



ВВЕДЕННЯ В ФІЗИКУ ПРИСКОРЮВАЧІВ

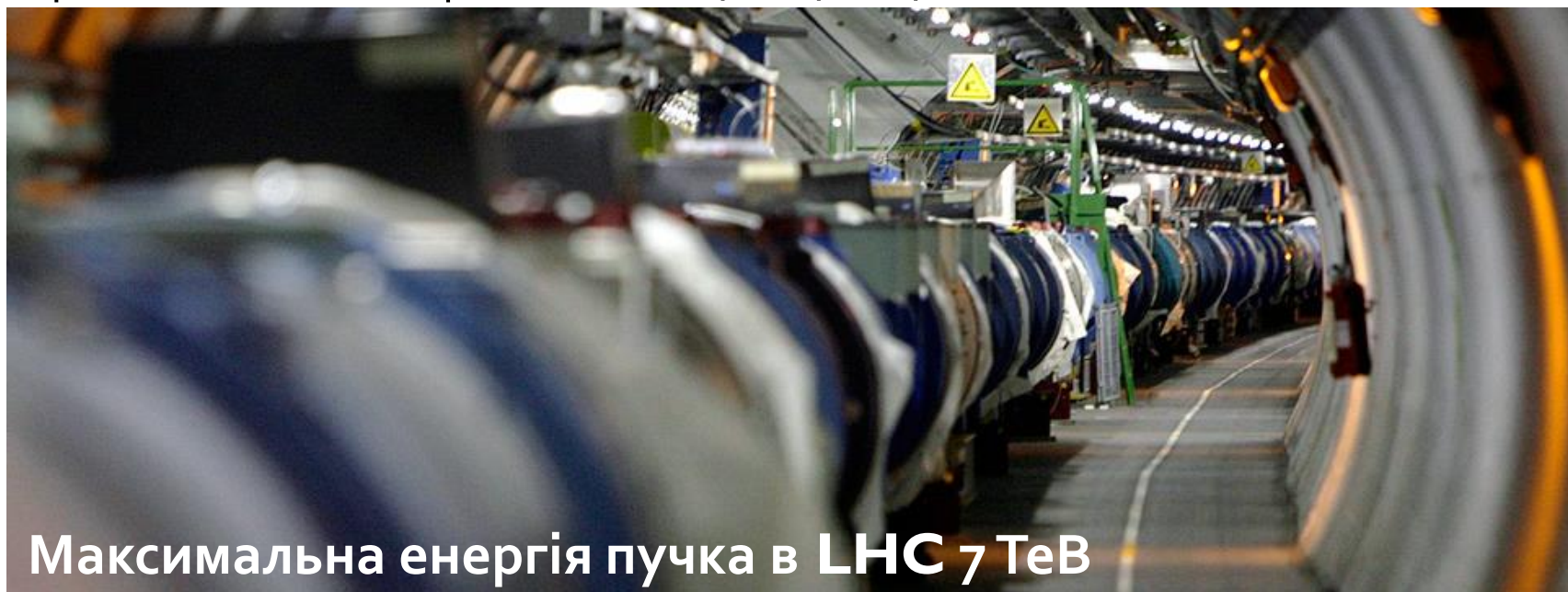
ЯРОСЛАВА ПРОФАТІЛОВА

ЗМІСТ

- Поняття прискорювача, основні одиниці вимірювання в фізиці прискорювачів
- Типи прискорювачів
- Прискорення заряджених частинок
- Поперечна динаміка пучка
- Колективні ефекти
- Прискорюючий комплекс в CERN
- Застосування прискорювачів

ЩО ТАКЕ ПРИСКОРЮВАЧ?

Пристрій для прискорення заряджених частинок (електронів, протонів, іонів). Частинки в прискорювачах розганяються до енергій \sim MeV, GeV, TeV,...



Максимальна енергія пучка в LHC 7 TeV

Основний принцип роботи прискорювачів: взаємодія заряджених частинок із електромагнітними полями.

ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАНЬ

Енергія:

1 **електронвольт** – енергія, яку набуває 1 електрон, коли проходить через електростатичний бар'єр з потенціалом один вольт. **1 eV = 1.602×10⁻¹⁹ Дж**

Маса:

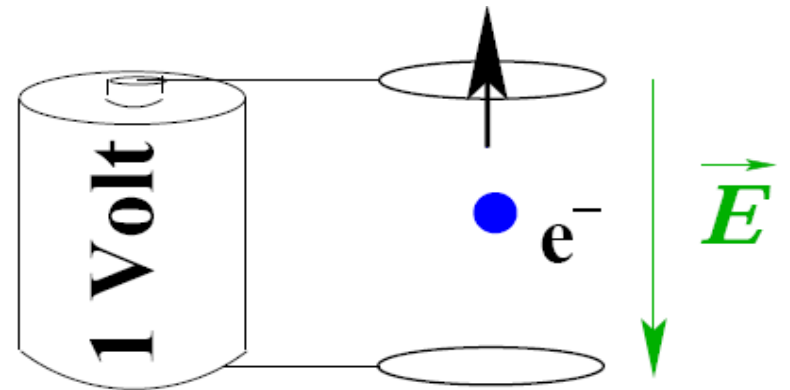
1 електронвольт, маючи на увазі енергію спокою, тобто $E = mc^2$

Маса електрону: $mc^2 = 0,511 \text{ MeV}$

Маса протону: $mc^2 = 938 \text{ MeV}$

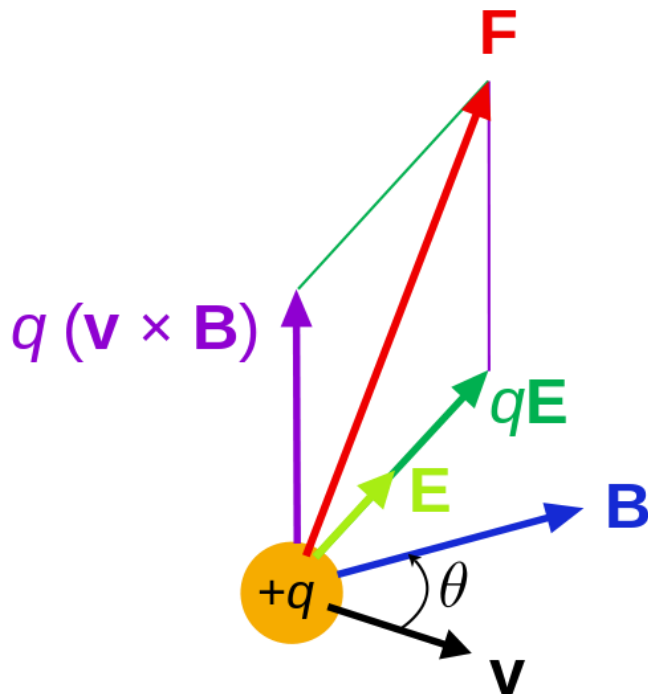
Імпульс: 1 електронвольт, тобто pc .

Швидкість: $\frac{v}{c}$, c – швидкість світла = 299 792 458 м/с.



СИЛА ЛОРЕНЦА

Сила Лоренца – сила, з якою діє електромагнітне поле на заряджену частинку. Електричне поле використовується для прискорення частинок, а магнітне поле для зміни траєкторії її руху.



$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

F – вектор результуючої сили

q – заряд частинки

E – вектор напруженості електричного поля

v – вектор швидкості

B – вектор індукції магнітного поля

ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ (LINAC)

Лінійний прискорювач – прискорювач, в якому заряджені частинки рухаються по лінійній траєкторії, прискорення відбувається по всій довжині прискорювача.

$$E_{\text{ц.м.}} \approx (2E_1 m_2)^{1/2}$$



Переваги

- + пряма траєкторія
- + один проліт
- + ...

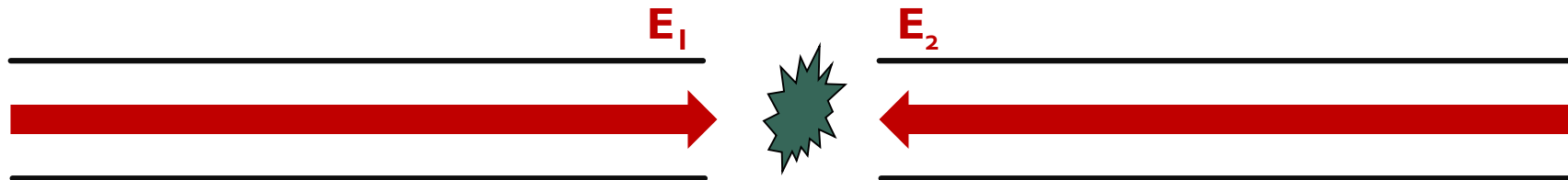
Недоліки

- енергія зіткнення
- довжина прискорювача
- ...

ЛІНІЙНИЙ КОЛЛАЙДЕР

Коллайдер – прискорювач на зустрічних пучках.

$$E_{\text{ц.м.}} \approx (4E_1E_2)^{1/2}$$



Переваги

- + пряма траекторія
- + один проліт
- + ...

Недоліки

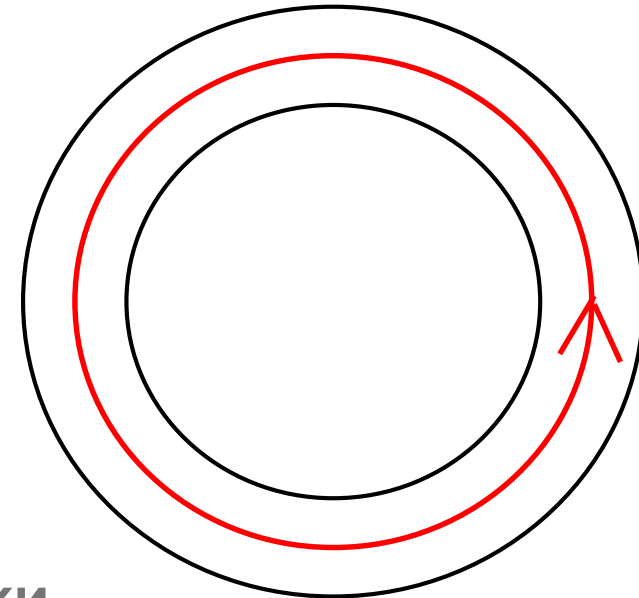
- довжина прискорювача
- ...

ЦИКЛІЧНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

В **циклічних прискорювачах** частинки багаторазово пробігають один і той же шлях, щоразу прискорюючись. Для того, щоб частинки рухались необхідною траєкторією використовується сильне магнітне поле.

Переваги

- + декілька прольотів
- + можна прискорювати в одній точці
- + ...

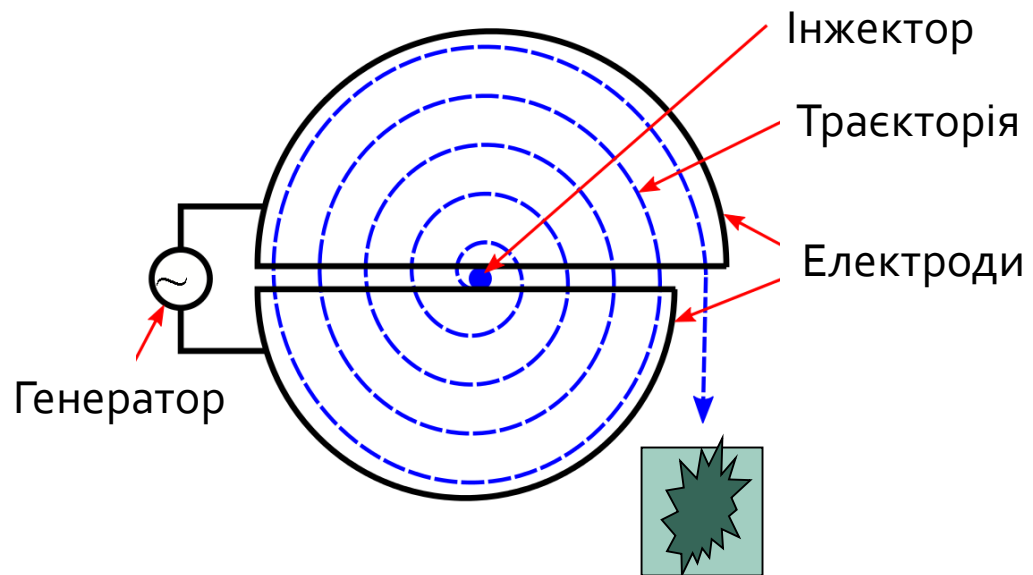


Недоліки

- треба повертати частинки
- синхротронне випромінювання
- ...

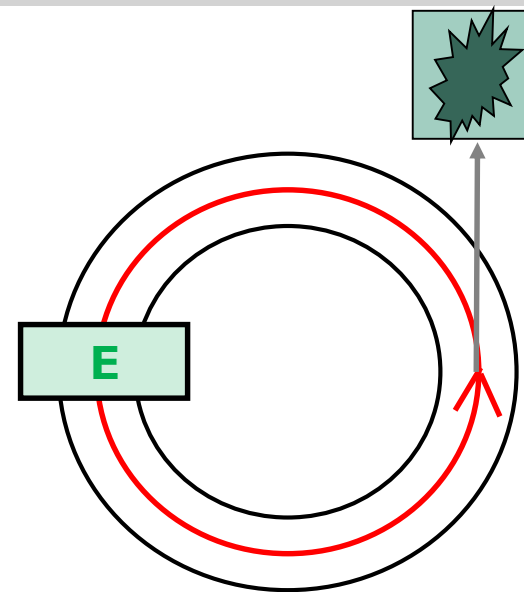
ЦИКЛІЧНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Циклотрон



Величезний дипольний магніт, компактний дизайн, постійне магнітне поле, низька енергія, один проліт

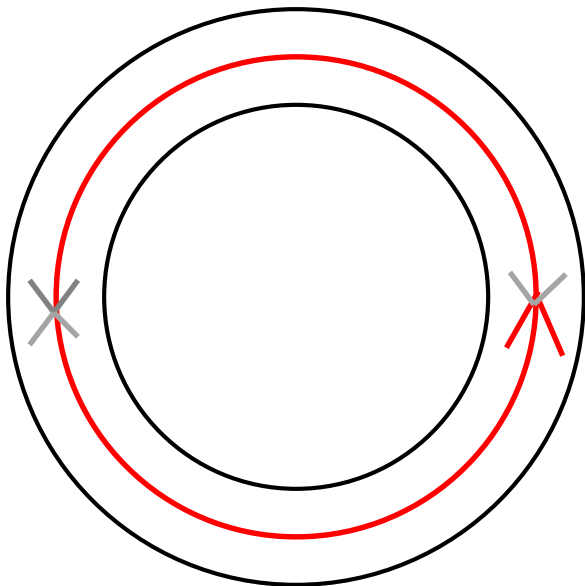
Синхротрон



Змінюється магнітне поле, невеликі магніти, велика енергія, прискорення в одній точці.

ЦИКЛИЧНІ КОЛАЙДЕРИ

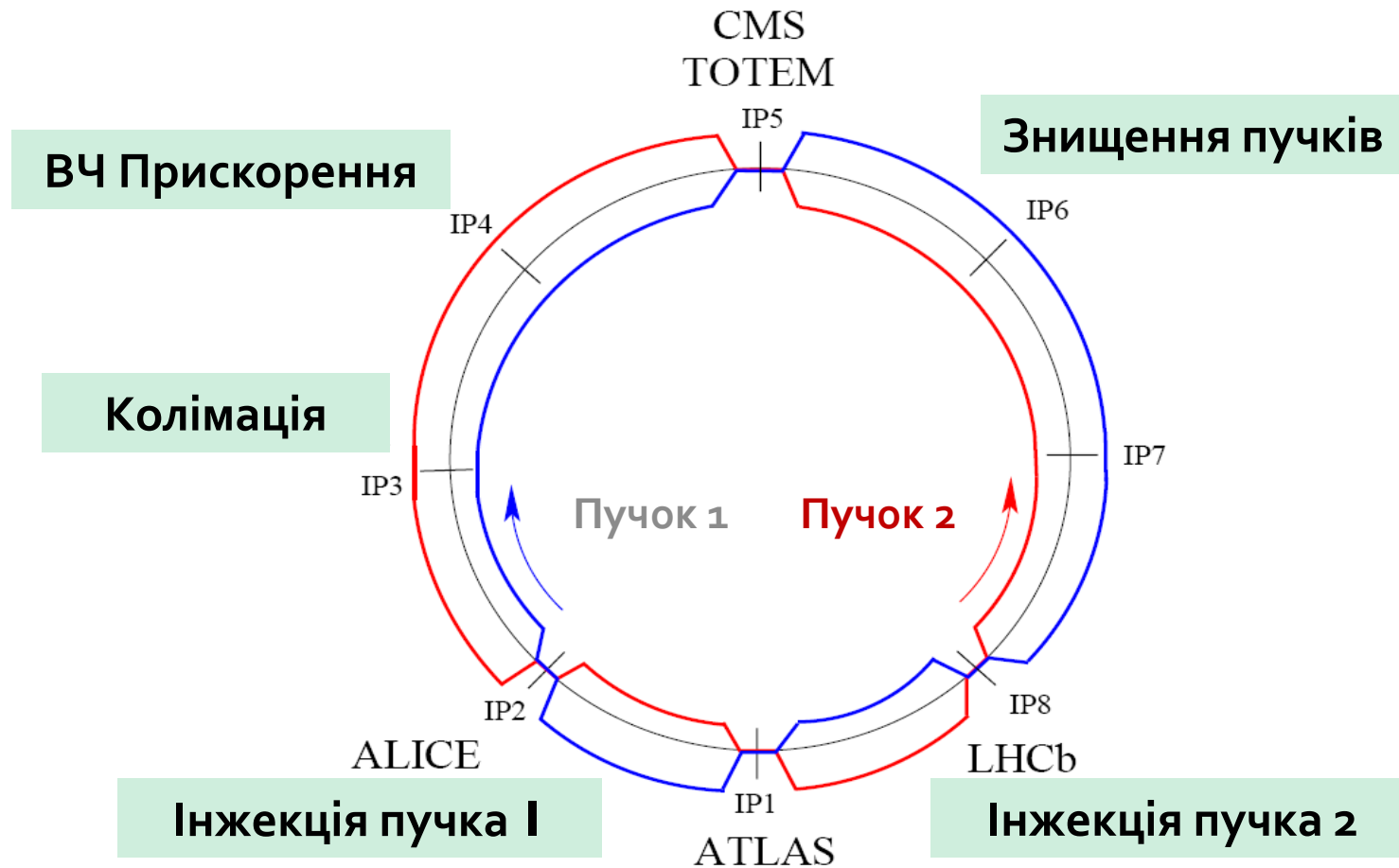
У **циклических колайдерах** два пучка частинок рухаються в протилежних напрямках по колу. Типи колайдерів: лептонний, адронний.



Колайдери із одним типом частинок, наприклад, p-p потребують дві камери для їх повороту за циклічною траєкторією. Пучки знаходяться в одній камері в районі точки зіткнення.

LHC: 8 можливих точок зіткнення пучків, 4 основних експерименти, довжина окружності 27 км.

LHC (ВЕЛИКИЙ АДРОННИЙ КОЛАЙДЕР)



ПРИСКОРЕННЯ ЧАСТИНОК

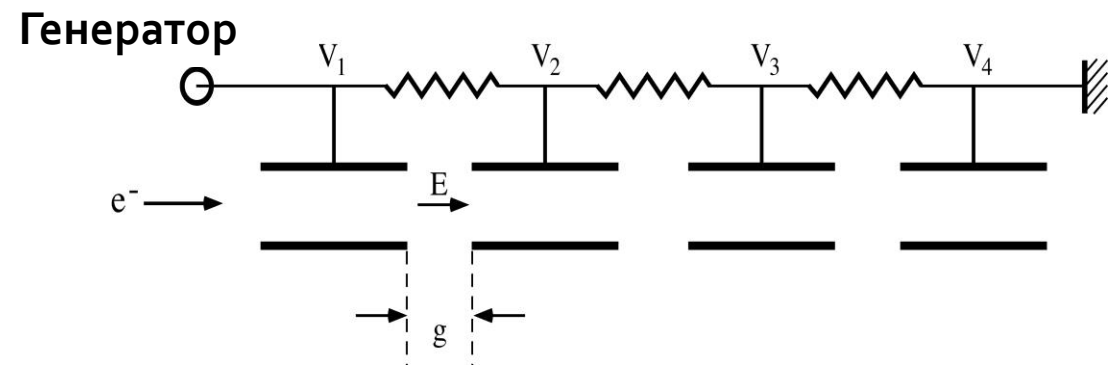
Прискорювач повинен повідомляти зарядженим частинкам кінетичну енергію. Для цього створюється **електричне поле**, узгоджене з напрямком руху частинки.

Електростатичний прискорювач

$$\mathbf{F} = q \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = n e \Delta V$$

- обмеження $V = \sum V_i$
- можливі іскри і пробої!

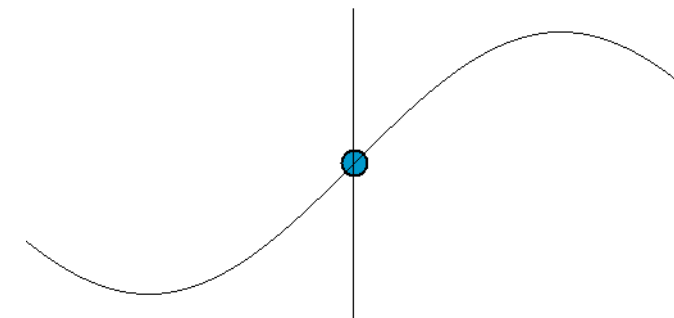


Альтернатива: використовувати прискорення електромагнітними хвилями

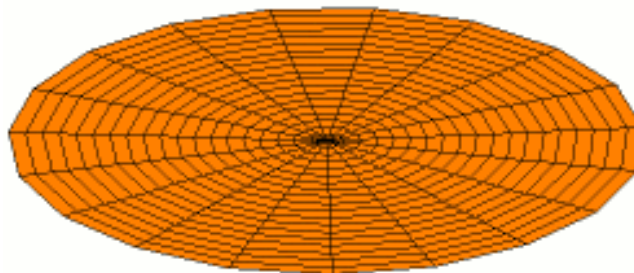
ПРИСКОРЕННЯ ХВИЛЕЮ

Прискорення електромагнітною хвилею можливе у випадку, коли напрямок електричного поля хвилі узгоджене з напрямком руху частинки - синхронізм.

Біжуча хвиля



Стояча хвиля

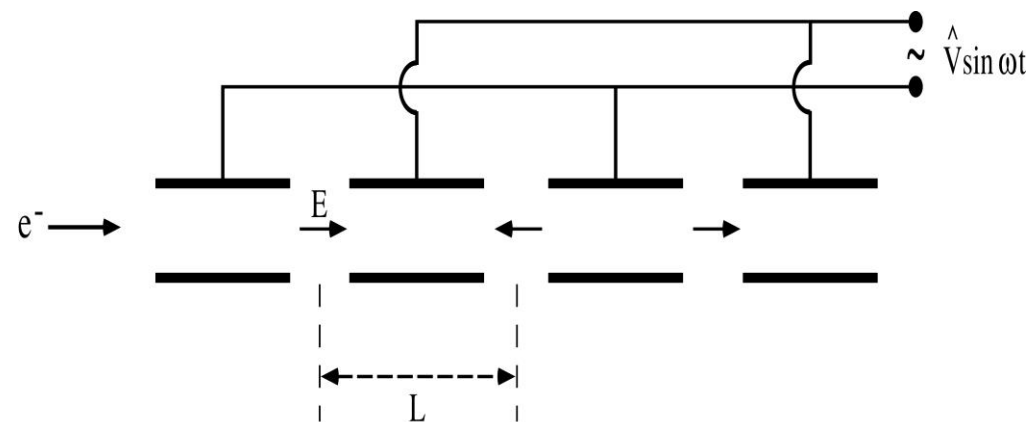


ДРЕЙФОВА ТРУБКА

Дрейфова трубка - низькоенергетичний лінійний прискорювач. Частинка прискорюється змінним електричним полем між електродами.

Синхронізм

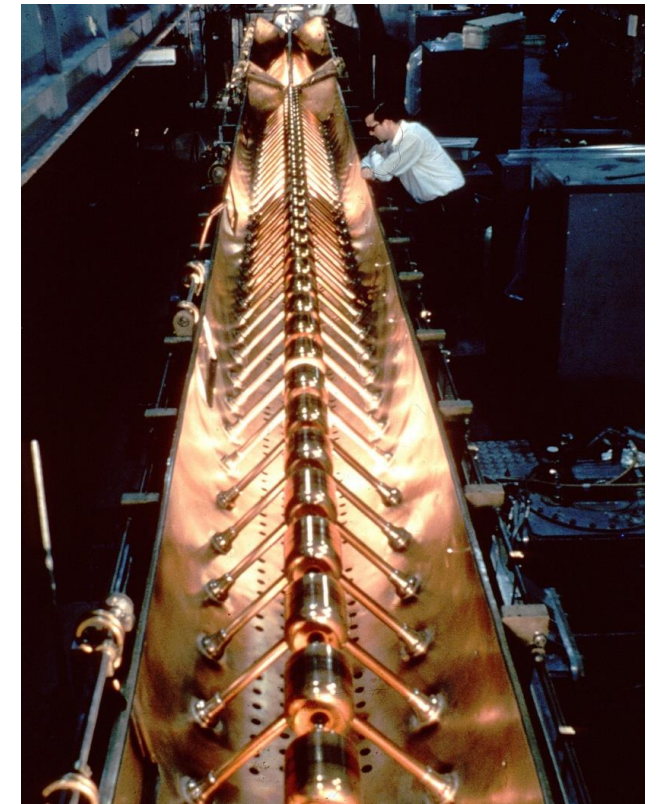
$$L/v = T/2$$



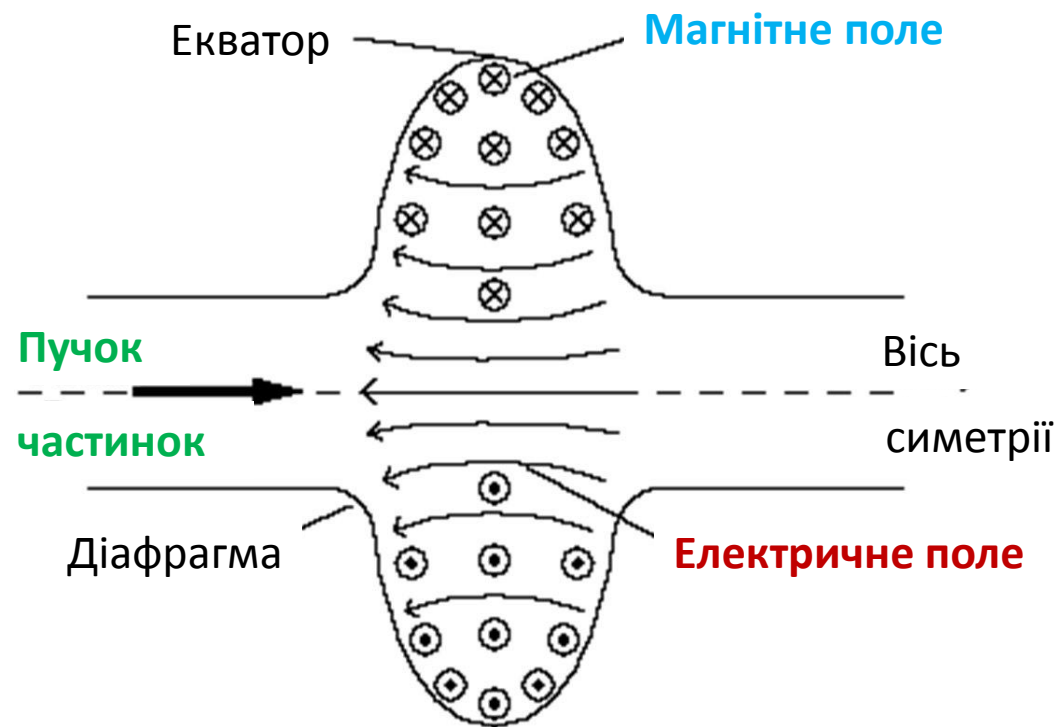
Зі збільшенням швидкості частинок довжина дрейфових трубок повинна зростати, щоб виконувалася умова синхронізму і відбувалося ефективно прискорення.

ДРЕЙФОВА ТРУБКА

Лінійні структури в
CERN



РЕЗОНАТОРНІ СТРУКТУРИ



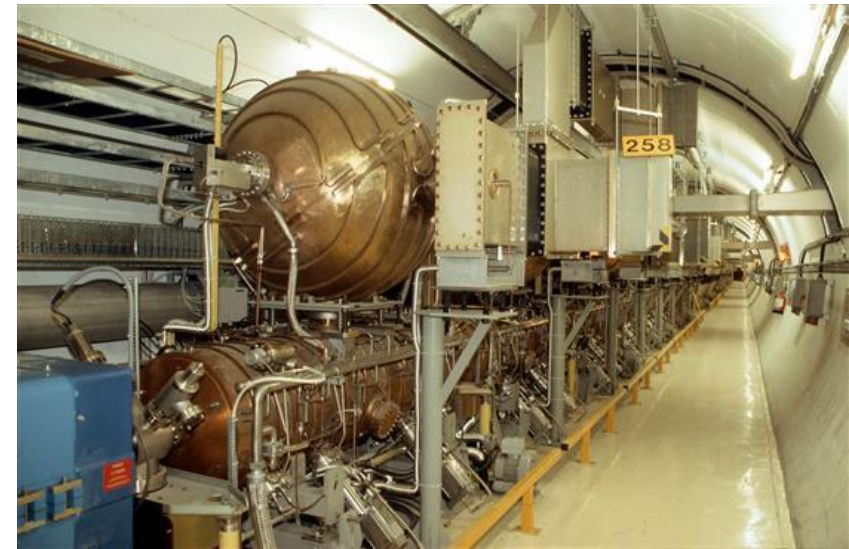
Резонансна частота структури узгоджена з частотою ВЧ генератора

РЕЗОНАТОРНІ СТРУКТУРИ

Для підвищення ефективності прискорення використовуються більш складні форми резонаторних структур.



LHC, надпровідні резонаторні структури,
400 МГц, Прискорення 5 МВ /м

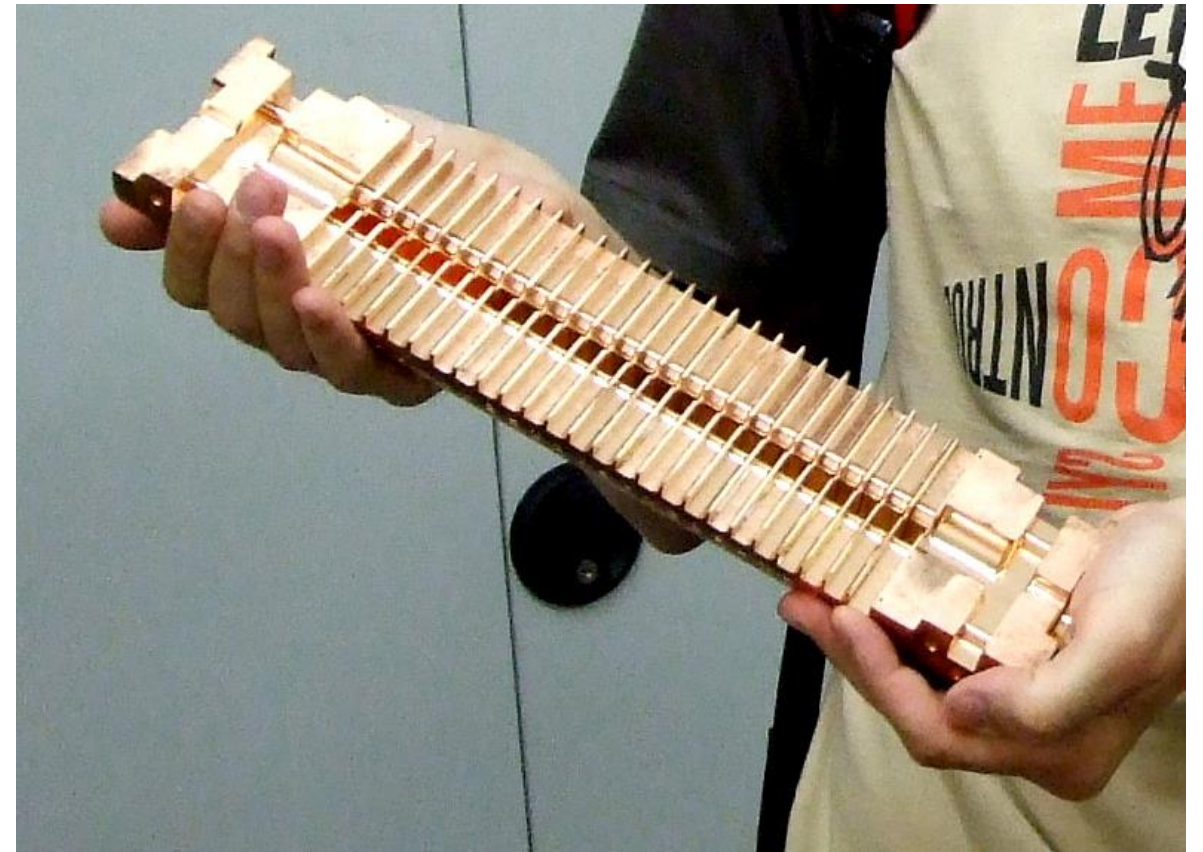


Large Electron-Positron collider, мідні резонатори,
352 МГц

РЕЗОНАТОРНІ СТРУКТУРИ

Чим вище робоча частота - тим менше розмір прискорювальної структури. Однак, необхідна більш висока точність її виробництва і більш дорогі СВЧ генератори.

Мідний резонатор для Compact Linear Collider, 12 ГГц, 100 МВ/м

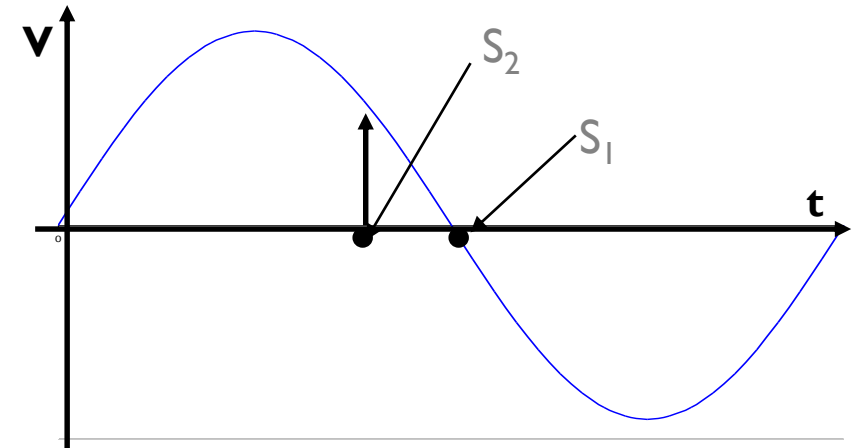


ПРИСКОРЕННЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ

Необхідно повідомити енергію частинкам, щоб їх **прискорити** або **компенсувати** втрати при зверненні в кільці циклічного прискорювача. «Ідеальна» частка повинна перебувати в структурі в одній і тій же фазі хвилі коло за колом.

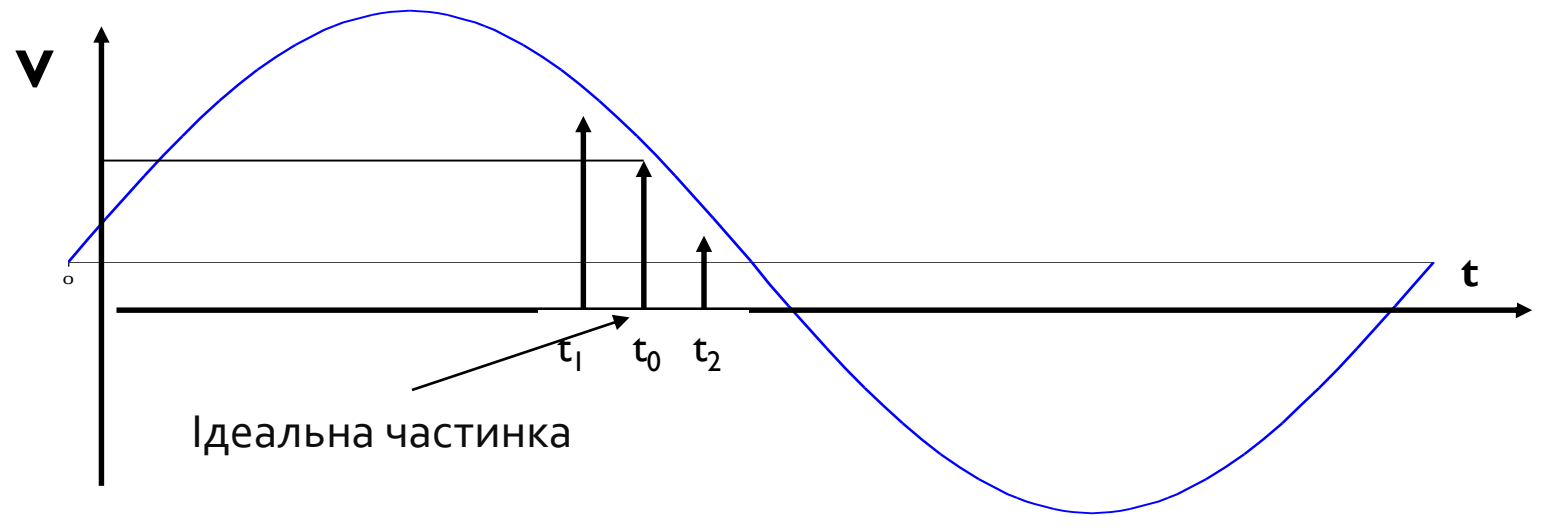
Синхронізм

$$f_{\text{ВЧ}} = h f_{\text{обр}}$$



ПРИНЦИП АВТОФАЗУВАННЯ

Рівноважна фаза повинна розташовуватися на спадаючому схилі синусоїди ВЧ. Таким чином, забезпечується стабільність частинок в повздовжньому напрямі.

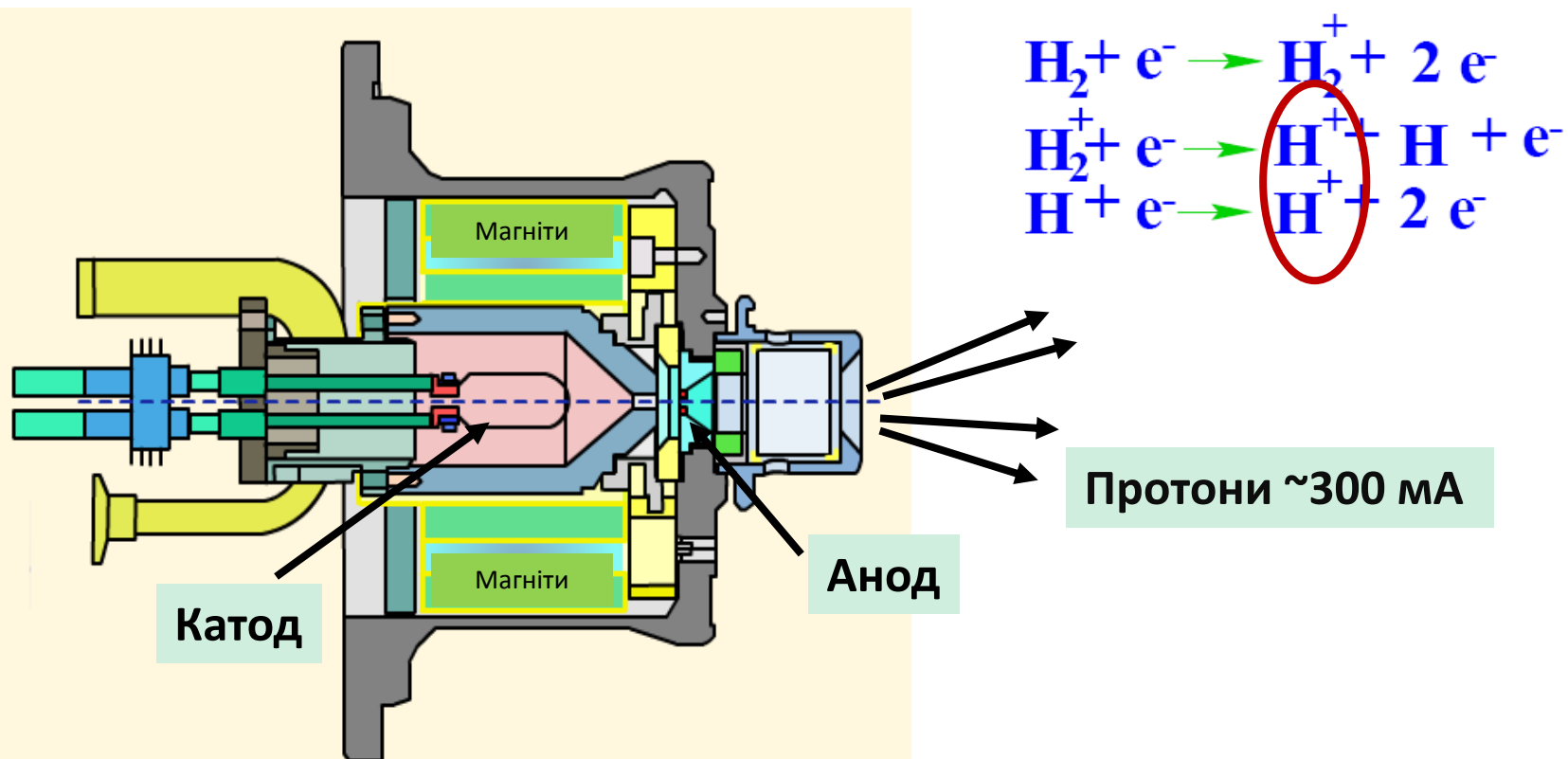


Ідеальна частинка прилітає в момент часу $t_0 \rightarrow V = V_0 \rightarrow \text{OK}$

Частинка прилітає пізніше: $t_2 \rightarrow V_2 < V_0$

Частинка прилітає раніше: $t_1 \rightarrow V_1 > V_0$

ГЕНЕРАЦІЯ ПРОТОНІВ ДЛЯ LHC



Для генерації протонів в LHC використовується дуоплазматрон. В камеру інжектуються водень, який іонізується електронами.

ПУЧКИ ЧАСТИНОК

Частинки згруповуються електромагнітними полями в згустки.
Набори згустків утворюють пучки.

LHC

$h = 35640$

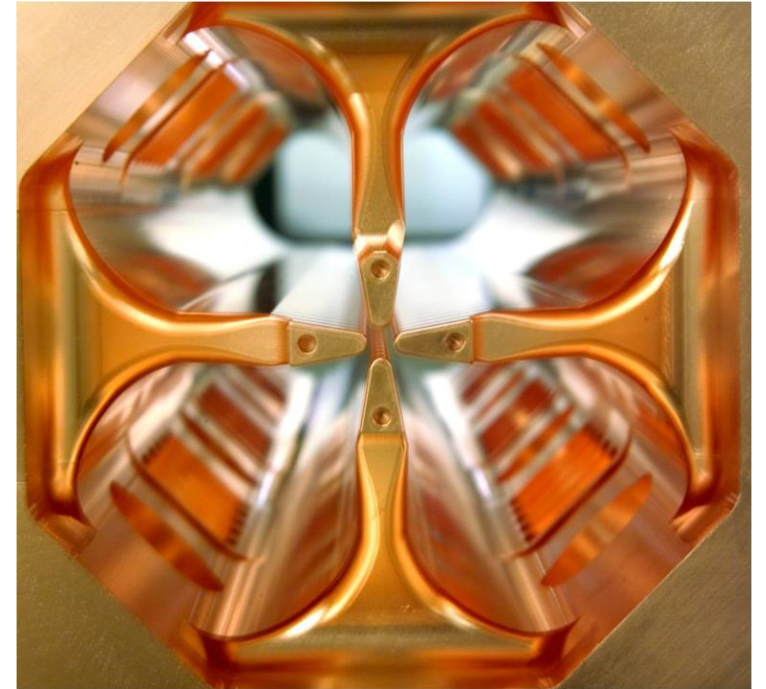
$f_{\text{ВЧ}} = 400 \text{ МГц}$

$V_{\text{RF}} = 16 \text{ МВ}$

2808 згустків в пучці

$$f_{\text{ВЧ}} = h f_{\text{обер}}$$

$$F_{\text{обер}} = c / (2\pi R)$$



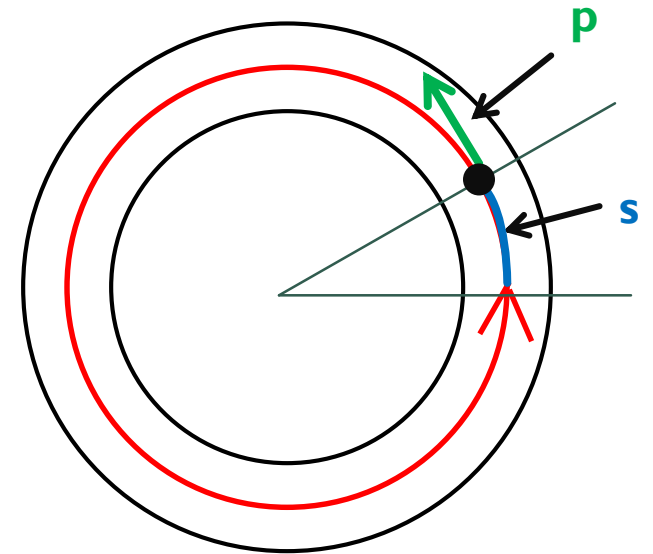
Високочастотний квадруполь:
фокусування, прискорення
і створення згустків частинок.

ДИНАМІКА ПУЧКА

Для того, щоб описати рух частинок в циклічному прискорювачі, кожна частка характеризується наступними шістьма змінними:

- азимутальна позиція в кільці: s
- імпульс: p
- горизонтальна позиція: x
- горизонтальний кут: x'
- вертикальний позиція: y
- вертикальний кут: y'

Маємо шестівимірний фазовий простір (s, p, x, x', y, y')



ДИНАМІКА ПУЧКА

У прискорювачі, розробленому для роботи з енергією $E_{\text{ном}}$, всі частинки виду $(s, E_{\text{ном}}, 0, 0, 0, 0)$ будуть циркулювати у центрі вакуумної камери по колу. Проте, це лише «ідеальні» частинки.

Проблеми виникають коли:

- Використовуються дипольні магніти для повороту пучка
- $E \neq E_{\text{ном}}$ або $(p-p_0) / p = \Delta p / p_{\text{ном}} \neq 0$
- $x, x', y, y' \neq 0$

ДИПОЛЬНІ МАГНІТИ

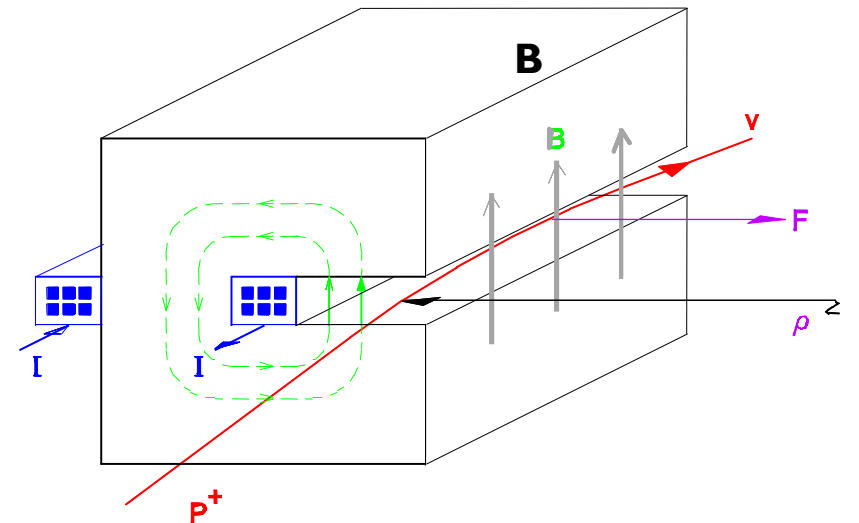
$$\mathbf{F}_{\text{Лоренца}} = q [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

$$\mathbf{F}_{\text{центр}} = mv^2/r$$

Магнітна жорсткість

$$Br = mv/q = p/q$$

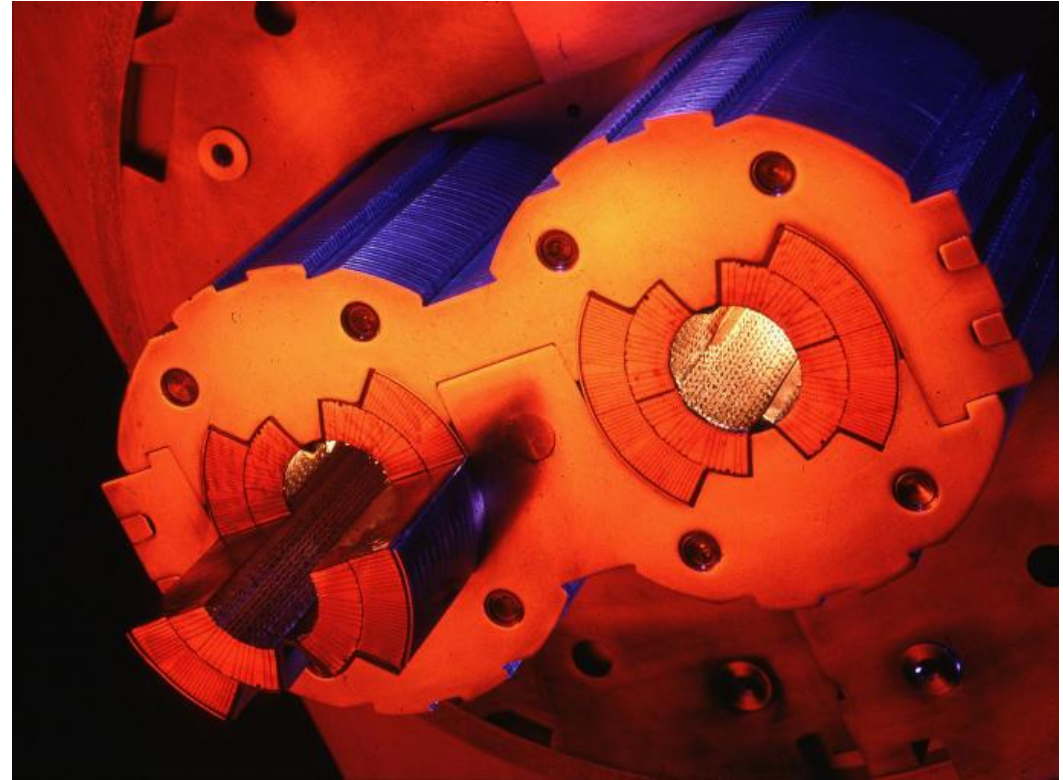
Частинки з однаковою магнітною жорсткістю рухатимуться за однаковими траєкторіями в полі \mathbf{B} .
Вираз також вірний для релятивістського випадку, якщо імпульс $m\mathbf{v}$ замінити на релятивістський імпульс \mathbf{p} .



ДИПОЛЬНІ МАГНІТИ



«Теплий» магніт



Надпровідний магніт

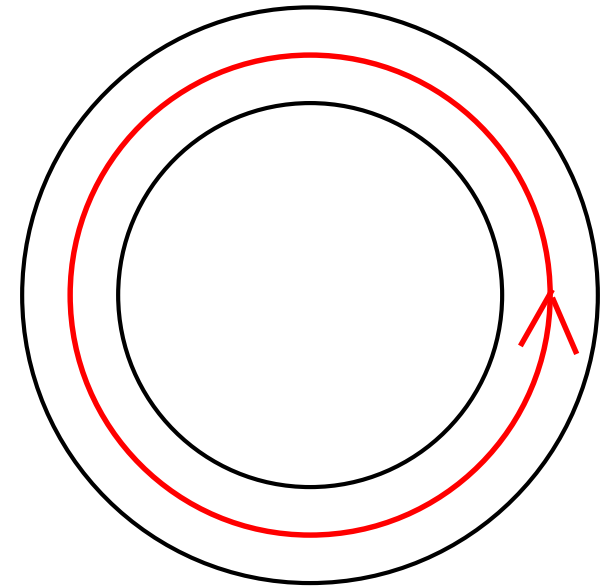
ІДЕАЛЬНИЙ КОЛАЙДЕР

Якщо знехтувати синхротронного випромінювання в диполі, гравітацією, то ідеальні частки будуть циркулювати на осі циклічного коллайдера вічно.

На жаль:

- гравітація $\Delta y = 20$ мм за 64 мс
- вирівнювання установки
- рух ґрунту
- відхилення ЕМ полів від розрахункових
- помилки в енергії частинок, положенні

Необхідне фокусування частинок!



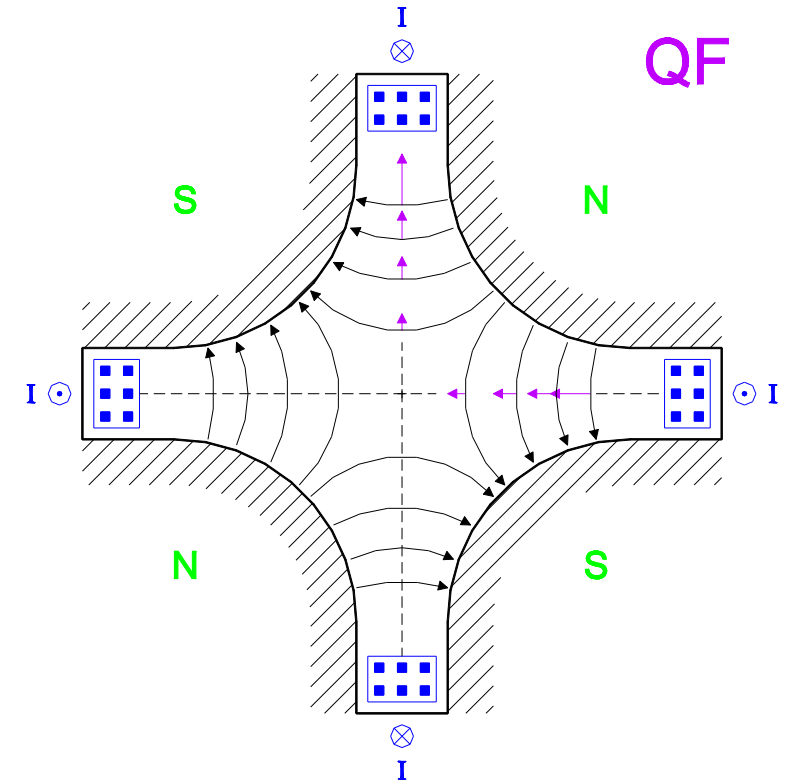
ФОКУСУВАННЯ КВАДРУПОЛЯМИ

$$F_x = -gx$$

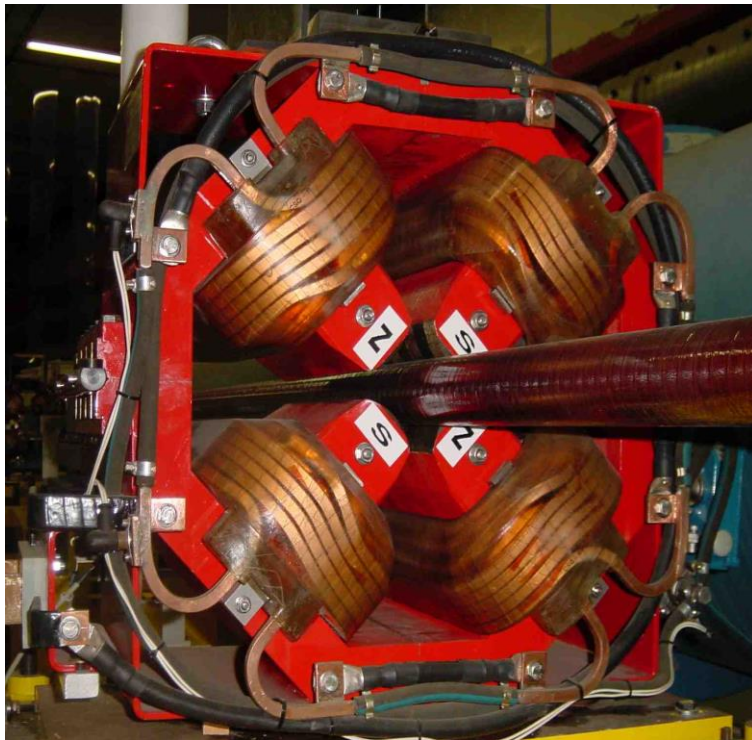
$$F_y = gy$$

Сила збільшується лінійно із зміщенням

На жаль, такий квадруполь фокусує частки в горизонтальній площині і розсіює у вертикальній площині



КВАДРУПОЛІ



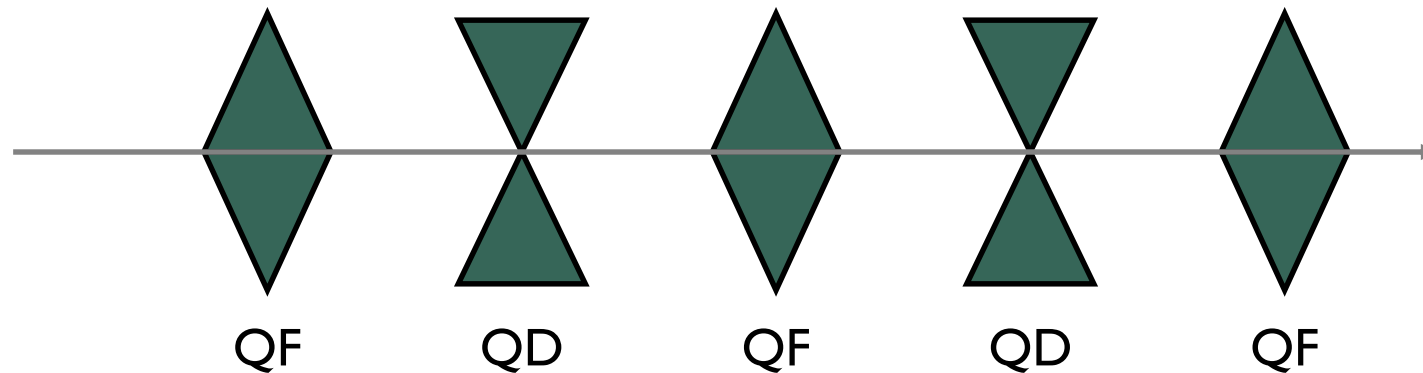
«Теплий» магніт



Надпровідний магніт

ЗНАКОЗМІННЕ ФОКУСУВАННЯ

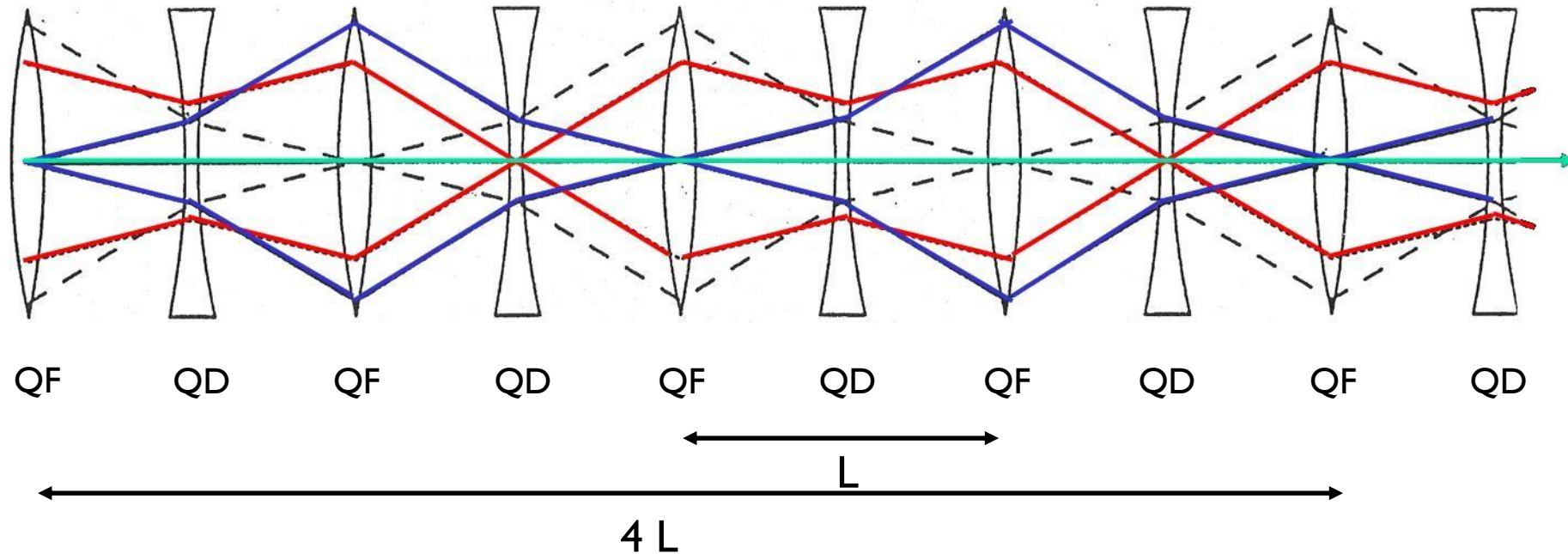
Основна ідея: відмовитися від одночасного фокусування в двох площинах. Частинки, що мають $x, x', y, y' \neq 0$ будуть осцилювати навколо «ідеальної» частинки всередині вакуумної камери.



QF – фокусуючий квадруполь, **QD** – дефокусуючий. Схема правильна лише в одній площині: горизонтальній або вертикальній.

КОНЦЕПЦІЯ FODO

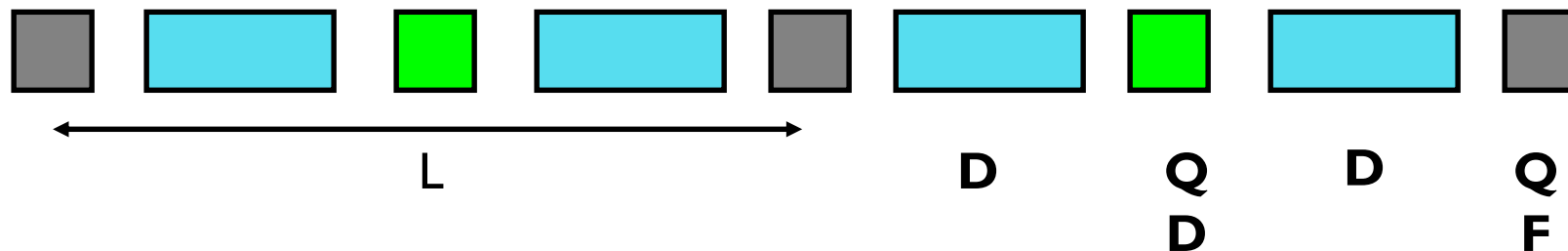
F - фокусування, O - дрейф, D - розфокусування, O - дрейф



Період повного коливання: 4 комірки $\Rightarrow \mu = 90^\circ$ комірку

ЦИКЛІЧНІ ПРИСКОРЮВАЧІ

Циклічний прискорювач уявляє собою періодичну структуру, що складається із комірок, крім прямих ділянок. Комірка: фокусуючий квадруполь QF, дипольний магніт D, розфокусуючий квадруполь QD, дипольний магніт D.

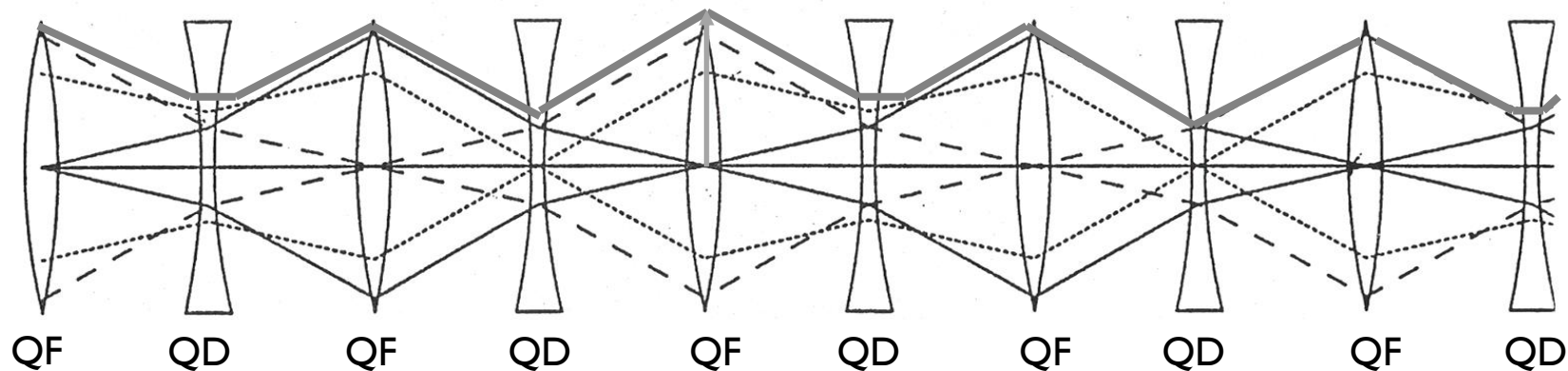


Змінюючи поле в квадрупольях, можна варіювати набіг фази на комірку μ . Ідеальна частинка буде слідувати траєкторією, яка замкнеться сама на себе після повного оберту в кільці.

Реальні частинки будуть виконувати коливання навколо замкнутої орбіти. Кількість коливань для повного оберту в кільці називається наастроювальним Q установки (Q_x и Q_y).

БЕТА-ФУНКЦІЯ $\beta(S)$

Бета-функція - це огибаюча всіх траєкторій частинок, що циркулюють в прискорювачі.



Мінімум **β -функції** знаходиться у **QD**, а максимум у **QF**, що забезпечує підсумковий ефект фокусування. Внаслідок повторення комірок ця функція є періодичною.

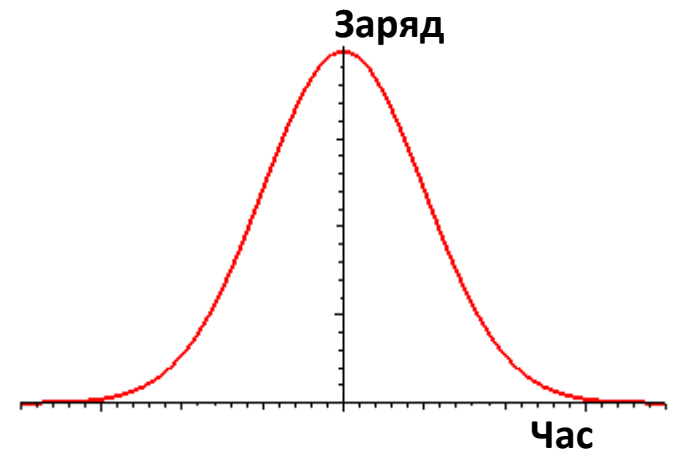
Осциляції частинок називаються бетатронними коливаннями.

НАВІЩО ПОТРІБНА ЦЯ ФУНКЦІЯ?

β -функція – фундаментальний параметр, тому що вона безпосередньо пов'язана з розміром пучка. Пучок має форму близьку до гауссової.

$$\sigma_{x,y}(s) = (\varepsilon \beta_{x,y}(s))^{1/2}$$

ε - емітанс, розмір фазового простору пучка, тобто критерій відхилення частинок від ідеальних



При зіткненні пучків у LHC $\sigma = 17$ мкм, $\beta = 0.55$ м

СИНХРОТРОННЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Заряджені частинки, що рухаються з релятивістськими швидкостями по викривлених магнітних траєкторіях, випускають синхротронне випромінювання.

$$\Delta E \sim \gamma^4 / r$$

$\gamma = E/E_0 = m/m_0$, m_0 – маса спокою.

Протон: $m_0 = 0.938 \text{ GeV}/c^2$

Електрон: $m_0 = 0.511 \text{ MeV}/c^2$

$(m_{o-p}/m_{o-e})^4 = (1836)^4 \cong 10^{13}$

Колайдер	B [Т]	E/пучок [GeV]	γ	ΔE [GeV]
LEP ($e^+ e^-$)	0.12	100	196000	2.92
LHC (p-p)	8.3	7000	7500	0.00001

Висновок: колайдери на високих енергіях для лептонів повинні бути лінійними. Для адронів же синхротронне випромінювання порівняно невелике.

СВІТНІСТЬ КОЛЛАЙДЕРА

Світність - інтенсивність зіткнення частинок зустрічних пучків

$$dN/dt = L \sigma \quad [cm^{-2}c^{-1}][cm^2]$$

$$L = N_1 N_2 f k / (4 \pi \sigma_x \sigma_y) \quad [cm^{-2}c^{-1}]$$

$$\sigma \leq 10^{-39} \text{ cm}^2$$

$$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$$

N(t) – кількість зіткнень

σ – ймовірність зіткнень

N_{1,2} – кількість частинок в зустку ($1.15 \cdot 10^{11}$)

f – частота (11.245 кГц)

k – кількість згустків у кільці (2808)

σ_{x,y} – розміри згустка (17 мкм)

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ



Женевська університетська лікарня

Томограф

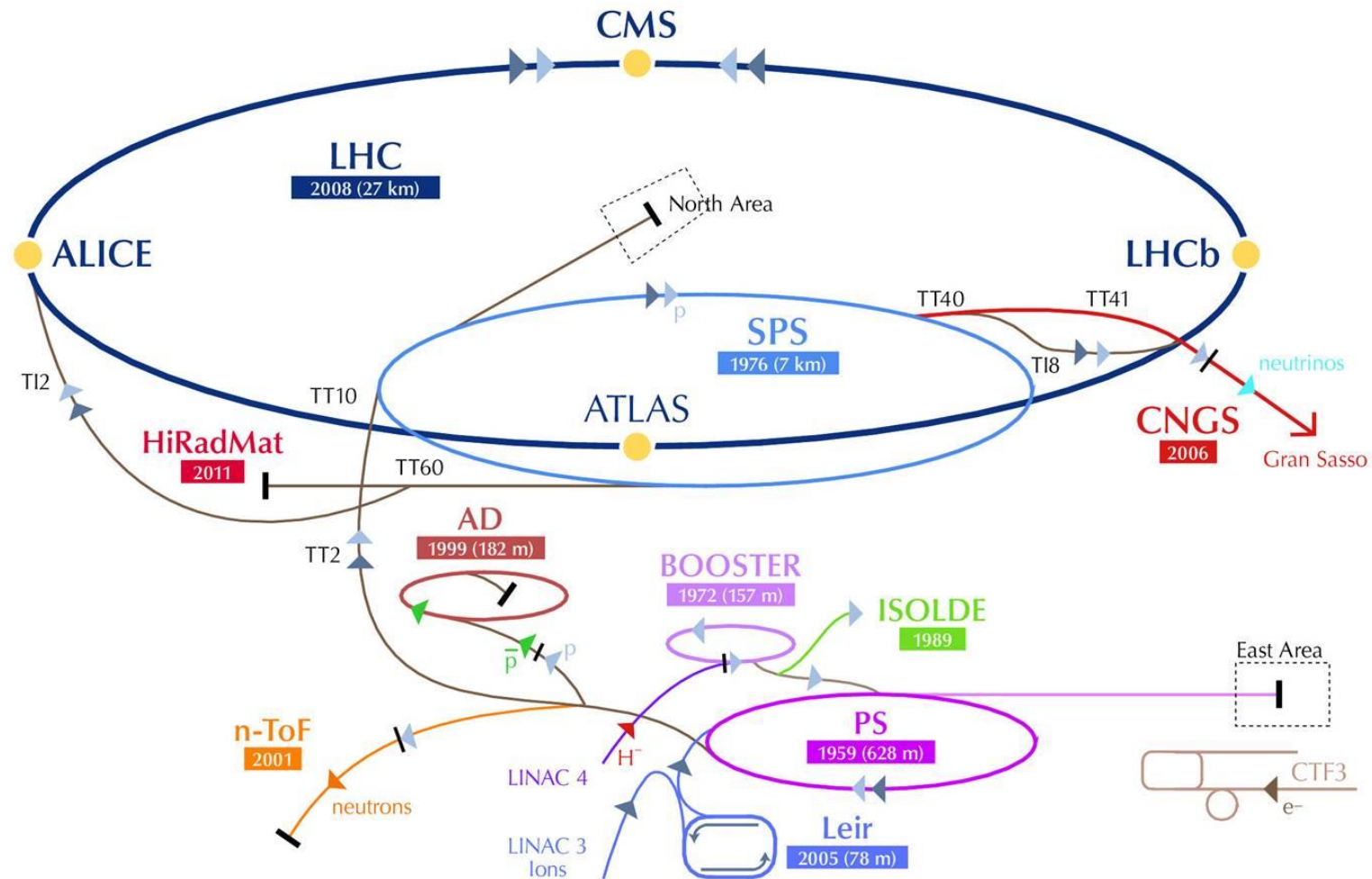


Інститут Поля Шеррера, Швейцарія

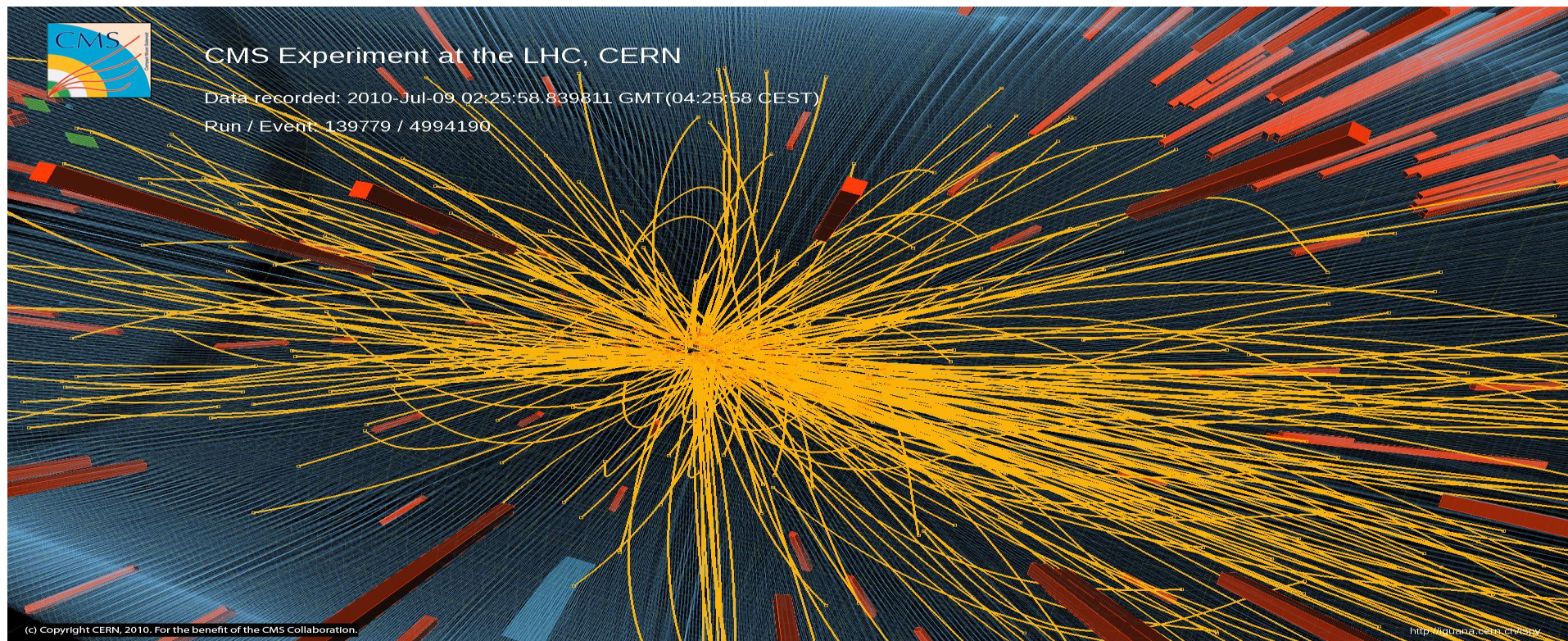
Терапія легкими іонами

- телевізор
- полімеризація пластмаси
- бактеріальна стерилізація без нагріву ...

ПРИСКОРЮЮЧИЙ КОМПЛЕКС В CERN



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!



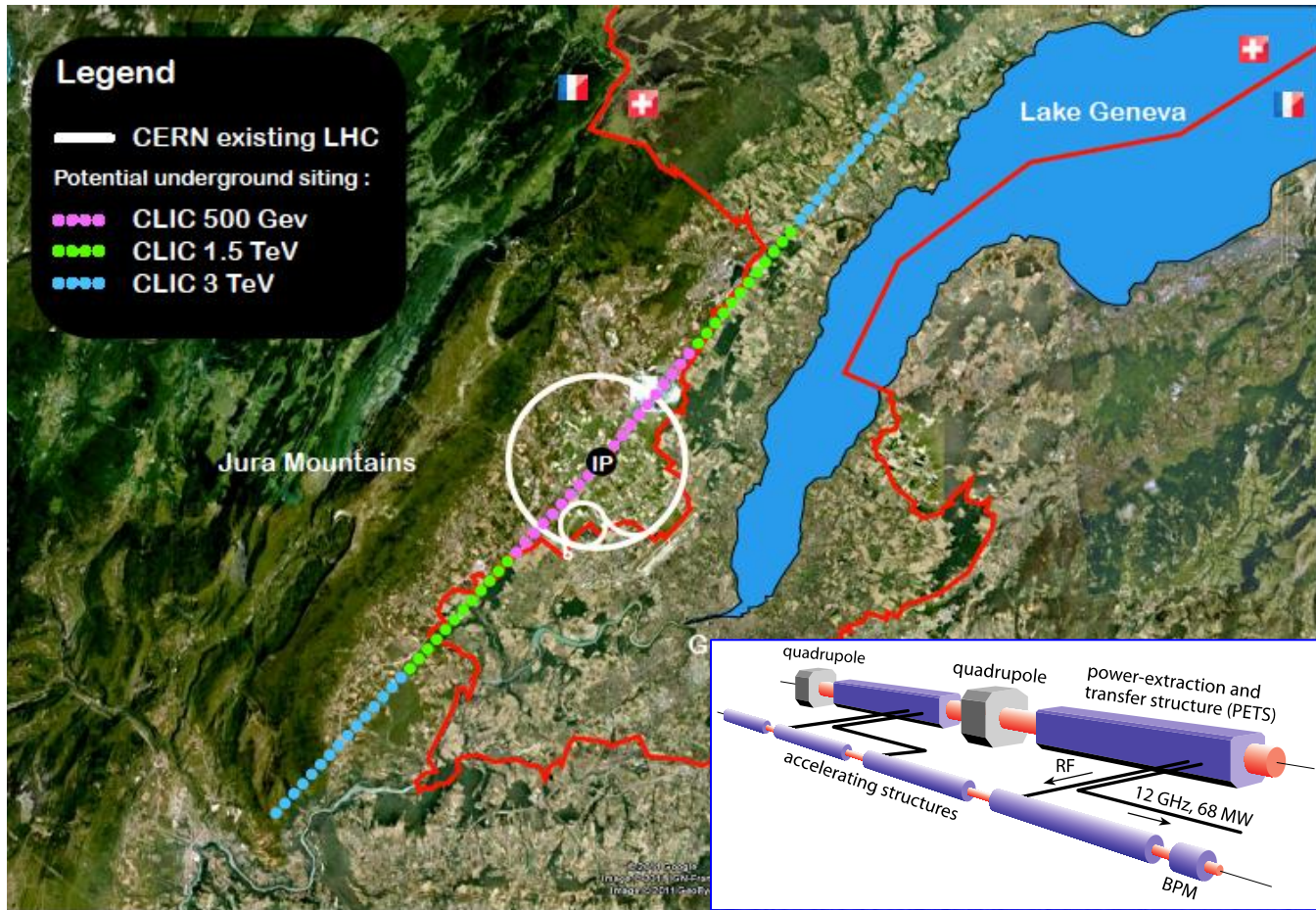
UKRAINIAN TEACHER PROGRAM 2019

Thanks also to Oleksiy Kononenko, Frank Tecker and Daniel Brandt, for the pictures and content taken from their excellent “Introduction to Accelerators” presentations



EXTRA SLIDES

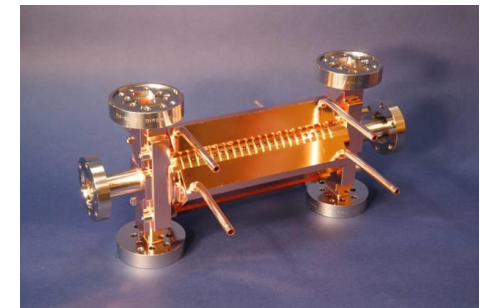
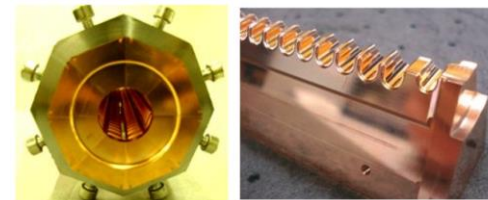
CLIC (КОМПАКТНИЙ ЛІНІЙНИЙ КОЛАЙДЕР)



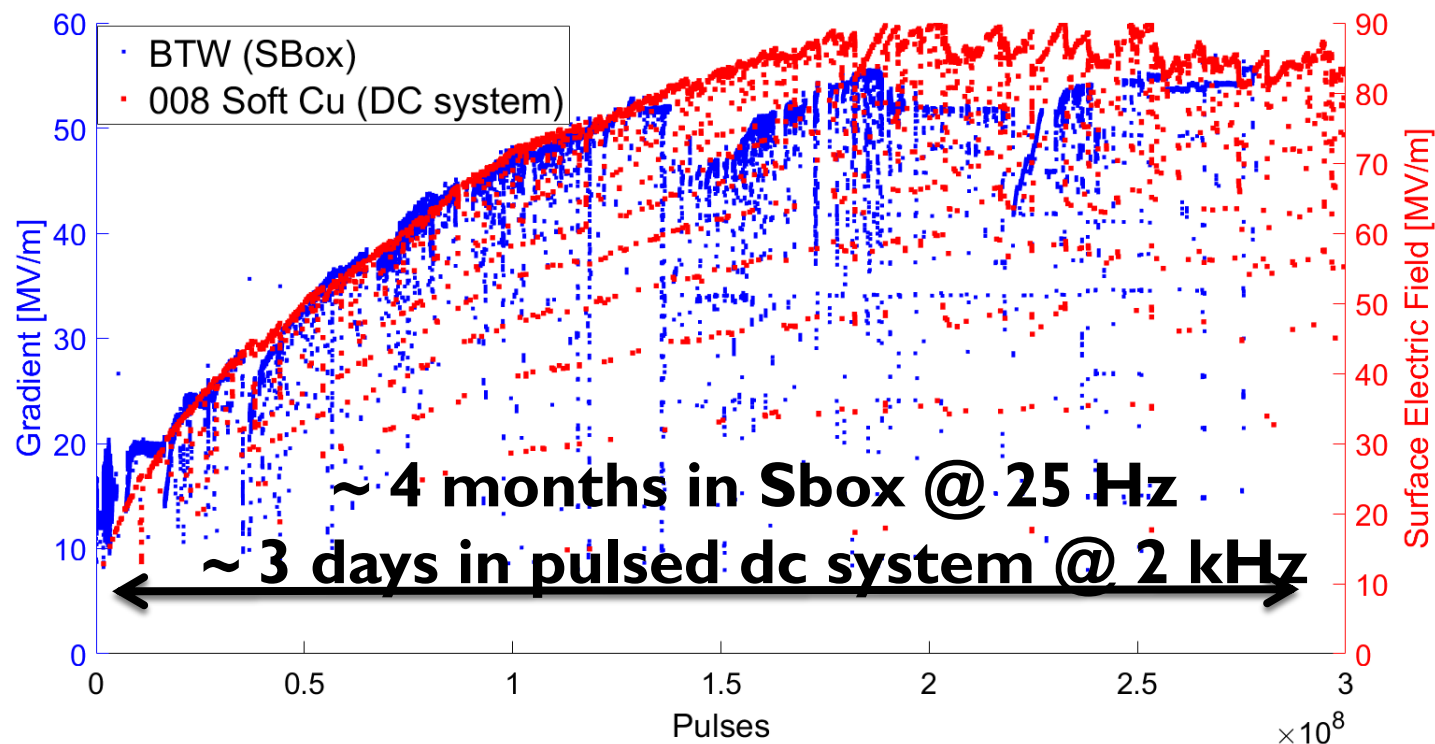
Ец.м. = 500 => 1400 =>
3000 GeV

Максимальний
прискорюючий градієнт
100 МВ/м

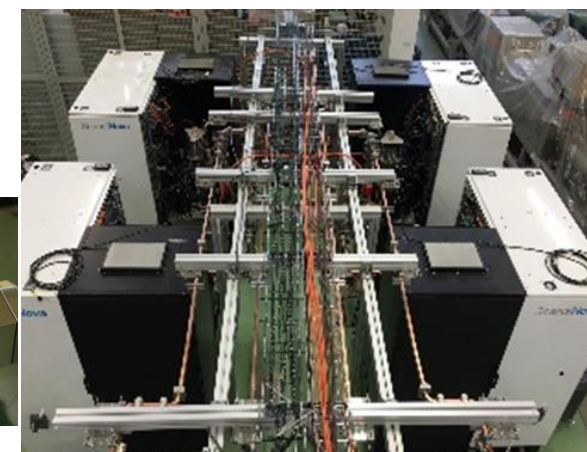
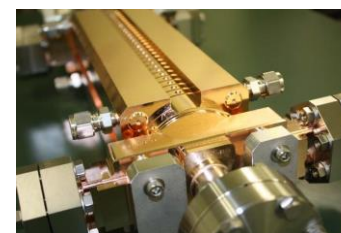
Довжина тунелю **48.3 км**



CONDITIONING IN RF AND DC



Marx generator, 6kHz



XBox-3: 6 MW, 400 Hz!

PULSED DC SYSTEM VACUUM SYSTEM FOR HIGH-GRADIENT STUDIES

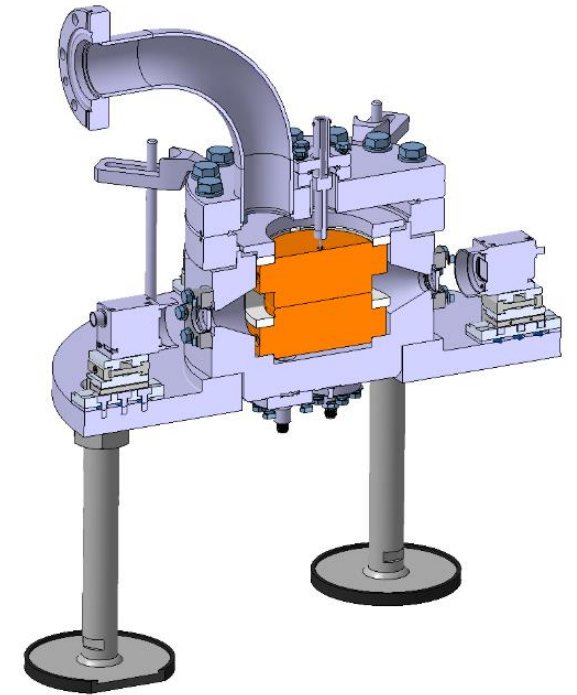
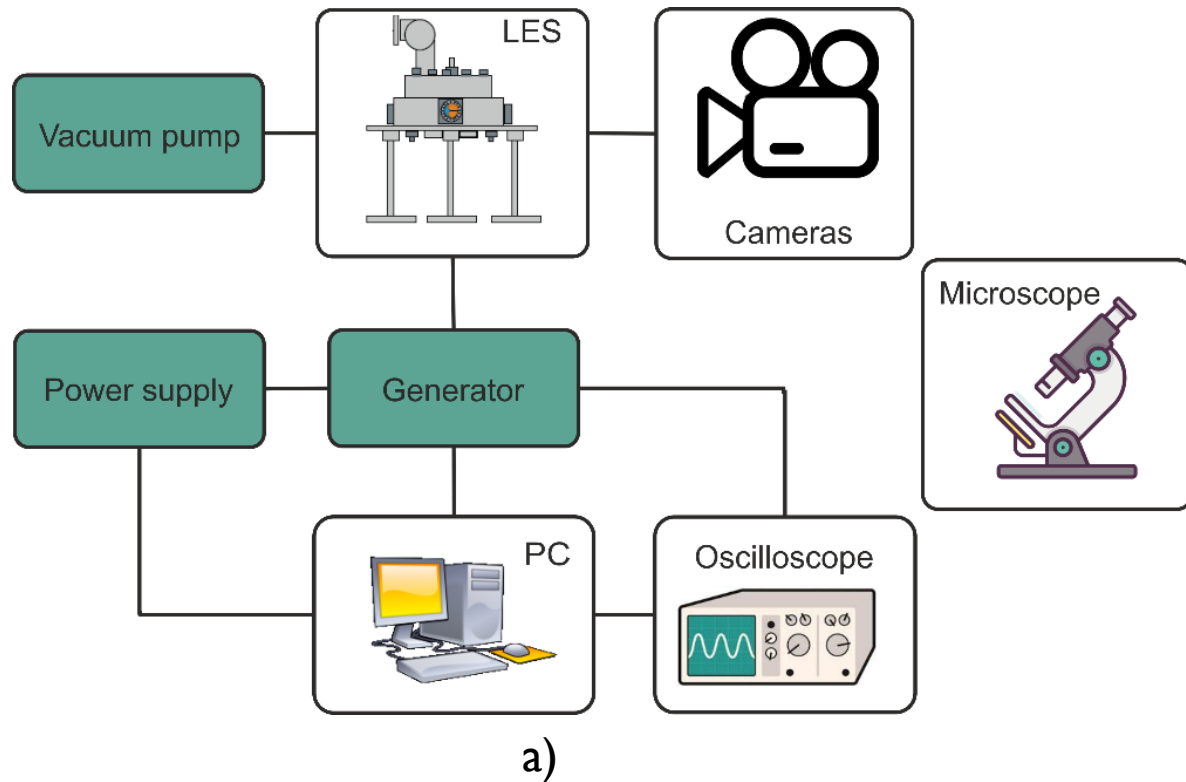
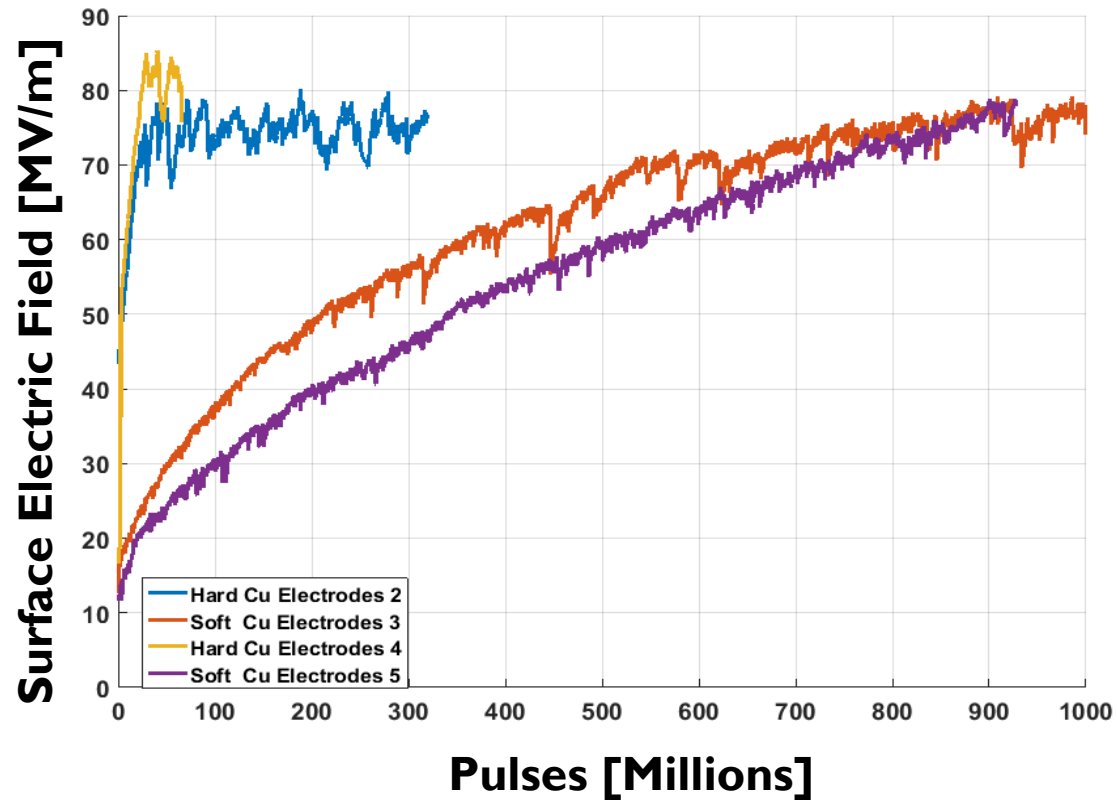
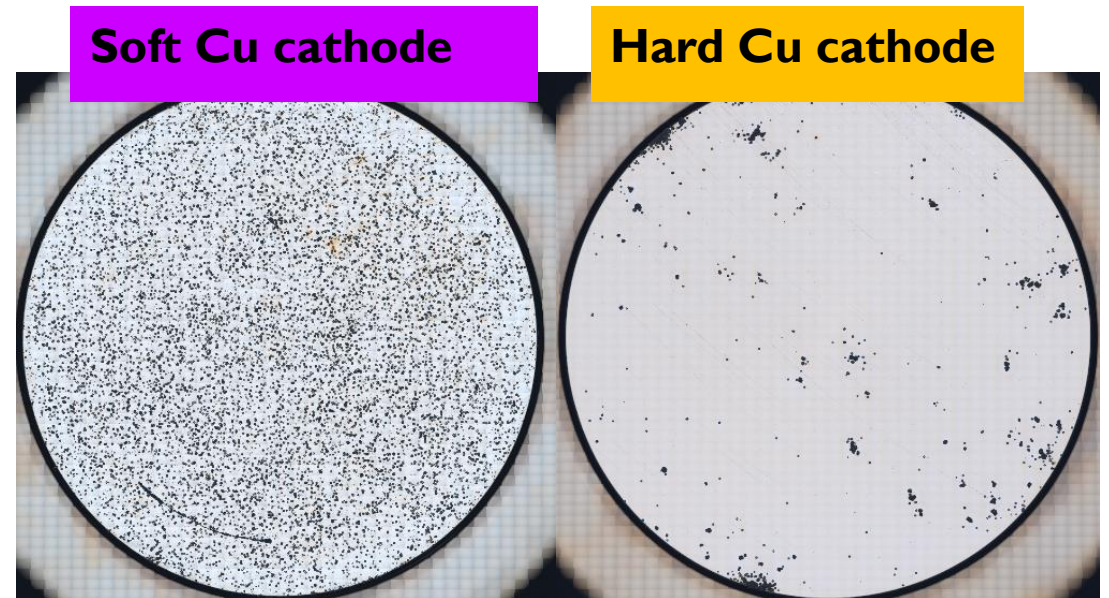


Fig. 4. Pulsed DC system at CERN: a) schematic of the equipment, b) photo of Large Electrodes System (LES), c) 3D-model for LES.

COMPARISON OF HEAT-TREATED AND AS-MACHINED COPPER



Conditioning curves from tests at Pulsed DC System



EVOLUTION OF BREAKDOWNS

