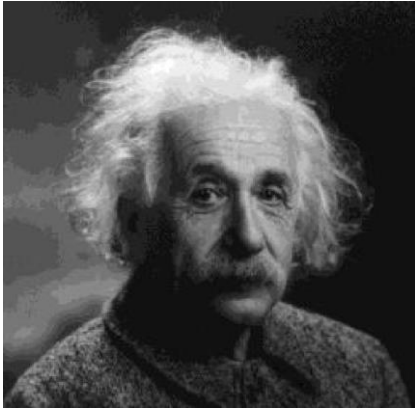


# Въведение в ускорителите и тяхното бъдеще

**Мариана Шопова**

*ИЯИЯЕ, Българска академия на науките  
Пловдивски Университет „Паисий Хилендарски“*

# 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**

# Връзка експеримент–енергия



Луи Дьо Броил  
(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.  $\lambda \sim 1/E$

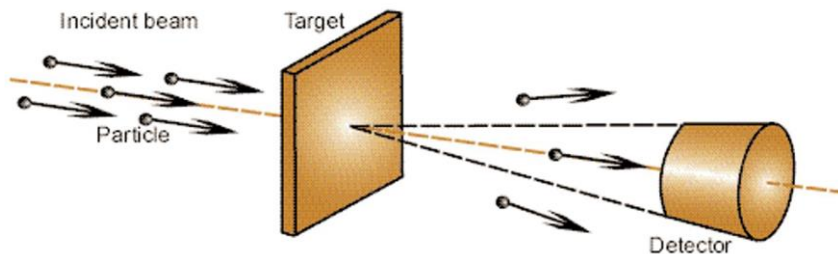
**Структурата на наблюдавания обект става видима, ако дължината на вълната на Дьо Бройл е сравнима или е по-малка от радиуса на наблюдавания обект.**

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

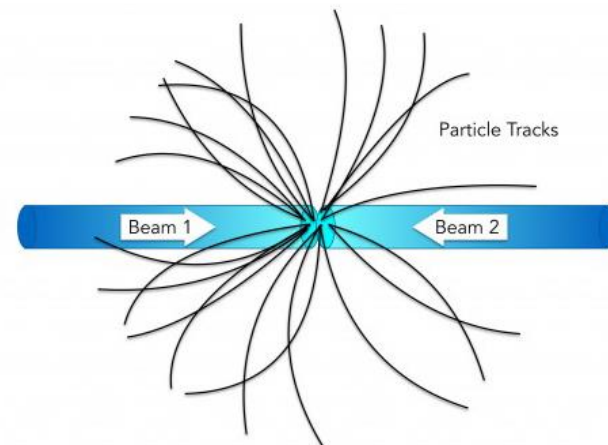
# Експерименти във физиката на елементарните частици

## Фиксирана мишена



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

## Насрещни снопове



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

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

Лоренцова сила

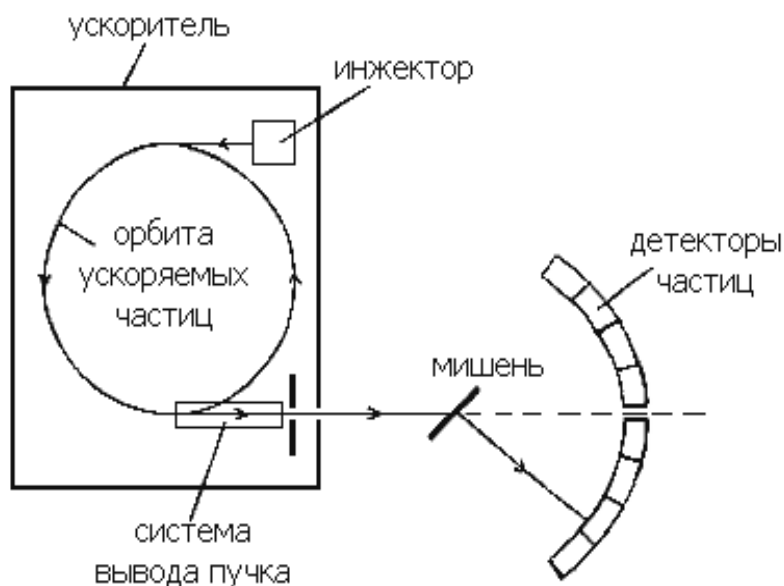
$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

*Electric force*                      *Magnetic force*

# Ускорители на заредени 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;
- .....



**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 снопок към експерименталната установка.

# Ускорители на заредени частици

## 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:

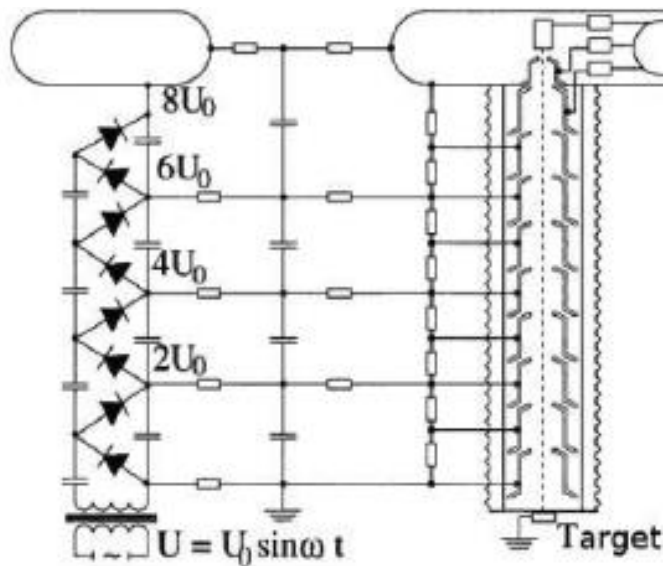
- Ускорители на електрони
- Ускорители на протони и йони

# Каскаден генератор на Кокрофт-Уолтън

Cockroft , Walton (1932), предложен 1951



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



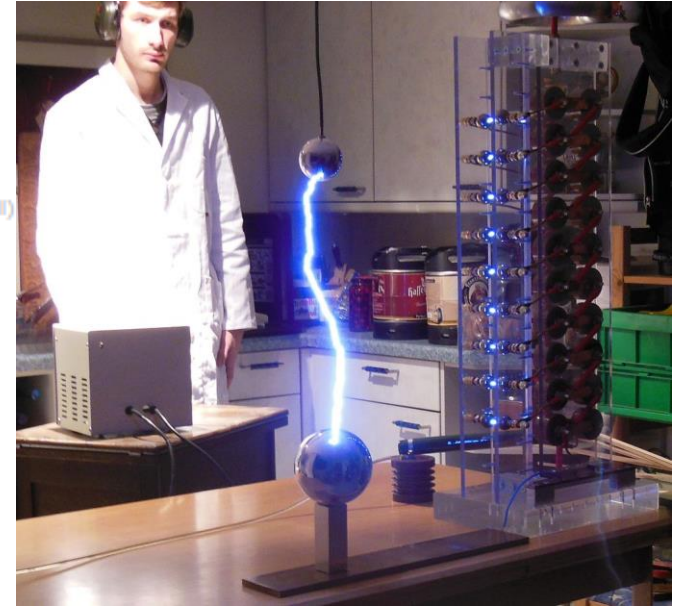
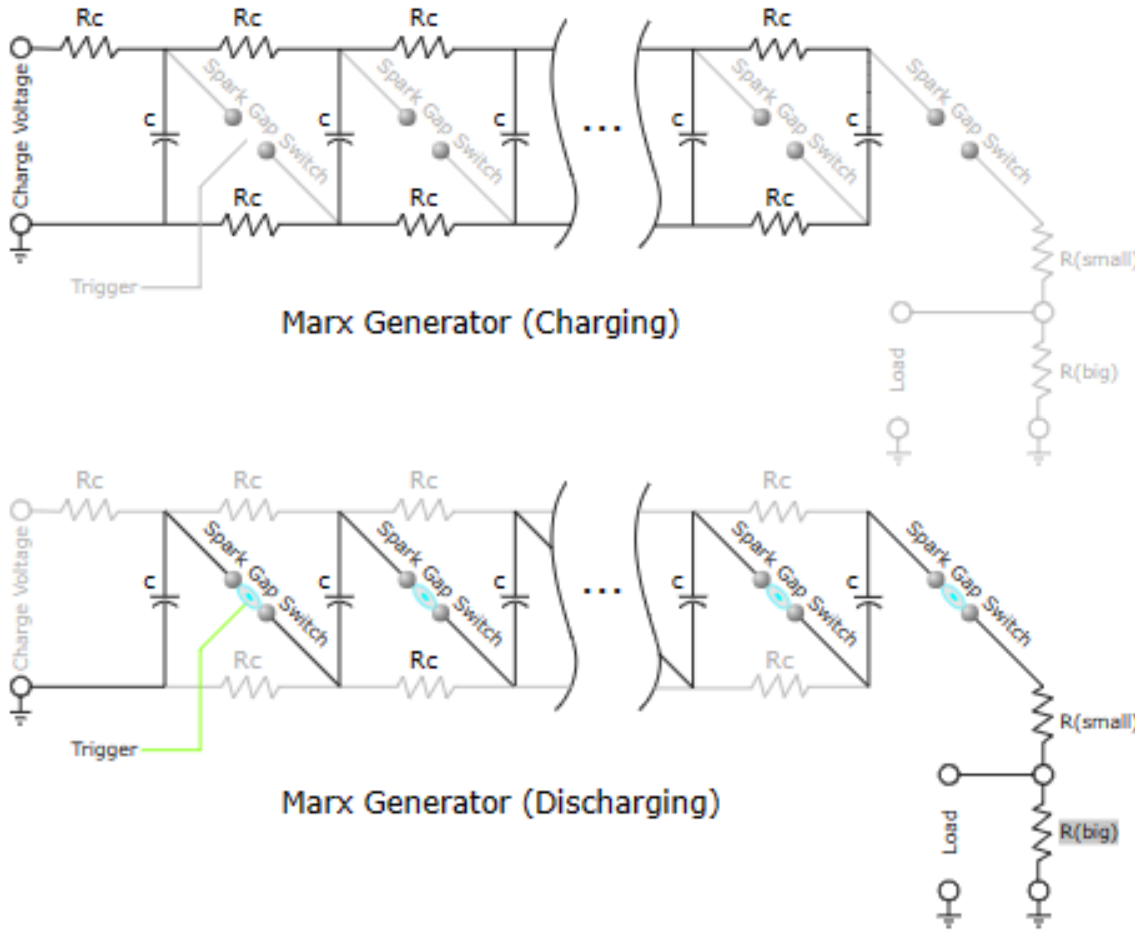
Електрическа схема за умножаване на напрежението (каскада), състояща се от кондензатори и диоди.

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 Маркс



Кратки импулси –  
от порядъка на  $\mu\text{s}$ .

Големи токове.

Максималното достигна напрежение през 1932 е около 6 MV.



# Генератор на Ван де Грааф

## Електростатичен генератор

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

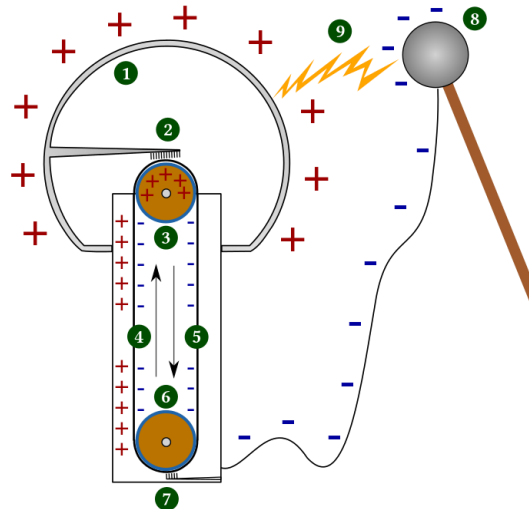
**Предимство** – непрекъснато действие;  
**Максимална енергия  $\sim 24 \text{ MeV}$ ,  
ограничение от коронен разряд**

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

Приложение в ядрената физика, медицината и др.

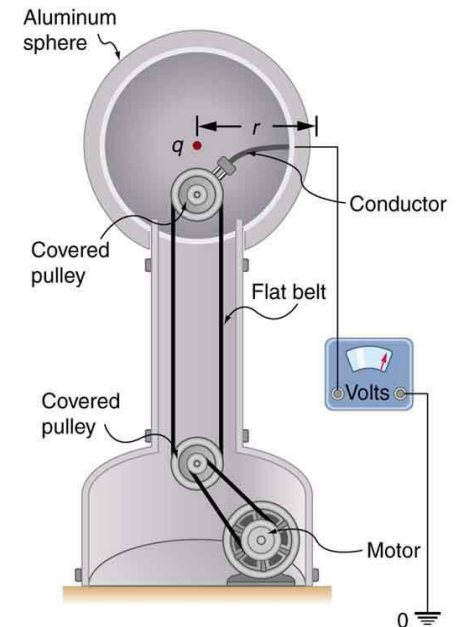


## Van de Graaff Generator



1. hollow metal sphere
2. upper electrode
3. upper roller (for example an acrylic glass)
4. side of the belt with positive charges
5. opposite side of belt, with negative charges
6. lower roller (metal)
7. lower electrode (ground)
8. spherical device with negative charges
9. spark produced by the difference of potentials

## Van de Graaff (1929)

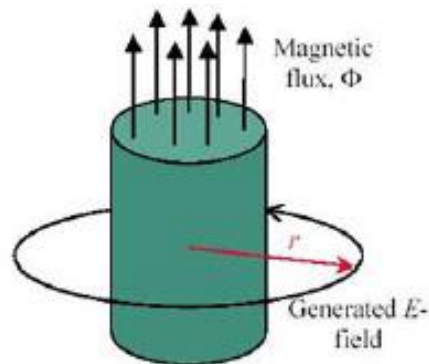


<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33070240>

# Бетатрон

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

- Принцип на трансформатора
- Ускорява през  $\frac{1}{4}$  от периода на синусоидално поле
- Приложение: източник на рентгеново лъчение

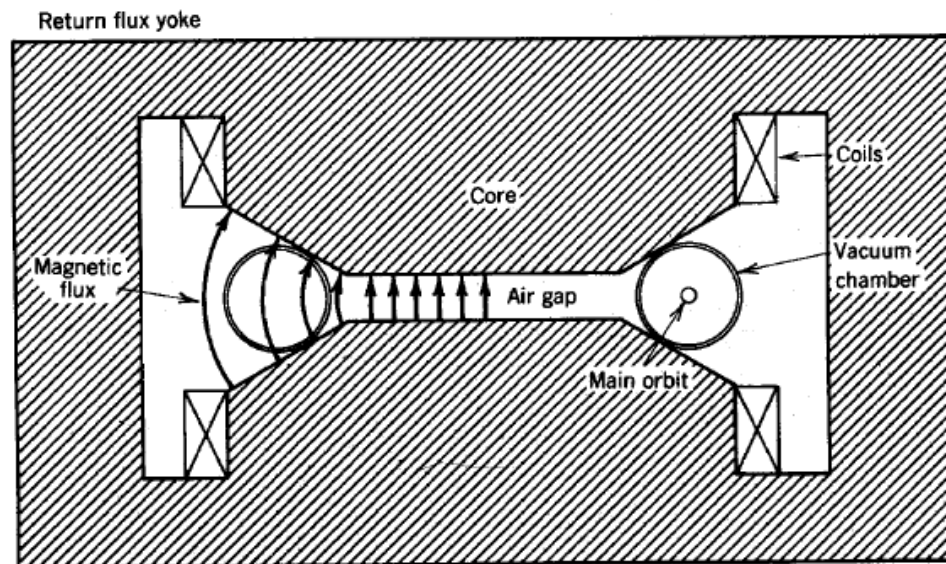


Donald Kerst

## Енергията е ограничена от:

- Магнитно насищане
- Размери
- Синхротронно лъчение

**$E_{\max}=300 \text{ MeV}$**



# Линеен ускорител

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



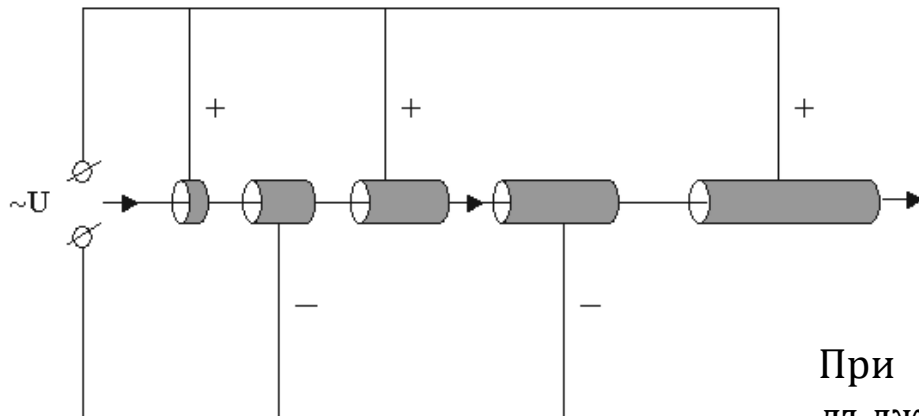
Rolf Wideroe

- 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:

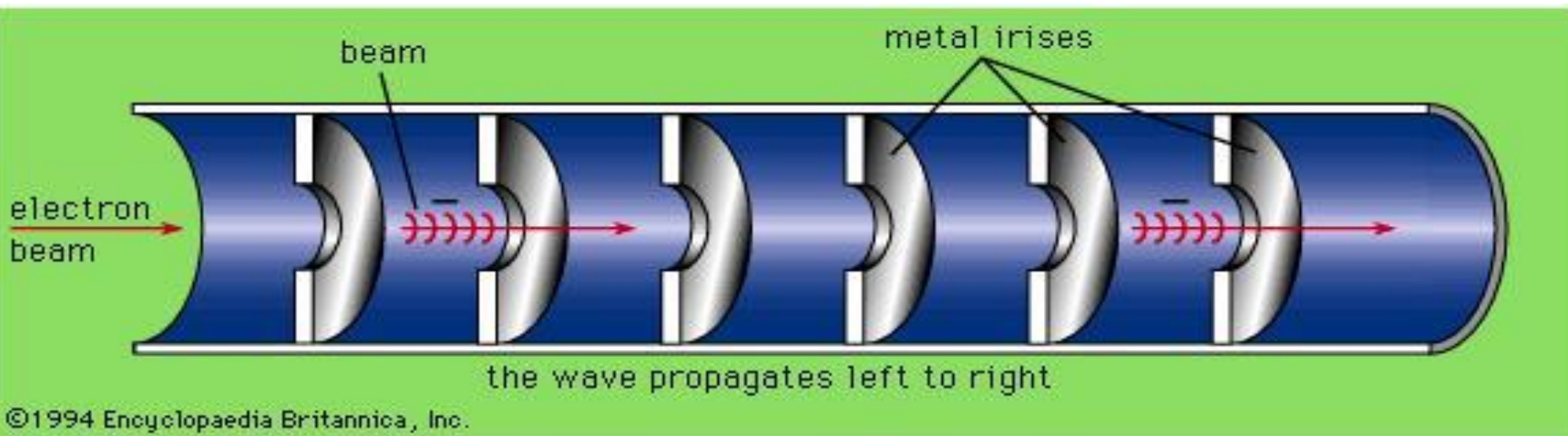
$$T_n = nZeU$$

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).

# Линеен ускорител – електрони

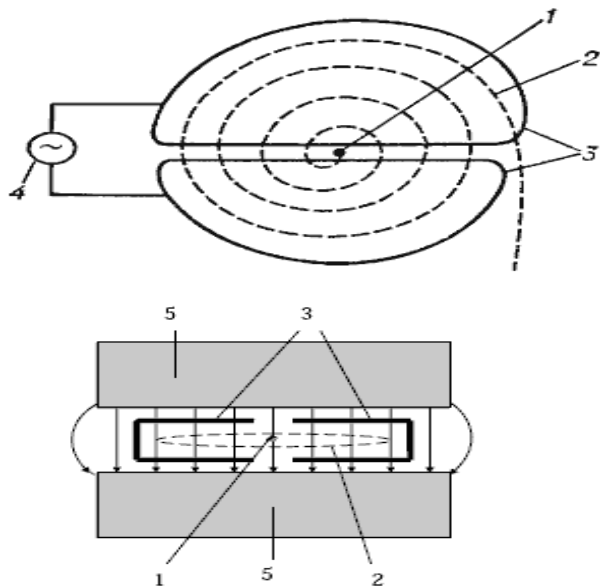


- По време на първата част от ускорението, електроните са принудени да се групират в бънчове, които след това се ускоряват до скорост близка до тази на светлината.
- Впоследствие, електроните се движат с гребена на електромагнитна вълна.



# Циклотрон

Първият работещ модел на циклотрон (1930г.), създаден от Лоуренс (Ernest Lawrence)



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

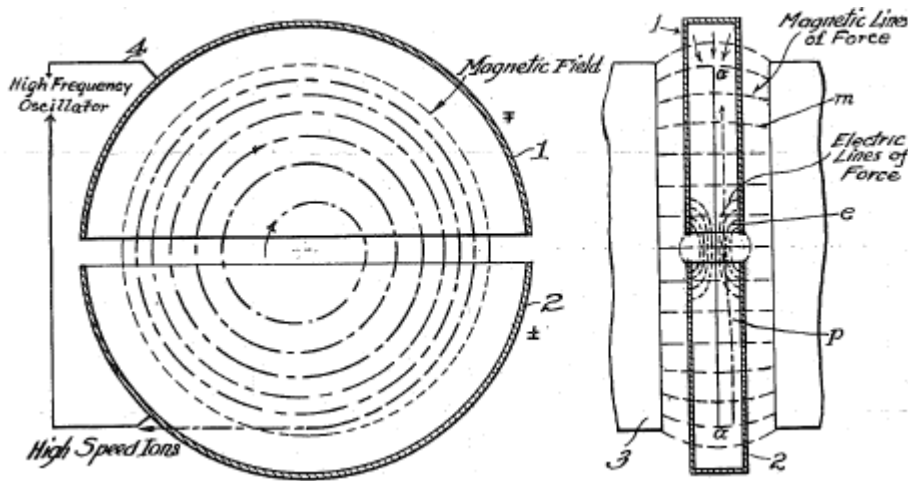


## Общ принцип на действие:

- 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  $v$ .

$$R = mv\gamma / ZeB$$

# Циклотрон



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.



# Фазотрон (Синхроциклотрон)

Veksler и McMillan (1945)  
Berkeley (1946), 195 MeV деутрони/  
390 MeV алфа частици



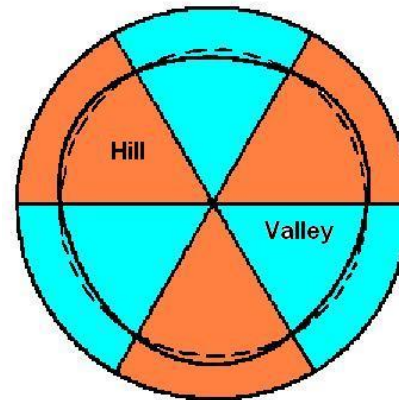
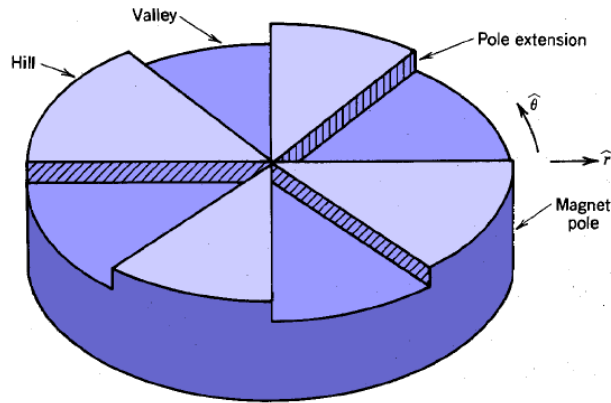
<http://phasotron.jinr.ru/>

- 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

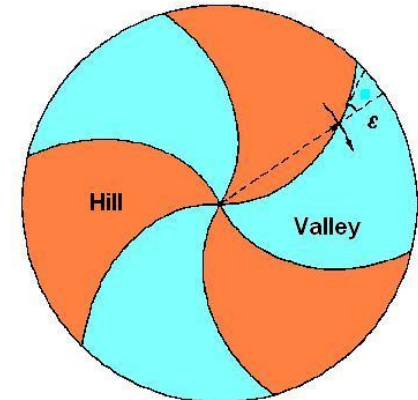
# Изохронен циклотрон

L. H. Thomas (1938), идея

**E<sub>max</sub>: 590 MeV, PSI, Цюрих, 1974**



Thomas sector



Spiral sector

- **Магнитното поле нараства с радиуса**
- Изисква азимутални промени 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  $v$ .



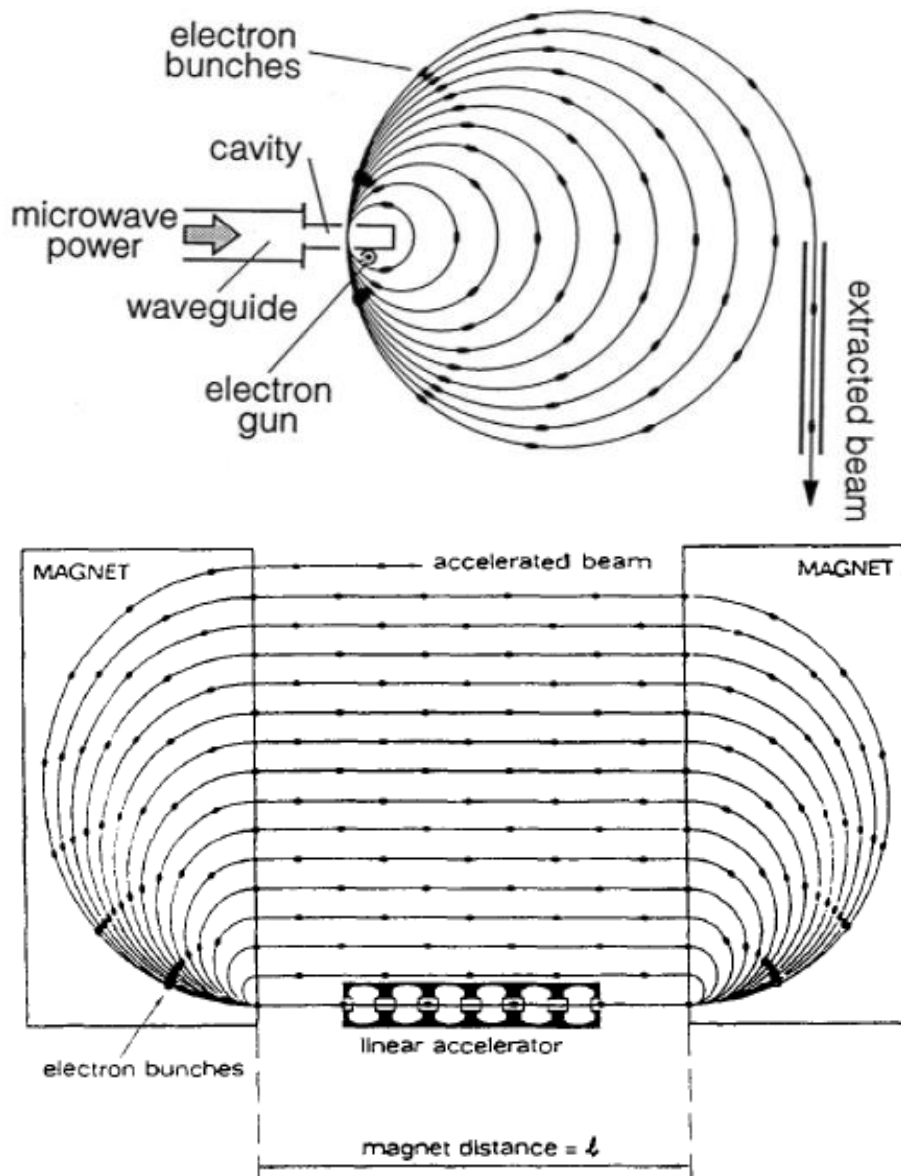
# Микротрон

Veksler (1944)

Ottawa, Kanada, (1947), 4.6 MeV

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

**Emax: 1.6 GeV, Mainz, 2007**



# Синхротрон със слаба фокусировка

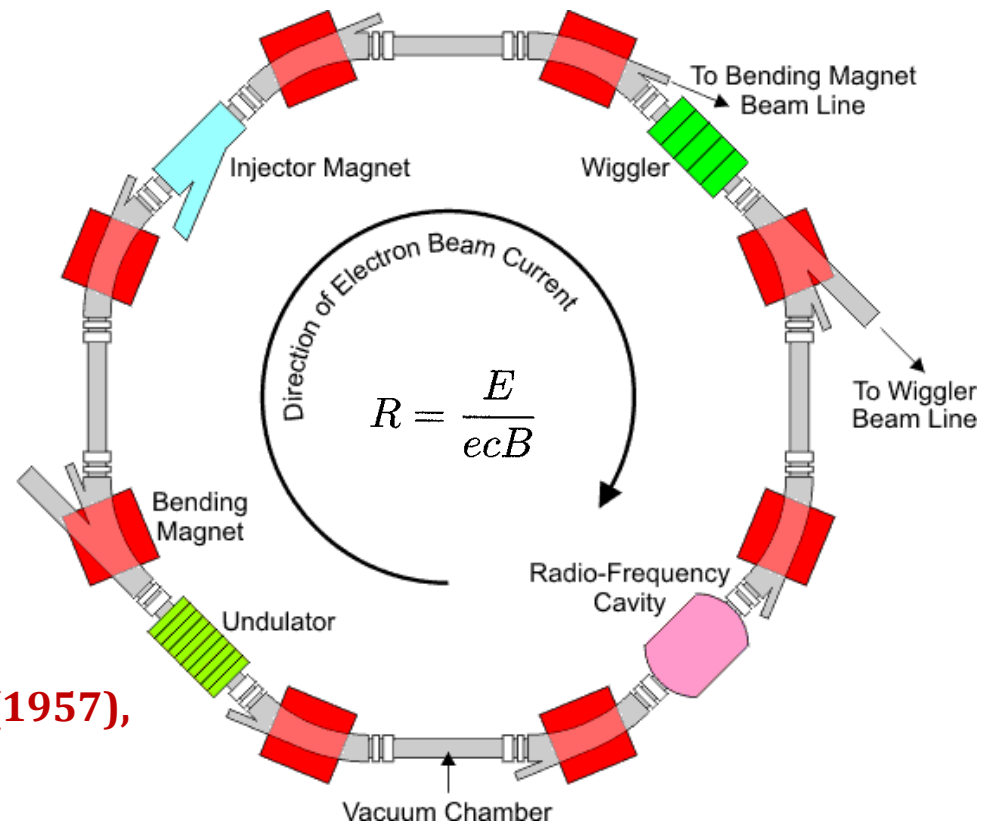


Mark Oliphant

Mark Oliphant (1943)  
Brookhaven (1952), 3.3 GeV протони

- Затворена орбита на движение с фиксирана геометрия
- Едновременно увеличаване на магнитното поле с енергията на частицата, за да се запази радиусът на кривината

- Необходимо е много по-малко по обем магнитно поле
- Висока ефективност при високи енергии
- Слаба фокусировка - използвани са отклоняващите магнити на синхротрона с подходящи полета



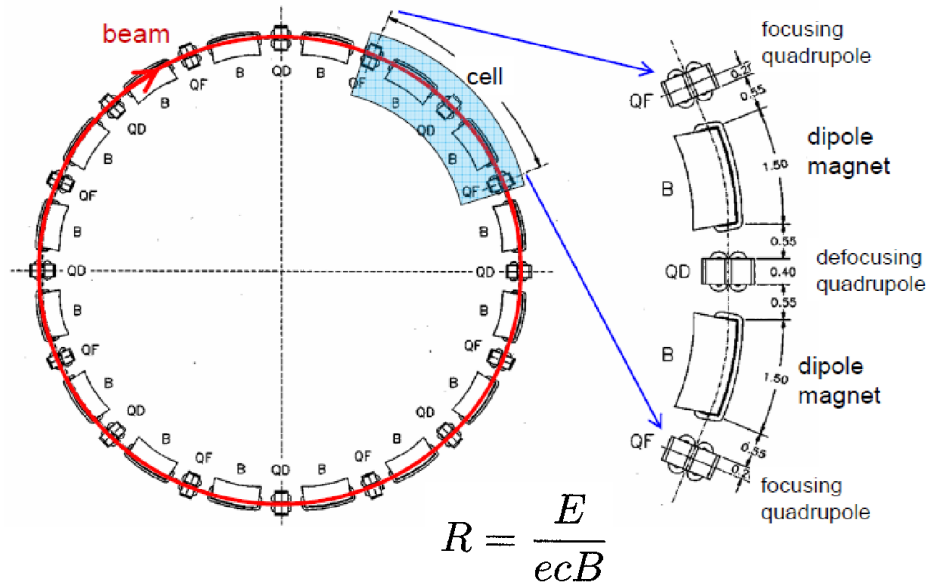
Етах: 10 GeV протони/деутрони, Дубна (1957),  
Синхрофазотрон, 36000 t

# Синхротрон със силна фокусировка

Courant, Livingston, Snyder (1952), идея  
Cornel University (1954), 1.5 GeV електрони



Courant, Livingston, Snyder



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

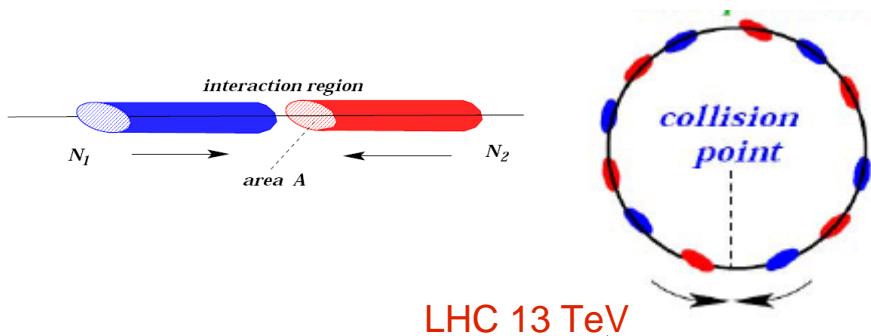
**FODO клетки** (или секции) – фокусиране и дефокусиране с квадруполни лещи.  
**F** – фокусира вертикално,  
**D** – фокусира хоризонтално;

**Етаж: електрони/позитрони: CERN, LEP, (1989/45 GeV -2000/105 GeV), 27 km**  
**Етаж: протони/тежки йони: CERN, LHC, (2010/3.5 TeV - 2017/6.5 TeV), 27 km**



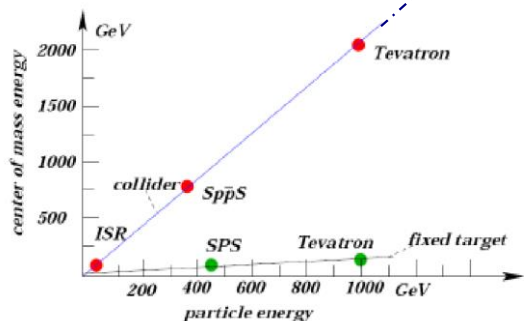
# Ускорител на насрещни снопове - Колайдер

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



Сноповете трябва да бъдат разделени преди да взаимодействат (синхротрони).

LHC 13 TeV

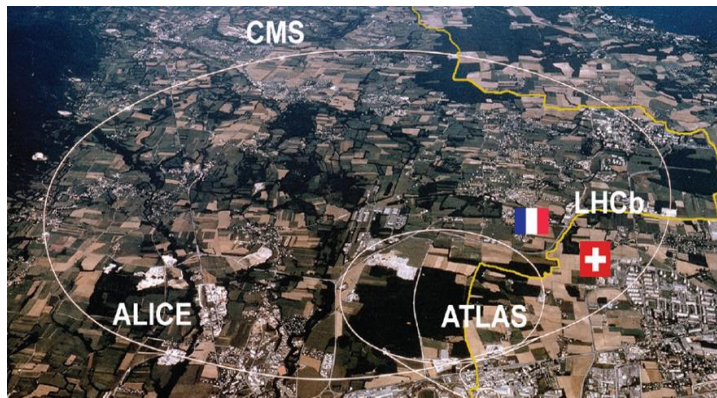


Докато при неподвижна мишена е важна **ИНТЕНЗИВНОСТТА** на снопа, то при колайдерите се въвежда понятието **СВЕТИМОСТ**, което отчита както количеството частици, разпределено по бънчовете, така и сечението за взаимодействие между частиците.

**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>

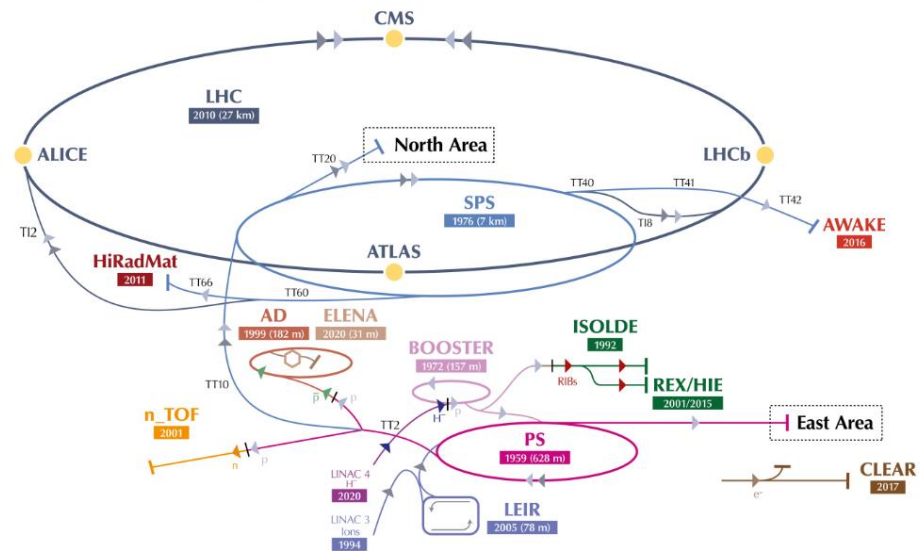


Големият адронен колайдер е построен на територията на Швейцария и Франция. Разположен е на около 100 м дълбочина. Ускоряването на сноповете се постига чрез система от ускорители, като на всяко ниво протоните се ускоряват до все по-високи енергии.

Например - от ускорителя SPS протоните достигат енергия от 450 GeV и се инжектират в LHC, където се ускоряват до енергии от 6500 GeV.

На четири места по контура на LHC са обособени точките, където се пресичат сноповете и се осъществяват сблъсъците. Около тези точки са разположени основните детекторни комплекси – CMS, ATLAS, LHCb и ALICE.

The CERN accelerator complex  
Complexe des accélérateurs du CERN



▶ H<sup>-</sup> (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶  $\bar{p}$  (antiprotons) ▶ e<sup>-</sup> (electrons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials

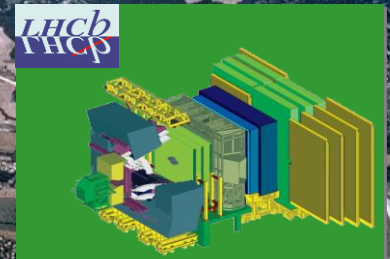


# ЦЕРН

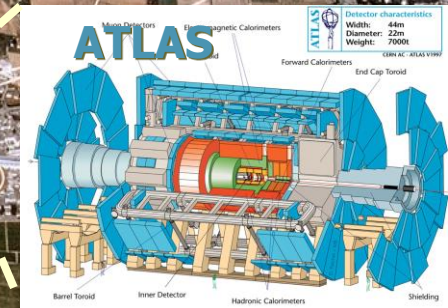
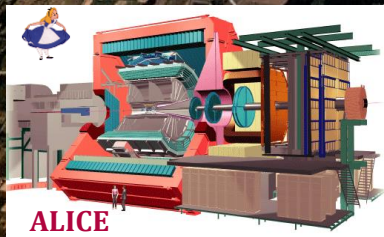
## Нова ера във фундаменталните изследвания

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





# Compact Linear Collider

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

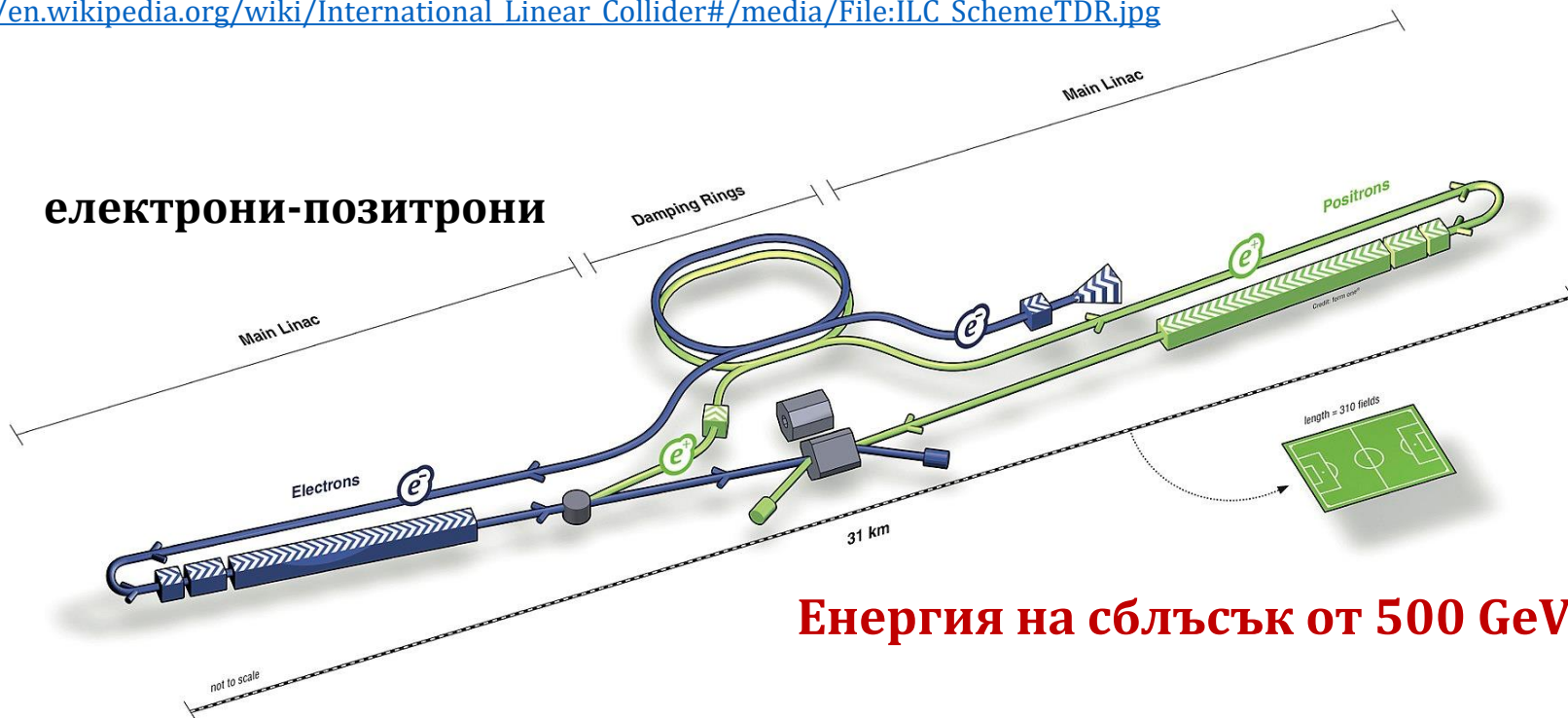


## Компактният линеен колайдер (CLIC) е предложен ускорител, CERN

- 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) кухни 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](https://en.wikipedia.org/wiki/International_Linear_Collider#/media/File:ILC_SchemeTDR.jpg)



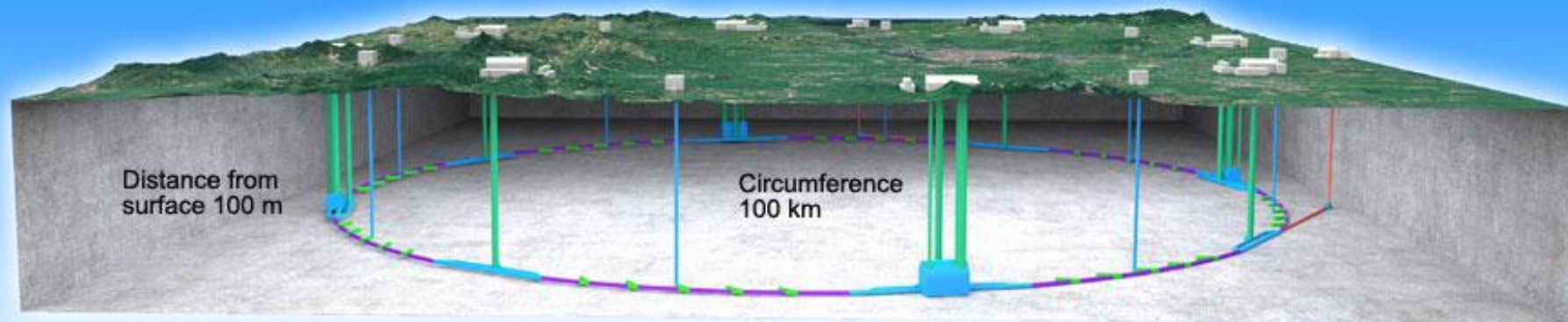
Общо 8000 свръхпроводящи радиочестотни резонатора ще бъдат инсталирани в главните линейни ускорители

- измеране 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>



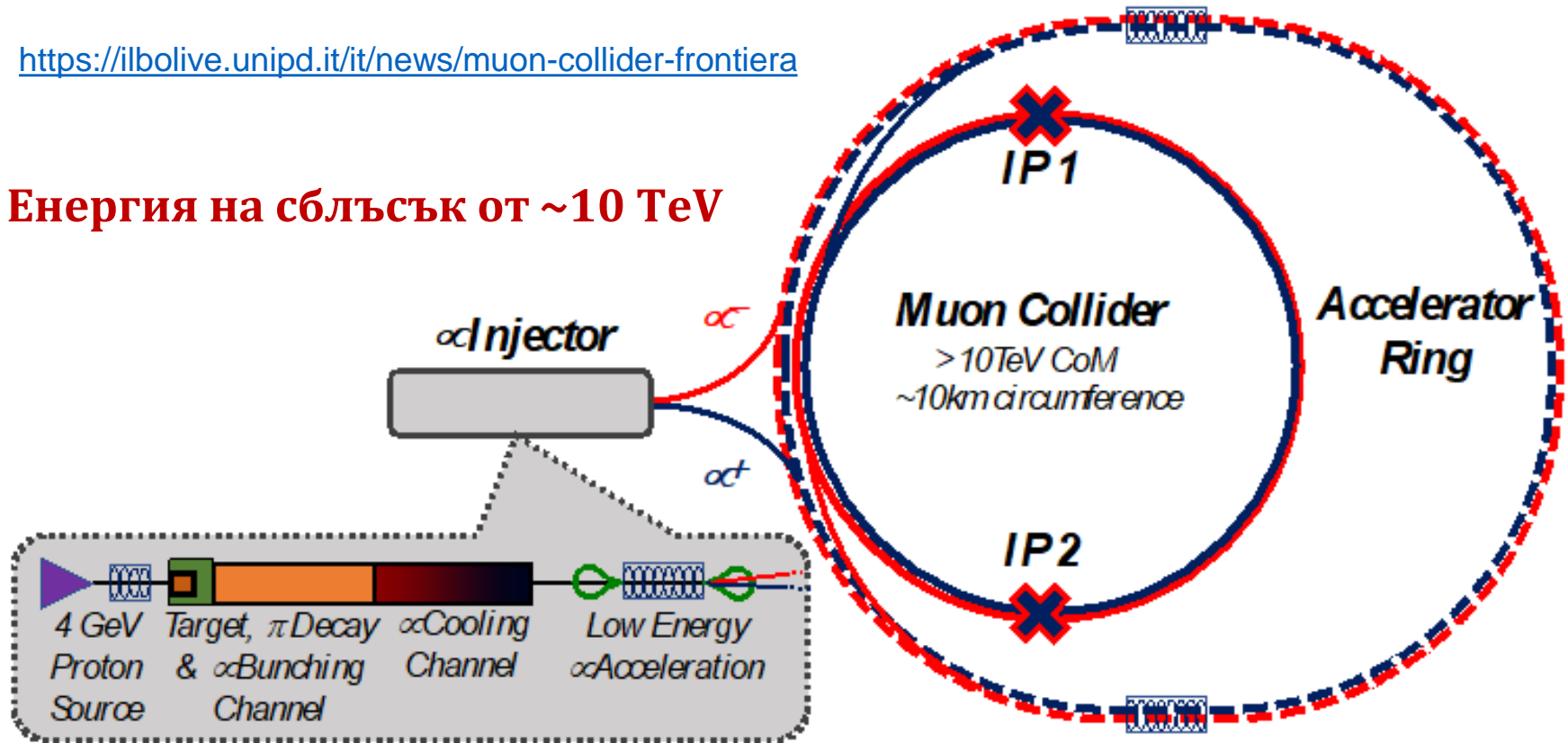
Основната цел е СЕРС да се използва като фабрика за Хигс бозони. Предварителният оперативен план „7-2-1“ е да работи първо като фабрика на Хигс в продължение на 7 години и да създаде един милион частици на Хигс или повече, последван от 2 години работа като фабрика Super Z за създаване на един трилион 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  $\sim 10$  TeV

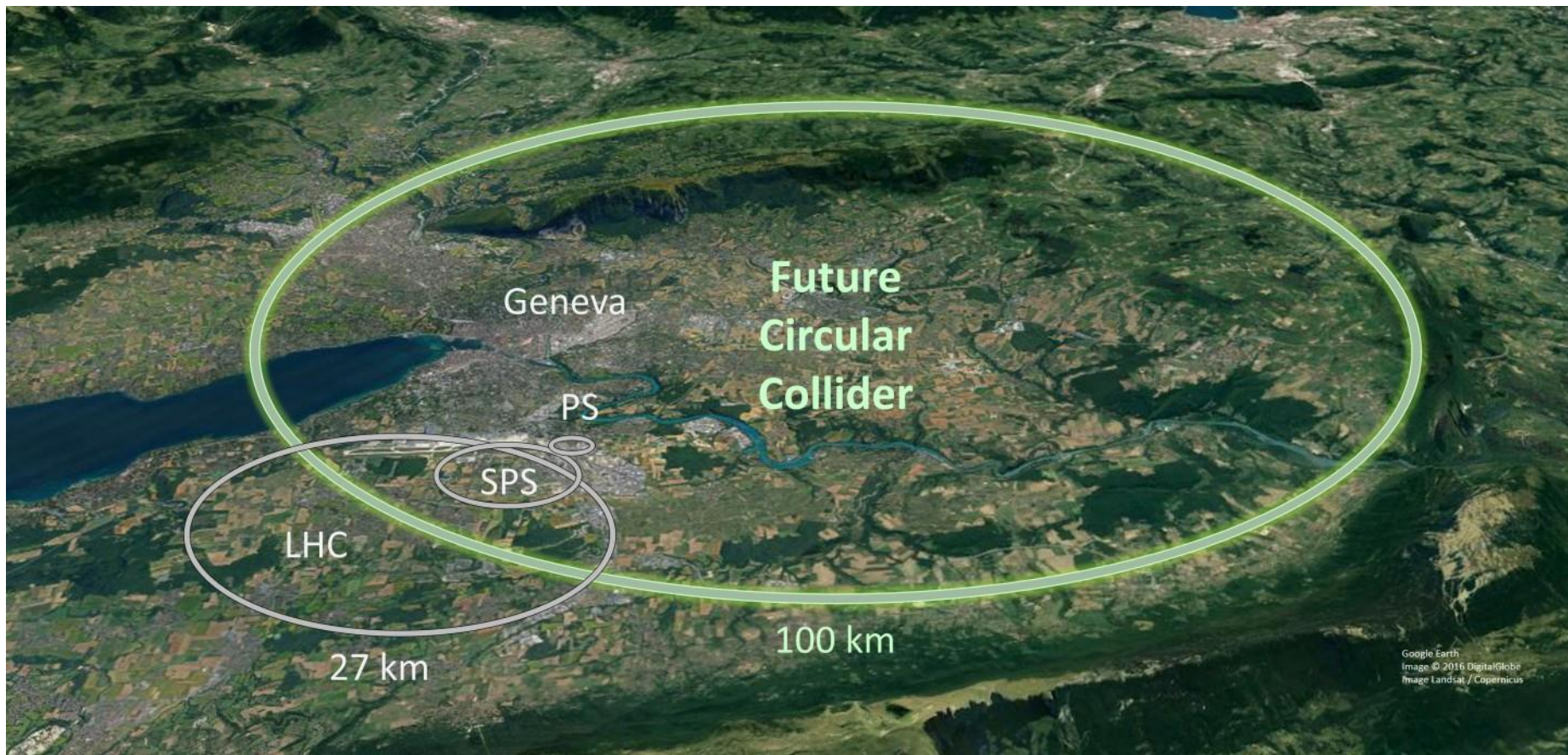


<https://muoncollider.web.cern.ch/welcome-page-muon-collider-website>



# Future Circular Collider

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



**Енергия на сблъсък от 100 TeV**

**Благодаря за вниманието!!!**