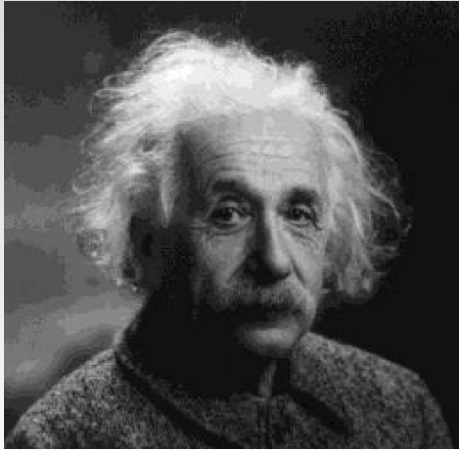


Въведение в ускорителите частици и тяхното бъдеще

Румяна Хаджийска
ИЯИЯЕ, Българска Академия на Науките
CMS Experiment, CERN
routyana.mileva.hadjiiska@SPAMNOTcern.ch

Връзка експеримент–енергия

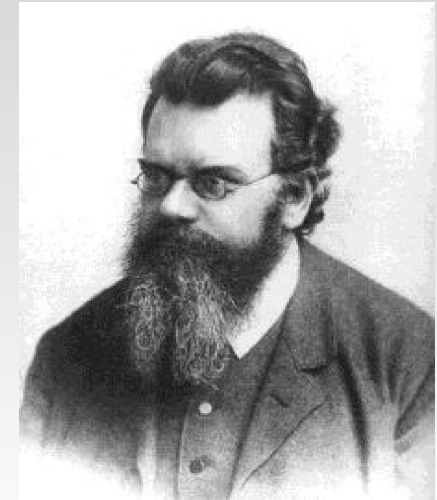


Алберт Айнщан
(Albert Einstein)

Връзка между енергия и
маса на частиците

$$E = mc^2$$

Търсене на нови тежки частици –
**нужда от високоенергетични
пробни частици**



Лудвиг Болцман
(Ludwig Boltzmann)

Връзка между енергия и
температура.

$$E = kT$$

Изучаване на младата Вселена –
**нужда от високоенергетични
пробни частици**

Луи Дьо Бройл (Louis de Broglie): Всяка частица има вълнови свойства, като дължината на вълната зависи от импулса на частицата

Структурата на наблюдавания обект става видима, ако дължината на вълната на Дьо Бройл е сравнима или е по-малка от радиуса на наблюдавания обект.

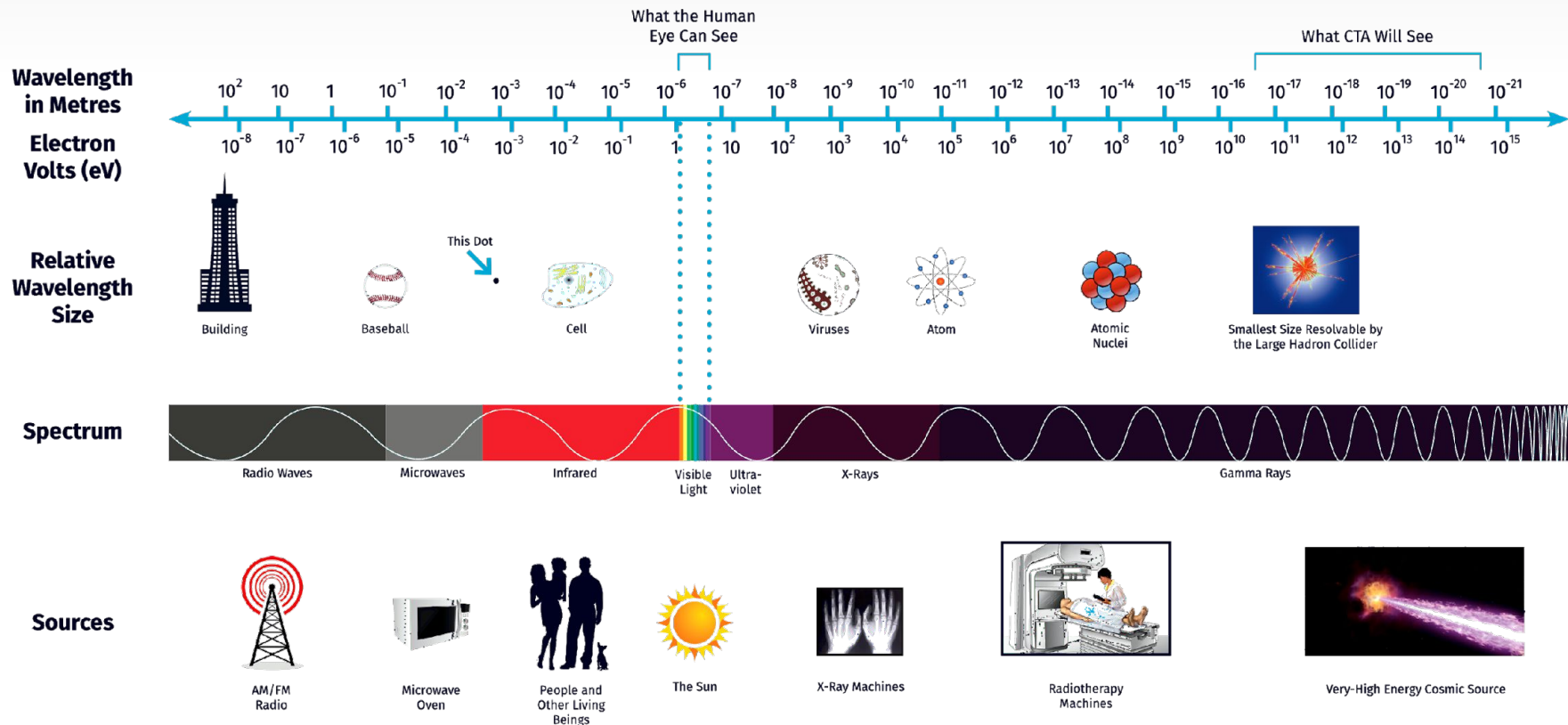
$$\lambda = h/p \approx 2\pi\hbar c/E \approx 2\pi \cdot 200[\text{MeV}\cdot\text{fm}]/E[\text{MeV}]$$

т.е. $\lambda \sim 1/E$

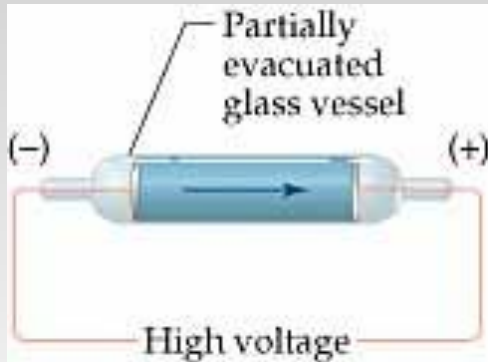


Примери:

- Изследване на структурата на ядрата – пробни (сондиращи) частици – електрони с $E \sim 10^2 \text{ MeV}$
- Изследване на структурата на нуклоните – пробни (сондиращи) частици – електрони с $E \sim 10^2 \text{ GeV}$



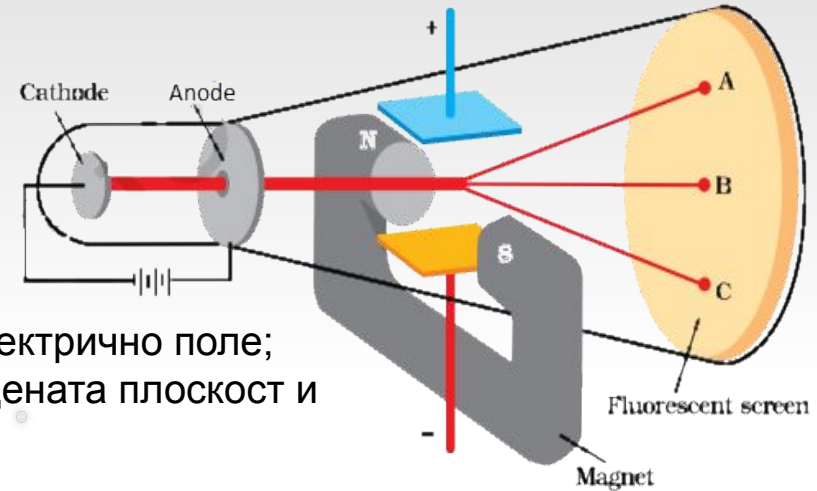
Откриването на електрона



Катодни лъчи

Евакуирана стъклена тръба и подадено високо напрежение

- Сияние в стъклото при анода
- Следователно има някакви лъчи, които идват от катода - **катодни лъчи**



Експеримент на Томсън (Thomson) – 1897
отношение: $e/m - 1.76 \cdot 10^8 \text{ C/g}$

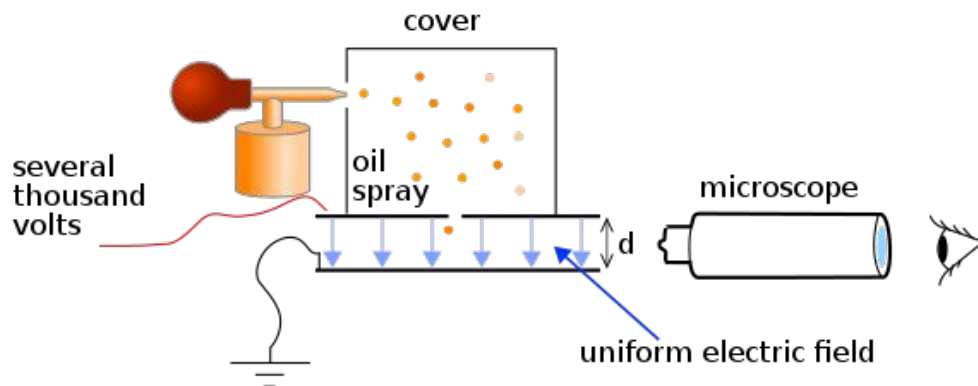
Две противоположно заредени плоскости, които създават електрично поле;
Катодните лъчи се отклоняват встрани от отрицателно заредената плоскост и
към положително заредената;

Следователно катодните лъчи са с отрицателен заряд

Добавя магнитно поле и следи как неговата промяна отклонява катодните лъчи

$$e/m = E/rB^2 = \text{const}$$

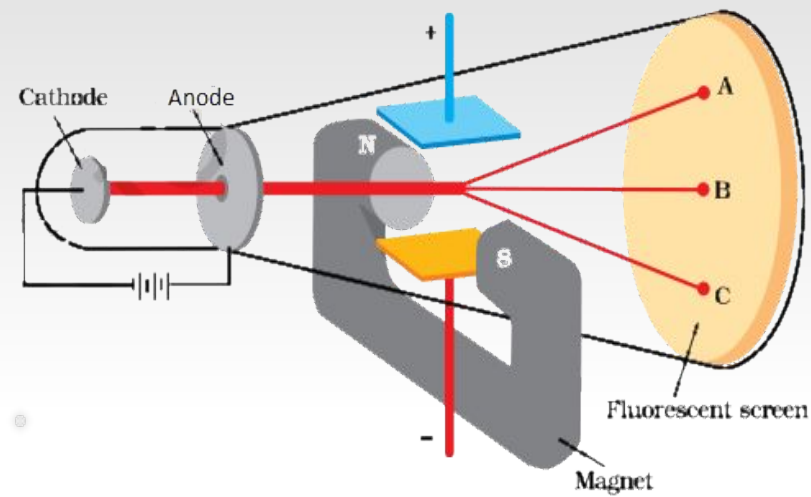
Следователно отрицателно заредена **частица - електрон**



Експеримент на Р. Миликън (Millikan) – 1909
ел. заряд на електрона – $1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Измерва масата на маслени капки, които са заредени електрически.

Масата на различните капки винаги се оказва кратна на едно и също число - **единичен заряд на електрона**



Увеличаване на кинетичната енергия на заредени частици при взаимодействие с електромагнитно поле.

Лоренцова сила

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

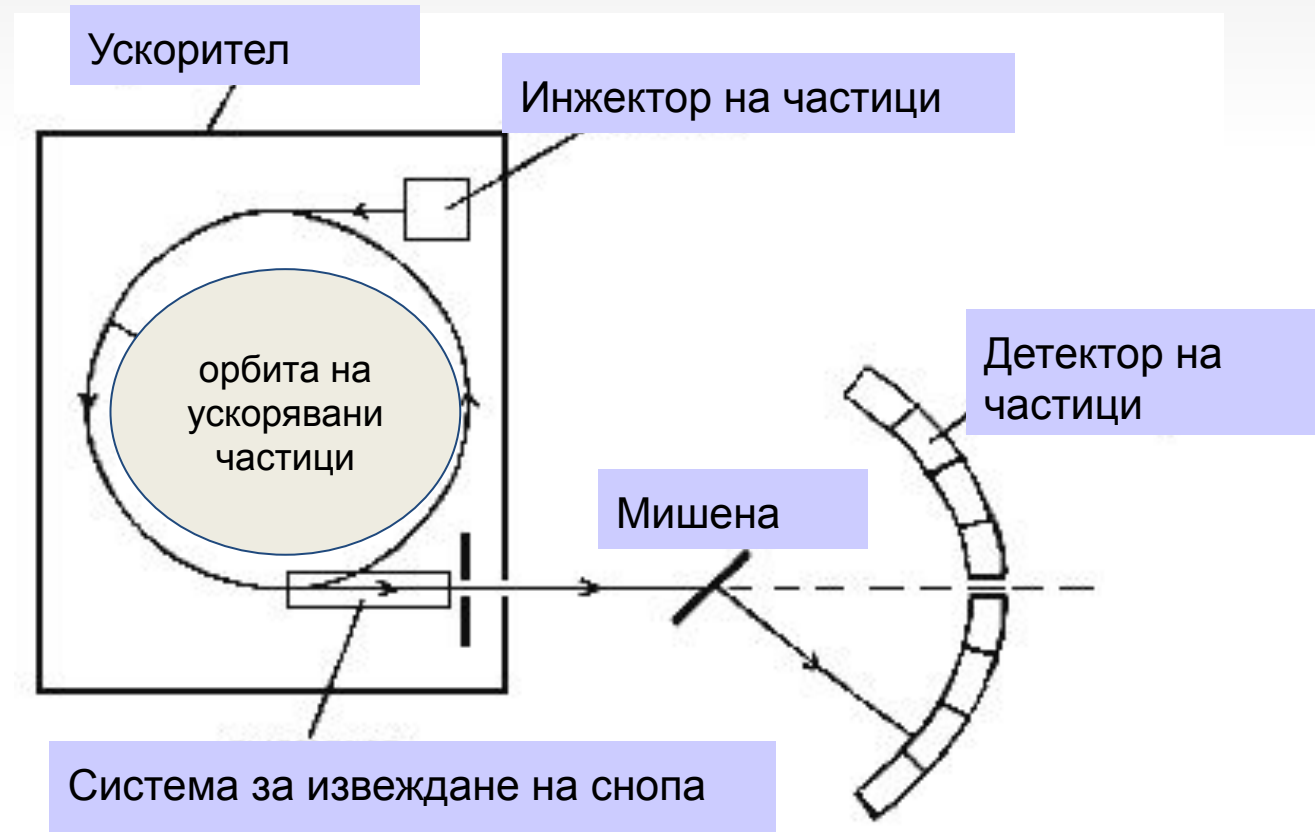
Electric force
Magnetic force

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

- Изследване на фундаменталните частици, изграждащи Вселената;
- Изследване на структурата и поведението на материалите и техните свойства
- Източници на синхротронно лъчение;
- Лъчетерапия;
- Производство на изотопи;
- Стерилизация;
-

Обща схема на ускорител на частици:

1. Инжектор на частици – подготовка на частиците, които ще се ускоряват;
2. Ускорителна система – увеличаване на енергията на частиците;
3. Система за извеждане на ускорения снап към експерименталната установка.



Обща класификация на ускорителите

Според траекторията:

- **Линейни**
- **Циклични** – многократно ускоряване по една и съща затворена траектория (**синхротрони**), многократно преминавайки през едни и същи ускоряващи промеждутаци, или по траектория на развиваща се спирала (**циклотрони**).

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
- ...

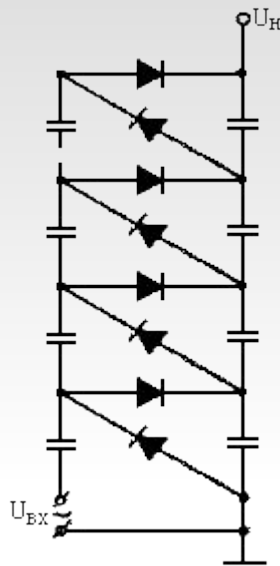
По тип ускорявани частици:

- Ускорители на електрони
- Ускорители на протони и йони
- ...

Каскаден генератор на Кокрофт (Cockroft) и Уолтън (Walton) – 1931г.



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



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

На показаната схема -изходното напрежение е удвоеното напрежение на входното напрежение по броя каскадни стъпала.

Електрически пробиви ограничават максималната енергия $E_{max}=750 \text{ KeV}$

Генератор на Ван де Грааф (Robert Van de Graaff)

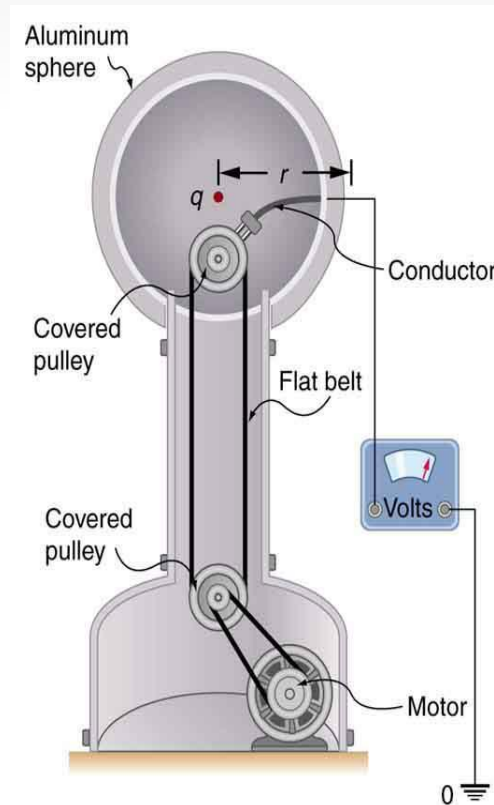
Електростатичен генератор

- Използва движеща се лента за да натрупа електрически заряд върху куха метална сфера;
- Натрупания заряд води до появата на голяма потенциална разлика $V \sim 20 \text{ MeV}$.
- Частици със заряд Ze добиват кинетична енергия $T = ZeV$

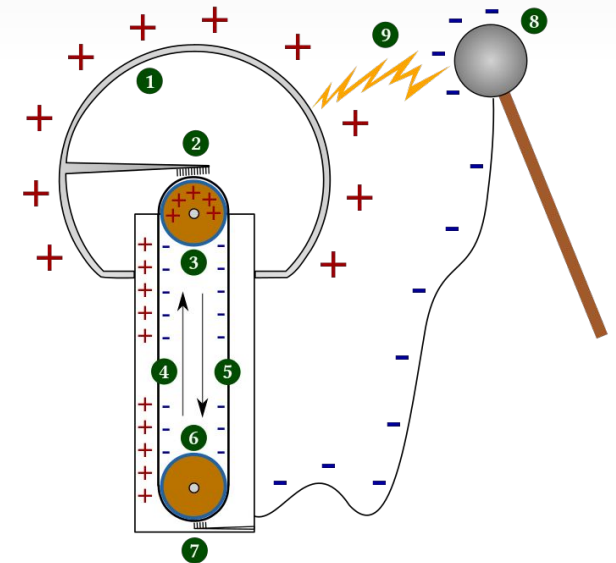


Предимство – непрекъснато действие;

Максимална енергия $\sim 24 \text{ MeV}$, ограничение от коронен разряд



Van de Graaff Generator



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33070>
240

Линеен ускорител

Идея: Изинг (Gustav Ising) (1924) ,
Реализация: Видерое (Rolf Wideroe) (1927) ,



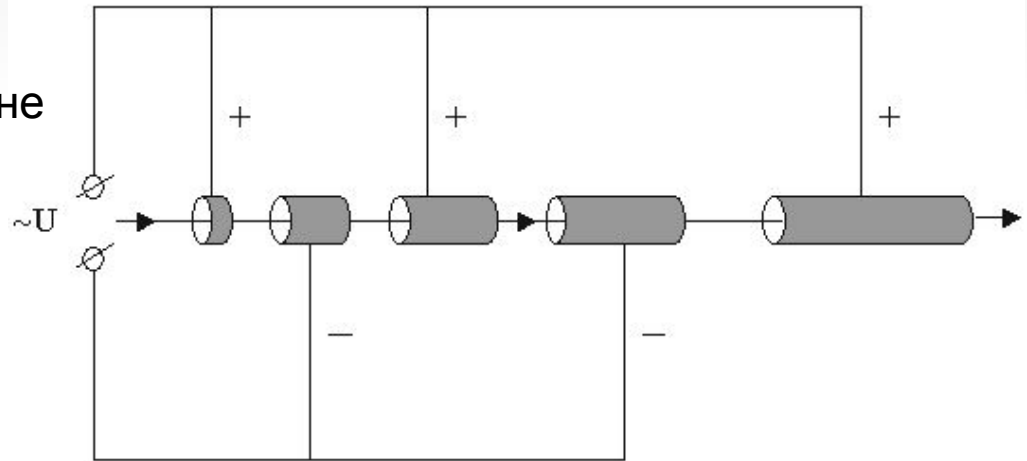
Rolf Wideroe

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

- Дължина на n-тата дрейфова тръба: l_n
- скорост на частицата след преминаване на n-тата тръба: v_n
- честота на ускоряващото поле: f

$$l_n = v_n / (2f)$$

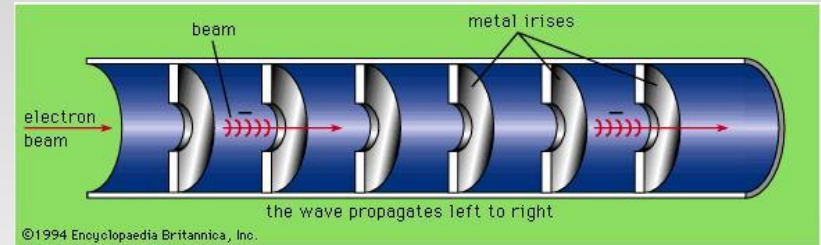
Увеличаване на $v_n \rightarrow$ увеличаване на l_n



След преминаване на n ускорителни участъка, частицата достига кинетична енергия $T_n = nZeU$
В нерелативистко приближение дължината на дрейфовата тръба нараства като \sqrt{n} .
При достигане на релативистка стойност дължината на тръбата остава постоянна.

Линеен ускорител - електрони

- Вълновод;
- Генератор на ЕМ поле с честота около 3000 MHz (микровълнови обхват) – клистрон;
- Бягаща електромагнитна вълна
- Фазата на ЕМ вълна е синхронизирана със скоростта на снопа;
- Порциите електрони се инжектират с енергии от порядъка на няколко десетки KeV
- Електроните са принудени да се групират в бълчове около максимумите на бягащата вълна и се ускоряват
- Впоследствие, електроните се движат с гребена на електромагнитна вълна
- Аналогия със сърфист, който “улавя” гребена на вълната и се ускорява.



Електрони, по-бързи от вълната

Електрони, осцилиращи около равновесното положение

Скоростта е почти константа, но електроните все още получават енергия от вълната, тъй като масите им нарастват

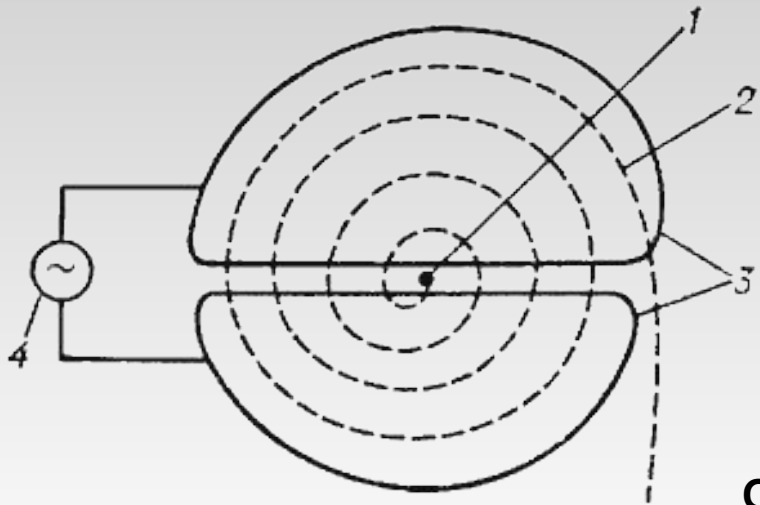


Електрони, по-бавни от вълната

Доближаване до светлинна скорост, нарастване на масата на електроните

стабилен бълч от електрони с нарастваща скорост, електроните получават енергия от вълната

Циклотрон



1. Източник на тежки заредени частици (протони, йони);
 2. Орбита на ускоряваната частица;
 3. Ускоряващи електроди (дуанти);
 4. Генератор на ускоряващото поле;
 5. Електромагнит
- Стрелките показват посоката на магнитното поле*

Общ принцип на действие:

- частици със заряд Ze и маса m ;
- движение в постоянно магнитно поле B , насочено перпендикулярно на оста на движение на частиците;
- Радиус R на траекторията на частиците, движещите се със скорост v .

$$R = mv\gamma / ZeB \rightarrow v = RZeB / m\gamma$$

За нерелативистки частици $\gamma \approx 1$

циклотронната честота f не зависи от енергията на частиците, но зависи от магнитното поле.

$$f = v / 2\pi R = ZeB / 2\pi m$$

- Ускоряване на частиците в процепите между дуантите;
- Енергията на частиците и радиуса на орбитата нарастват - развиваща се спирала
- Частицата достига скорост: $v = ZeBR/m$ и енергия: $E = mv^2/2 = (Ze)^2 B^2 R^2 / (2m)$

Циклотрон

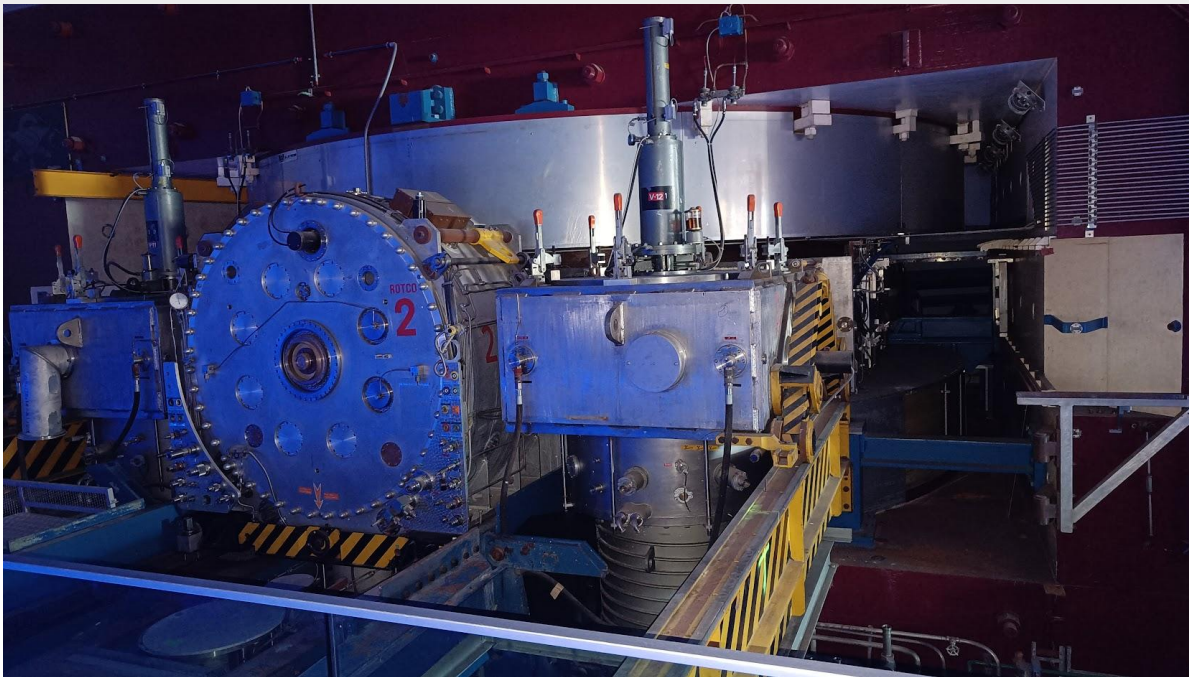


Ърнест Лоуренс (Ernest Lawrence)
Нобелова награда за физика за 1939
година „за изобретението и
създаването на циклотрона

Първият работещ модел на циклотрон (1930г.), създаден от Лоуренс (Ernest Lawrence)
 $E_{\max} = 1\text{MeV}$

Фазотрон (Синхроциклотрон)

- Магнитното поле е еднородно и постоянно във времето;
- **Регулиране на честотата на приложеното напрежение** (да съответства на намаляването на честотата на въртене на частиците с увеличаването на радиуса);
- На фигурата: SC в ЦЕРН - част от визитата в понеделник



Изохронен циклотрон

- **Магнитното поле нараства с радиуса**
- Изисква азимутални корекции на магнитното поле, за да задържи частиците в техните орбити.

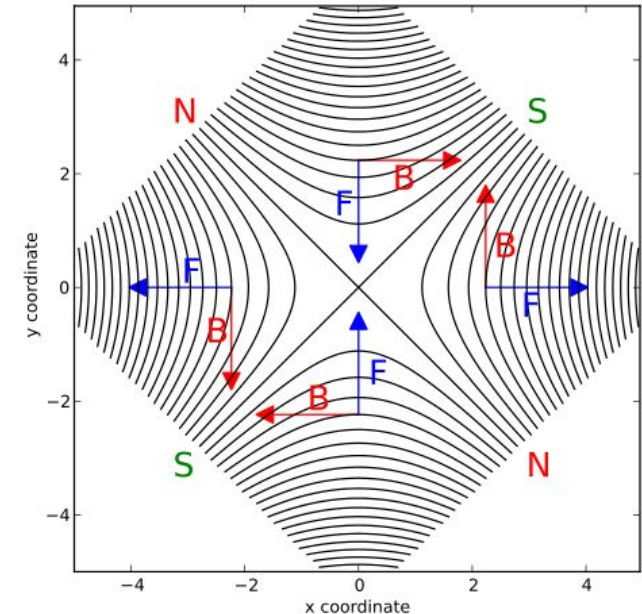
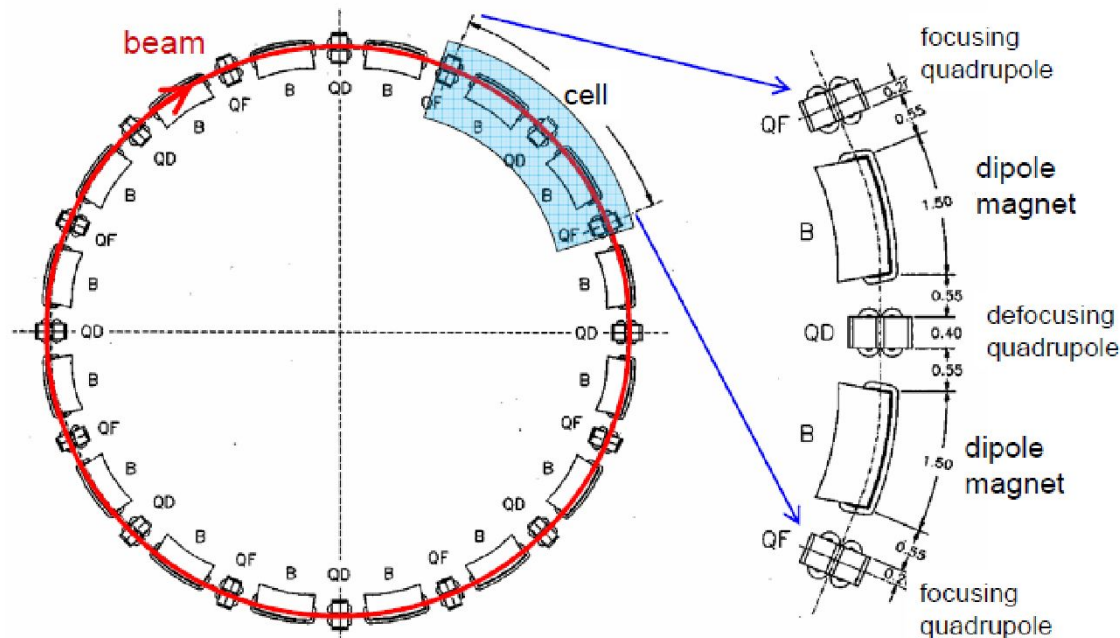
Синхротрон

Силна фокусировка:

Ускоряваните частици преминават през редуващи се периоди на фокусиране на хоризонталната и вертикалната компонента на снопа

като се съхранява глобалната устойчивост на напречните размери на снопа.

Фокусиране с квадрополни лещи.

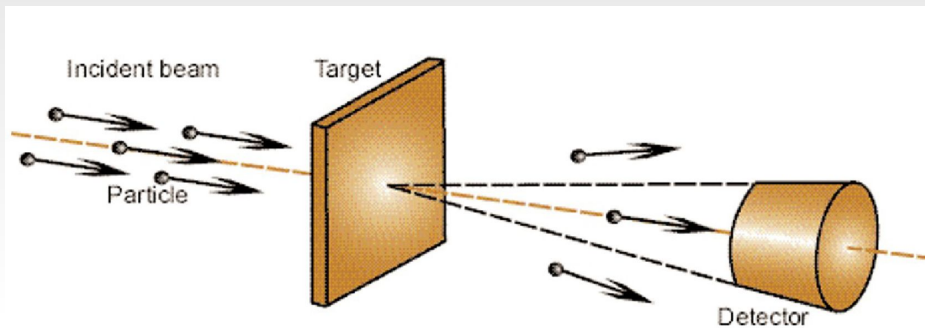


FODO клетки (или секции) – фокусиране и дефокусиране с квадрополни лещи.

F – фокусира вертикално,
D – фокусира хоризонтално;

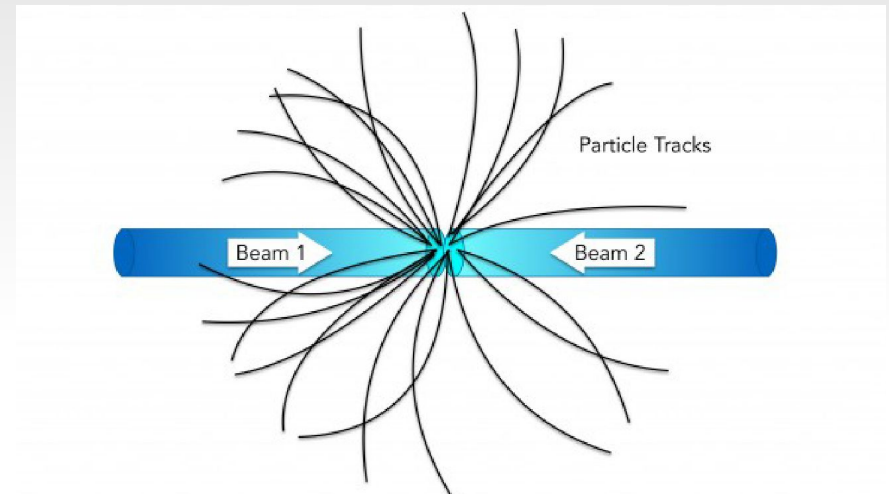
Експерименти във физиката на елементарните частици

Фиксирана мишена



<https://www.fnal.gov/pub/ferminews/Ferminews00-06-30.pdf>

Насрещни снопове

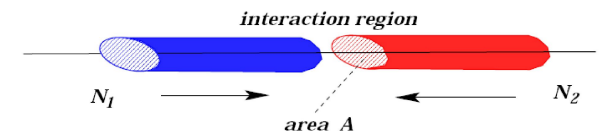
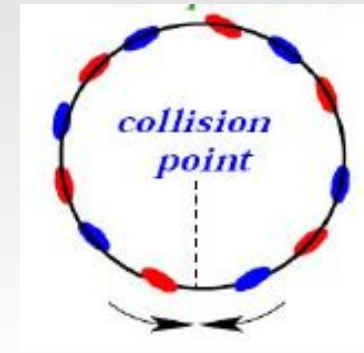
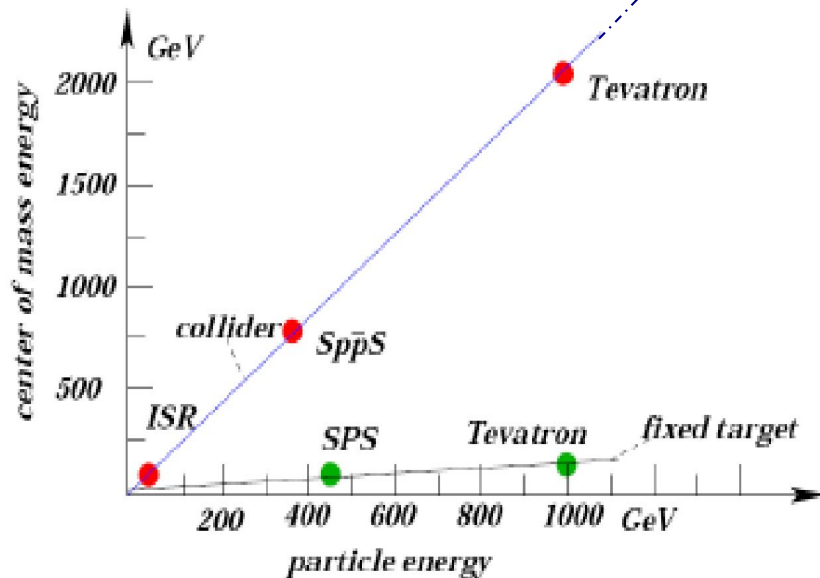


<https://atlas.cern/updates/news/counting-collisions>

Ускорител на насрещни снопове - Колайдер

Сблъскването на два снопа частици е много по ефективно по отношение на енергията на взаимодействие от облъчване на неподвижна мишена.

LHC 13 TeV



Енергия на взаимодействията в система център на масите е:

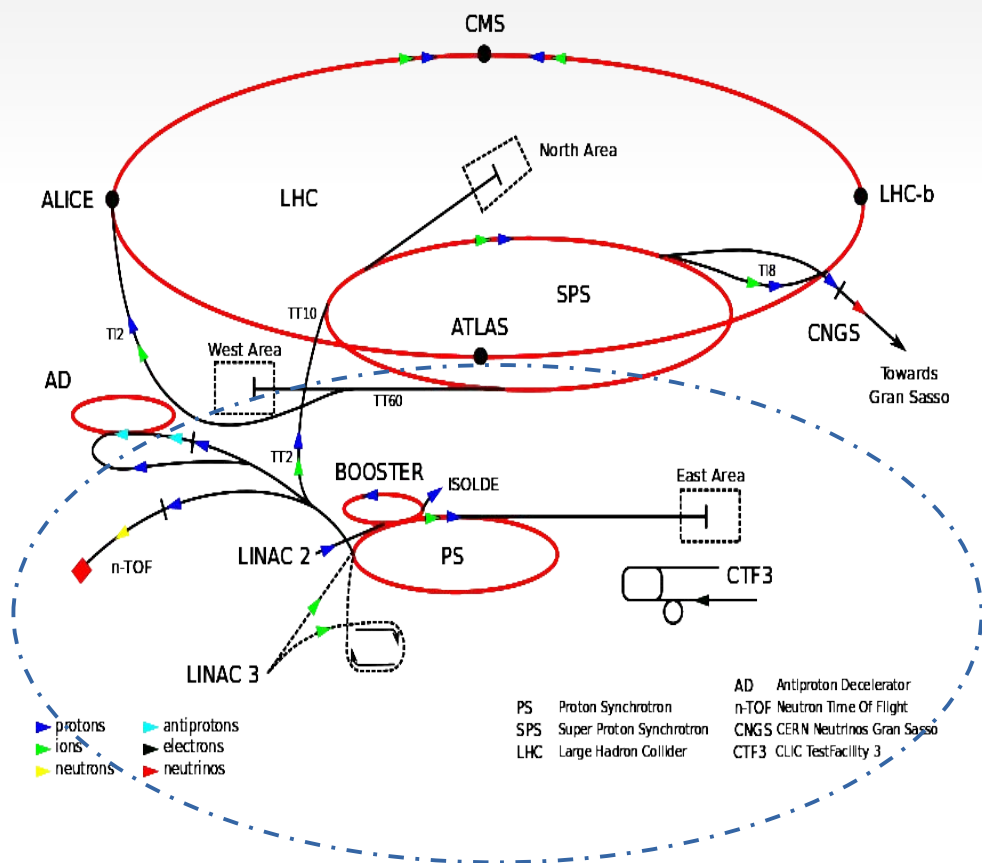
$$\sqrt{s} = 2 E_{\text{сноп}}$$

Ускорители на насрещни снопове - Колайдери

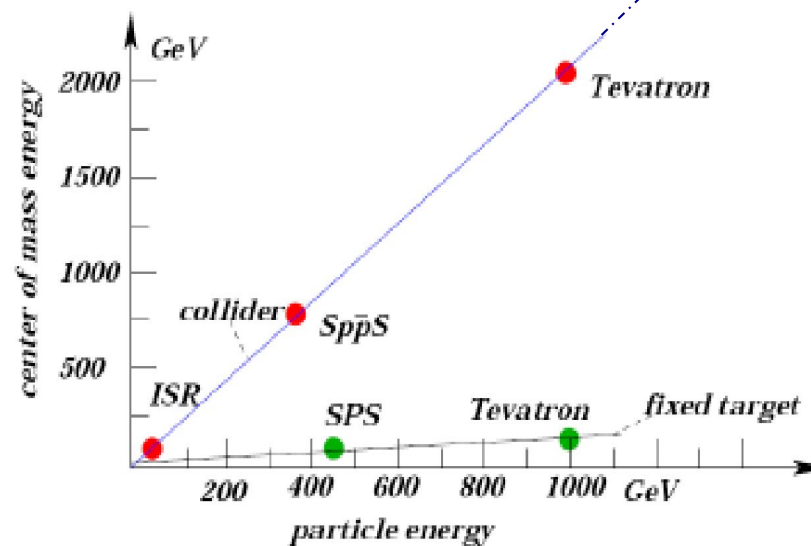
Сблъскването на два снопа частици е много по ефективно по отношение на енергията отколкото при обстрелване на неподвижна мишена.

Енергия на взаимодействията в система център на масите е равно на $2 \times E_{\text{сноп}}$

ЛНС - Големия Адронен Колайдер



LHC 13.6 TeV



Бъдещи ускорители - HL-LHC (High Luminosity LHC)

Фаза на висока светимост на LHC

- Анонсиран през 2013 г. като най-голям приоритет на Европейската стратегия за развитие на физиката на елементарните частици;
- Да модернизира и увеличи откривателския потенциал на LHC;
- Енергия от 14 TeV;
- Увеличена интензивност на взаимодействията:
 - момента светимост от 5 - 7.5 x 10³⁴ cm⁻²s⁻¹
- Очакван старт на експлоатация - 2029 г.

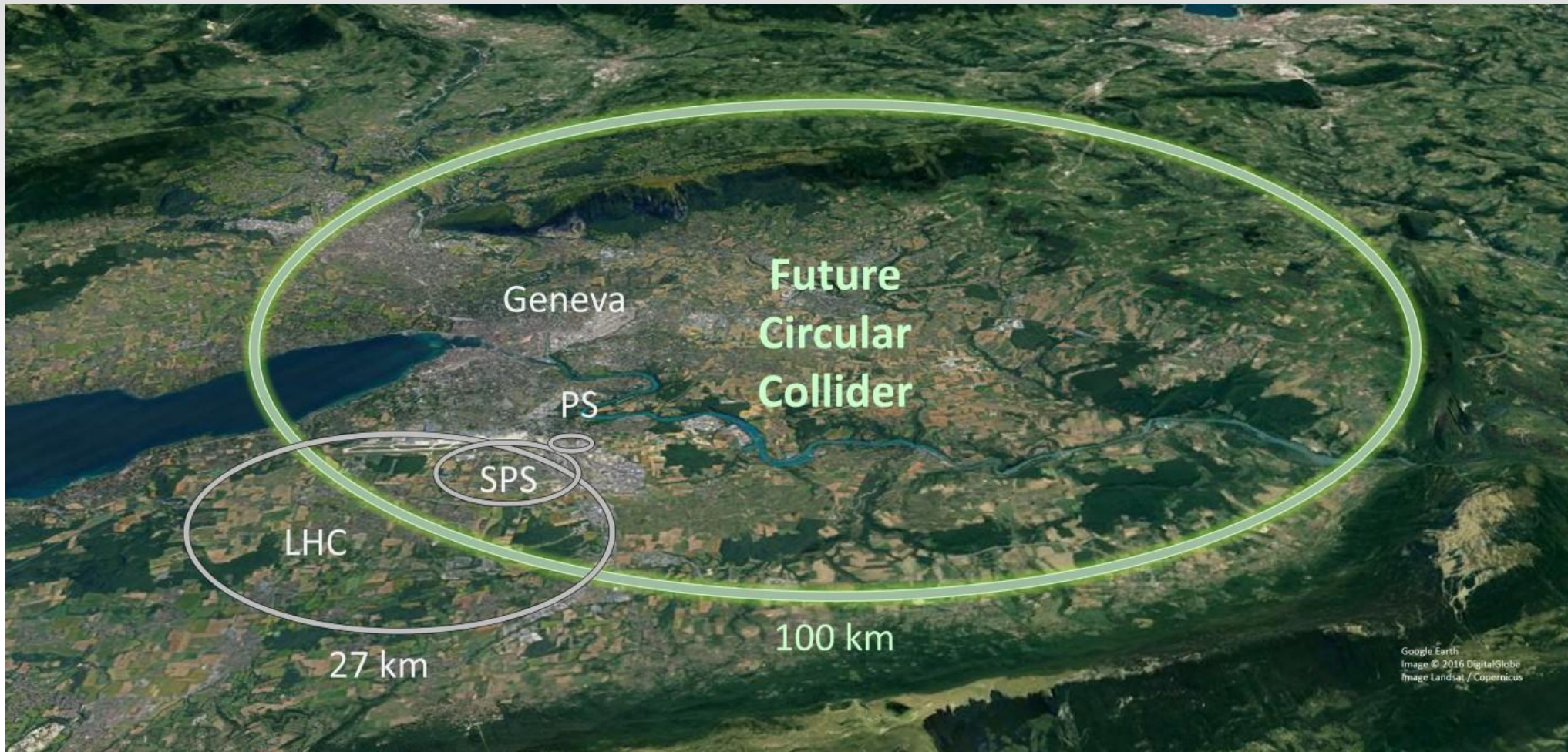
По-голяма светимост -> повече данни (от 3000 - 4000 fb⁻¹)

1 fb = 10⁻³⁹ cm², т.е. чувствителност към събития, които се случват с толкова малка вероятност (1 път на 10³⁹ пъти в площ от 1 cm²)

- Пример: на HL-LHC ще се родят поне 15 000 000 Хигс бозона за година
 - В сравнение: на LHC са родени около 3 000 000 през 2017 г.
- Изисква модернизация на сега съществуващите детектори на експериментите на LHC, както и добавянето на нови детекторни нива
- Българските учени участват в модернизацията на мюонната система на CMS в проектите RPC и GEM
- Чудесна възможност за млади хора, които искат да продължат образованието си и да се развият като професионалисти в тази област!

Future Circular Collider

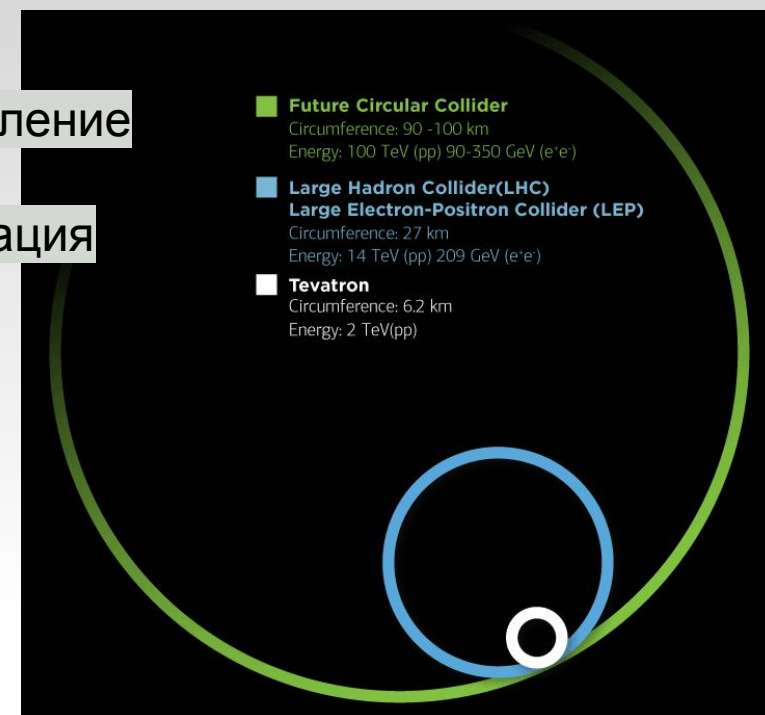
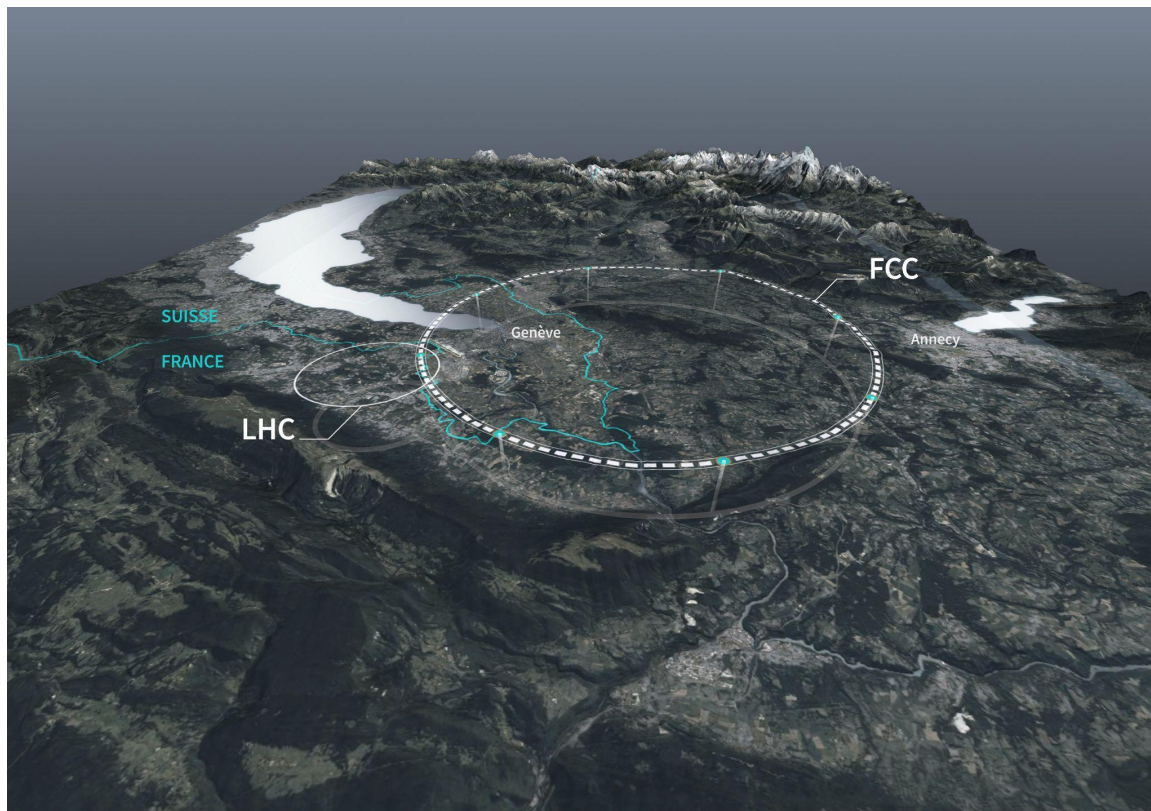
<https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider>



Енергия на сблъсък от 100 TeV

Бъдещи ускорители - FCC (Future Circular Collider)

- нова изследователска инфраструктура - ново поколение ускорител на частици
- очаква се да бъде построен и да влезе в експлоатация около 2040 г.
- Очаквана енергия $E = 100 \text{ TeV}$
- Международна колаборация от 150 университета, изследователски звена и индустриални партньори
- Нови детектори за FCC

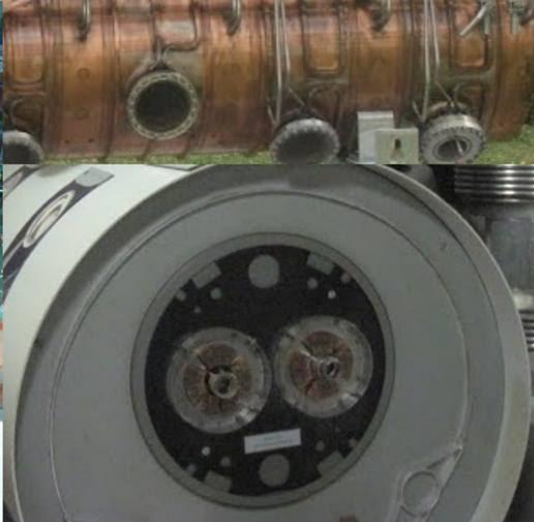
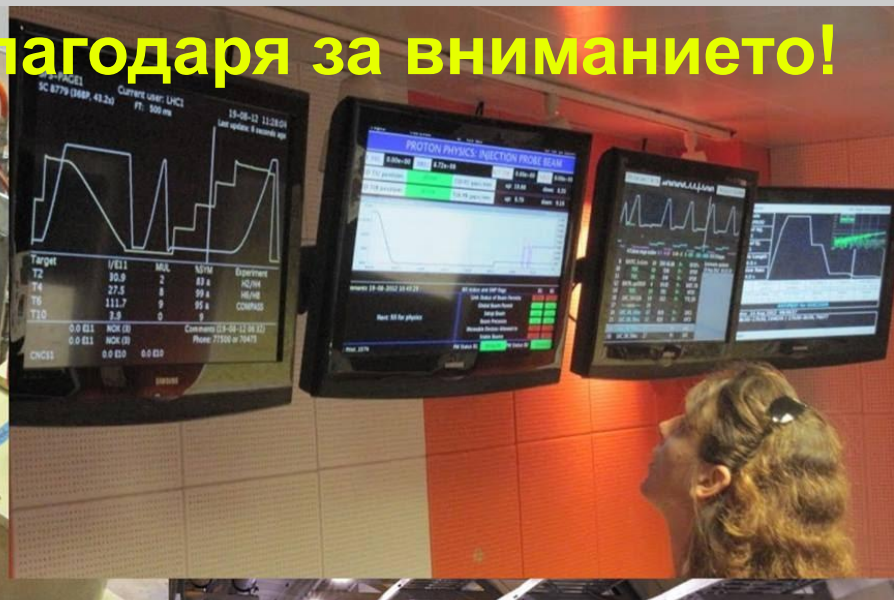


Разглеждат се три различни програми:

- адронни сблъсъци: протон-протонни и тежки ядра - FCC-hh
- електрон-позитрон колайдер: FCC-ee
- протон-електрон или протон-тежки ядра

повече информация - [ЛИНК](#)

Благодаря за вниманието!



Допълнителни слайдове

Compact Linear Collider

<https://home.cern/science/accelerators/compact-linear-collider>



Компактният линеен колайдер (CLIC) е предложен ускорител, CERN

- електрони и позитрони
- три етапа, при енергии на сблъсък съответно от 380 GeV, 1,5 TeV и 3 TeV, за дължина на обекта, варираща от 11 до 50 km.
- високопрецизни измервания на взаимодействията на Хигс бозона с други частици и със самия себе си
- радиочестотни (RF) кухини концепция за ускоряване с два снопа за създаване на ускоряващи полета до 100 MV на метър. Радиочестотната мощност, необходима за ускоряване на главния главния сноп, се генерира локално чрез забавяне на втори електронен сноп с висок интензитет – „задвижващия сноп“ – в специални структури за извличане на енергия. Това ще позволи сблъсъци до 3 TeV..

International Linear Collider (ILC)

https://en.wikipedia.org/wiki/International_Linear_Collider#/media/File:ILC_SchemeTDR.jpg



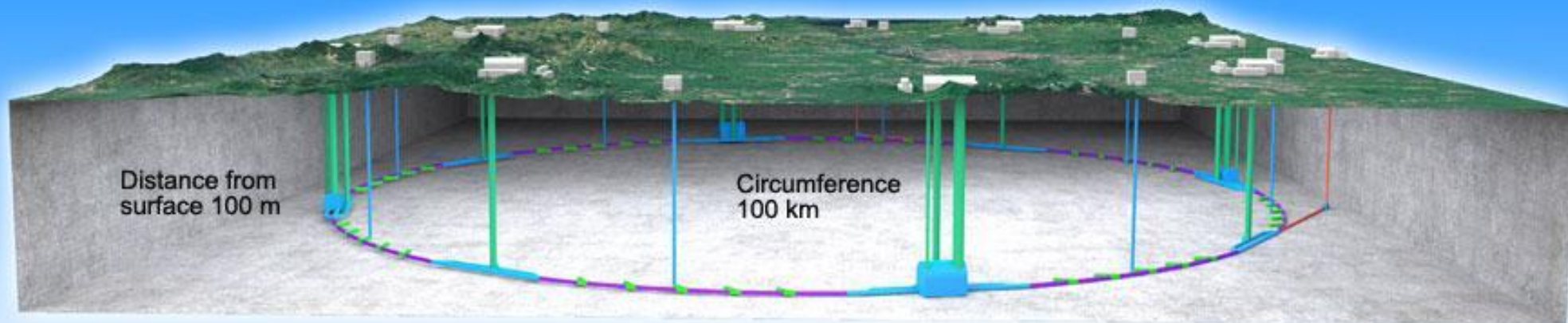
Общо 8000 свръхпроводящи радиочестотни резонатора ще бъдат инсталирани в главните линейни ускорители

- измерване на масата, спина и силата на взаимодействие на бозона на Хигс
- брой, размер и форма на всички допълнителни измерения в TeV скала
- изследване най-леките суперсиметрични частици, възможни кандидати за тъмна материя

Нанолъчи – Всеки сноп (електрон и/или позитрон) се фокусира на ширина 500 nm и височина 8 nm в точката на взаимодействие.

Circular Electron Positron Collider

<https://www.chinadaily.com.cn/a/201811/15/WS5becad13a310eff303288bdc.html>



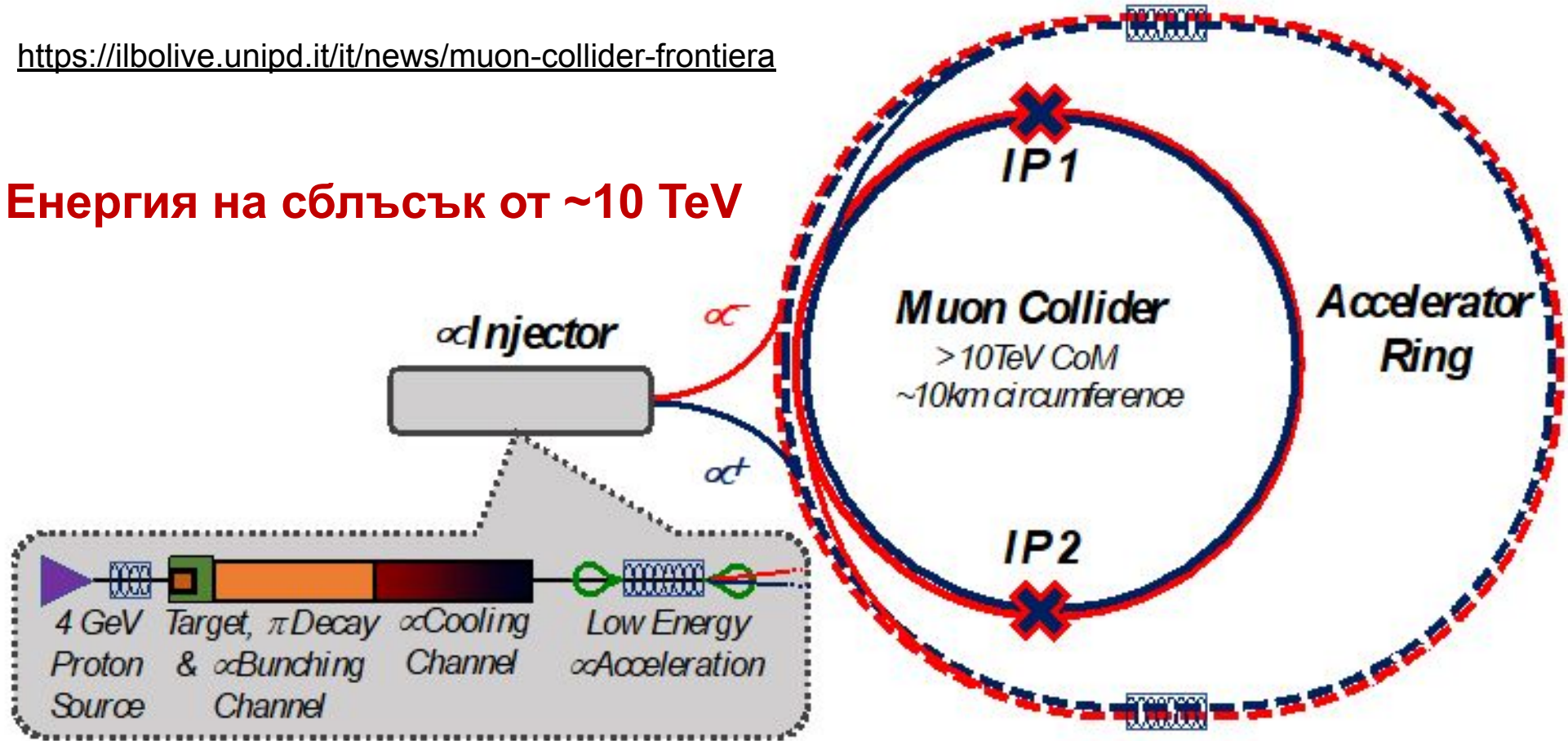
Основната цел е CEPC да се използва като фабрика за Хигс бозони. Предварителният оперативен план „7-2-1“ е да работи първо като фабрика на Хигс в продължение на 7 години и да създаде един милион частици на Хигс или повече, последван от 2 години работа като фабрика Super Z за създаване на един трилион Z бозони и след това 1 година като W фабрика за създаване на около 100 милиона W бозони.

Енергия на сблъсък от 240 GeV, 91 GeV и 160 GeV

Muon Collider

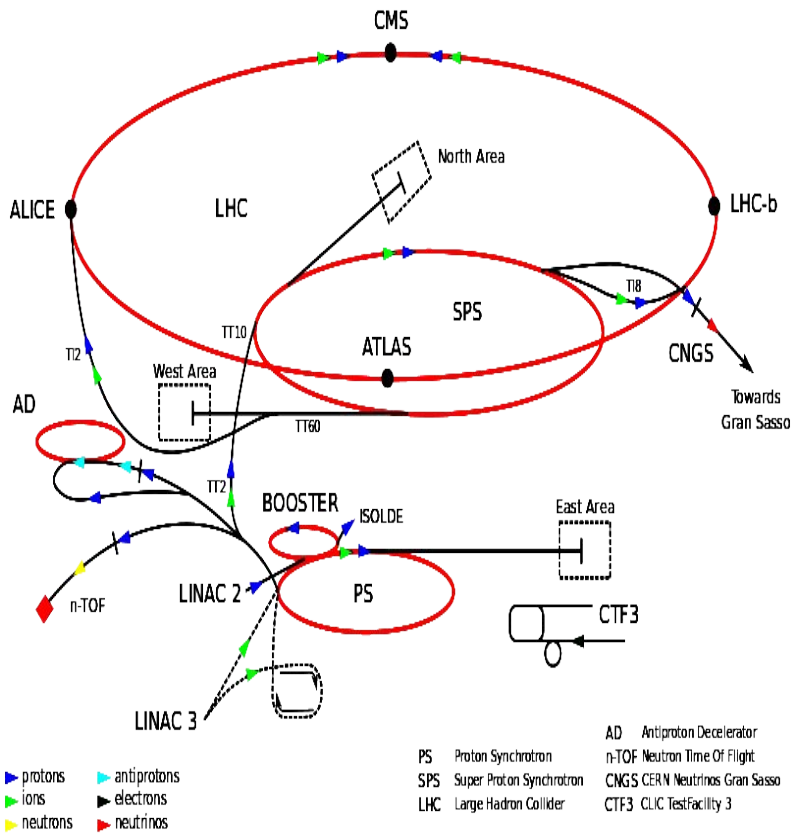
<https://ilbolive.unipd.it/it/news/muon-collider-frontiera>

Енергия на сблъсък от ~ 10 TeV

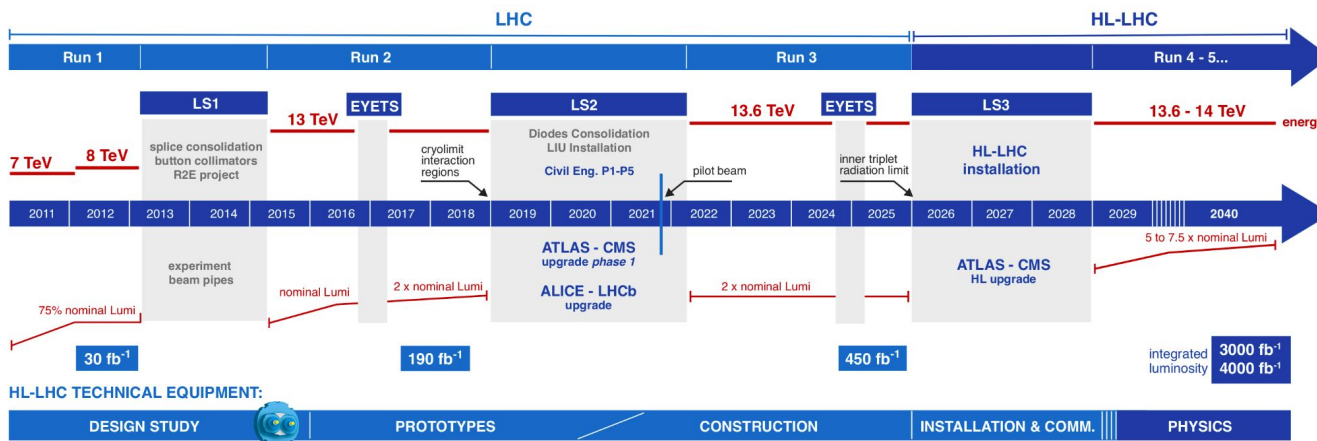


<https://muoncollider.web.cern.ch/welcome-page-muon-collider-website>

Големия адронен колайдер ЛНС и експериментални комплекси



Run2 (2015-2018)
 $E(\text{снопа}) = 6.5 \text{ TeV}$
 $L(\text{peak}) = 2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 $PU(\text{peak}) \approx 80$



Run3 (2022-)
 $E(\text{снопа}) = 6.8 \text{ TeV}$
 $L(\text{peak}) \sim 2.06 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 $PU(\text{peak}) \approx 80$

Светимост и брой взаимодействия/сблъсък (pileup)

Моментна светимост

$[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$

N - брой протони в група(бънч);

k - брой сблъскващи се групи от протони (colliding bunches)

$f_{\text{rev}} = 11.245 \text{ kHz}$ - честота на LHC (revolution frequency)

$\gamma(E=6.5 \text{ TeV})=6927$ Лоренц фактор на ускоряваните

F - редуциращ фактор, ^{протони} отчитащ ъгъла на пресичане на сноповете

β^* - стойност на амплитудната функция β в мястото на пресичане на

сноповете
 $\beta = \pi \sigma / \epsilon$ $[\beta] = [\mu\text{m}]$

ϵ - емитанс на снопа

$[\epsilon] = [\mu\text{m} \cdot \text{rad}]$

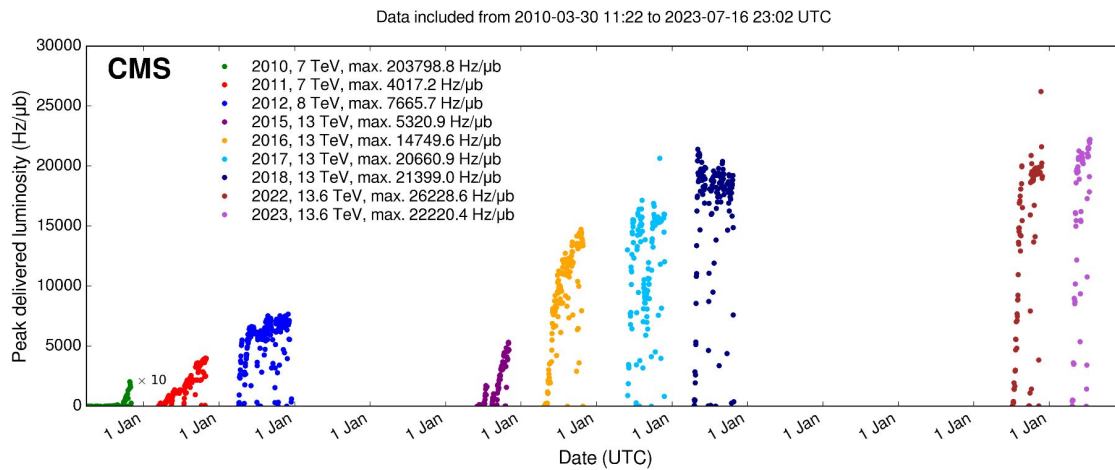
Интегрална светимост $[\text{cm}^{-2}]$ или

$[\text{b}^{-1}]$
 $N_{\text{process}} = \sigma_{\text{process}} \mathcal{L}$

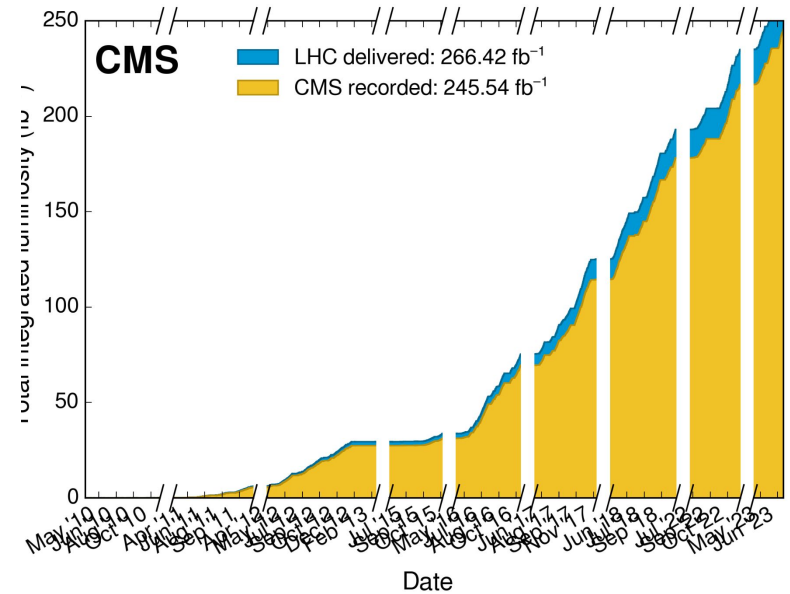
$$\mathcal{L} = \int L dt$$

Pileup - брой взаимодействия при един сблъсък

Интегрална светимост

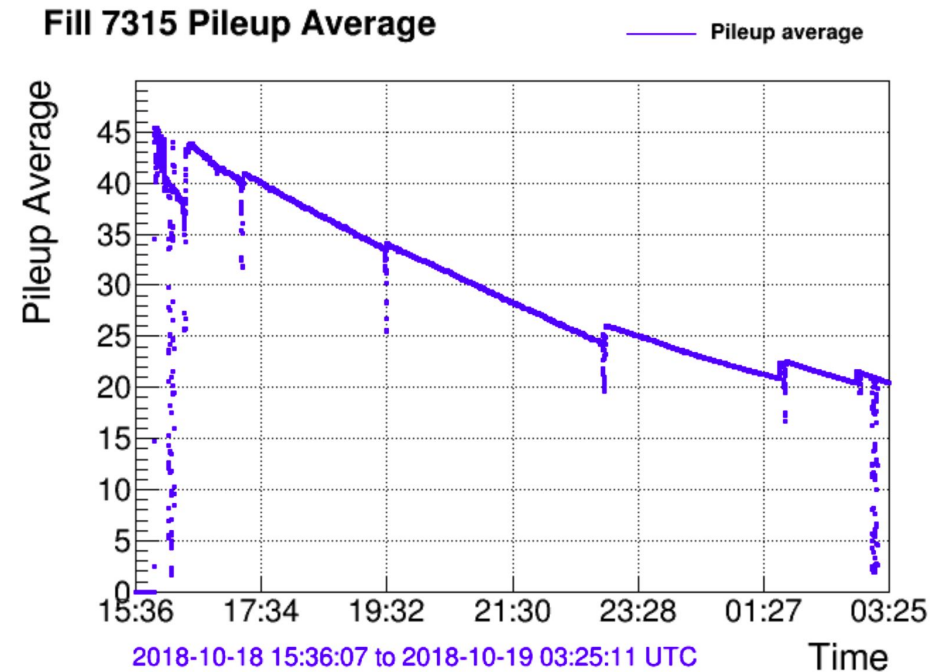
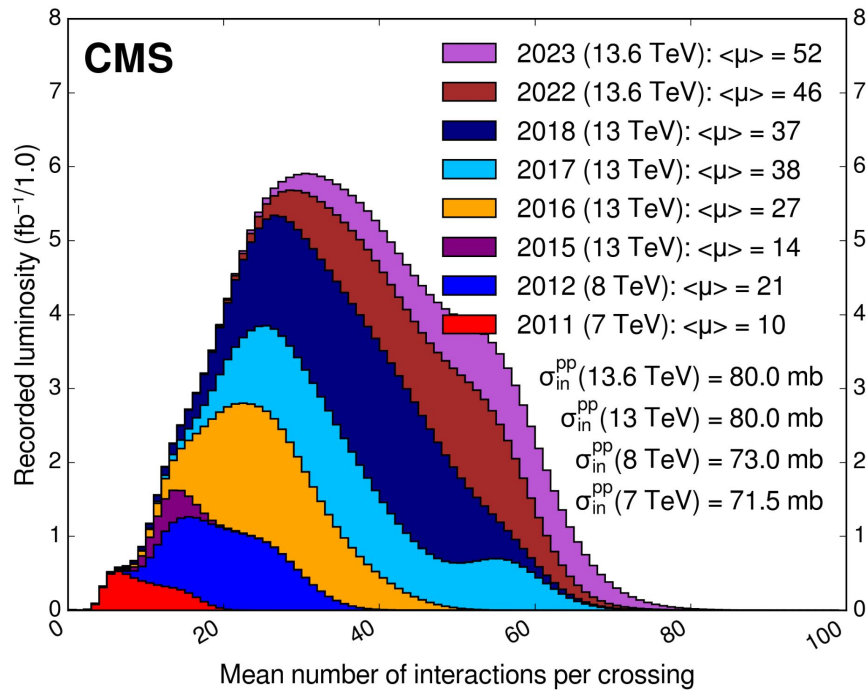


Пикови стойности на доставената моментна светимост през целия период на набор на данни.



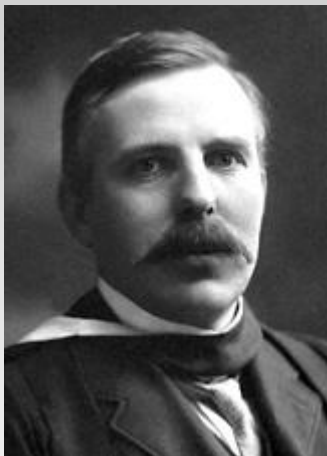
Интегрална светимост записана от CMS за целия период на набор на данни

Брой взаимодействия/сблъсък (pileup)



Брой първични взаимодействия при едно пресичане на сноповете.

Средна стойност на PU според онлайн системата за измерване на светимостта на CMS



Експеримент на Ръдърфорд

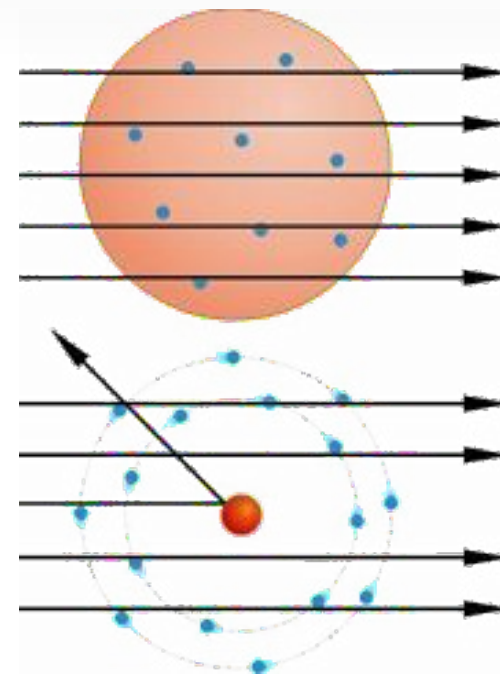
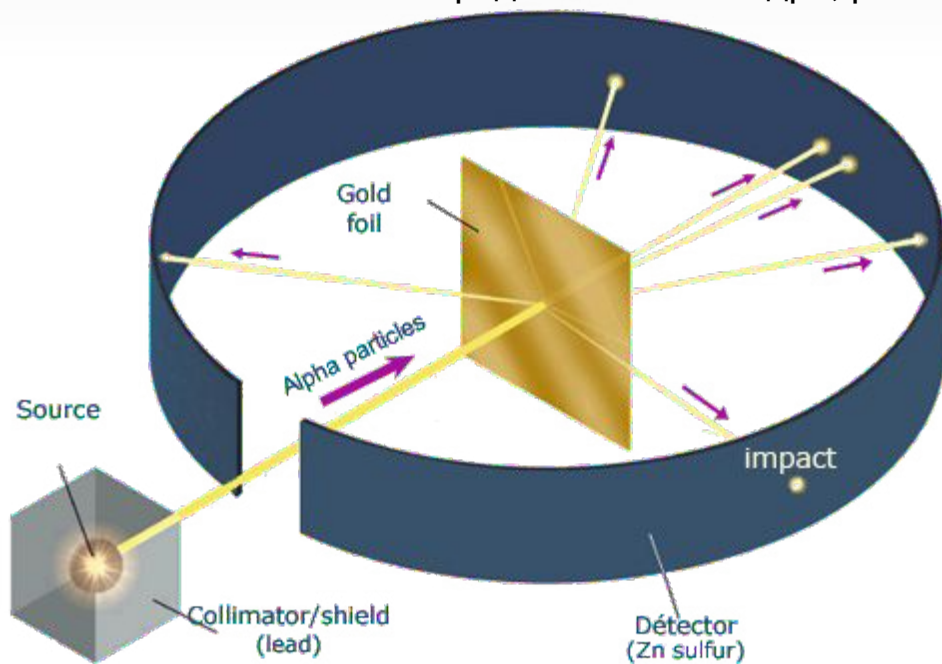
показва, че електрическите заряди в атома не са разпределени равномерно.

Ръдърфорд обстрелва мишена от златно фолио със сноп от алфа частици (положителен електрически заряд).

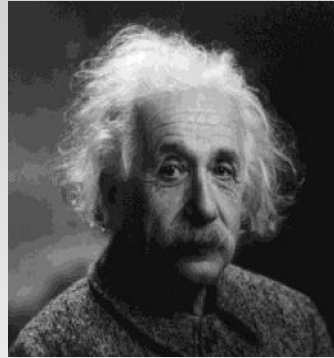
Голяма част от частиците преминават през мишената, но също така, голяма част от частиците биват разсеяни под различни ъгли, а някои от тях са разсеяни обратно назад.

Ако електрическият заряд в атома беше разпределен хомогенно, това би позволило на алфа частиците да преминат без промяна на тяхната посока.

По тази причина Ръдърфорд предполага, че атомът е съставен основно от празно място, като електроните се намират на кръгови орбити около положително заредено масивно ядро, разположено в центъра на атома.



Алберт Айнщайн
(Albert Einstein)
Връзка между енергия и
маса на частиците
 $E = mc^2$



Търсене на нови тежки
частици – **нужда от
високоенергетични
пробни частици**

Луи Дьо Бройл (Louis de Broglie)

Всяка частица има вълнови свойства, като дължината на вълната зависи от импулса на частицата и се дава от формулата на дьо Бройл:

$$\lambda = h/p \approx 2\pi\hbar c/E \approx 2\pi \cdot 200[\text{MeV}\cdot\text{fm}]/E[\text{MeV}]$$

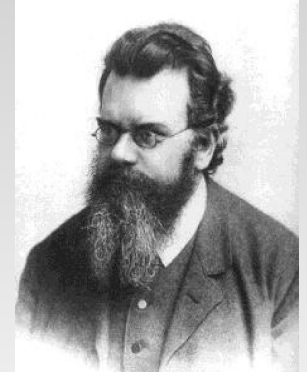
т.е. $\lambda \sim 1/E$

Структурата на наблюдавания обект става видима, ако дължината на вълната на Дьо Бройл е сравнима или е по-малка от радиуса на наблюдавания обект.

Примери:

- Изследване на структурата на ядрата – пробни (сондиращи) частици – електрони с $E \sim 10^2 \text{ MeV}$
- Изследване на структурата на нуклоните – пробни (сондиращи) частици – електрони с $E \sim 10^2 \text{ GeV}$

Лудвиг Болцман
(Ludwig Boltzmann)
Връзка между енергия и
температура.



$$E = kT$$

Изучаване на младата
Вселена – **нужда от
високоенергетични
пробни частици**



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

- Изследване на фундаменталните частици, изграждащи Вселената;
- Изследване на структурата и поведението на материалите и техните свойства
- Източници на синхротронно лъчение;
- Лъчетерапия;
- Производство на изотопи;
- Стерилизация;
-

Класификация според траекторията:

- **Линейни** (с пряко действие)
- **Циклични** – многократно ускоряване по една и съща затворена траектория (**синхротрони**), многократно преминавайки през едни и същи ускоряващи промеждутаци, или по траектория на развиваща се спирала (**циклотрони**).

По тип ускоряващо поле:

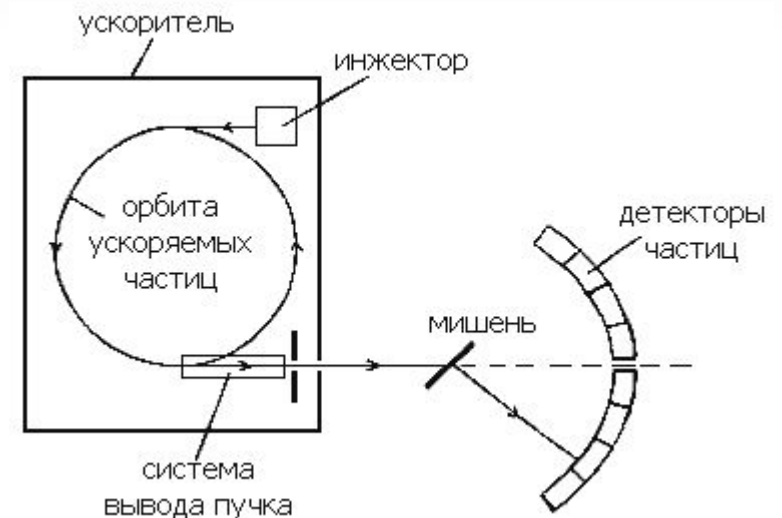
- Ускоряване със статично електростатично поле
- Ускоряване с електричното поле на променлив магнитен поток
- Ускоряване с променливото електрично поле в радиочестотни резонатори

По тип ускорявани частици:

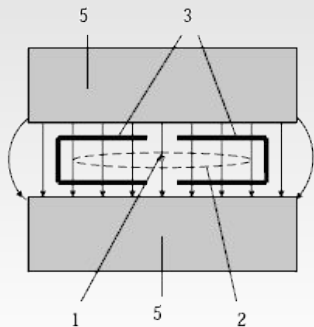
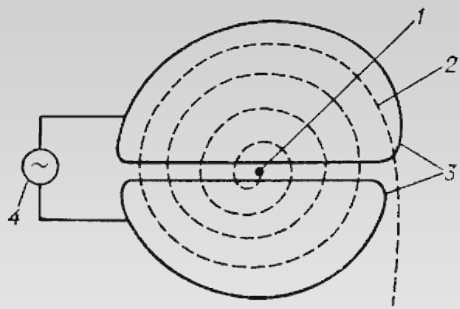
- Ускорители на електрони
- Ускорители на протони и йони

Обща схема на ускорител на частици:

1. Инжектор на частици – подготовка на частиците, които ще се ускоряват;
2. Ускорителна система – увеличаване на енергията на частиците;
3. Система за извеждане на ускорения сноп към експерименталната установка.



Циклотрон



1. Източник на тежки заредени частици (протони, йони);
2. Орбита на ускоряваната частица;
3. Ускоряващи електроди (дуанти);
4. Генератор на ускоряващото поле;
5. Електромагнит;

Стрелките показват посоката на магнитното поле

Общ принцип на действие:

- частици със заряд Ze и маса m ;
- движение в постоянно магнитно поле B , насочено перпендикулярно на оста на движение на частиците;
- Радиус R на траекторията на частиците, движещите се със скорост v .

$$R = mv\gamma/ZeB$$

За нерелативистки частици γ е ~ 1 и **циклотронната честота f** не зависи от енергията на частиците:

$$f = v/2\pi R = ZeB/2\pi m$$

Ускоряване на частиците в процепите между дуантите;
Енергията на частиците и радиуса на орбитата нарастват;
Частицата достига скорост: $v = ZeBR/m$
и енергия: $E = mv^2/2 = (Ze)^2 B^2 R^2 / (2m)$

Предимства - Постоянен режим на ускоряване;

Недостатък – Ограничение по максимална енергия (20-25 MeV), дори малки поправки към релативисткия фактор водят до влошаване на синхронизацията между времето в което частиците се появяват между процепите и честотата на променливото напрежение.



Първият работещ модел на циклотрон (1930г.), създаден от Лоуренс (Ernest Lawrence)
 $E_{max} = 1\text{MeV}$

Фазотрон (Синхроциклотрон)

- Магнитното поле е еднородно и постоянно във времето;
- **Регулиране на честотата на приложеното напрежение да съответства на намаляването на честотата на въртене на частиците с увеличаването на радиуса;**
- 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

- **Магнитното поле нараства с радиуса**
- Изисква азимутални корекции на магнитното поле, за да задържи частиците в техните орбити;

Релативистки радиус: $r = \gamma m_0 v / ZeB$

Релативистска честота: $f = f_0 / \gamma$

Ако магнитното поле е пропорционално на лоренцовия фактор: $B = \gamma B_0$

Тогава радиусът на траекторията: $r = m_0 v / qB_0$ ще зависи само от скоростта v .

Синхротрон

Слаба фокусировка:

Едновременно увеличаване на магнитното поле и честотата;

Фокусиране с диполни лещи;

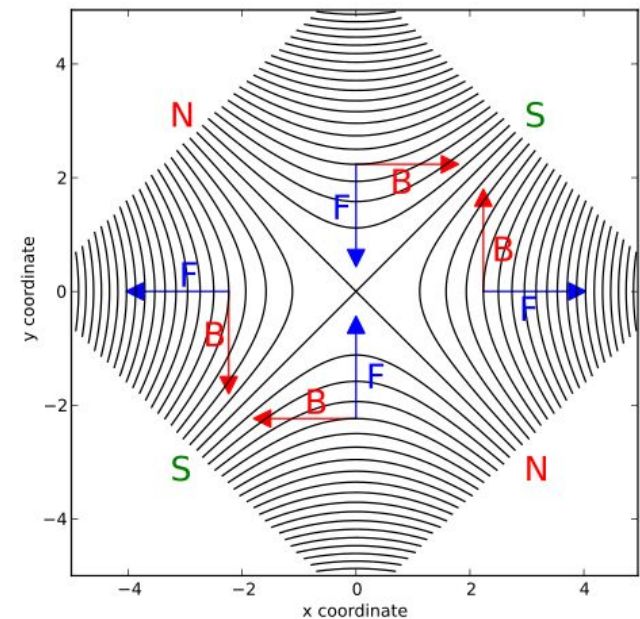
Увеличаване на напречните размери на снопа с нарастване на енергията, т.е. трябва да нарастват също и размерите на вакумната камера и магнитните елементи.

Силна фокусировка:

Ускоряваните частици преминават през редуващи се периоди на фокусиране на хоризонталната и вертикалната компонента на снопа

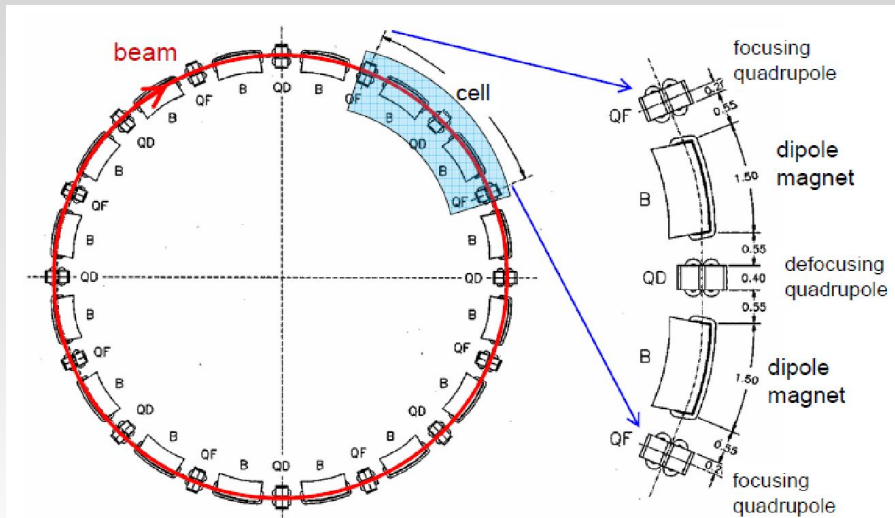
като се съхранява глобалната устойчивост на напречните размери на снопа.

Фокусиране с квадруполни лещи.



By Andre.holzner - python/matplotlib, CC BY-SA 3.0,
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=37948467>

Синхротрон със силна фокусировка

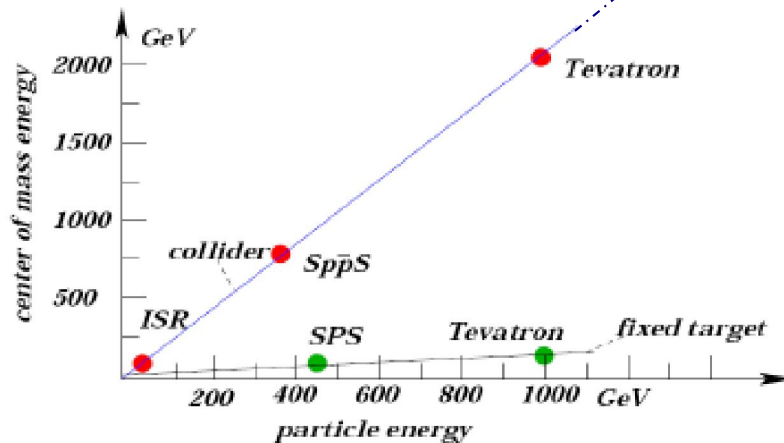


FODO клетки (или секции) – фокусиране и дефокусиране с квадруполни лещи.

F – фокусира вертикално,
D – фокусира хоризонтално;

LHC 13 TeV

Ускорители на насрещни снопове - Колайдери



Сблъскването на два снопа частици е много по ефективно по отношение на енергията на взаимодействие от облъчване на неподвижна мишена. Енергия на взаимодействията в система център на масите е:

$$\sqrt{s} = 2 E_{\text{сноп}}$$