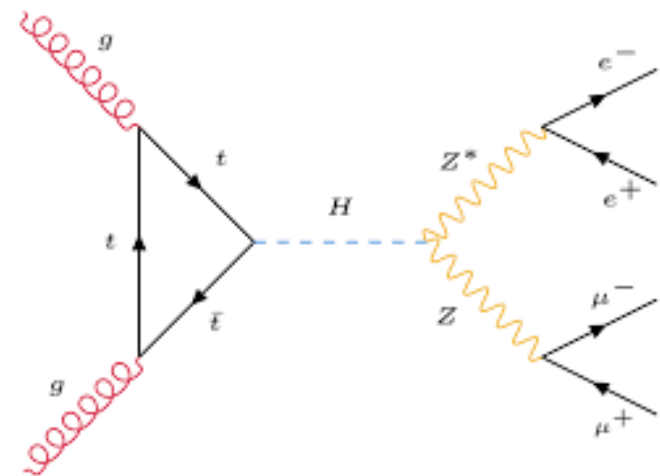
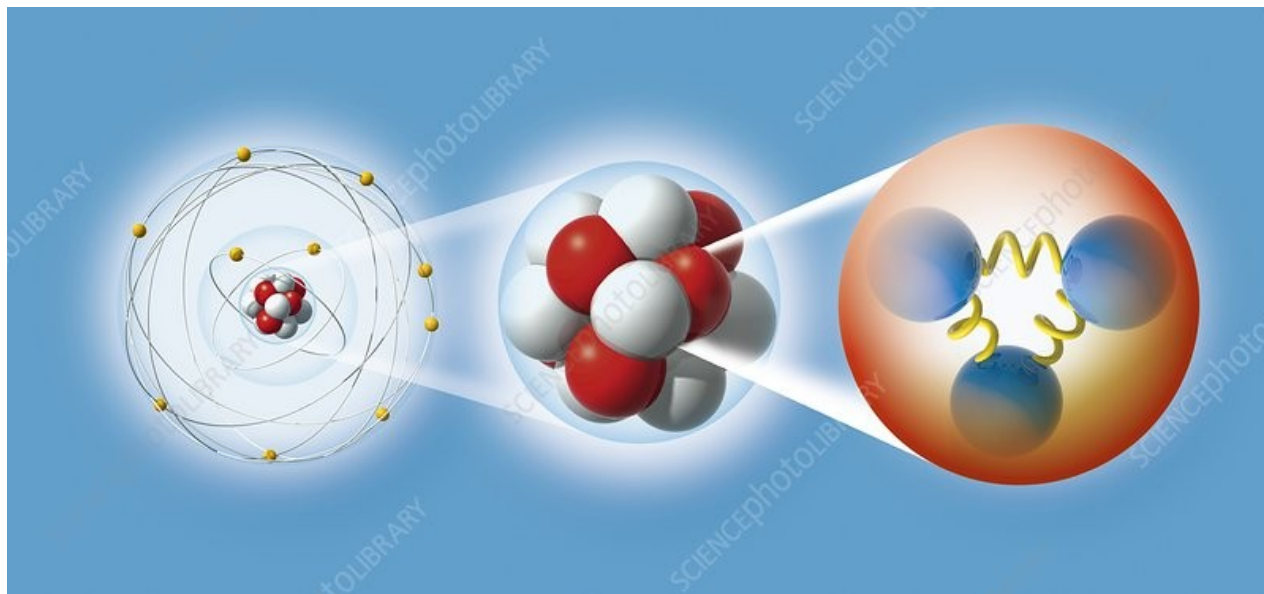


Въведение във  
физиката на елементарните частици,  
ускорителите и тяхното бъдеще

Пейчо Петков, СУ

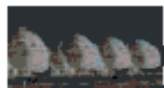
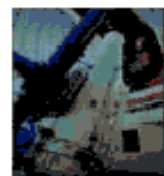
# Физика на елементарните частици

изучава елементарните съставлящи на материята и лъченията,  
и взаимодействията между тях.



# Мащаби

## Инструменти



Accelerators  
LHC, LEP

(Particle beams)  
Electron  
Microscope  
Microscope



Telescope

Radio  
Telescope

$10^{-34}$

$10^{-30}$

$10^{-26}$

$10^{-22}$

$10^{-18}$

$10^{-14}$

$10^{-10}$

$10^{-6}$

1m

$10^6$

$10^{10}$

$10^{14}$

$10^{18}$

$10^{22}$

$10^{26}$

SUSY particle?  
Higgs?  
Z/W  
(range of  
nuclear force)  
(range of  
weak force)

Proton  
Nuclei

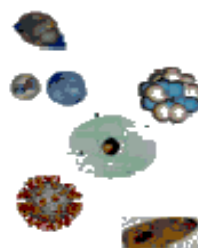
Atom

Virus  
Cell

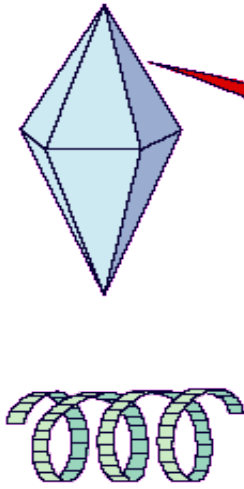



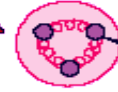


Earth radius  
Earth to Sun

Galaxies  
Radius of observable  
Universe

## Наблюдаеми



# Структура на материята

Crystal Molecule	Atom	Atomic Nucleus	Elementary Particles	
		 <p><b>Nuclei</b></p>	<p><b>Hadrons</b></p> <p><b>Mesons</b></p>  <p><b>Baryons</b></p> <p><b>Proton Neutron</b></p> 	 <p><b>Leptons</b> <math>e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau</math></p> <p><b>Pointlike</b></p>  <p><b>Quarks</b> <math>u, c, d, s, b, t</math></p>
1 cm	$10^{-8}$ cm	$10^{-12}$ cm	$10^{-13}$ cm	?

y1101

**Физика на елементарните частици**

# Симетрии и закони за запазване

- Теорема на Нютер (Emmy Noether)
  - ~ Симетрия -> закон за запазване
- Пространствени симетрии
  - ~ Хомогенно и изотропно пространство-време -> маса, спин,  $33E$ ,  $33I$ ,  $33MI$
- Вътрешни симетрии
  - ~ Закон за запазване на баионното число, лептонно число, ...
- Глобални симетрии
  - ~ Закон за запазване на електричния заряд, цвета, ...
- Локални/калибровъчни симетрии
  - ~ Преносители на взаимодействие
- Дискретни симетрии
  - ~ Пространствено отражение
  - ~ Обръщане на посоката на времето
  - ~ Зарядово спрягане



Portrait of [Emmy Noether](#), around 1900

Източник: wikipedia

# Непрекъснати симетрии

Транслация в пространството



непрекъснатата

Ако системата остава инвариантна  $\Rightarrow$  запазване на импулса

Въртене в пространството



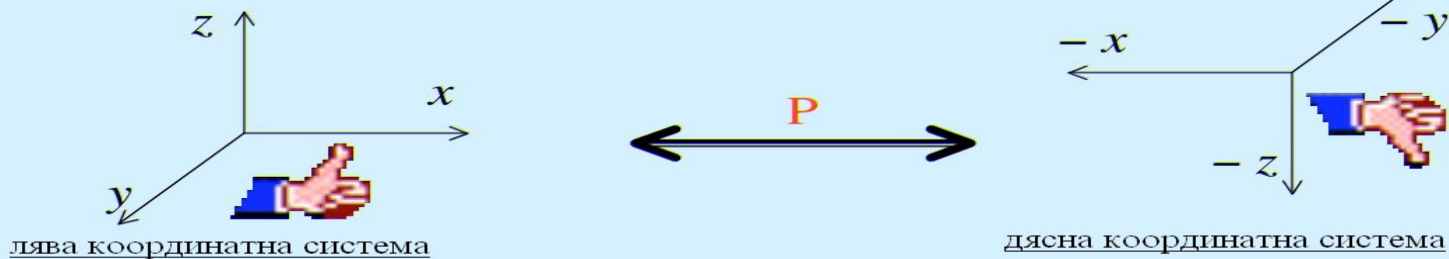
непрекъснатата

момента на импулса

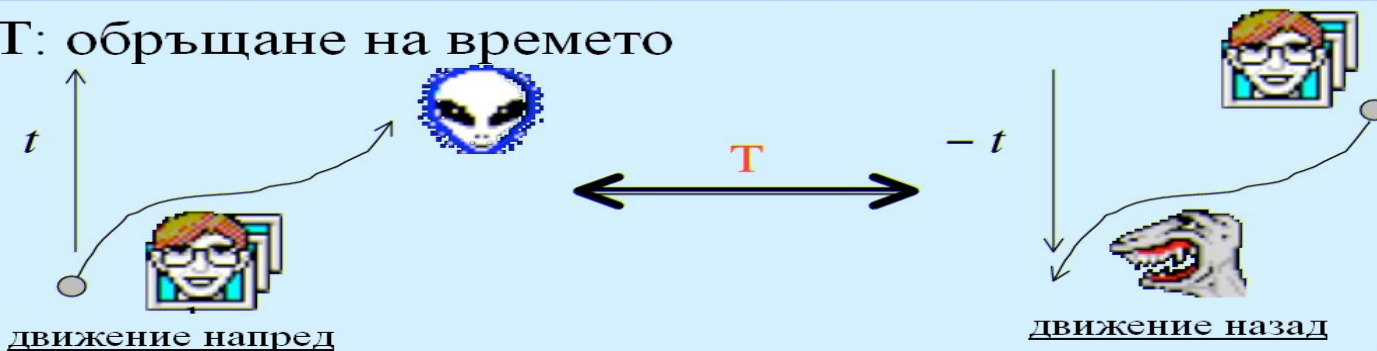
# Дискретни симетрии

## 2) P, T и C трансформации

P: четност или пространствено отражение



T: обръщане на времето



# Дискретни симетрии

## Запазване на симетриите

Ако няма разлика между „този свят“ и „пространствено отразения свят“

=> казваме:

Четността се запазва,

P-симетрията се запазва,

Светът е инвариантен относно P-трансформация

и т.н.

По-„професионално“ описание,

$\hat{H}$  оператор на Хамилтон, описващ системата

P оператор на четността

$P^+ \hat{H} P = \hat{H}^P$  трансформация на четността на Хамилтониана

Ако  $\hat{H}^P \neq \hat{H}$  => нарушение на четността, незапазване на четността и т.н.



# Система естествени единици (NU)

SI – kg, m, s

- [скорост] = m/s
- [ъглов момент] = kg.m<sup>2</sup>/s
- [маса] = kg
- [енергия] = kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> = J
- [импулс] = kg.m/s
- [дължина] = m
- [време] = s
- .....

Маса на протона  
 $1.7 \times 10^{-27}$  kg (SI)  
 935 MeV (NU) ~ 1 GeV

$$1 \text{ eV} = e \cdot 1V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

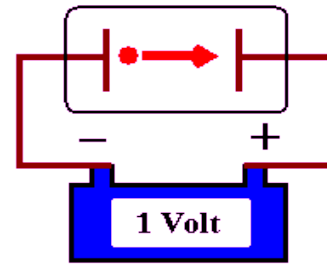
$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

## Енергия

1 електронволт (eV):

енергията на частица с електричен заряд  $= e$ , първоначално в покой, след това ускорена от разлика в електростатичния потенциал = 1 Volt  
 $(e \cdot 1 \text{ Volt} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J})$



NU – GeV  
 $c=1, \hbar=1$

- [скорост] – безразмерна величина
- [ъглов момент] – безразмерна величина
- [маса] = [енергия] = [импулс] = GeV
- [дължина] = [време] = [ъглов момент]/[импулс] = 1/GeV
- .....

Маса на електрона  
 $9.109 \times 10^{-31}$  kg (SI)  
 511 keV (NU) ~ 1 GeV

# Стандартен модел

(във физика на елементарните частици)

Кварки, лептони, преносители на взаимодействието, поле на Хигс

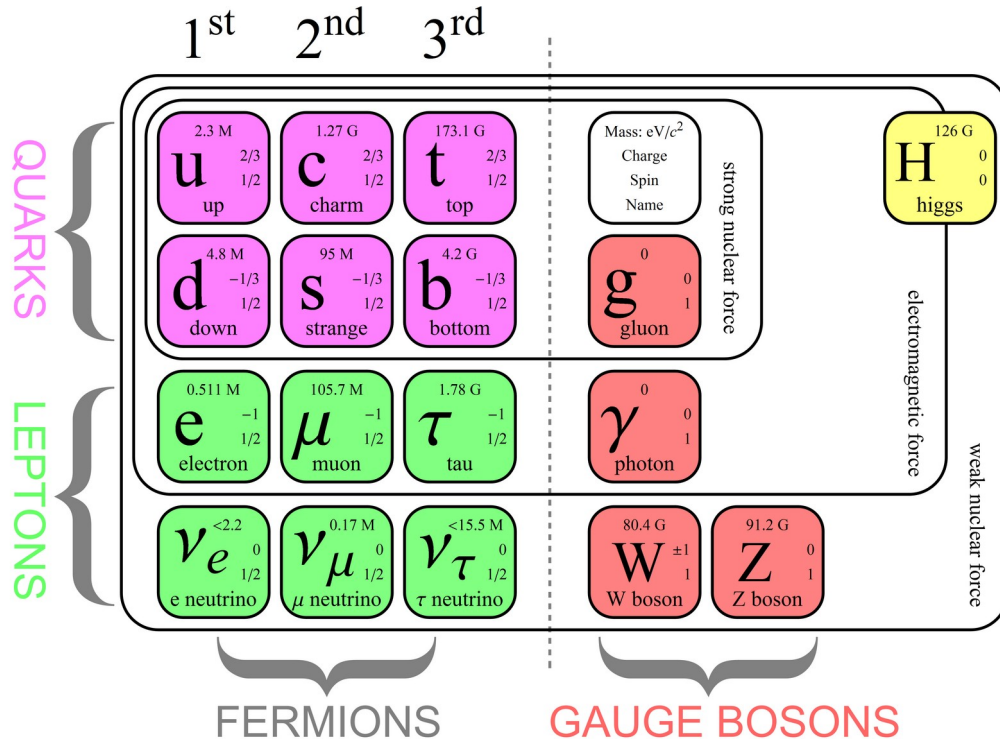


Image by [Matic Lubej](#)

- + Античастици
- Фермионите си взаимодействат чрез обмяна на преносители на взаимодействието – калибровъчни бозони
- Частиците получават маса чрез взаимодействие на полето на Хигс
- Група на симетрия  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- Завършена теория и експериментално проверена с голяма точност
- Има въпроси, на които не може да даде отговор → нискоенергетично приближение на по-обща теория

# Фундаментални взаимодействия

Обмяна на променливостни бозони –  
преносители на взаимодействието



Гравитационно

Слабо

Силно

Електромагнитно

Константите на взаимодействие  
зависят от енергията/разстоянието

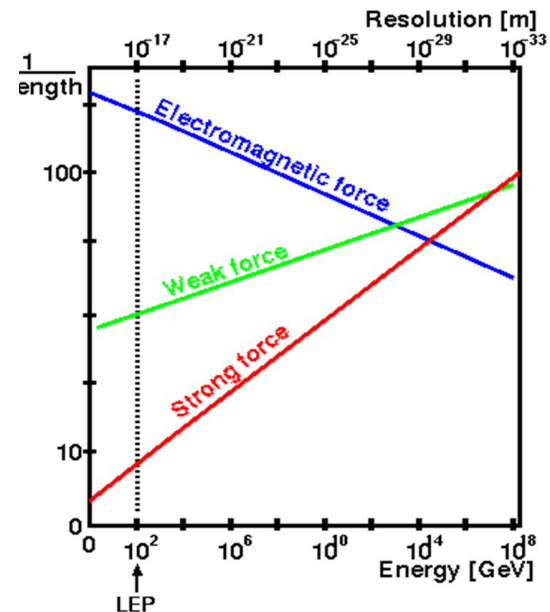
Константи на взаимодействие

Силно :  $a_s \sim 1$

Електромагнитно:  $a_{em} \sim 1/137$

Слабо:  $a_W \sim 10^{-6}$

Гравитационно:  $a_g \sim 10^{-38}$



# Кварки – характеристики

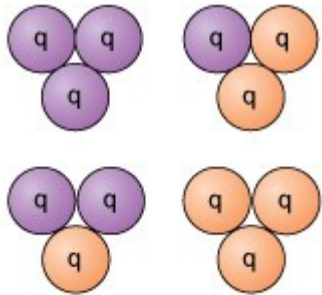
Properties	Up (u)	Down (d)	Charm (c)	Strange (S)	Top (T)	Bottom (b)
Mass	350	350	1800	550	20.000	4500
Q-charge in unites of (e)	2/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3	-1/3
B-Baryon number	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
C-charmness	0	0	+1	0	0	0
S-strangeness	0	0	0	-1	0	0
b-bottomness	0	0	0	0	0	-1
T-topness	0	0	0	0	+1	0
S-spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
I-isospin	1/2	1/2	0	0	0	0
$I_z$ -isospin in z-direction	1/2	-1/2	0	0	0	0
p-parity	+1	+1	+1	+1	+1	+1

## Why "Quark"?

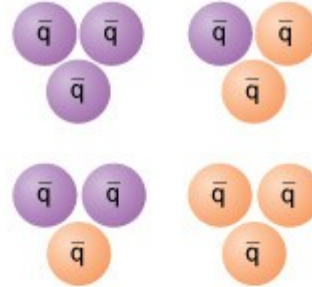
The name "quark" was taken by Murray Gell-Mann from the book "Finnegan's Wake" by James Joyce. The line "Three quarks for Muster Mark..." appears in the fanciful book. Gell-Mann received the 1969 Nobel Prize for his work in classifying elementary particles.

source: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/quark.html>

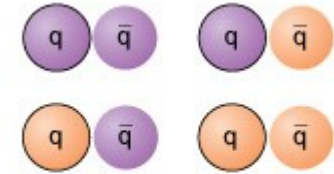
# Адрони



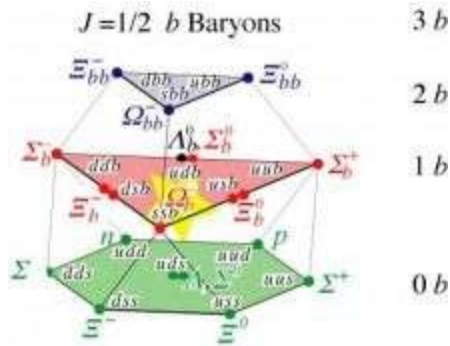
бариони



антибариони



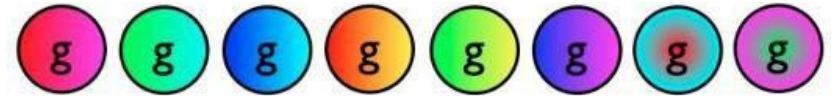
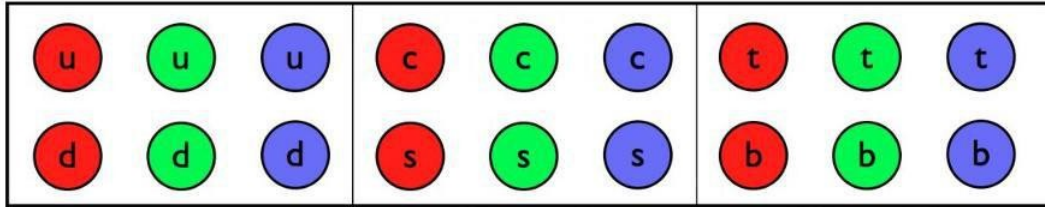
МЕЗОНИ



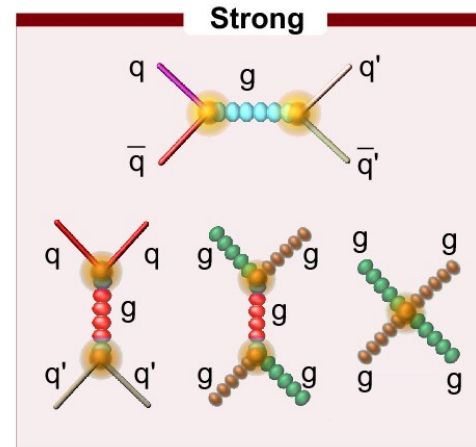
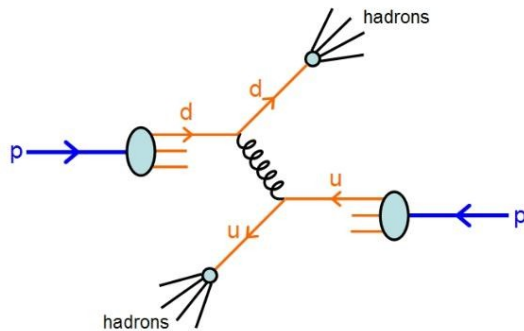
Baryons	Quark composition
P	uud
N	Udd
$\Sigma^+$	suu
$\Sigma^0$	sud
$\Sigma^-$	sdd
$\Xi^0$	ssu
$\Xi^-$	ssd
$\Lambda^0$	sud
$\Omega^-$	sss

Mesons	Quark composition
$\pi^+$	$u\bar{d}$
$\pi^0$	$(u\bar{u} - d\bar{d}) / \sqrt{2}$
$\pi^-$	$d\bar{u}$
$k^+$	$s\bar{u}$
$k^0$	$d\bar{s}$
$k^-$	$\bar{u}s$
$\bar{k}^0$	$\bar{d}s$
$\eta^0$	$(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}) / \sqrt{6}$

# Силни взаимодействия квантова хромодинамика (КХД)



- „силен“ заряд – цвят
- кварки – 3 цвята – червен, син, зелен
- преносителите на взаимодействието (глюони) също имат цветен заряд – 8 цвята
- глюоните нямат маса
- запазва аромата на кварките
- асимптотична свобода



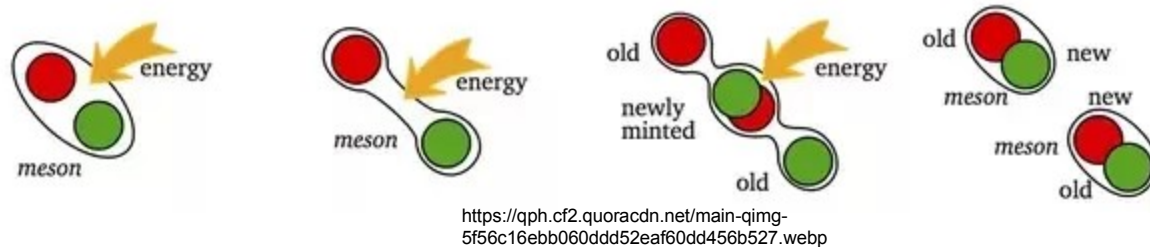
Range  $\sim 10^{-15}$  m, relative strength = 1

# КХД – удържане (confinement)

Свободни кварки и глюони – не са наблюдавани експериментално; има само индиректно доказателство за тях от изучаването на адрони - ЗАЩО?

**УДЪРЖАНЕ:** цветните частици са ограничени в рамките на безцветни адрони поради поведението на цветните сили при големи разстояния

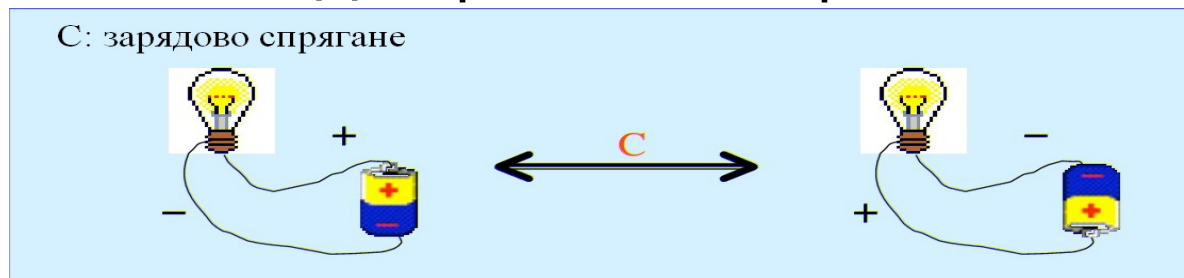
Силата на привличане между цветните частици нараства с разстоянието  $\Rightarrow$  нарастване на потенциалната енергия  $\Rightarrow$  раждане на кварк-антикваркови двойки, което неутрализира цвета  $\Rightarrow$  формиране на безцветни адрони (**адронизация**)



При високи енергии (напр., в  $e^+e^- \rightarrow q + \bar{q}$ ) се очаква адроните да се раждат по направление на началната посока на  $q - \bar{q}$  двойката  $\Rightarrow$  раждане на адронни “струи”

**УДЪРЖАНЕ, АДРОНИЗАЦИЯ:** свойства, заключени от наблюдение. До сега, свойствата на цветните сили на големи разстояния нямат точно математическо описание в КХД

# Дискретни симетрии



Във физиката на елементарните частици: обръщат се вътрешните квантови числа

## заредени състояния

$e^-$ (електрон)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$e^+$ (позитрон)
$p$ (протон)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$\bar{p}$ (антипротон)
$\pi^+$ (положителен пион)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$\pi^-$ (отрицателен пион)
$u$ (u кварк)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$\bar{u}$ (анти u кварк)

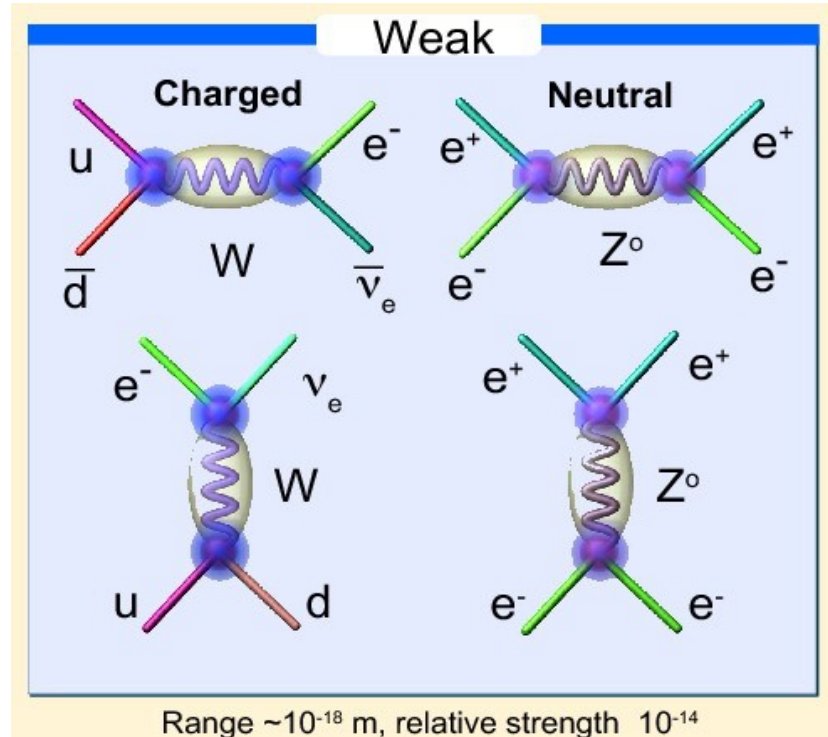
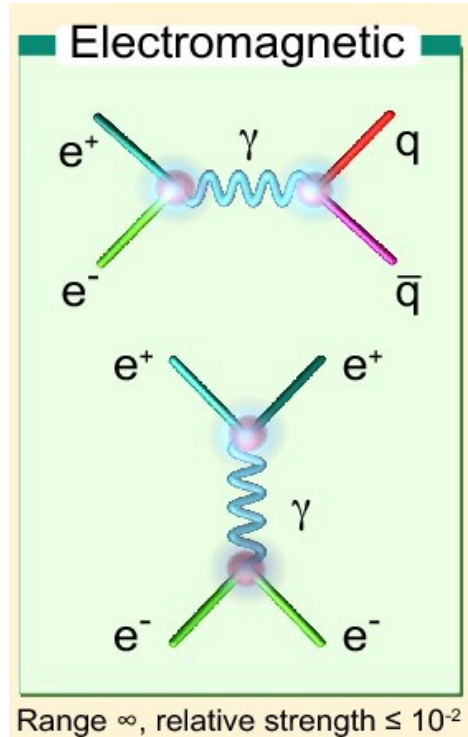
## неутрални състояния

$n$ (неутрон)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$\bar{n}$ (антинейтрон)
$K^0$ (к-нула мезон)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$\bar{K}^0$ (анти к-нула мезон)
$\pi^0$ (неутрален пион)	$\langle \Rightarrow \rangle$	$\pi^0$ (неутрален пион)



# Електрослаби взаимодействия

- преносители  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  бозони, фотон
- слабите вз. - **много малък радиус** на действие – преносителите **имат маса**
- електромаг. вз. - **безкраен радиус** на действие – преносителите **нямат маса**
- не запазват C-четността, P-четността и CP-четността
- могат да променят аромата на кварките



# Дискретни симетрии

**Силните и електромагнитните  
взаимодействия запазват:  
ароматните квантови числа,  
С, Р, Т, СР, СТ, РТ и СРТ**

# Фундаментални частици

Три поколения

$$\begin{pmatrix} \nu_e & u \\ e^- & d' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu & c \\ \mu^- & s' \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau & t \\ \tau^- & b' \end{pmatrix}$$

Структура на поколението

$$\begin{pmatrix} \nu_l & q_u \\ l_j & q_d \end{pmatrix} \equiv \left\{ \left( \begin{pmatrix} \nu_l \\ l^- \end{pmatrix} \right)_L, (\nu_l)_R, l_R^- \right\}; \left\{ \left( \begin{pmatrix} q_u \\ q_d \end{pmatrix} \right)_L, (q_u)_R, (q_d)_R \right\}$$

Заредени токове  $W^\pm$

Само ляво винтови фермиони

Промяна на аромата:  $\nu_l \Leftrightarrow l, q_u \Leftrightarrow q_d$

Неутрални токове  $\nu_\mu, \tau, Z$

Запазване на аромата  $f_i \Leftrightarrow f_i$

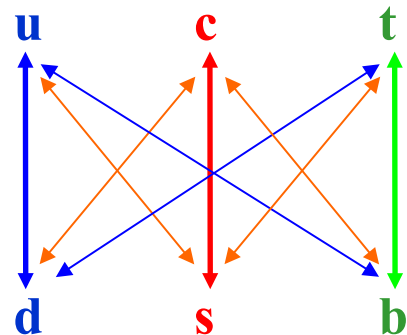
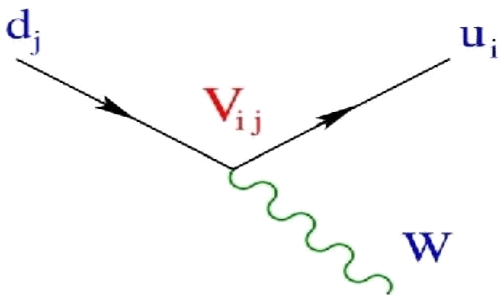
# Смесване на кварките

$$L_{NC}^Z = \frac{e}{2 \sin \theta_W \cos \theta_W} Z_\mu \sum_f \bar{f} \gamma_\mu [v_f - a_f \gamma_5] f$$

Запазващ аромата неутрален ток

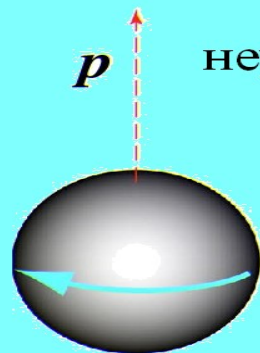
$$L_{CC}^W = \frac{g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[ \sum_{ij} \bar{u}_i \gamma^\mu (1 - \gamma_5) V_{ij} d_j + \sum_l \bar{\nu}_l \gamma^\mu (1 - \gamma_5) l_j \right] + h.c.$$

Променящ аромата зареден ток



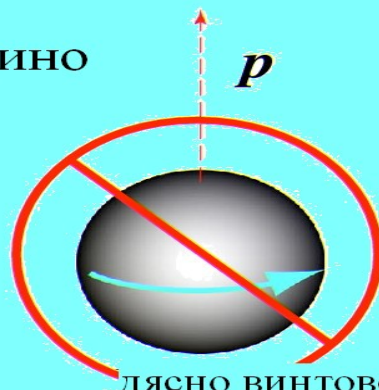
# Дискретни симетрии

## В света на елементарните частици



ЛЯВО ВИНТОВО

неутрино



ДЯСНО ВИНТОВО

не съществува!

теория за  
нарушаване  
на четността



1956, T.D. Lee and C.N. Yang

експеримент за  
нарушаване  
на четността



1957, C.S. Wu

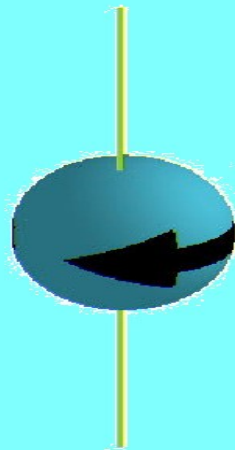
# Дискретни симетрии

свят на частици

свят на античастици

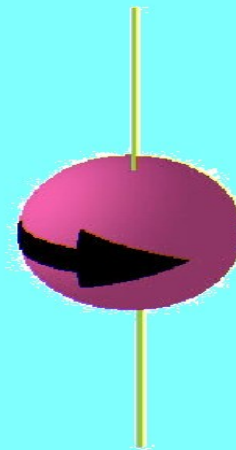
неутрино

антинейтрино



ЛЯВО ВИНТОВО

свързани с  
CP  
трансформация



ДЯСНО ВИНТОВО

# Дискретни симетрии

В слабите взаимодействия

**C, P и CP симетриите се нарушават!**

Обща теорема - CPT симетрията се запазва във всички взаимодействия

# Какво научихме от екпериментите?

- Сложните обекти във Вселената са изградени чрез комбиниране на прости обекти по различни начини
- Наглед различни явления може да бъдат проява на едни и същи физични закони
  - ~ Орбитите на планетите и ябълките падащи от дърветата
- Почти всичко около нас е изградено от малки обекти, които си взаимодействат
- Интуицията основана на ежедневиия ни опит не винаги е вярна - Живеем в свят подчиняващ се на законите на квантовата механика, но това изобщо не е очевидно



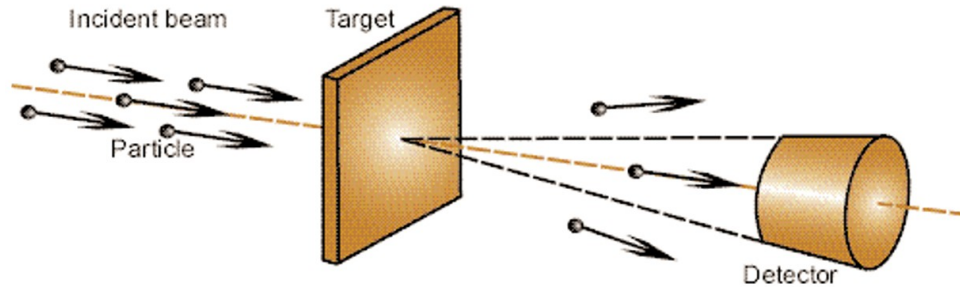
# Експерименти във физиката на елементарните частици

- Използват се ускорени частици, които се пускат върху мишена като от отделената при сблъсъка енергия се раздат по-тежки частици.
  - $E = mc^2$
- Всяка частица се разпада на по-леки, ако това не е забранено от някой от законите за запазване
- Частиците, които не могат да се разпаднат на други са стабилни: протони, електрон, неутрино. На практика се регистрират и такива с достатъчно дълго средно време на живот като напримет мюоните ( $\sim 2$  us) и неутроните (1000 s).

# Експерименти във физиката на елементарните частици

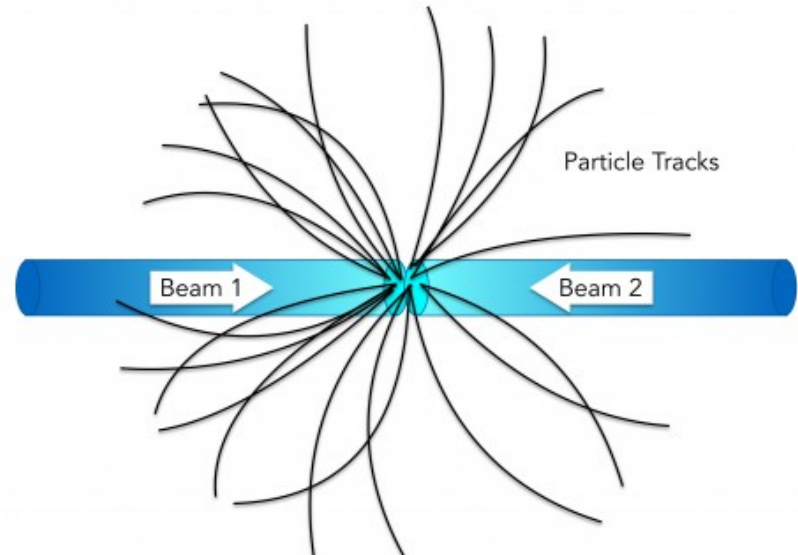
- Типове експерименти

Фиксирана мишена



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

Насрещни снопове



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

# Ускорители на заредени частици

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

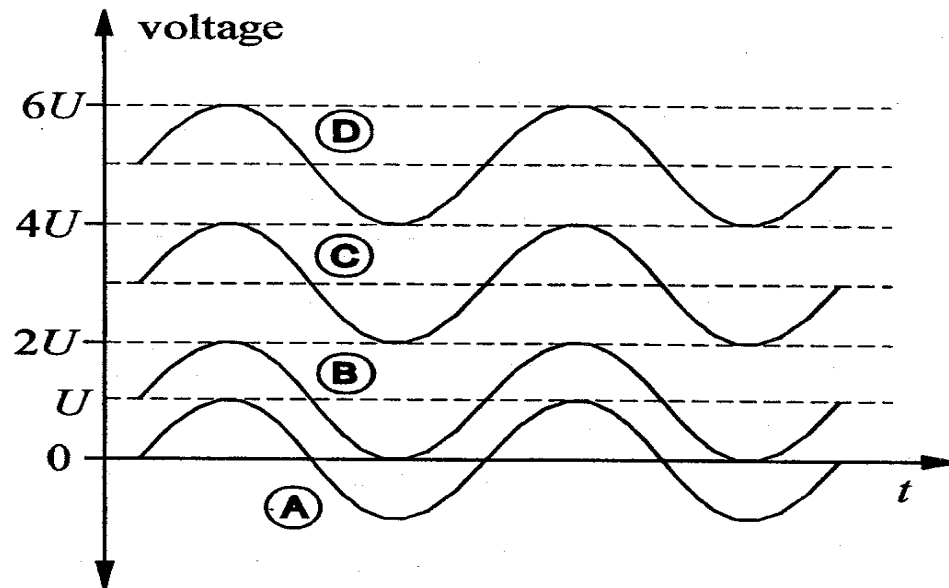
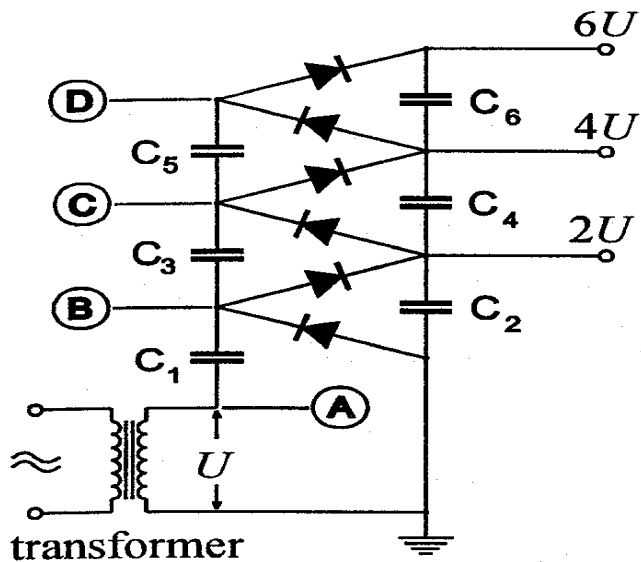
Лоренцова сила

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

*Electric force*                      *Magnetic force*

# Генератор на Кокрофт-Уолтън

Началото на 30-те години на XX век.

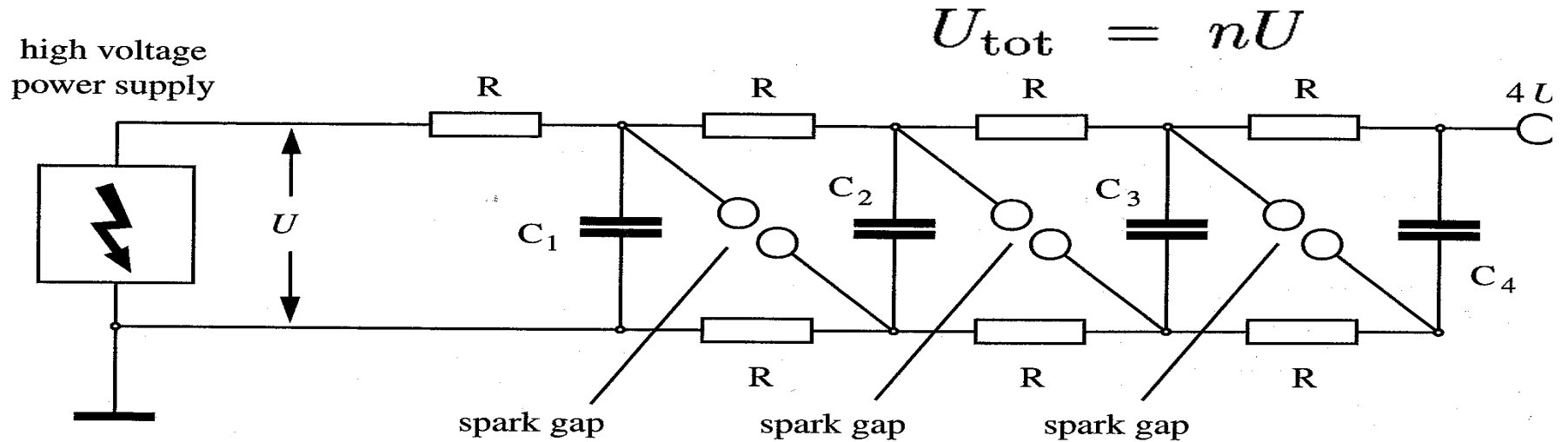


От генератора винаги се черпи ток. Поради отечките максималното напрежение, което може да бъде достигнато е:

$$U_{\text{tot}} = 2Un - \frac{2\pi I}{\omega C} \left( \frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{12}n \right)$$

Максимално достигнато напрежение около 4 MV.

# Генератор на Маркс

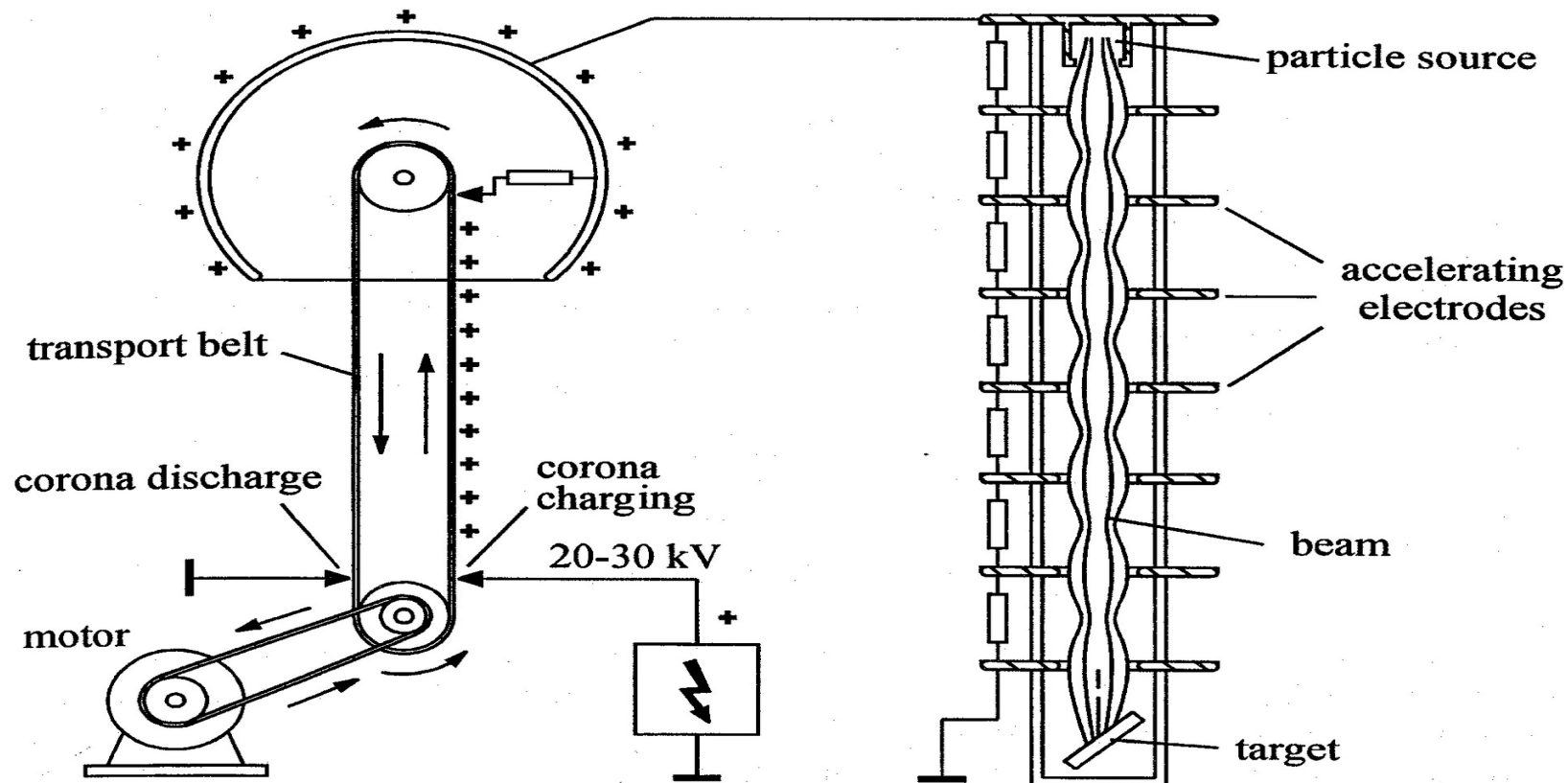


Кратки импулси – от порядъка на  $\mu\text{s}$ .

Големи токове. Максималното достигна напрежение през 1932 е около 6 MV.

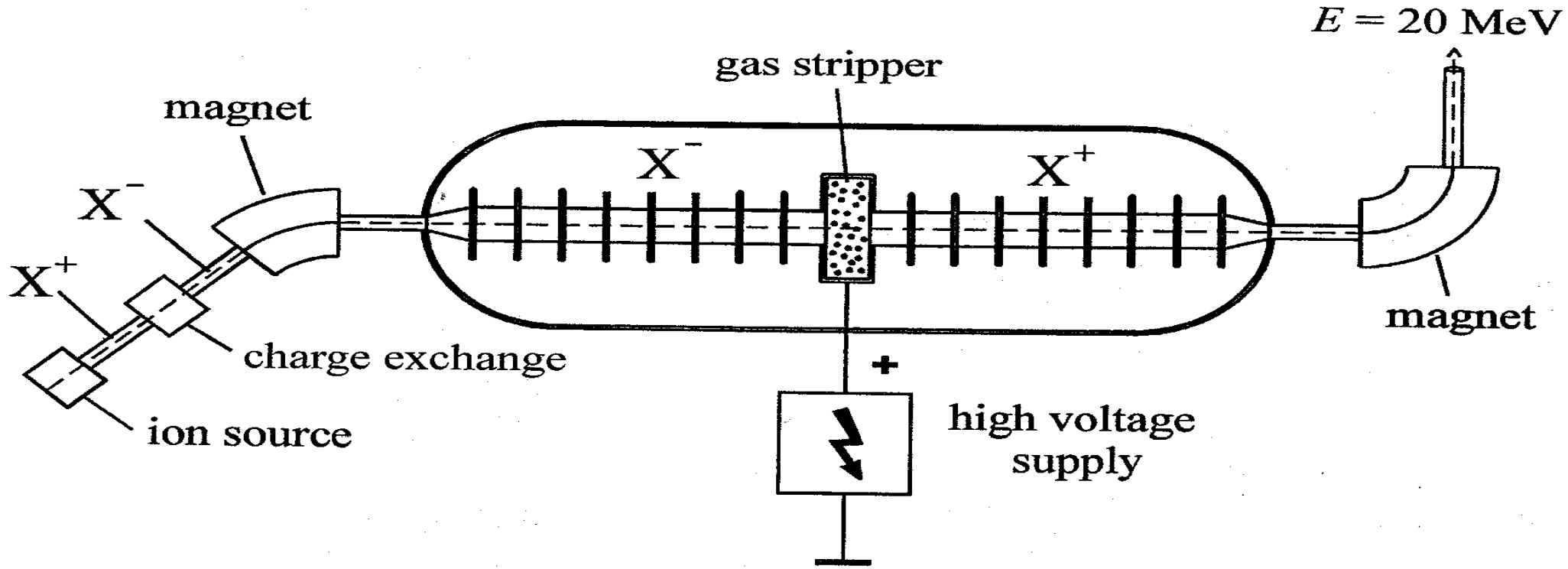
# Ускорител на Ван де Грааф

Разработването е започнало през 1930 г.



Максимално напрежение при нормални условия 2 MV. В SF<sub>6</sub> среда – до 10 MV.

# Тандем ускорител

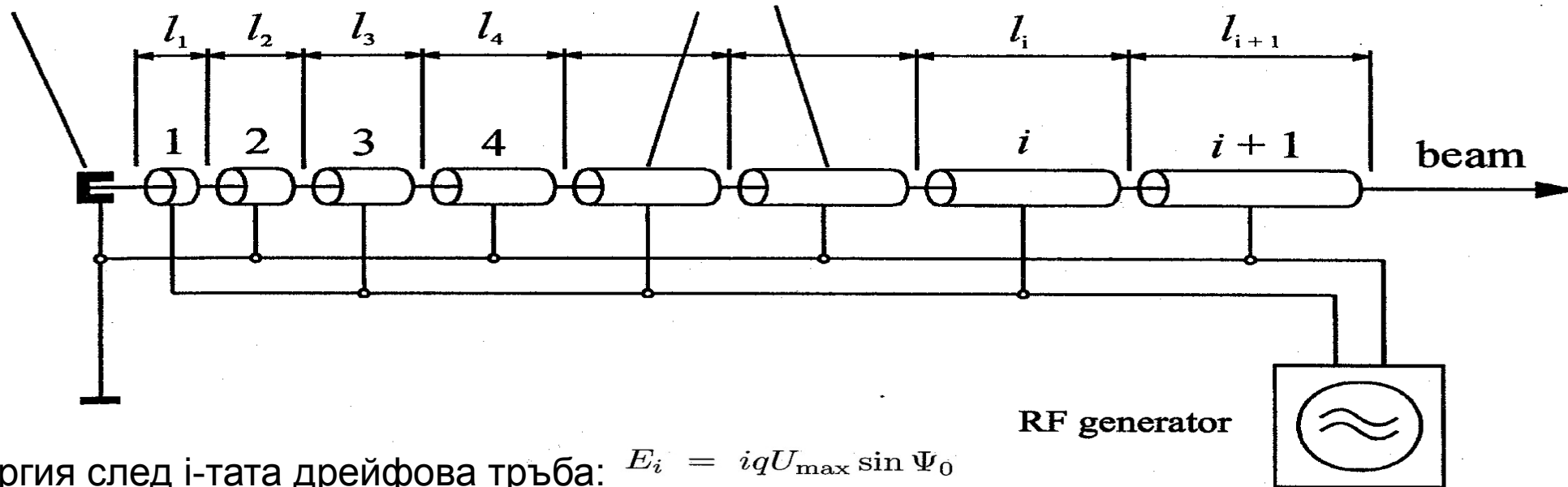


Ако се работи с многократно йонизирани йони може да се достигнат енергии до 1000 MeV.

# Линеен ускорител - Wideroe

ion source

drift tubes



Енергия след  $i$ -тата дрейфова тръба:  $E_i = iqU_{\max} \sin \Psi_0$

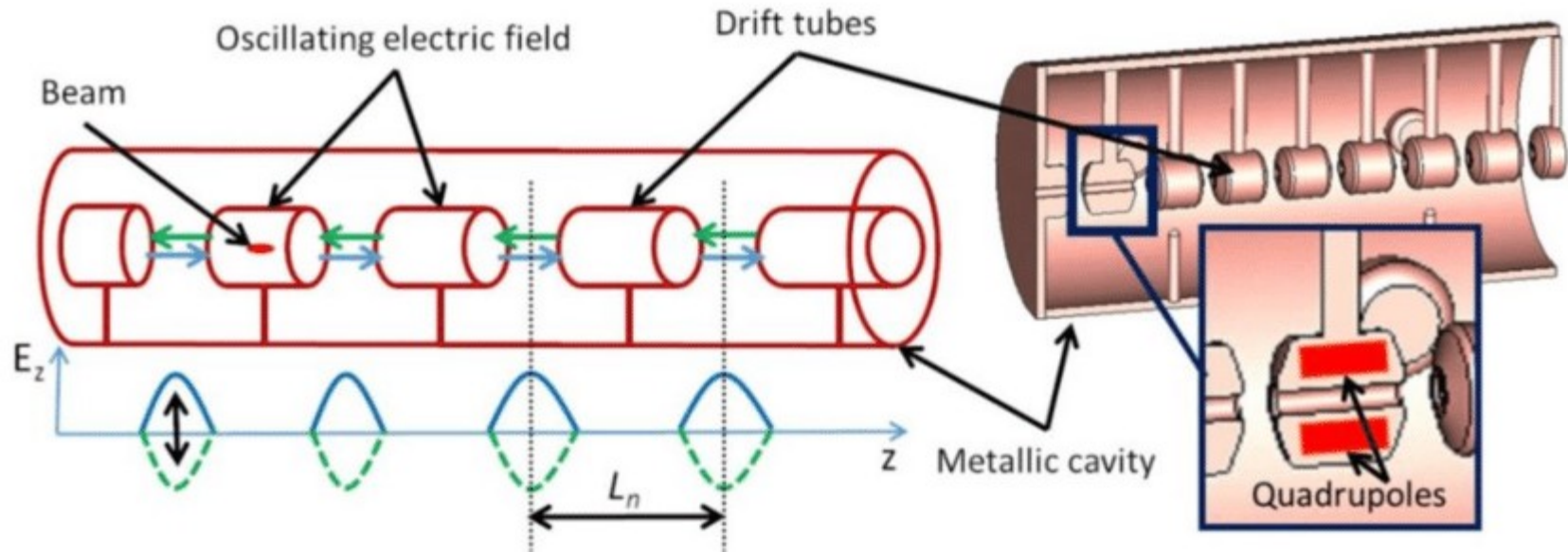
$$l_i = \frac{v_i T_{\text{RF}}}{2} = \frac{v_i}{2\nu_{\text{RF}}} = \frac{v_i \lambda_{\text{RF}}}{2c} = \beta_i \frac{\lambda_{\text{RF}}}{2}$$

Дължина на дрейфовите тръби

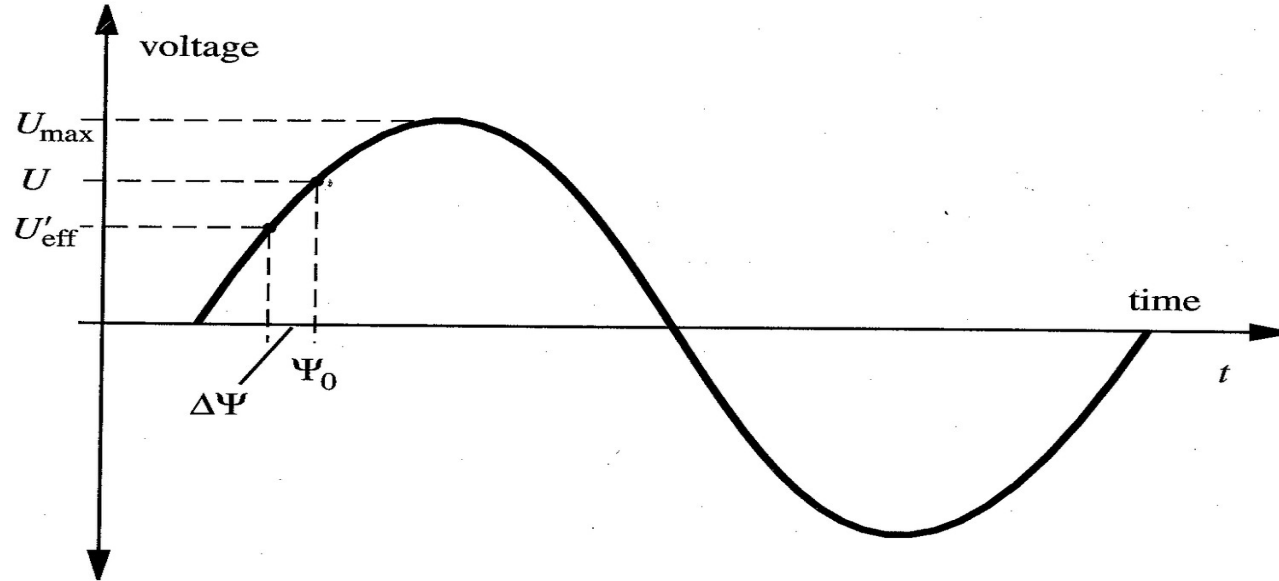
$$l_i = \frac{1}{\nu_{\text{RF}}} \sqrt{\frac{iqU_{\max} \sin \Psi_0}{2m}}$$



# Линеен ускорител - Alvarez



# Автофазировка

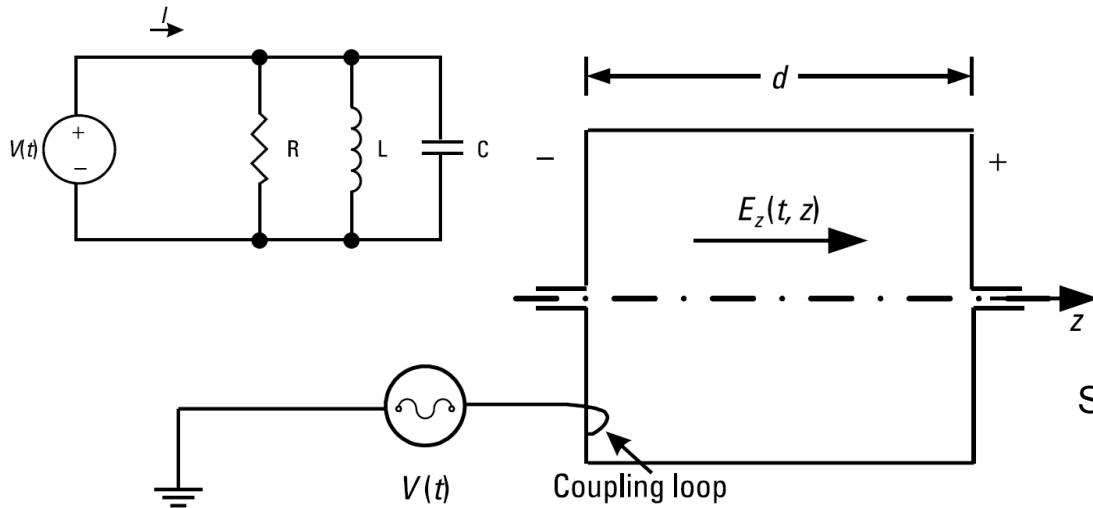


$$U'_{\text{eff}} = U_{\max} \sin(\Psi_0 - \Delta\Psi) < U_{\max} \sin \Psi_0$$

# Радиочестотен резонатор – концепция

Кухина оградена чрез проводяща повърхност.

Електромагнитна вълна се излъчва в нея. Вълната се разпространява в кухнята и се отразява от стените.



$$c = f_{RF} \lambda_{RF}$$

- L - magnetic properties of the cavity
- C - electric properties
- R - losses due to power dissipated in the cavity walls

Stored energy,  $V_0$  - peak voltage across the gap

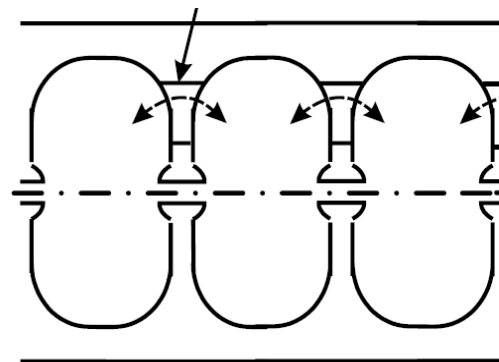
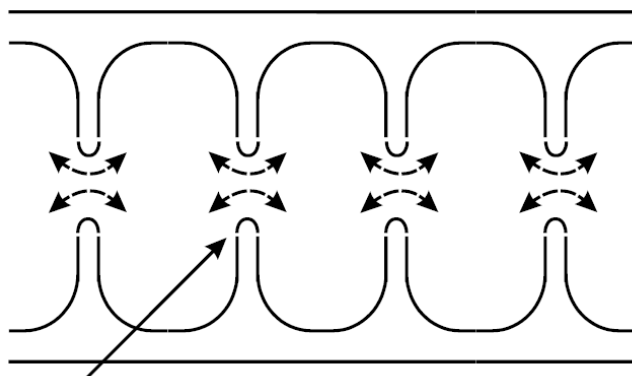
Качествен  
фактор

$$Q = 2\pi f_0 \left( \frac{U}{P} \right)$$

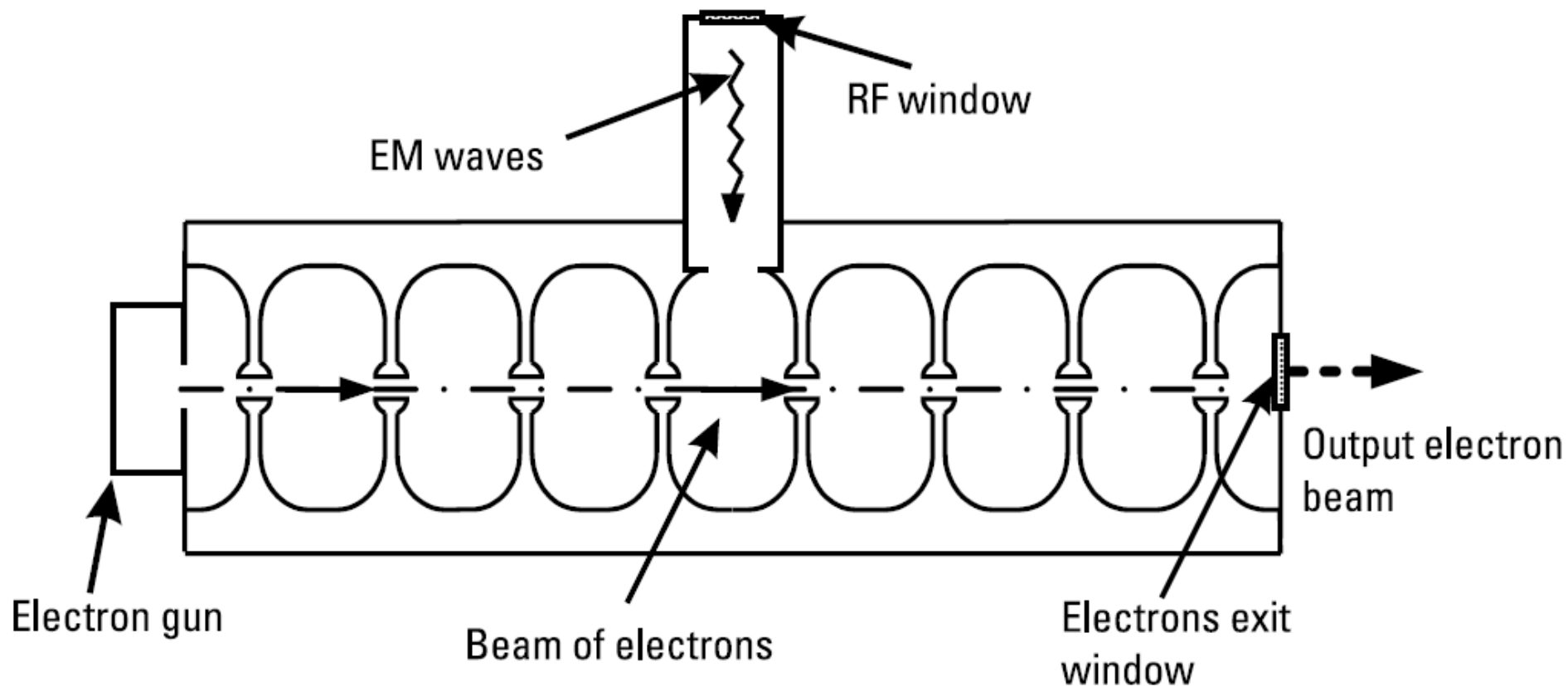
мед -  $Q=1e4$

суперпроводник -  $Q=1e10$

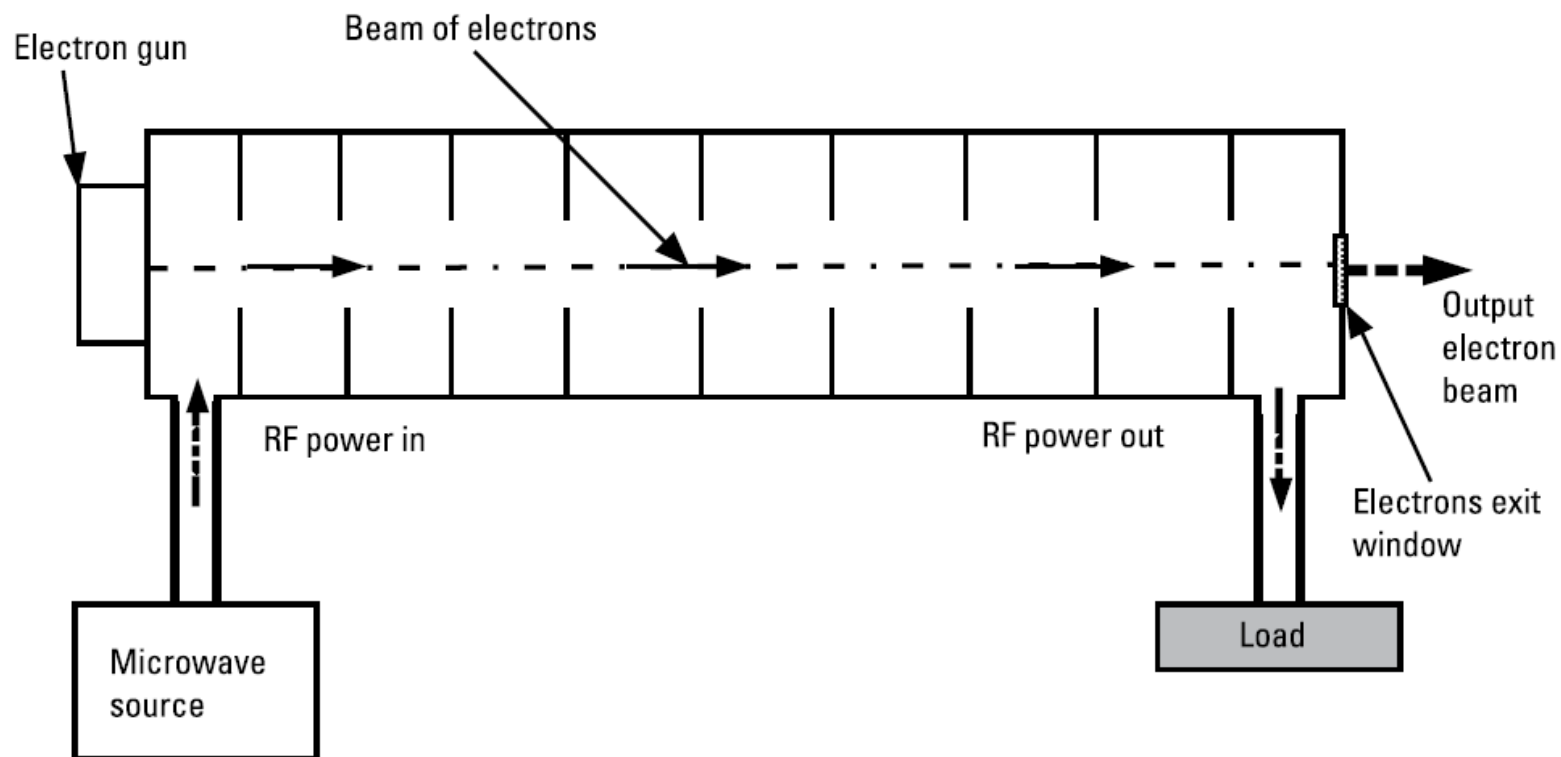
# Масиви от радиочестотни резонатори



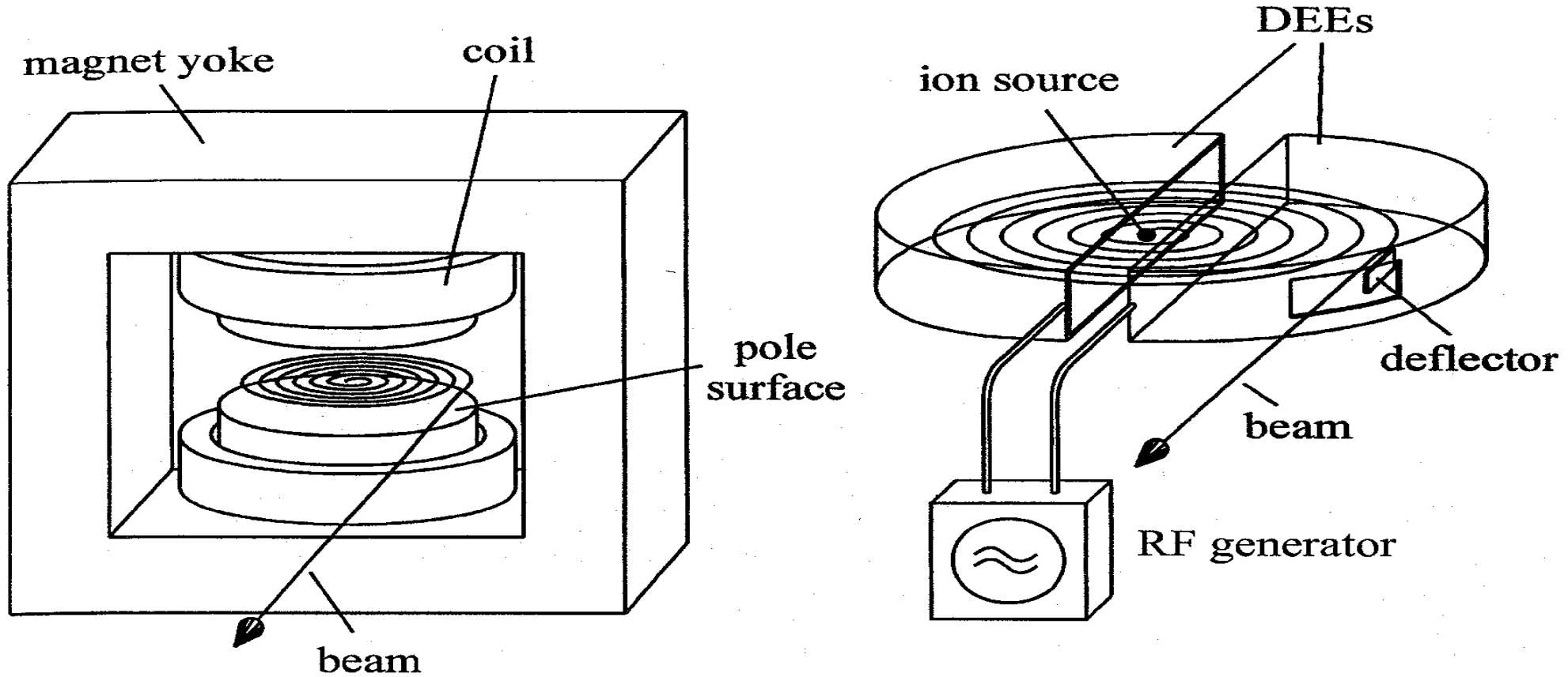
# Линеен ускорител със стояща вълна



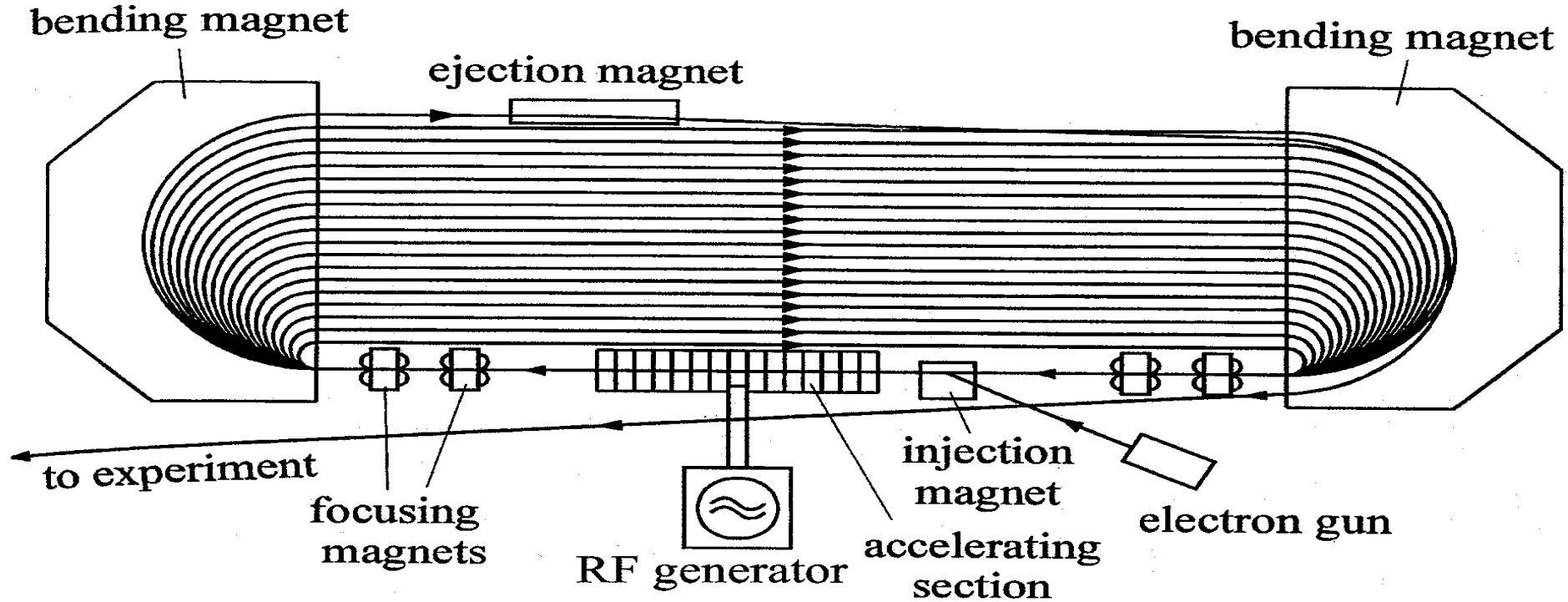
# Линеен ускорител с бягаща вълна



# ЦИКЛТРОН

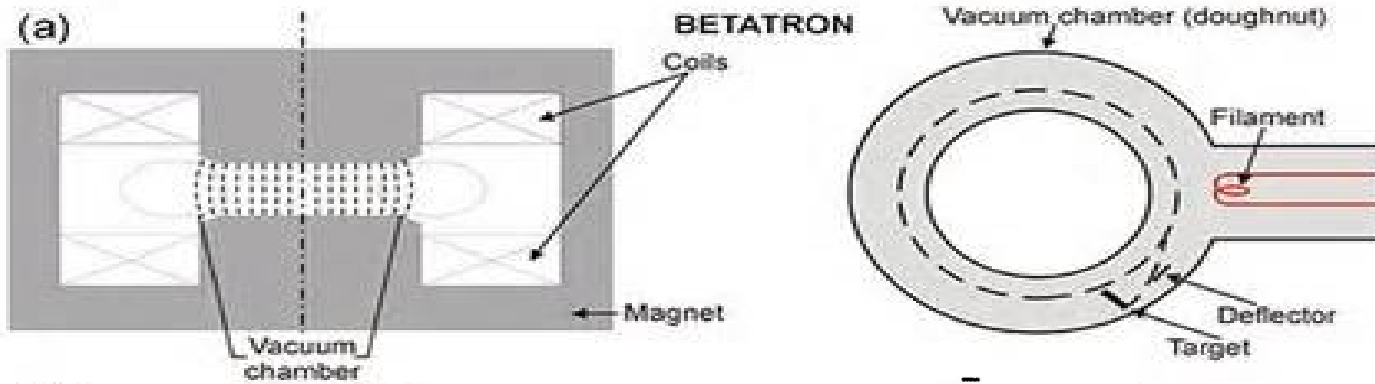


# Микротрон





# Бетатрон

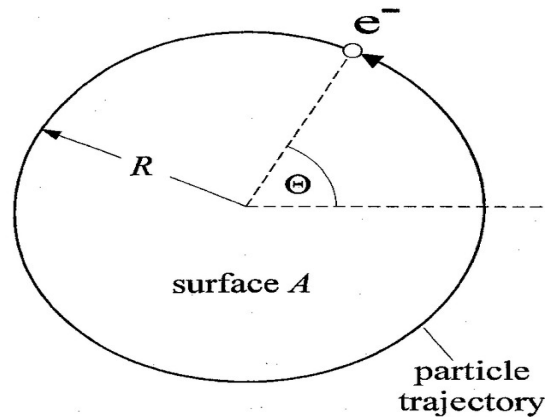


$$B(r) \neq \text{const}$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = - \iint_A \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\mathbf{B}(t) = B_0 \sin \omega t$$

$$d\mathbf{E}/d\Theta = 0$$



$$|\mathbf{F}| = |\dot{\mathbf{p}}| = -e|\mathbf{E}| = \frac{eR}{2} \langle |\dot{\mathbf{B}}| \rangle$$

Условие за стабилна траектория.

$$|\mathbf{B}(t)| = \frac{1}{2} \langle |\mathbf{B}(t)| \rangle + |\mathbf{B}_0|.$$

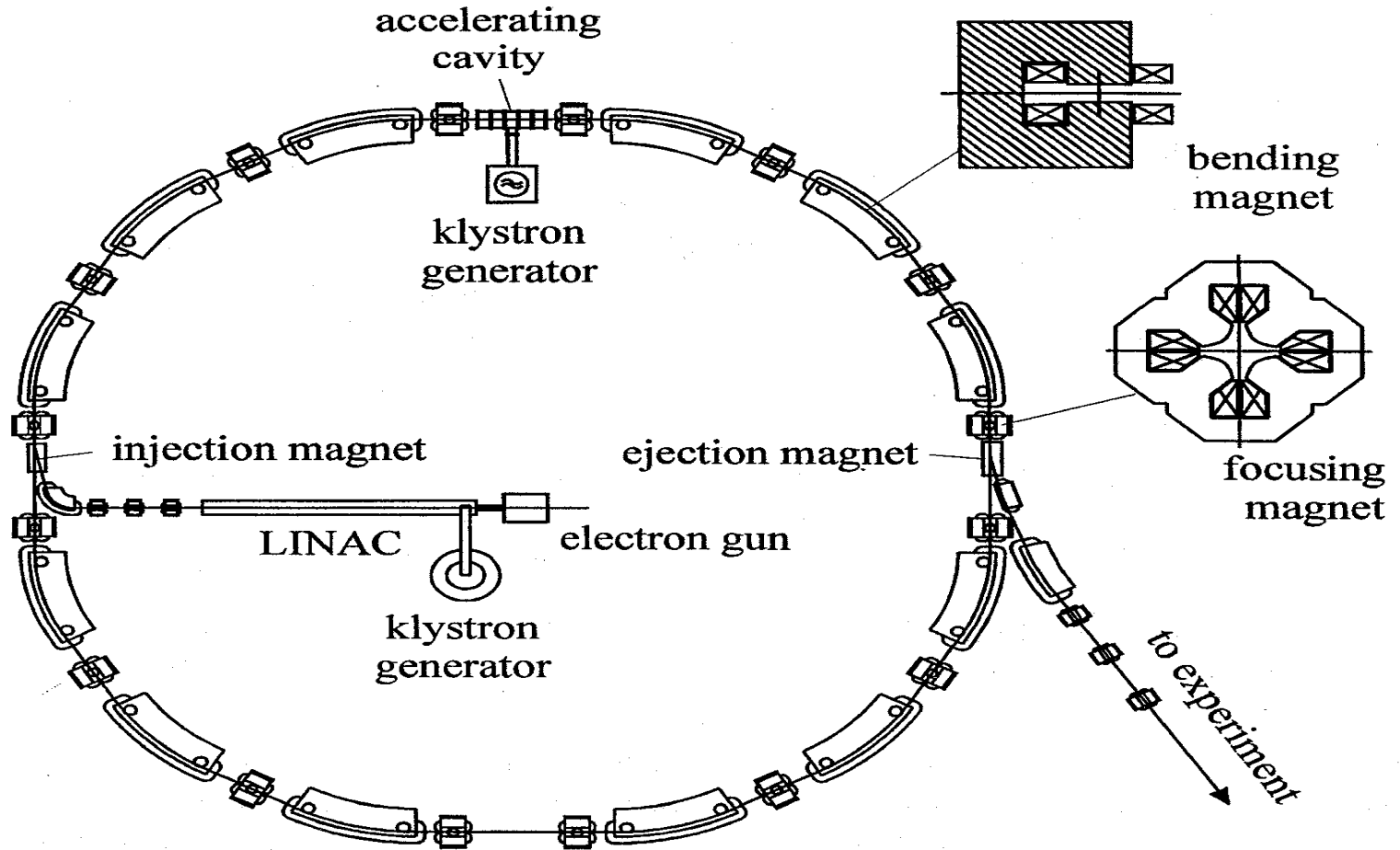


A German 6 MeV betatron (1942)

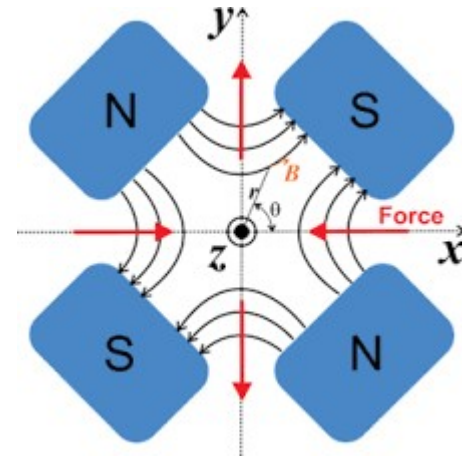
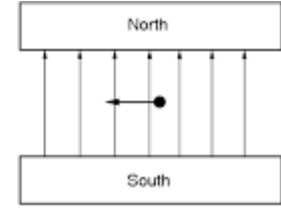
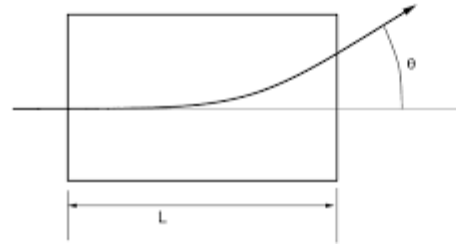
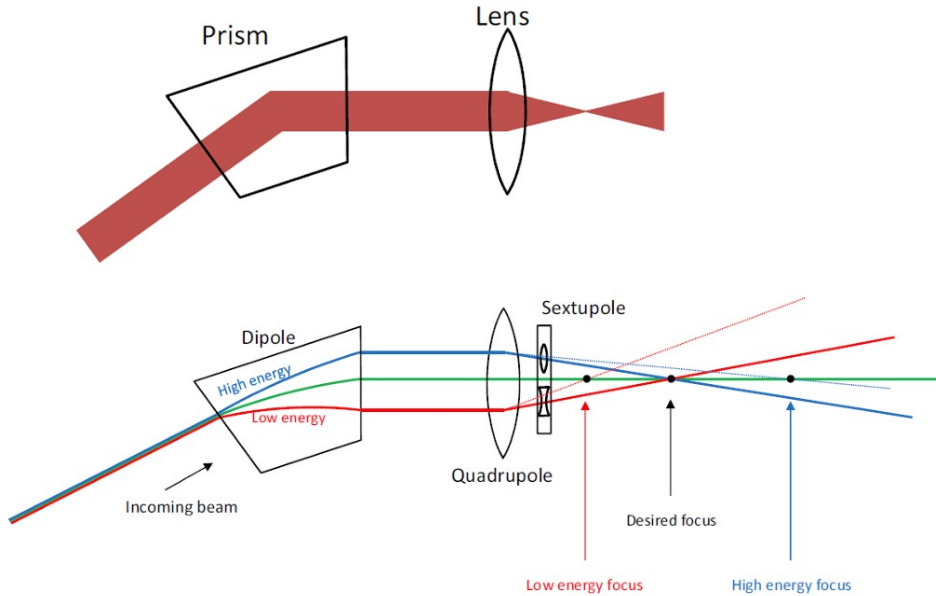
[https://en.wikipedia.org/wiki/Betatron#/media/File:Betatron\\_6MeV\\_\(1942\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Betatron#/media/File:Betatron_6MeV_(1942).jpg)

# СИНХРОТРОН

$$R = \frac{E}{ecB}$$



# Насочване и фокусиране на снопа



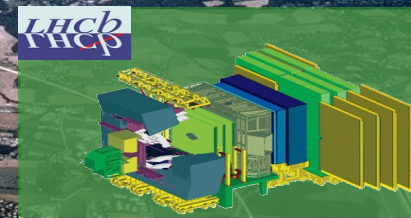
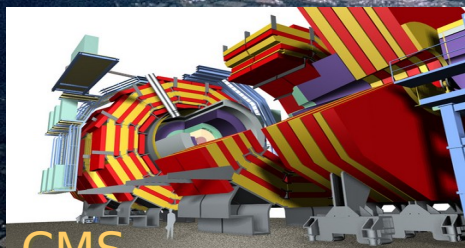
Мекo фокусиране  
Твърдо фокусиране - FODO

# LHC

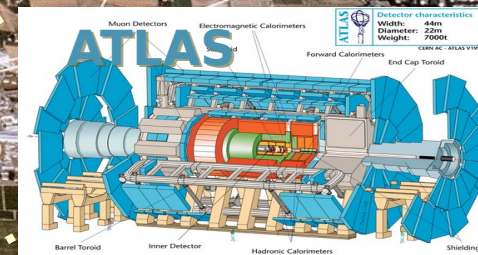
Нова ера във фундаменталните изследвания

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

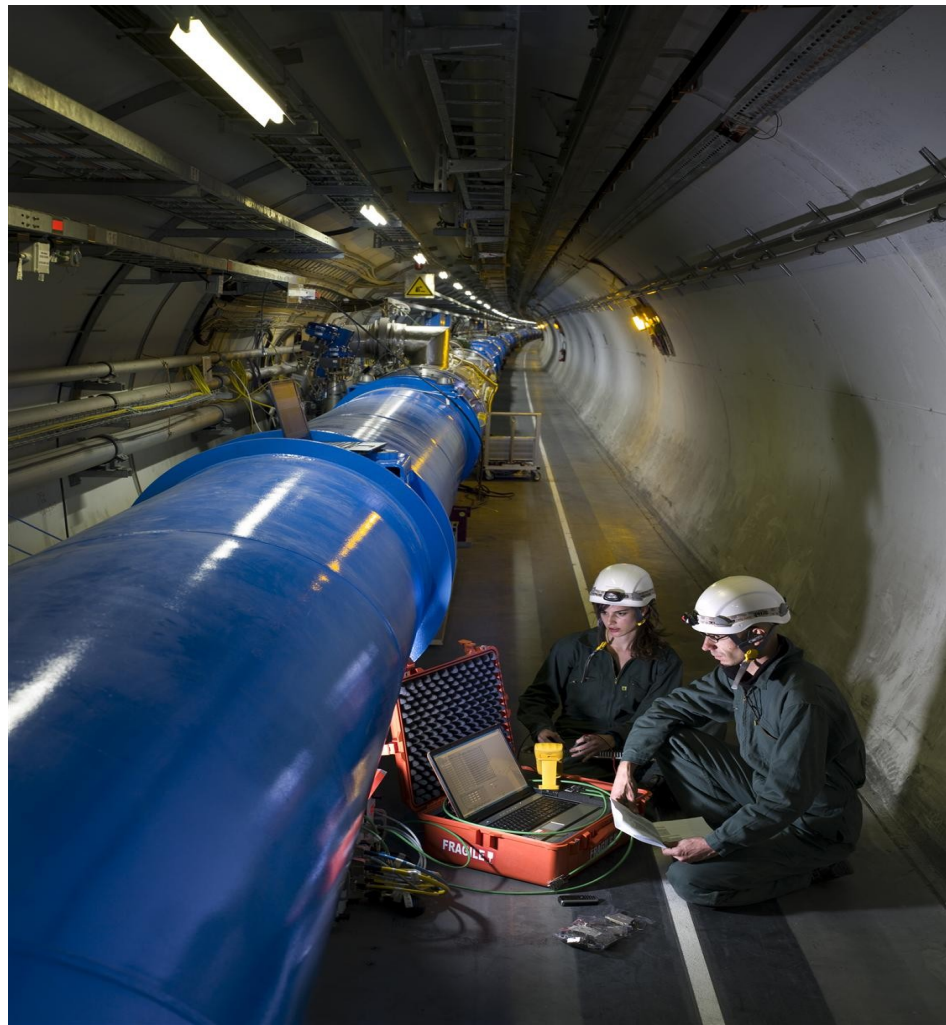
Ключов момент за физиката на елементарните частици



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



# Големият адронен колайдер (LHC)



Протоните се ускоряват от мощни електрични полета до скорост много (много) близка до скоростта на светлината.

И се насочват по своите кръгови орбити от мощни свръхпроводящи диполни магнити.

Диполните магнити създават магнитно поле с индукция 8.3 T (200'000 x Earth's magnetic field) & 1.9K (-271°C) като се охлаждат със течен хелий.

Протоните пътуват в тръба, която е под по-добър вакуум и при по-ниска температура от тази в междупланетното пространство.

# Бъдещи ускорители

## Compact Linear Collider



Компактният линеен колайдер (CLIC) е предложен ускорител, CERN

- електрони и позитрони (антиелектрони)

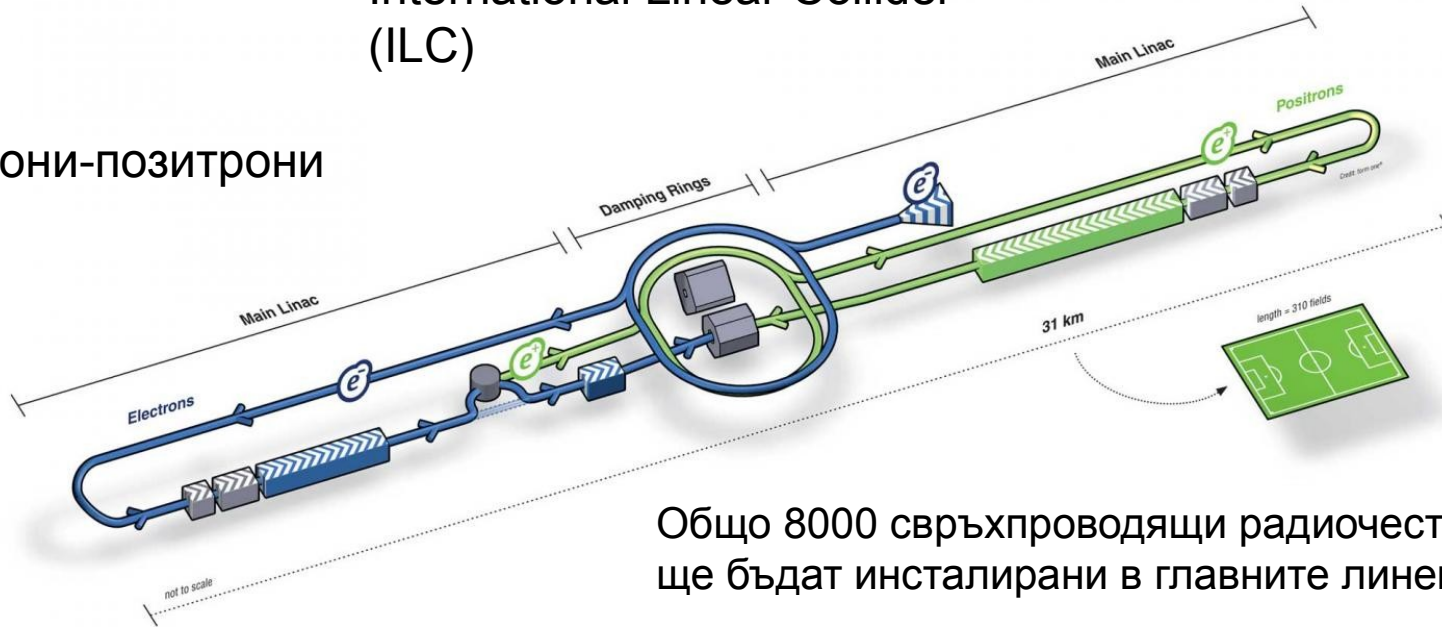
- три етапа, при енергии на сблъсък съответно от 380 GeV, 1,5 TeV и 3 TeV, за дължина на обекта, варираща от 11 до 50 km.

- 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 снап, се генерира локално чрез забавяне на втори електронен снап с висок интензитет – „задвижващия снап“ – в специални структури за извличане на енергия. Това ще позволи сблъсъци до 3 TeV..

# International Linear Collider (ILC)

електрони-позитрони



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

(CEPC)

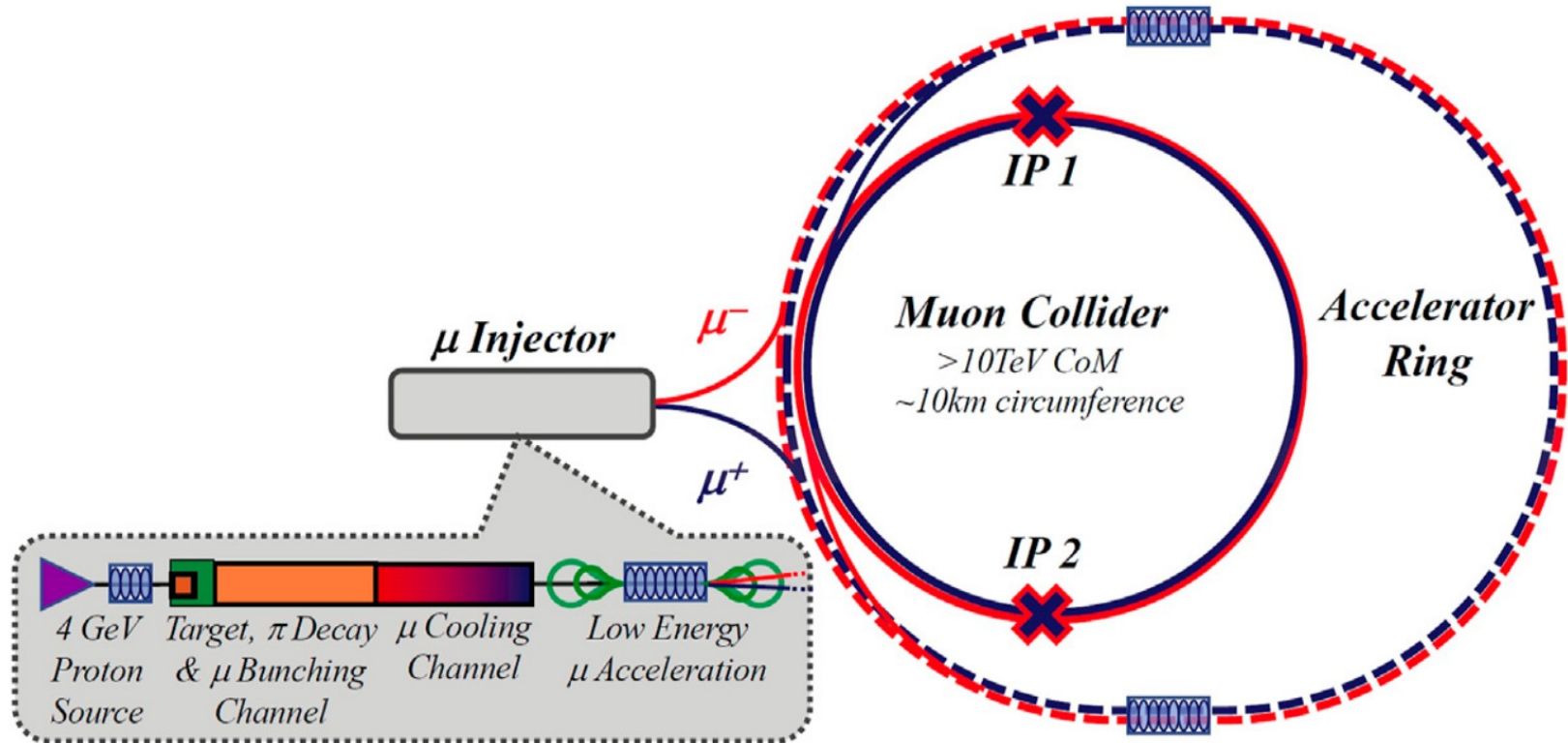
240 GeV, 91 GeV и 160 GeV,



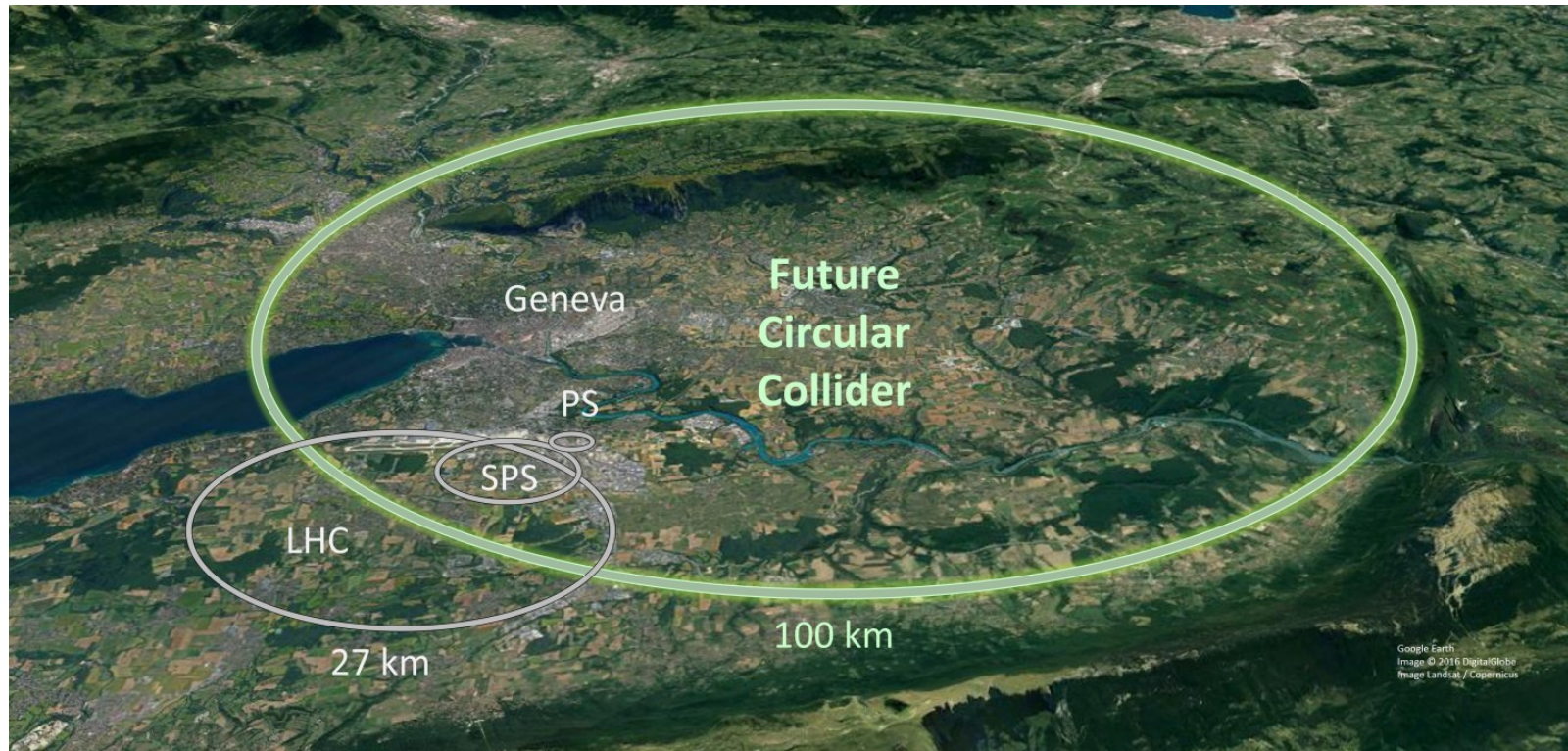
Основната цел е CEPC да се използва като фабрика за Хигс бозони. Предварителният оперативен план „7-2-1“ е да работи първо като фабрика на Хигс в продължение на 7 години и да създаде един милион частици на Хигс или повече, последван от 2 години работа като фабрика Super Z за създаване на един трилион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



# Мюонни колайдери



# Future Circular Collider



100 TeV

Благодаря за вниманието!!!