

Въведение във физиката на
елементарните частици,
въведение в ускорителите и
тяхното бъдеще
II-ва част

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

Откриването на електрона

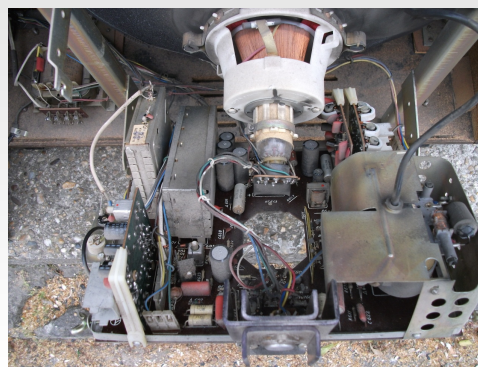
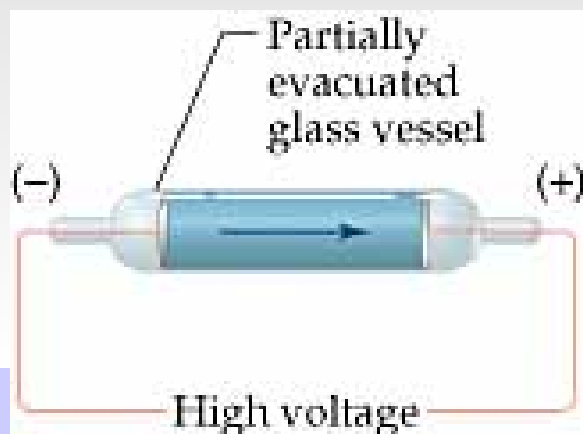
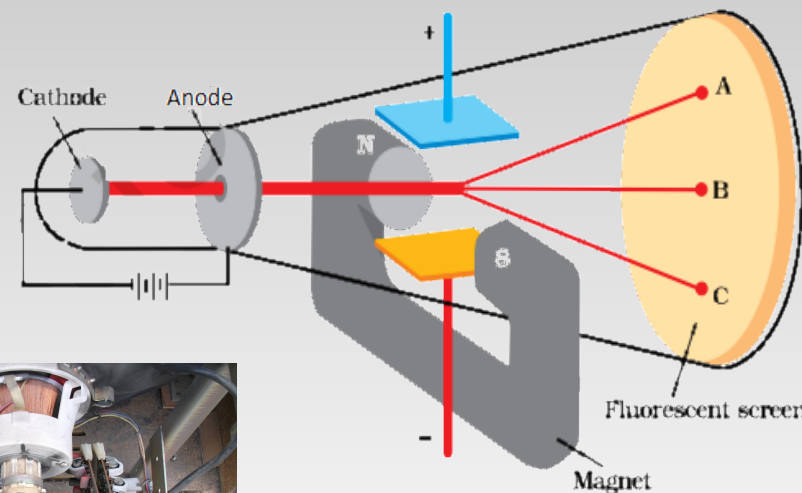
Изучаване на катодните лъчи

Експеримент на Томсън (Thomson) – 1897

отношение: $e/m - 1.76 \cdot 10^8 \text{ C/g}$

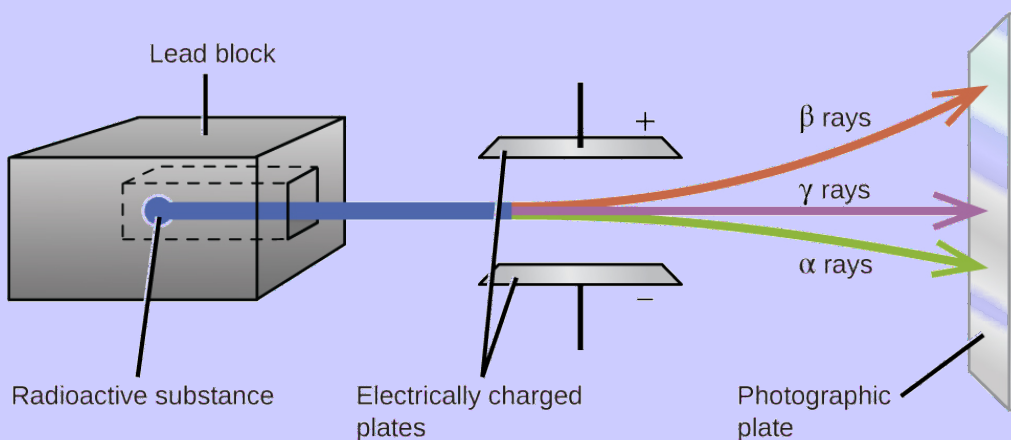
Р. Миликън (Millikan) – 1909

ел. заряд на електрона – $1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$



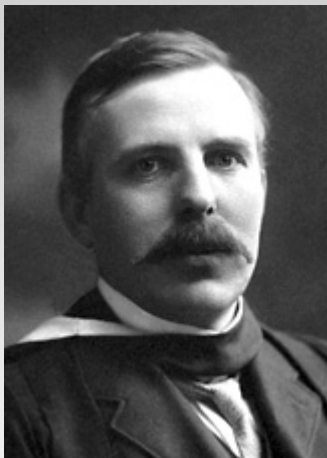
Откриване на радиоактивността

Анри Бекерел (H. Becquerel), Мария и Пиер Кюри (M. Curie, P. Curie), Ърнест Ръдърфорд (Rutherford) ...



Различните видове радиация се различават по тяхната реакция на приложено електрично поле. Траекториите на α и β частиците се закривяват в присъствието на електрично поле, но в различни посоки.

γ радиацията не се влияе от електричните полета.



Експеримент на Ръдърфорд

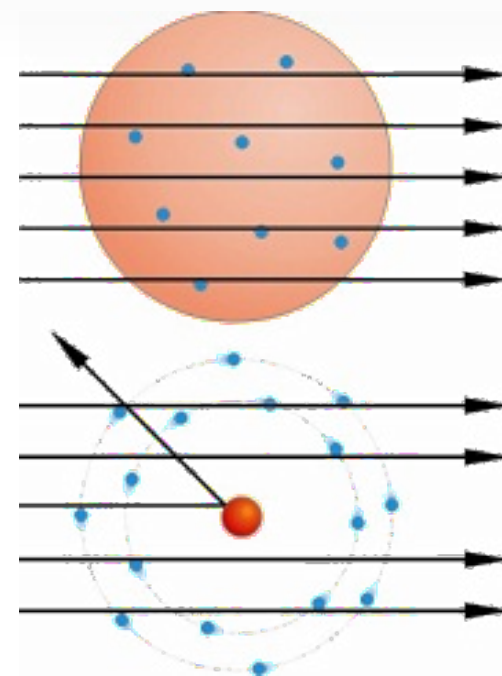
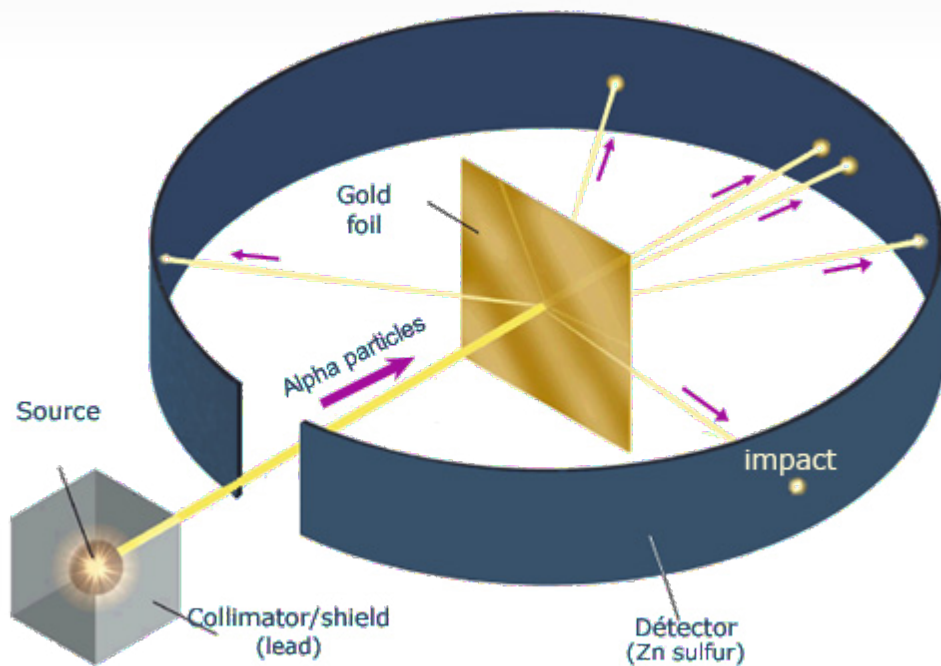
показва, че електрическите заряди в атома не са разпределени равномерно.

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.

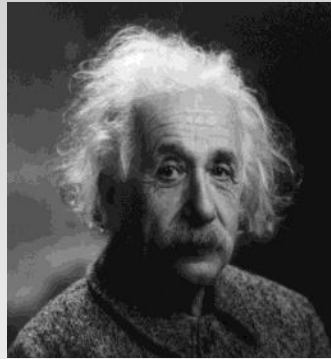
По тази причина Ръдърфорд предполага, че атомът е съставен основно от празно място, като електроните се намират на кръгови орбити около положително заредено масивно ядро, разположено в центъра на атома.



Алберт Айнщайн
(Albert Einstein)

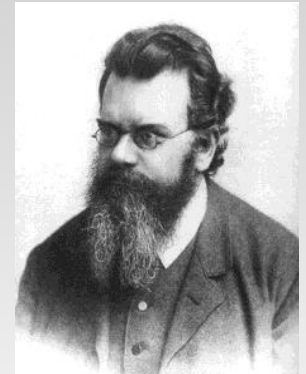
Връзка между енергия и
маса на частиците

$$E = mc^2$$



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

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 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 $E \sim 10^2 \text{ GeV}$

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:

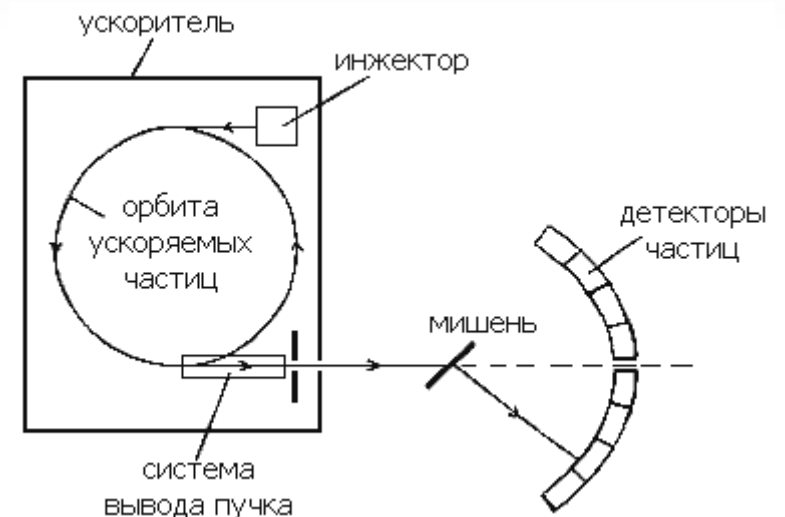
- Ускоряване със статично електростатично поле
- Ускоряване с електричното поле на променлив магнитен поток
- Ускоряване с променливото електрично поле в радиочестотни резонатори

По тип ускорявани частици:

- Ускорители на електрони
- Ускорители на протони и йони

Обща схема на ускорител на частици:

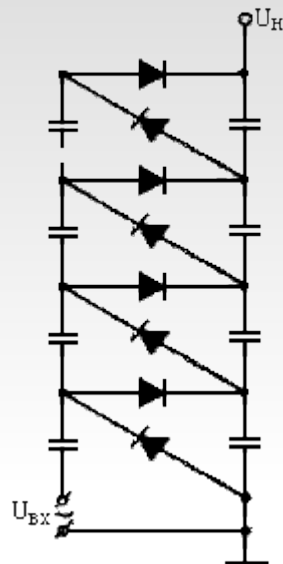
1. Инжектор на частици – подготовка на частиците, които ще се ускоряват;
2. Ускорителна система – увеличаване на енергията на частиците;
3. Система за извеждане на ускорения сноп към експерименталната установка.



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 в 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;

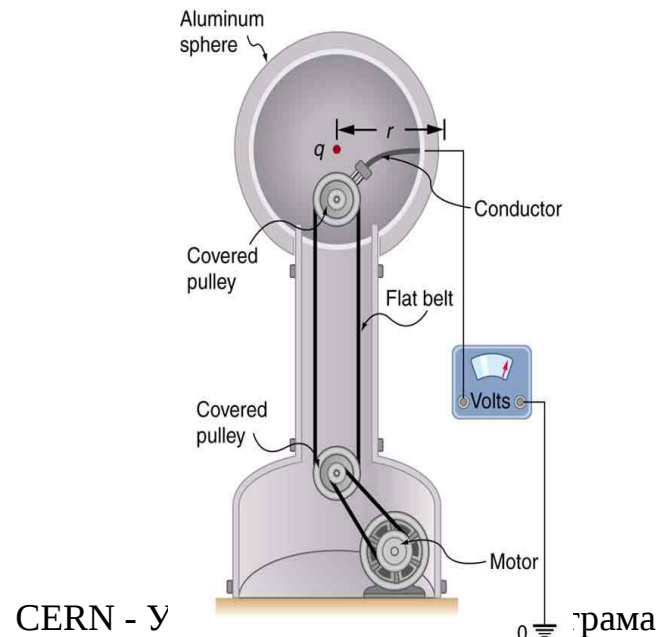
Максимална енергия $\sim 24 \text{ MeV}$, ограничение от коронен разряд

Тандем генератор: ускорява отрицателни йони, които се презареждат и като положителни йони отново се ускоряват;

Приложение в ядрената физика, медицината и др.

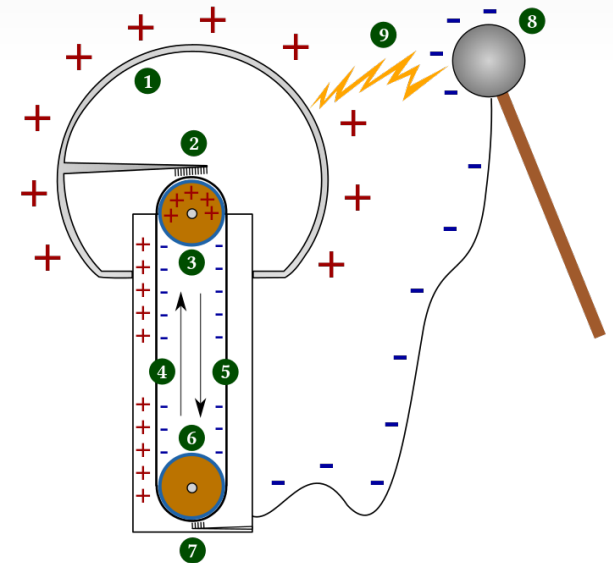


3. Октомври



CERN - У

Van de Graaff Generator



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33070240>

Линеен ускорител

Идея: Изинг (Gustav Ising) (1924) ,
Реализация: Видерое (Rolf Wideroe) (1927) ,
50 keV, Na, K, 25 KV, 1 MHz



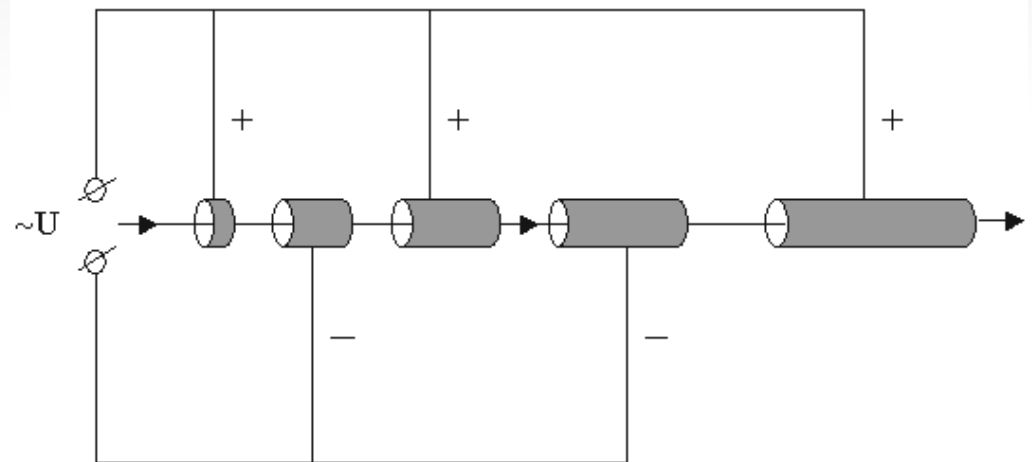
Rolf Wideroe

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

Дължина на n-тата дрейфова тръба l_n ,
скорост на частицата v_n и честота на
ускоряващото поле f ;

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

Увеличаване на $v_n \rightarrow$ увеличаване на l_n



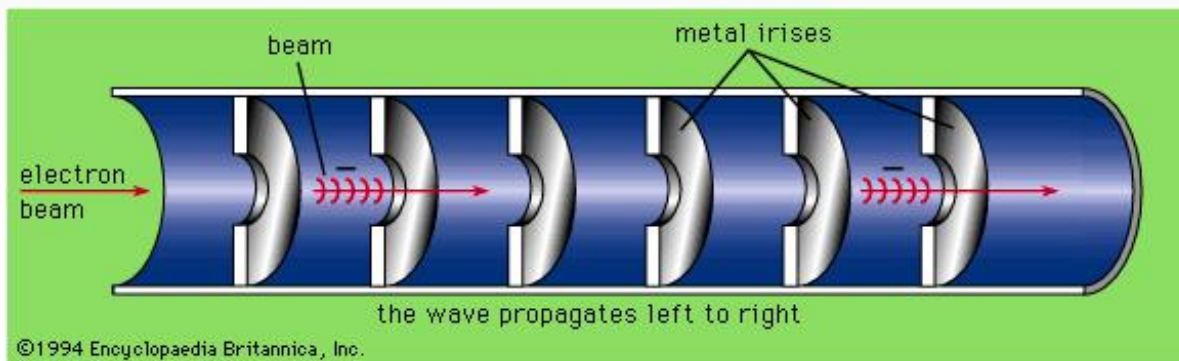
След преминаване на n ускорителни участъка, частицата достига кинетична енергия:

$$T_n = nZeU$$

В нерелативистко приближение дължината на дрейфовата тръба нараства като \sqrt{n} .
При достигане на релативистка стойност дължината на тръбата остава постоянна.

Линеен ускорител - електрони

- Евакуирани тръби, служат като вълновод;
- Генератор на ЕМ поле с честота около 3000MHz (микровълнови обхват) – клистрон;
- 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;
- Порциите електрони се инжектират с енергии от порядъка на няколко десетки KeV (т.е. скорост около половината на скоростта на светлината).
- По време на първата част от ускорението, електроните са принудени да се групират в бънчове, които след това се ускоряват до скорост близка до тази на светлината.
- Впоследствие, електроните се движат с гребена на електромагнитна вълна.



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

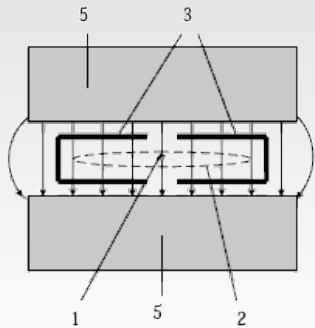
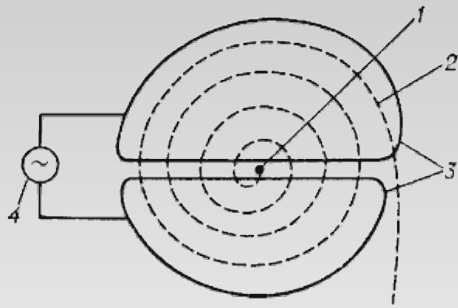


Електрони, по-бавни от вълната

Доближаване до светлинна скорост, нарастване на масата на електроните

стабилен бънч 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 оосиката на движение на частиците;
- Радиус R на траекторията на частиците, движещите се със скорост v .

$$R = mv\gamma / ZeB$$

За нерелативистки частици $\gamma \approx 1$ 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 промени на магнитното поле, за да задържи частиците в техните орбити;
- AVF (azimuthal varying field) cyclotron

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

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;

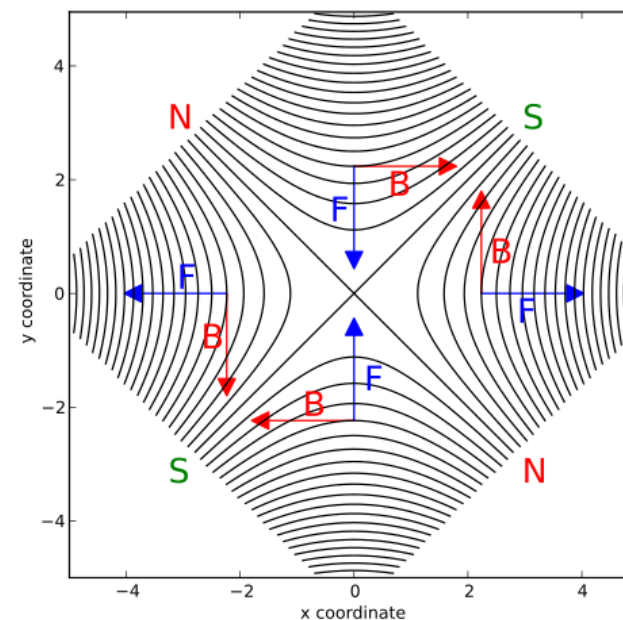
Фокусиране с диполни лещи;

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:

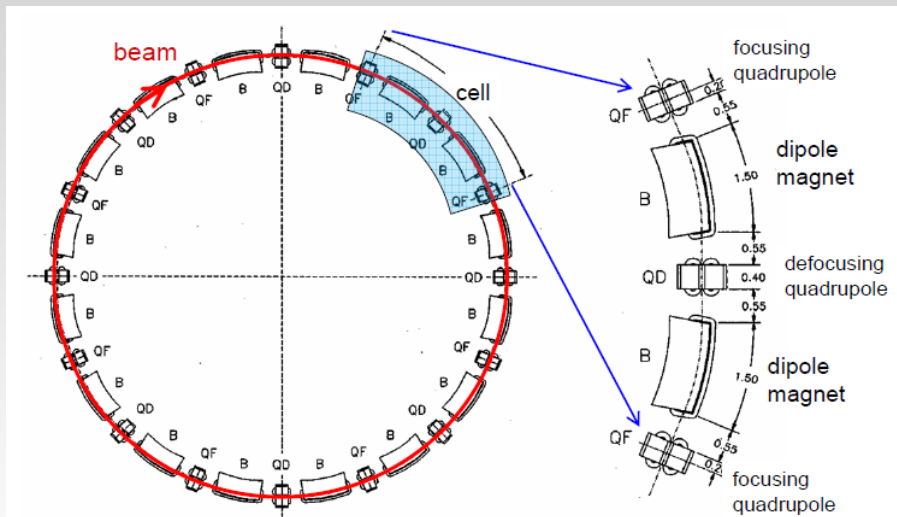
Ускоряваните частици преминават през редуващи се периоди на фокусиране на хоризонталната и вертикалната компонента на снопа, като се съхранява глобалната устойчивост на напречните размери на снопа.

Фокусиране с квадрополни лещи.



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

Синхротрон със силна фокусировка

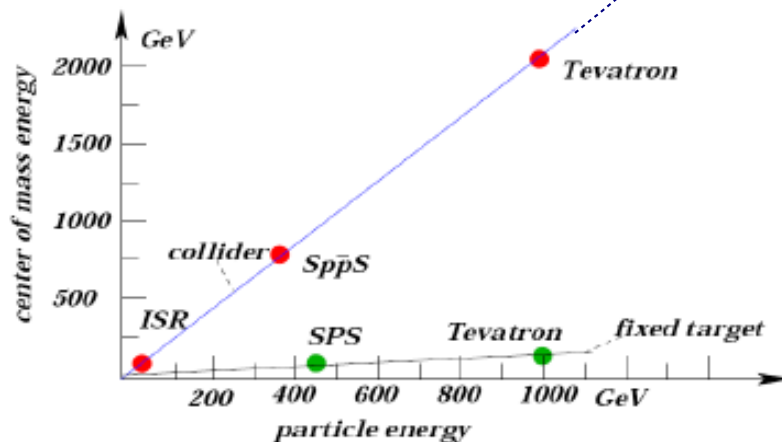


FODO клетки (или секции) – фокусиране и дефокусиране с квадрополни лещи.

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:

$$\sqrt{s} = 2 E_{\text{сноп}}$$

Големия адронен колайдер LHC

<http://home.cern/topics/large-hadron-collider>



Големият адронен колайдер е построен на територията на Швейцария и Франция. Разположен е на около 100 м дълбочина. Ускоряването на сноповете се постига чрез система от ускорители, като на всяко ниво протоните се ускоряват до все по-високи енергии.

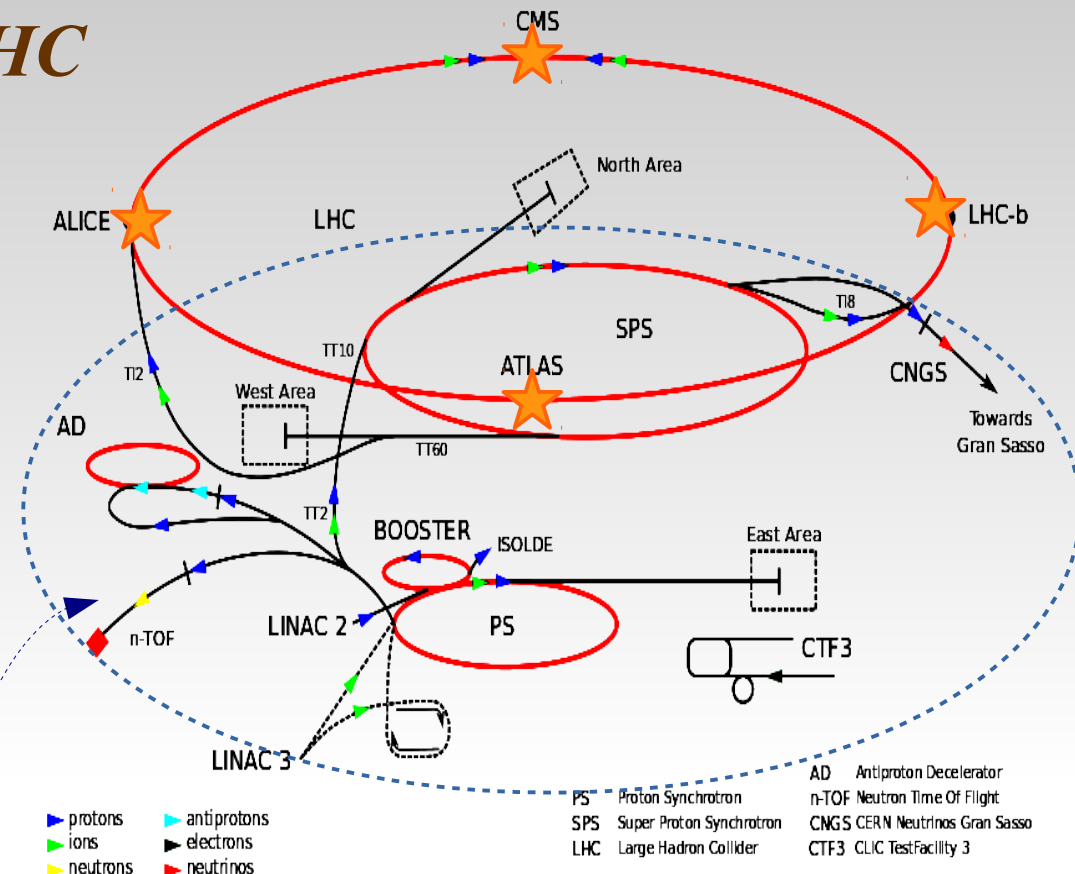
Например: от ускорителя SPS протоните достигат енергия от 450 GeV и се инжектират в LHC, където се ускоряват до енергии от 6500 GeV (Гига електрон волта).

На четири места по контура на LHC са обособени точките, където се пресичат сноповете и се осъществяват колизиите.

Около тези точки ★ са разположени основните детекторни комплекси – CMS, ATLAS, LHCb и ALICE

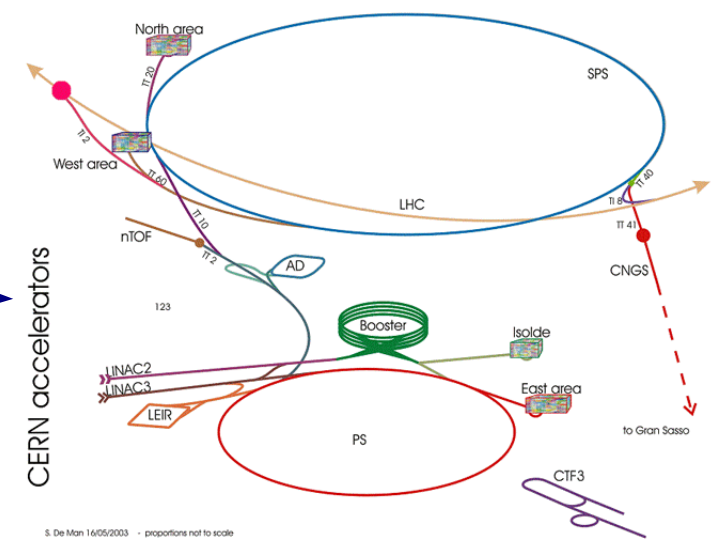
3.Октомври

CERN - Учителска инженерна прогн.



- ▶ protons
- ▶ ions
- ▶ neutrons
- ▶ antiprotons
- ▶ electrons
- ▶ neutrinos

- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider
- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso
- CTF3 CLIC Test Facility 3



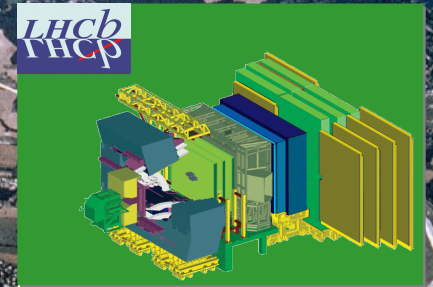
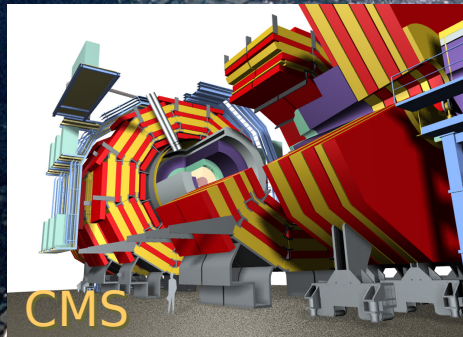
S. De Man 16/05/2003 - proportions not to scale

ЦЕРН

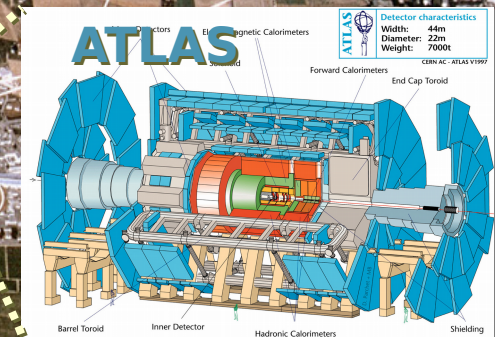
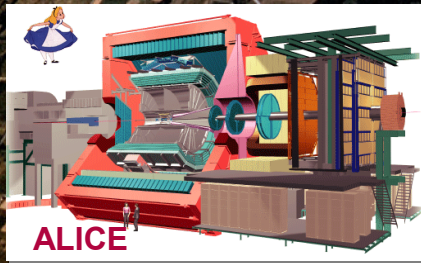
Нова ера във фундаменталните изследвания

Пускането на (LHC) през 2008 – най-големият и наистина глобален проект в човешката история досега

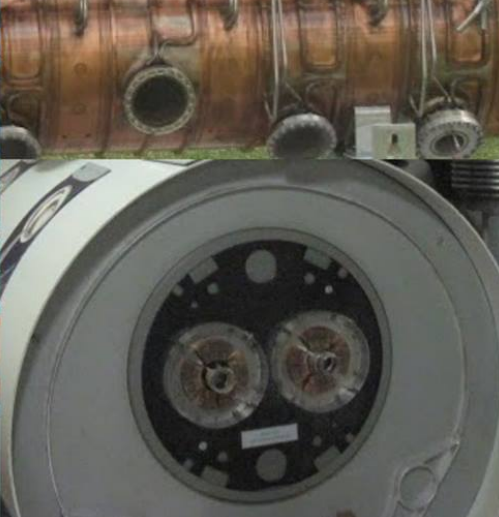
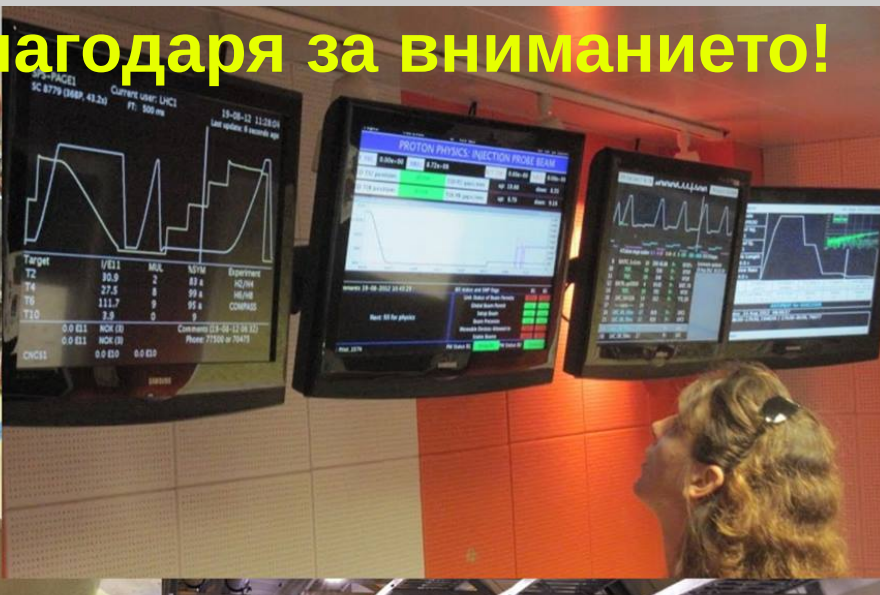
Ключов момент за физиката на елементарните частици



Изучаване на нови граници на енергията
протон-протон сблъсъци $E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$ ($14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$)
Олово-олово сблъсъци: $E/\text{nucleon} = 2.76 \text{ TeV/u}$



Благодаря за вниманието!



Backup Slides

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

