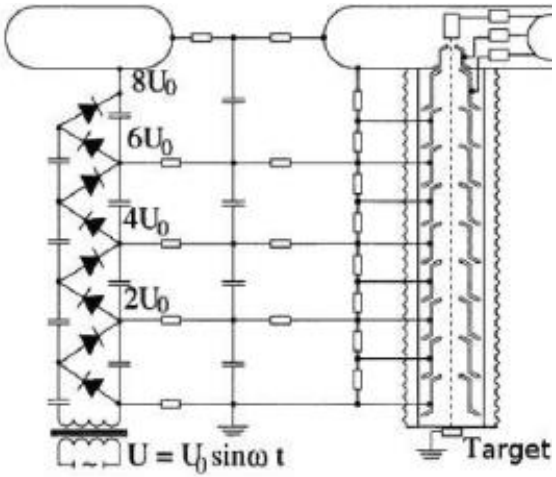
  - Ускорители на **протони и йони**

Генератор на Cockroft-Walton

Cockroft , Walton (1932), предложен 1951, Нобелова награда за приложението му в ядрената физика

Електрическа схема за умножаване на напрежението (каскада), състояща се от кондензатори и диоди

John Cockroft, Ernest Rutherford, E.T.S. Walton

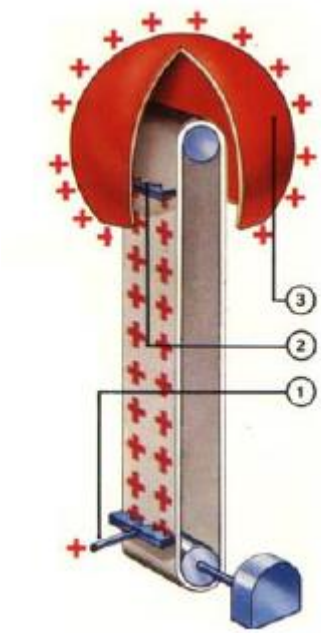


Електрически пробиви ограничават максималната енергия
Emax=750 keV

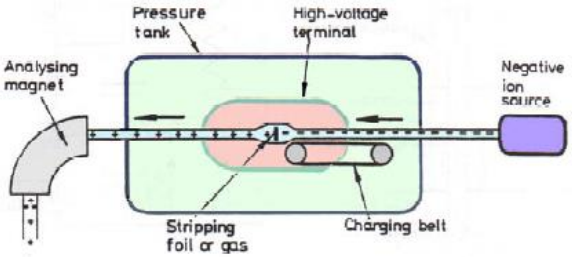
Генератор на Ван де Граф. Тандем генератор

Van de Graaff (1929)

- Електростатичен генератор
- Използва движеща се лента за да натрупа електрически заряд в куха метална сфера
- Тандем генератор: ускорява отрицателни йони, които се презареждат и като положителни йони отново се ускоряват
- Приложение в ядрената физика, медицината и др.



Robert Van de Graaff



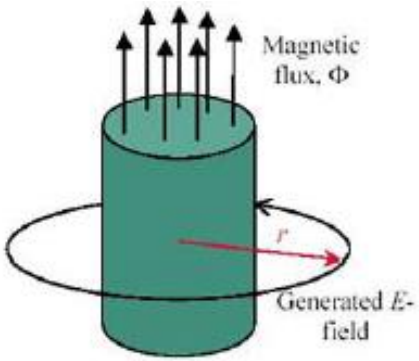
Тандем генератор

Електрически пробиви ограничават максималната енергия
Emax = 24 MeV

Бетатрон

Wideroe (1928), концепция
Steenbeck (1935), развитие
Kerst (1940) , реализация, 2.3 MeV

- Принцип на трансформатора
- Ускорява през ¼ от периода на синусоидално поле
- Приложение: източник на рентгеново и лъчение

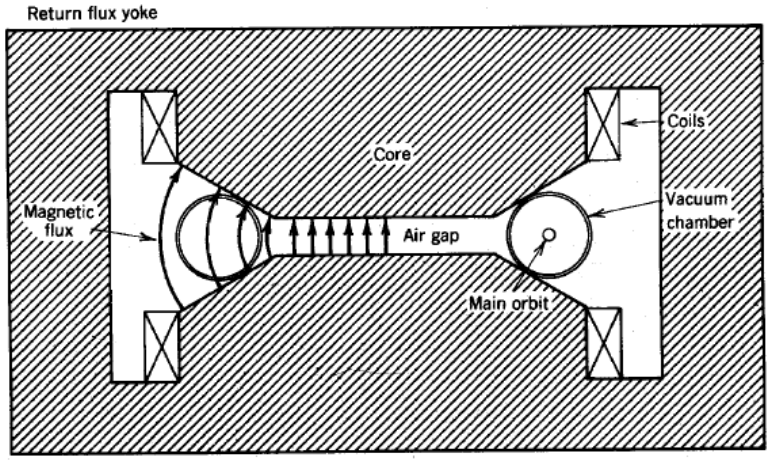


Donald Kerst

Енергията е ограничена от:

- Магнитно насищане
- Размери
- Синхротронно лъчение

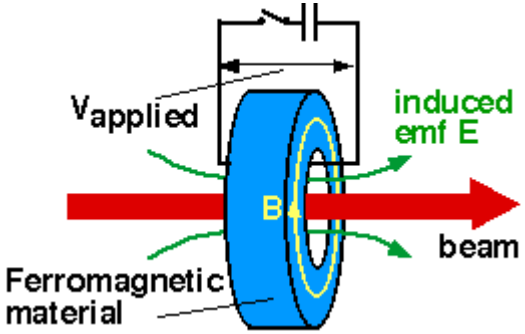
Emax=300 MeV



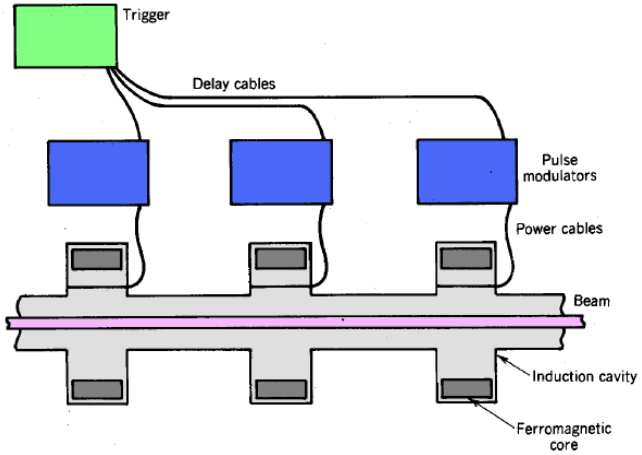
Линеен индукционен ускорител

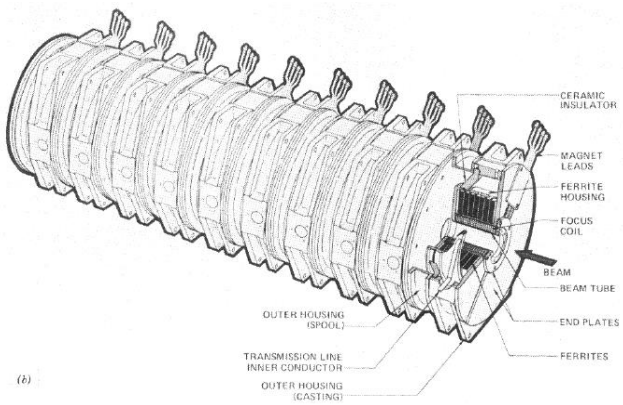
Christofilos (1964)

- Принцип на трансформатора
- Поредица от индуктивности синхронизирани със движението на снопа



Nichola Christofilos





ATA, Lawrence Livermore NL, 1983 г.
50 MeV, 10 kA, 70 ns

Ускоряване с променливо електрично поле

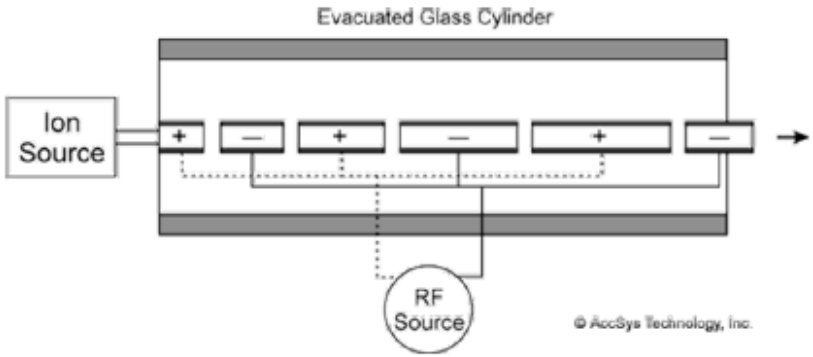
- Използване на бързо променящо се електрично поле, вместо електростатично, достигайки много високо ускоряване, но избягвайки електрически пробив
- Движението на частиците трябва да бъде синхронизирано с променливото напрежение
- Фазова стабилност на принципа на автофазировка , Veksler, McMillan (1944-45)
- Снопът се разпределя в бънчове
- Необходими са мощни радиочестотни генератори работещи на високи честоти

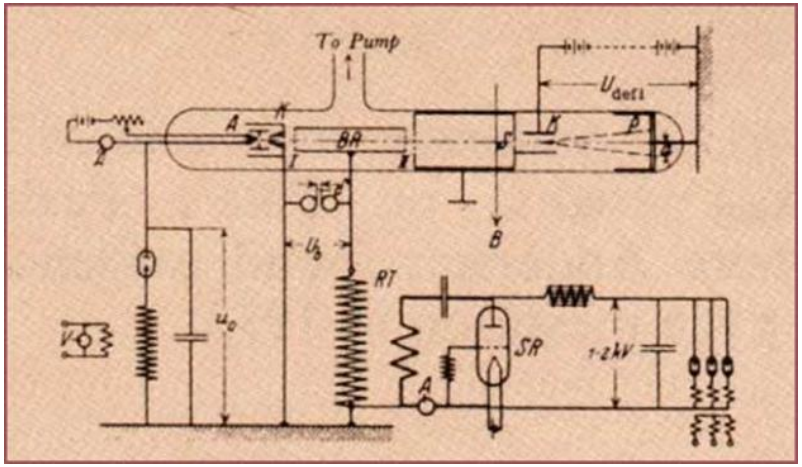
Линеен ускорител

Gustav Ising (1924) , идея
Rolf Wideroe (1927) , реализация,
50 keV, Na, K, 25 KV, 1 MHz

Rolf Wideroe

- Цилиндрични електроди в стъклен цилиндър , свързани с източник на променливо напрежение
- Дължината им зависи от вида частици и честотата на напрежението



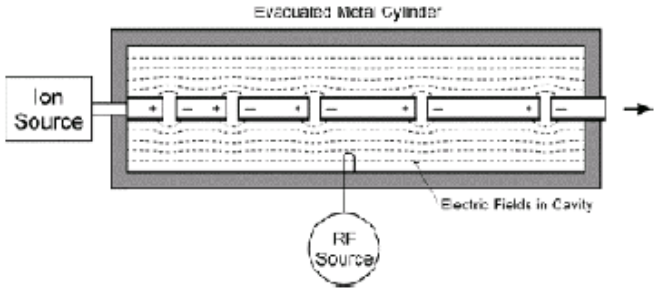


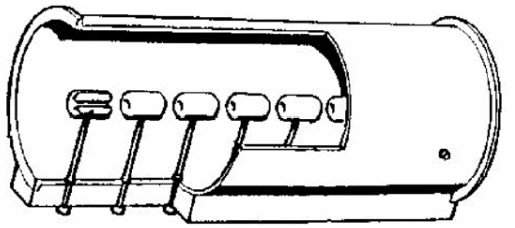
Линеен ускорител (DTL) - протони

Л. Алварец (1946), Протони, 32 MeV, 200 MHz

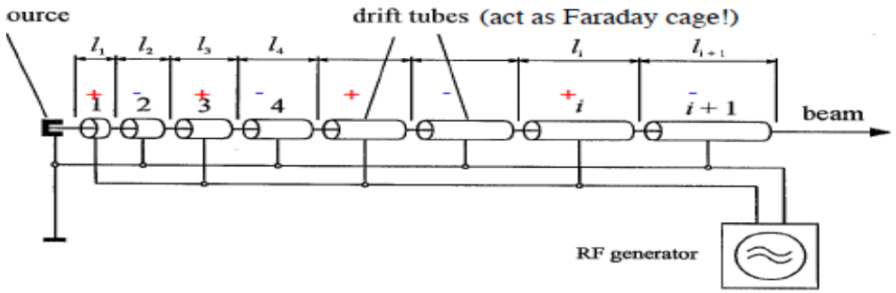
- Цилиндрични електроди с нарастваща дължина в метален цилиндър : DTL (Drift Tube Linac)
- Протоните увеличават скоростта си
- След Втората Световна Война става възможно използването на мощни няколко MW ВЧ генератори на честота от няколкостотин MHz, разработени за мощни радари.

Luis Alvarez





Линеен ускорител (DTL) - протони



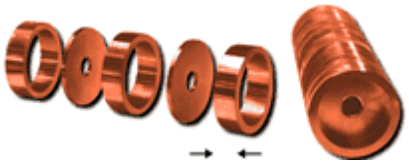
- Радиочестотен генератор (клистрон) създава силни електрически полета между електродите.
- Електрическото поле между всеки два електрода осцилира с честотата на генератора.
- Заредените частици пристигат на групи (бънчове), като във времето, когато са между електродите се ускоряват.
- Когато полето обърне своята посока и стане забавящо, частиците са скрити в тръбите и екранирани от електрическото поле
- Дължината на електродите и разстоянието между тях нараства с увеличаването на скоростта на частиците.
- Бънчовете пристигат в определен момент от време в центъра на тръбата. Частиците, които пристигат по-рано добавят по-малко енергия, а тези, които пристигат по-късно – повече енергия.
- Сноповете се фокусират напречно от силни постоянни квадруполни магнити във всяка тръба.

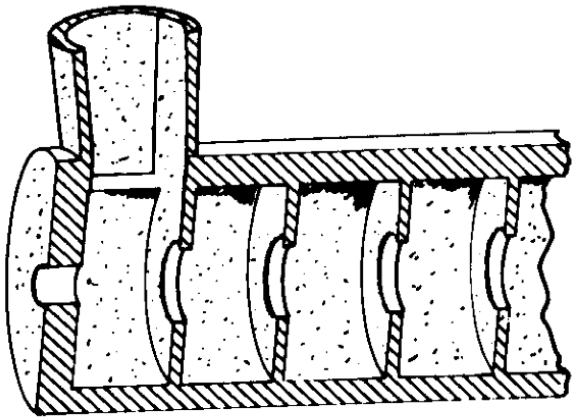
Emax:
800 MeV - LANSCE Linac (Los Alamos) (LAMPF)
1000 MeV - Spallation Neutron Source Linac at ORNL

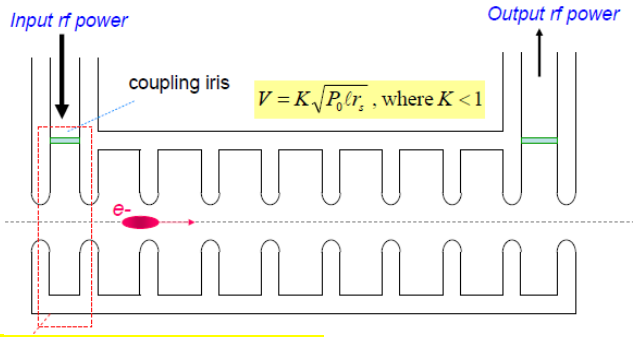
Линеен ускорител - електрони

Ginzton, Hansen and Kennedy
Stanford (1947)

- Бягаща електромагнитна вълна
- Фазата на ЕМ вълна е синхронизирана със скоростта на снопа.
- Поредица от ВЧ цилиндрични резонатори, с централен отвор за преминаване на снопа и ЕМ намаляват фазовата скорост.



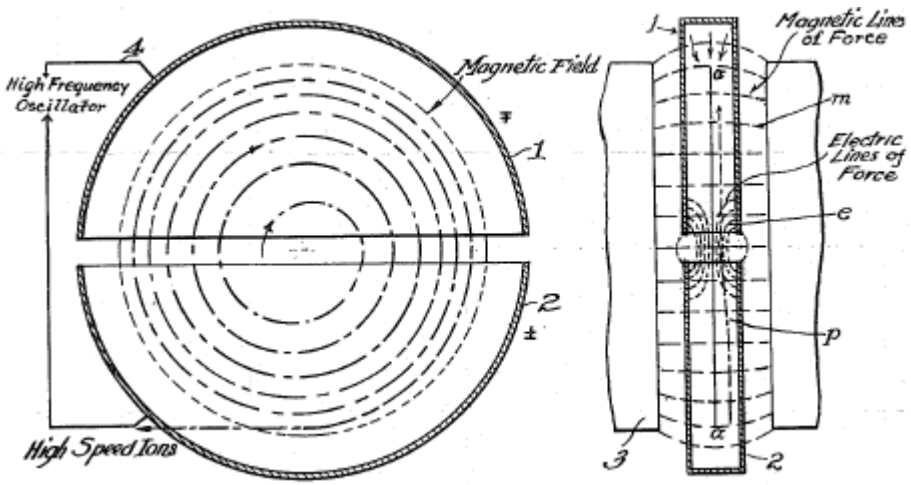




Emax:
50 GeV, 2856 MHz, 3 km
SLAC, Stanford

Циклотрон

Ernest O. Lawrence
Патент (1934)
Нобелова награда (1939)



Ernest O. Lawrence

- Честотата не зависи от радиуса, ако масата е постоянна
- Не може да ускорява до високи енергии, поради загуба на синхронизация, предизвикана от релативистичното нарастване на масата на частицата
- Emax = 20 MeV (протони)

Синхроциклотрон

Veksler и McMillan (1945)

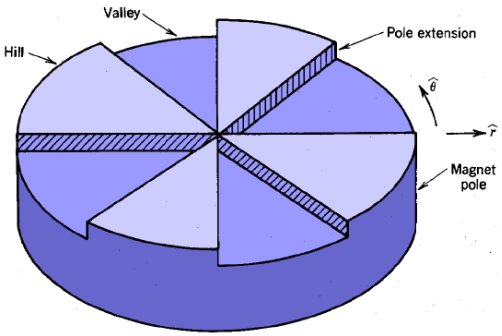
- Регулиране на честотата на приложеното напрежение да съответства на намаляването на честотата на въртене на частиците с увеличаването на радиуса, дължащо се на релативисткото увеличение масата на йона
- Може да ускорява само един бънч от частици
- Първи синхроциклотрон: 350 MeV, Berkeley
- Най-голям синхроциклотрон: 1000 MeV, Gatchina, 6 m диаметър, 10 000 t

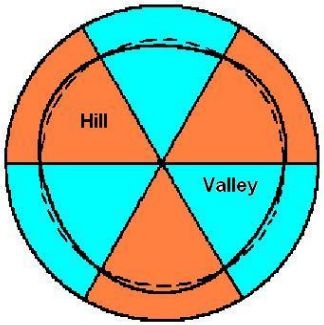
Изохронен циклотрон

L. H. Thomas (1938), идея

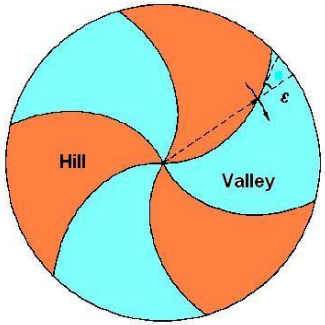
- Запазване честотата на въртене с увеличение на средното магнитно поле с радиуса
- Нарушава се фокусировката
- Азимутално вариращо поле (AVF)

L. H. Thomas





Thomas sector

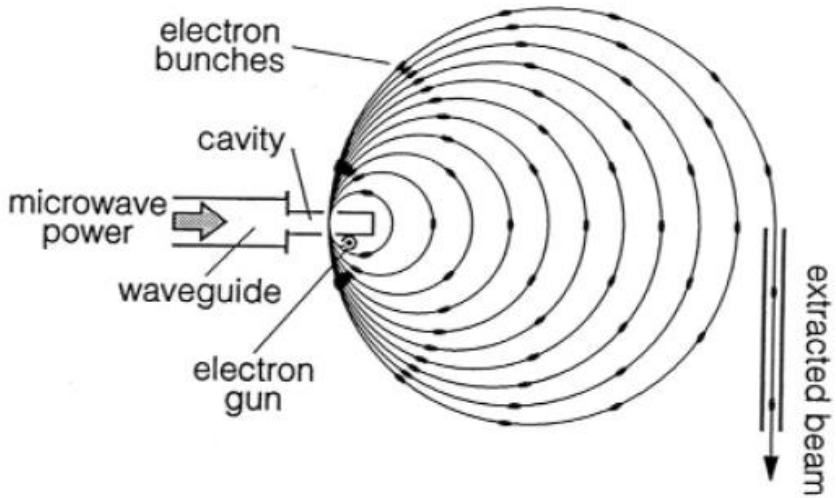


Spiral sector

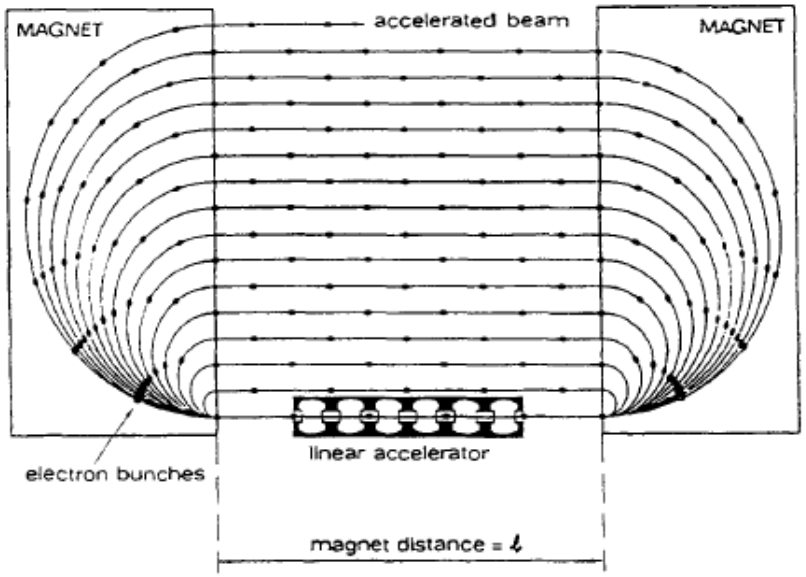
Микротрон

Veksler (1944)

- Електрони, движещи се в напречно магнитно поле
- Орбиталния период е кратен на периода на ускоряващия резонатор



“Racetrack” микротрон

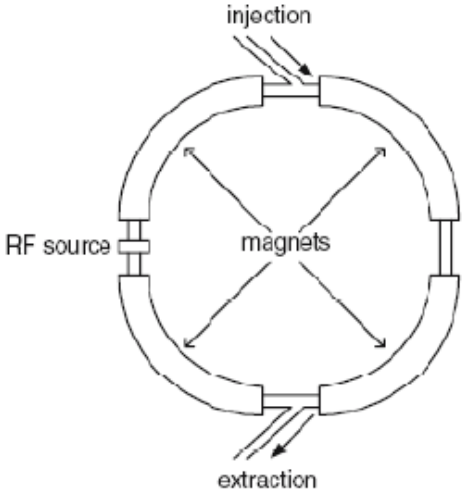


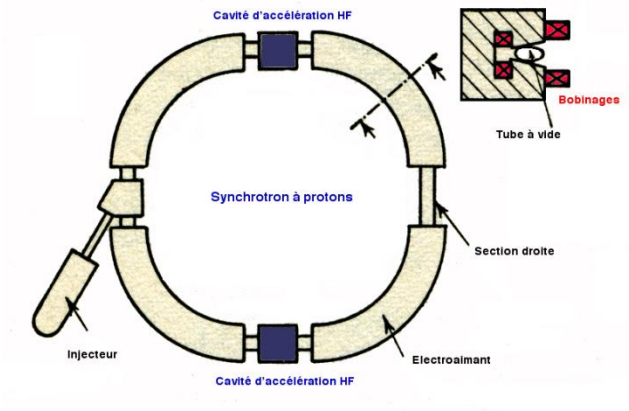
Синхротрон със слаба фокусировка

Mark Oliphant (1943)

- Затворена орбита на движение с фиксирана геометрия
- Едновременно увеличаване на магнитното поле и честотата
- Необходимо е много по-малко по обем магнитно поле
- Висока ефективност при високи енергии
- Първи синхротрон, 1954 г., Cornel University, 1.5 GeV електрони

Mark Oliphant





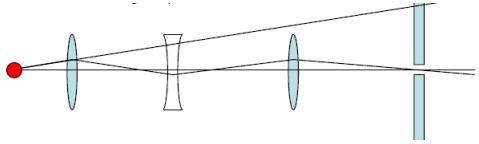
Фокусиране на заредени частици. Силна фокусировка

Courant, Livingston, Snyder и Christofilos

Courant, Livingston, Snyder

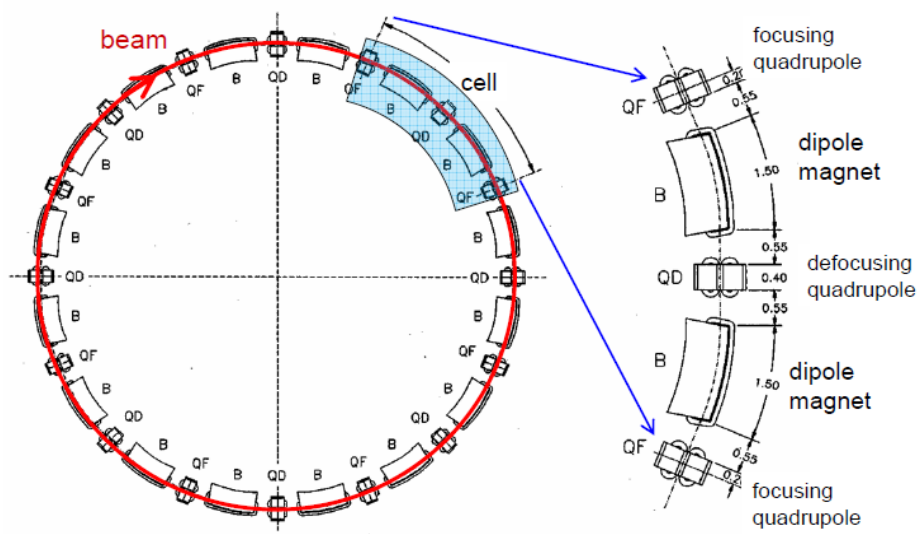
- Частиците в снопа се нуждаят от фокусировка
- Използват се магнитни елементи
- Първоначално са използвани отклоняващите магнити на синхротрона с подходящи полета и редуващи фокусиране и дефокусиране

Christofilos



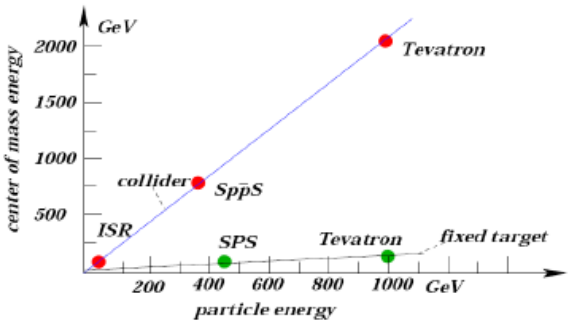
Геометрична оптика

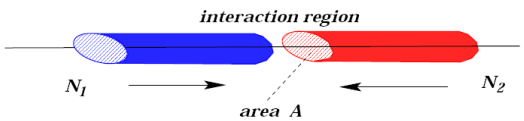
Синхротрон със силна фокусировка

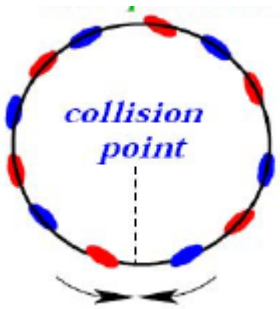


Съвременните синхротрони разделят функциите на отклоняване (диполни магнити) и фокусиране (квадруполни лещи) – силна фокусировка

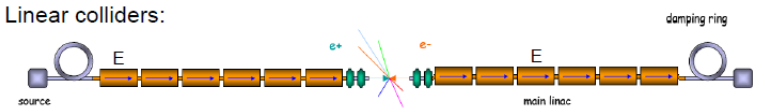
Колайдери

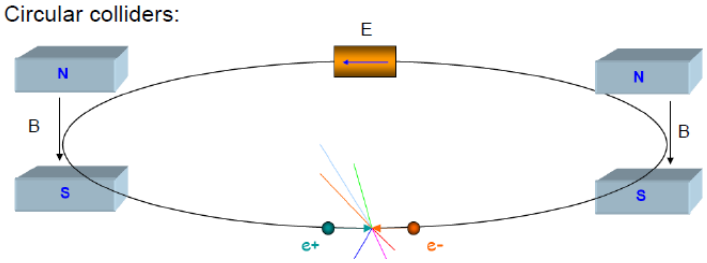






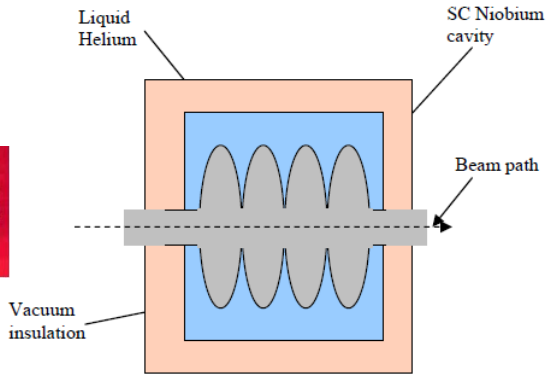
- Сблъскването на два снопа частици е много по ефективно по отношение на енергията на взаимодействие от облъчване на неподвижна мишена
- Сноповете трябва да бъдат разделени преди да взаимодействат (синхротрони)
- Докато при неподвижна мишена е важна **интензивността** на снопа, то при колайдерите се въвежда понятието **светимост**, което отчита както количеството частици, разпределено по бънчовете, така и сечението за взаимодействие между частиците.





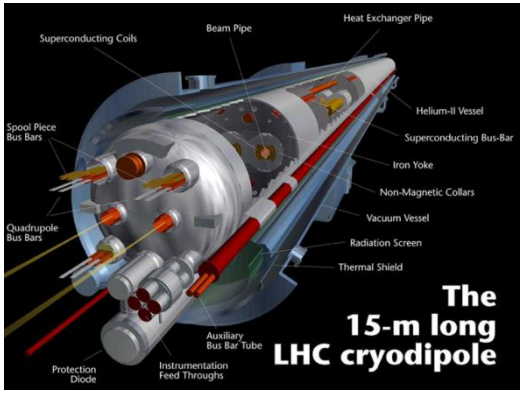
Свръхпроводимост

Свръхпроводящи резонатори:
Отсъствието на съпротивление води до отсъствие на загуби на енергия в стените на резонатора

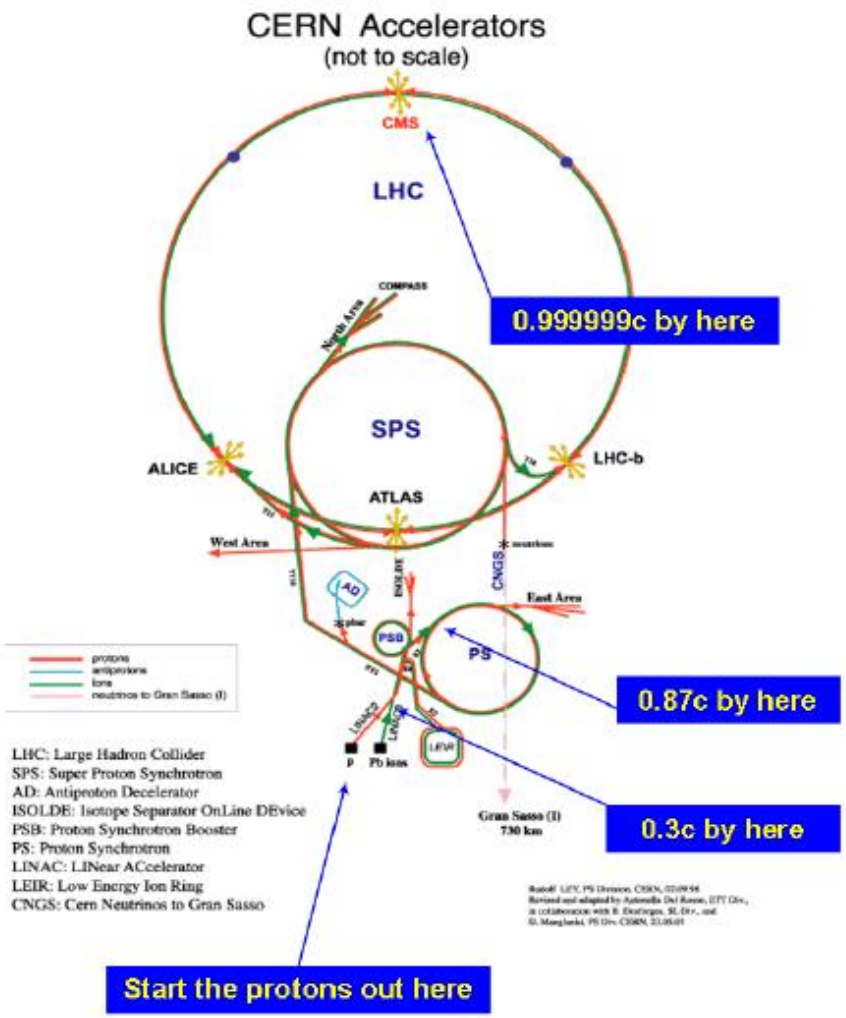


LHC: 1.9 K
Най – студеното място във Вселената!!!

Свръхпроводящи магнити:
Създават много по-силно магнитно поле, намалявайки значително размера на ускорителите



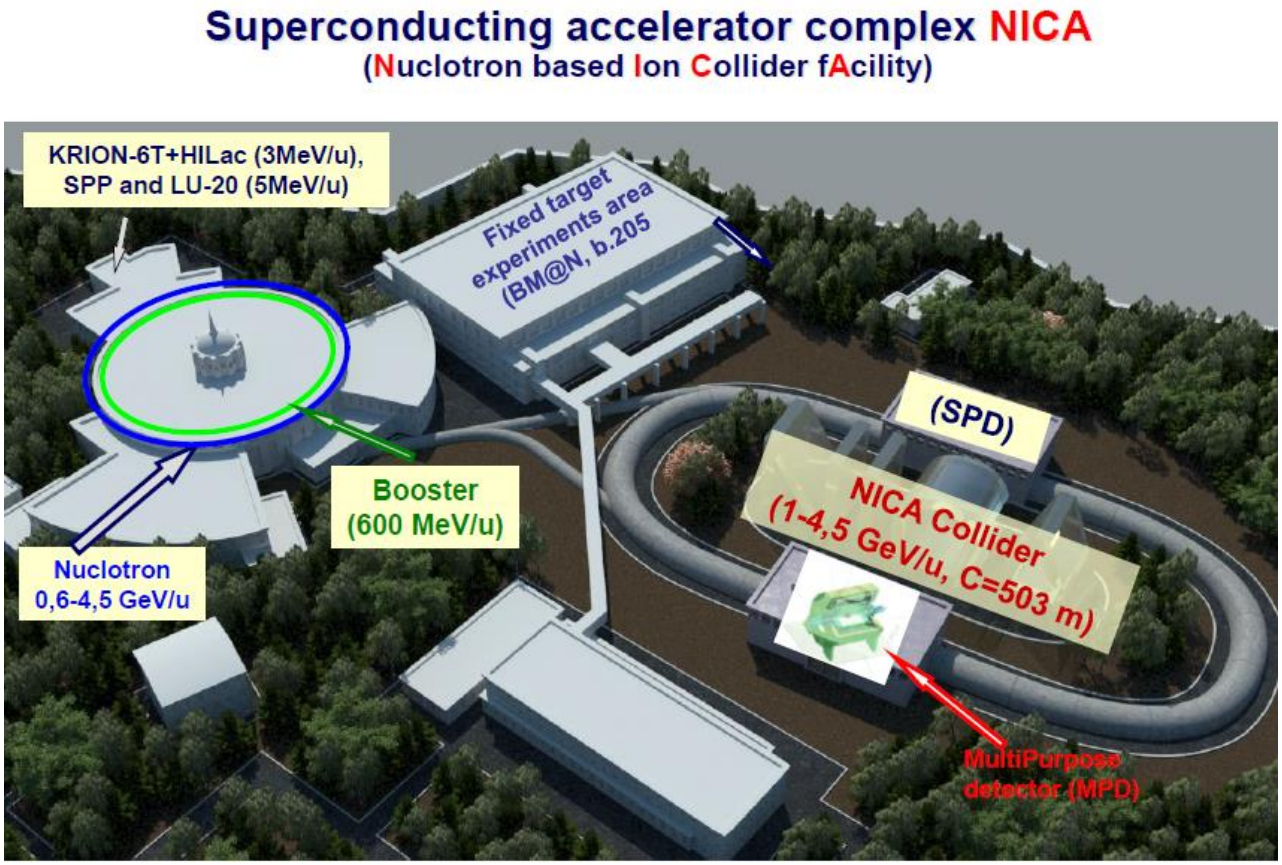
Large Hadron Collider (LHC)



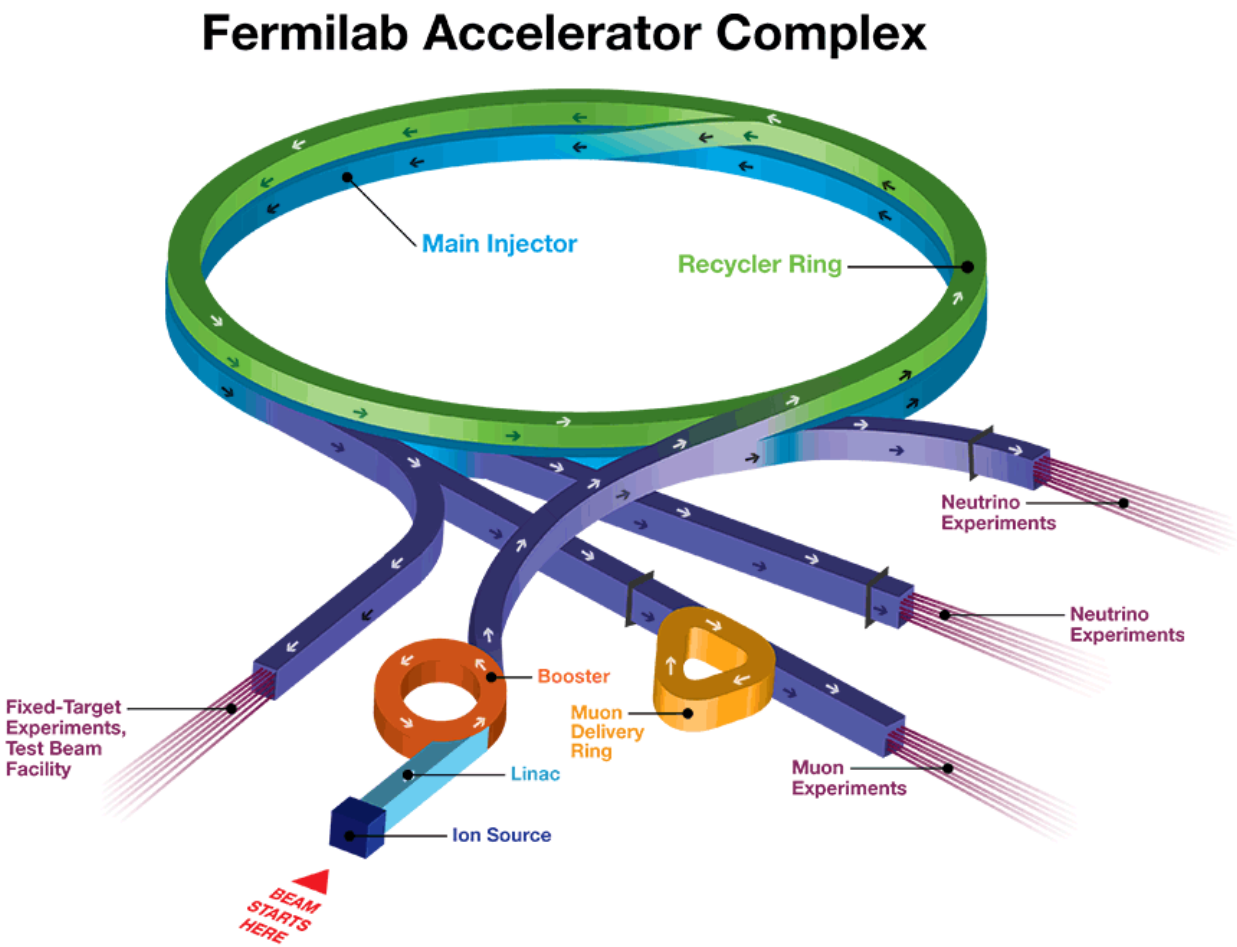
Energies:

Linac	50 MeV
PSB	1.4 GeV
PS	28 GeV
SPS	450 GeV
LHC	7 TeV

Колайдер за тежки йони



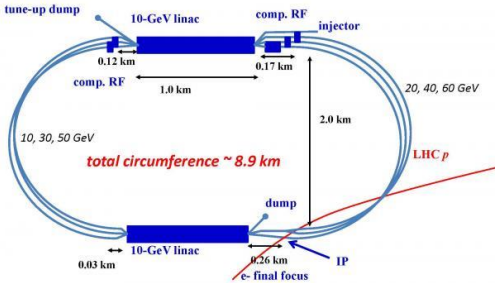
Ускорителен комплекс за експерименти с мюони и неутрино



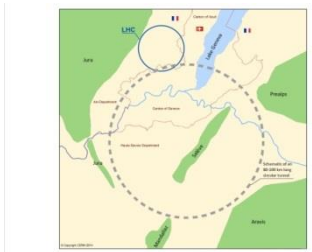
Бъдещи ускорителни проекти в ЦЕРН

High Luminosity Upgrade for LHC (HL-LHC)

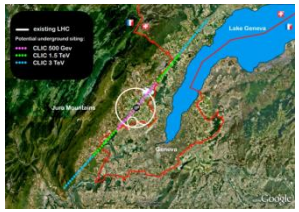
Large Hadron Electron Collider (LHeC)



Future Circular Collider (FCC)
80 – 100 km
100 TeV



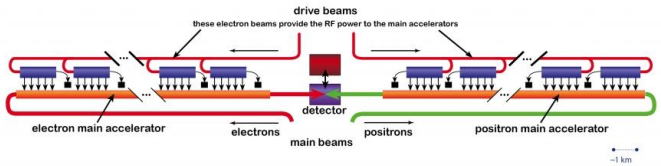
Compact Linear Collider (CLIC)
3 TeV електрони-позитрони
100 MV/m поле

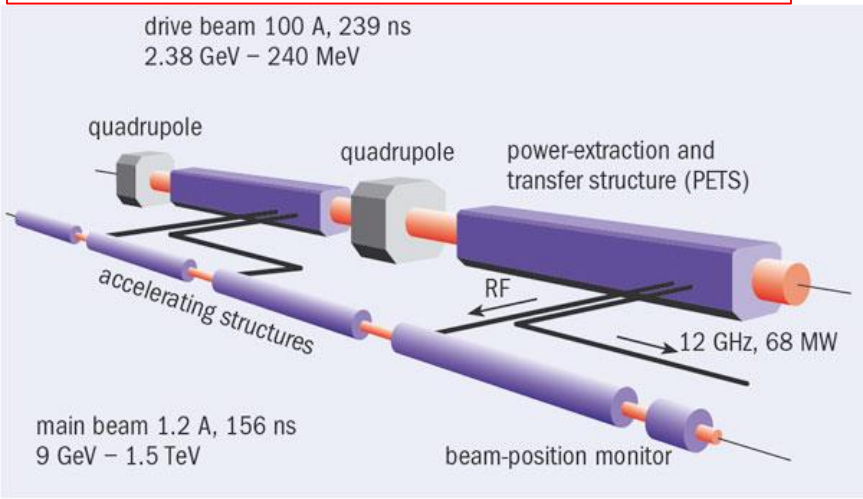


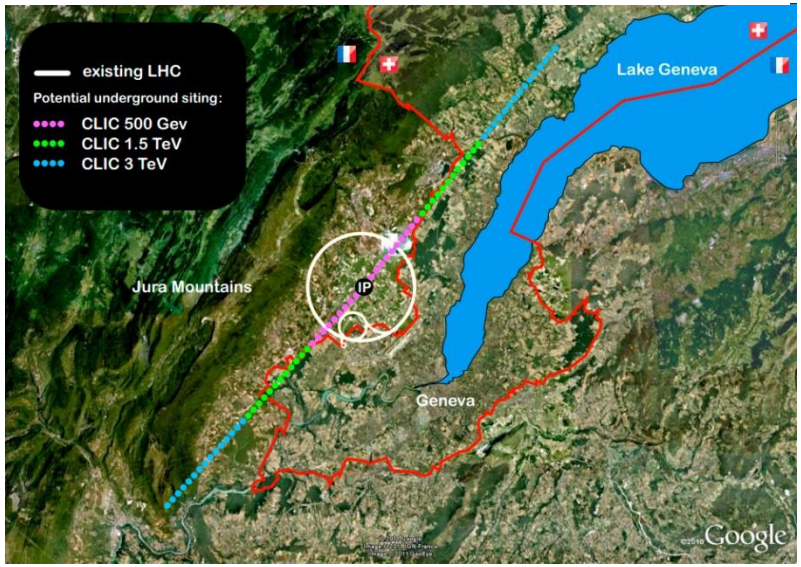
Compact Linear Collider (CLIC)

3 TeV електрони – позитрони

Нова концепция:
Паралелен електронен сноп, който предава енергията си на основния ускоряван сноп в специални Power Extraction and Transfer Structures (PETS)
Дължина: 42 km



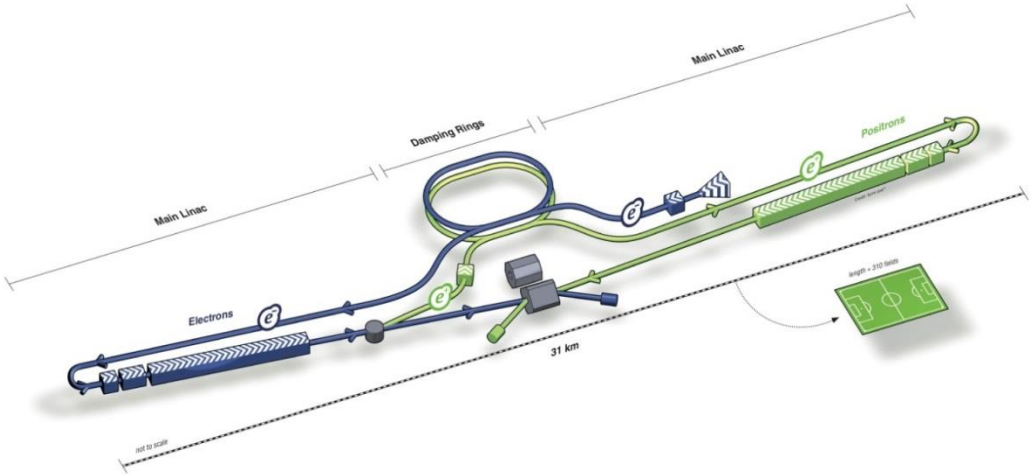




International Linear Collider (ILC)

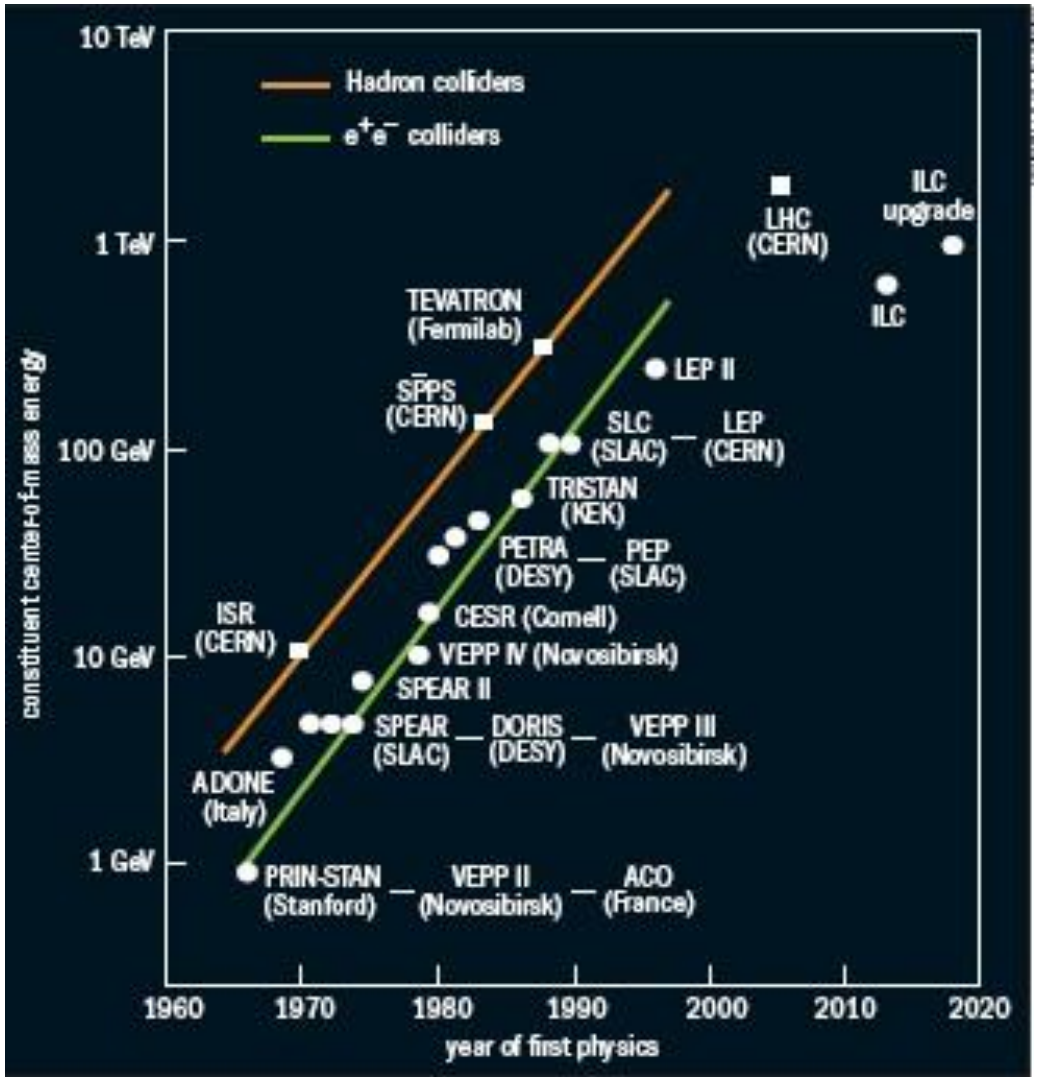
500 GeV електрони – позитрони

- Електронен източник: 5 GeV
- Damping ring: Подобрява качеството на снопа
- Предварителен ускорител: 15 GeV
- Главен ускорител: 250 GeV
- Позитронен източник: Генерирани от електрони с енергия 250 GeV, ундулатор и мишена
- Финално фокусиране до няколко нанометъра в точката на сблъсък



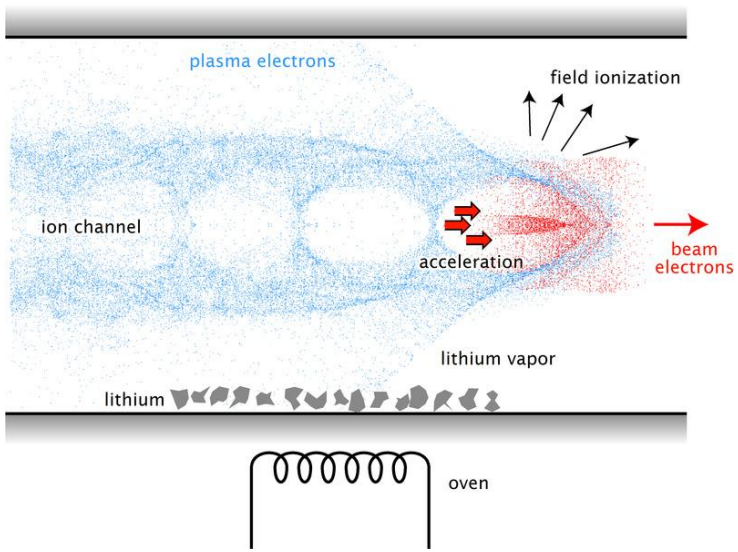
Дължина: 31 km

Крива на Ливингстън



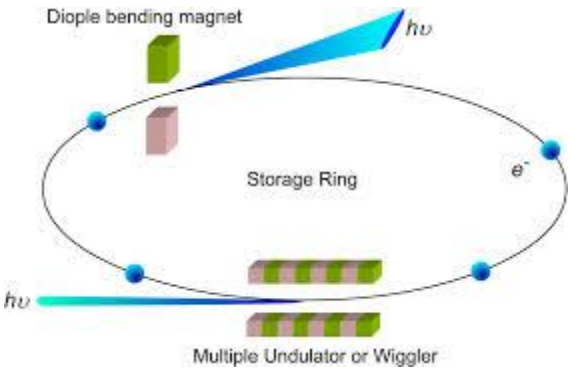
Ускоряване в плазма

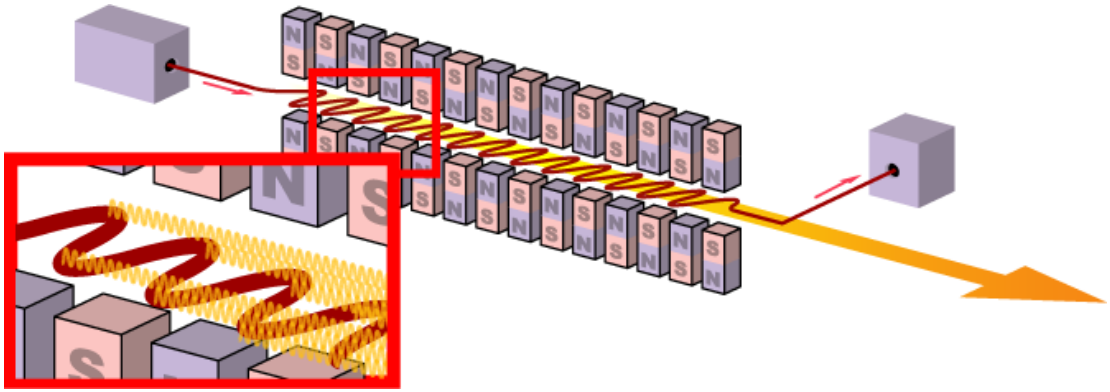
- Ускоряването чрез ВЧ резонатори има граница от 100 MV/m. Електрически пробиви и емисия на електрони от стените на камерата
- 1979 г., Dawson and Tajima предлагат ускоряване на електрони в плазма облъчена с лазерен сноп или сноп релативистки частици
- Бързоподвижните електрони се отместват от бавно подвижните йони, създавайки мощни електрически полета, които могат да ускоряват заредени частици
- 2014 г., Lawrence National Laboratory, Berkeley, 4.25 GeV електрони, 9 cm, мощен лазер

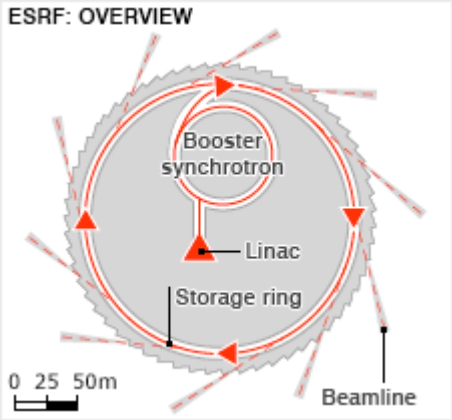


Източници на синхротронно лъчение

- Синхротронното лъчение се състои от фотони, които се излъчват от бързи електрони, отклонени от магнитно поле
- 1947 г., 70 MeV електронен синхротрон на General Electric
- Ундулатори и уинглери – последователност от магнити с редуваща се полярност
- Лазери на свободни електрони







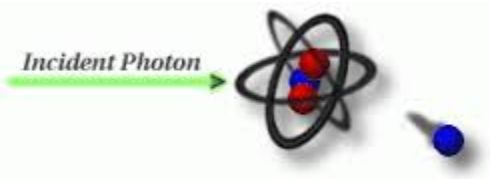
Източници на неутрони

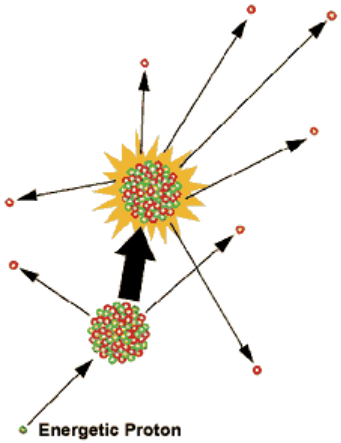
- Протони и електрони с висока енергия генерират неутрони от мишени на тежки метали на базата на:

  - за електрони –> фотони –> фотоядрена реакция

  - за протони -> разцепване на ядрото

- Тези източници заместват ядрените реактори, давайки мощни неутронни снопове с различни енергии.





Ускорителите в света по предназначение

1. Научни изследвания: около 120 ускорителя
2. Синхротронно лъчение: около 70 ускорителя
3. Медицина: повече от 7000 ускорителя (радиотерапия и производство на изотопи)
4. Индустрия: повече от 18 000 ускорителя (йонна имплантация и обработка с електронни снопове)

За научни изследвания и нови технологии са < 1%

Данните са от 2010 г.

Заключение

- Постоянни насоки на развитие на ускорителите

  - Увеличение на енергията

  - Увеличение на интензивността/светимостта

  - Подобрение на параметрите на снопа

- Новите проекти предвиждат линейни колайдери за електрони и позитрони
- Науката за ускорителите включва много широк набор от аспекти на физиката и технологиите

Имат ли извънземните цивилизации построен космически ускорител, използващ черна дупка и можем ли да разберем това?

- SETI at Planck Energy: When Particle Physicists Become Cosmic Engineers, Brian C. Lacki, Institute for Advanced Study, Princeton, USA, 6.03.2015 г.
- Квантовите ефекти от гравитацията стават силни при енергии 10^{28} eV и дължини 10^{-35} m
- Генериране на частици с огромна енергия
- Само неутрино може да достигне до земята
- SETI експерт, Paul Davies: SETI може да включи наблюдението на неутрино с такава висока енергия
- Регистриране с 100 000 хидрофона в океана на предизвиканите от неутриното каскади от вторични частици
- Защо са построили такъв ускорител ? Създаване на миниатюрна вселена или друга пространствено временна структура?
- Дали тази машина работи постоянно за да я наблюдаваме?

БЛАГОДАРЯ

за

ВНИМАНИЕТО!