

Wstęp do akceleratorów

Arek Gorzawski

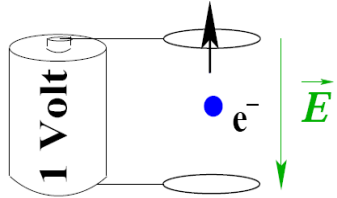
ESS Operations Division

CERN Beams Department

Przedmowa

Kilka użytecznych faktów do zapamiętania podczas wykładu i później

Krótka ściągą z jednostek:



Energie wyrażamy w
elektrono-woltach
 $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Masę cząstek często wyrażamy **nie w kg a
w eV/c^2** ($E = mc^2$ musi się zgadzać!)
np elektron:

$$0.511 \text{ MeV}/c^2 = \sim 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$



Przykład dla protonu ($\sim 1 \text{ GeV}$):

- Bateria 3.7V / 4.5cm
- $1 \text{ GeV}/3.7 \text{ eV} \rightarrow \sim 250 \times 10^6$ baterii z telefonu komórkowego
- Co daje ok $12 \times 10^6 \text{ m}$ \rightarrow Średnica ziemi!

Wydaje się być oczywistym, że musimy znaleźć sprytniejszą metodę do przyspieszania, aniżeli zestawianie baterii!

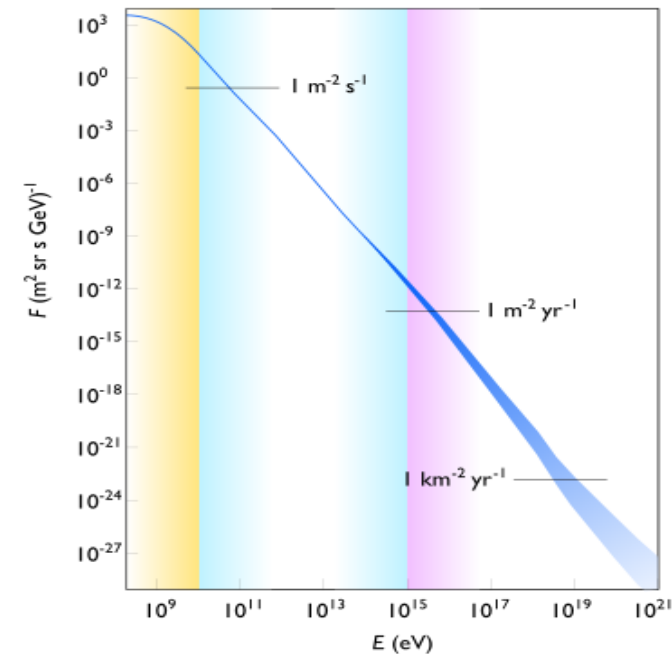


Akcelerator ?!



Naturalne akceleratory...

- Akceleratory jądrowe:
 - Doświadczenie Rutheforda (1911), który badając **Ra** i **Th** studiował strukturę atomów.
 - Przekraczanie bariery Kulombowskiej pozwala osiągnąć 6MeV!
- **Promienie kosmiczne**
 - Energie do $3 \times 10^{20} \text{ eV}$ -> czyli 40×10^6 więcej niż LHC ($7+7 \times 10^{12} \text{ eV}$)
- Wysoko energetyczne promienie występują jednak bardzo rzadko...
 - 1 na 1 km^2 na rok!



Dlaczego budować akceleratory?



VS



Laboratoryjne akceleratory mają następującą przewagę nad tymi naturalnymi:

- Duże i monochromatyczne **energie**
- Duże **strumienie** wybranych(!) cząstek
- **Kontrolowalny** cel wiązek

Akcelerator

Akcelerator cząstek to urządzenie które **rozpędza** cząstki naładowane elektrycznie do dużych prędkości (energii) **formując z nich wiązki**.



Akceleratory w żargonie tubylczym nazywa się *maszynami*...

Wiązka

Wiązka to strumień cząstek.

- **Naładowanych** lub
- **Neutralnych** (fotony, neutrony i neutrino).

- **Pierwotnych** (pochodzących z reakcji jonizacji gazu) lub
- **Wtórnych** (pochodzących z interakcji z materią lub gazami).

Do typowych właściwości wiązki należą:

- *Kierunek, zbieżność, energia*

Jako, że to nie jest wykład o laserach...

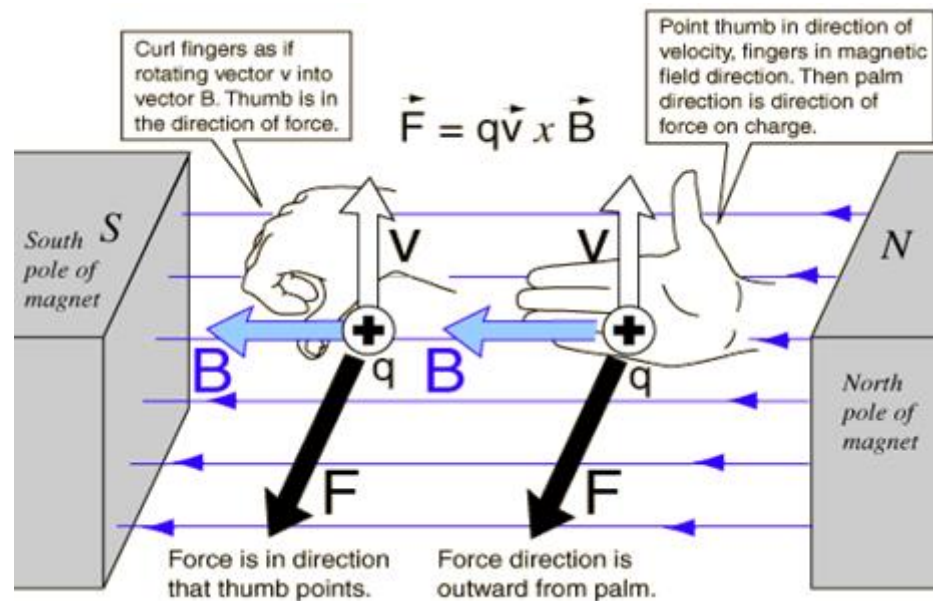
Przyjrzyjmy się **wiązkom cząstek naładowanych**, którymi można względnie łatwo manipulować przy pomocy pól:

- **Elektrycznego**
- **Magnetycznego**

Które wybrać?



Siła Lorentza (wzór na dziś!)



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

Electric force *Magnetic force*

Zakrzywianie toru lotu

Weźmy relatywistyczny ładunek elementarny w typowym magnesie 2 T, o polu prostopadłym do kierunku ruchu:

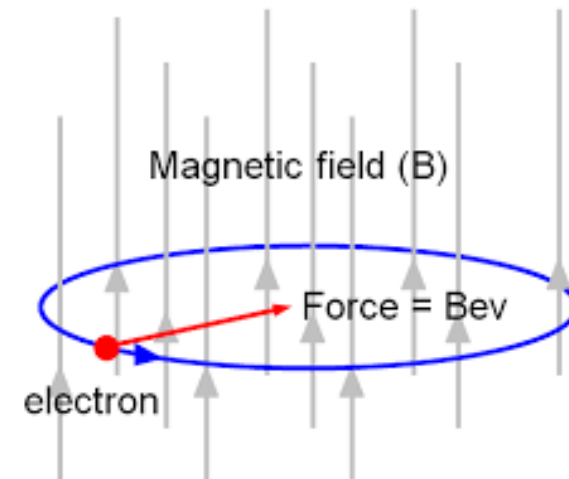
$$F = e * c * B = 96 \text{ pN}$$

Żeby wytworzyć podobną siłę polem elektrycznym ($F = qE$):

$$E = 96 \text{ pN} / e = \mathbf{600 \text{ MV/m (!)}}$$

(Przebiecie elektryczne w próżni: $\sim 5\text{-}50 \text{ MV/m}$)

Wniosek?



Jak kontrolować wiązki.

Do efektywnej zmiany (zakrzywiania) trajektorii wiązki używamy **pola magnetycznego**

Do przyśpieszania cząstek używamy **pola elektrycznego**

Oczywiście, od obu tych reguł są wyjątki...



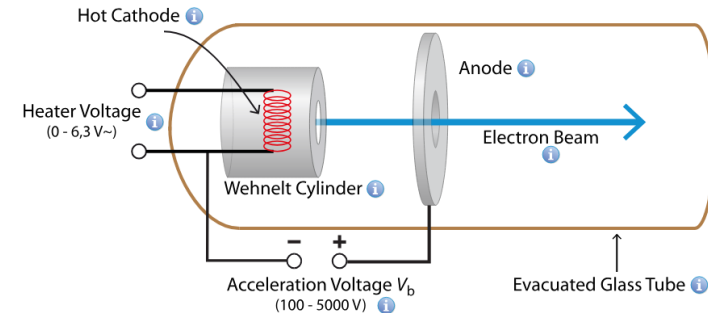
Spis treści

- ~~Przedmowa~~
- Akceleratory:
 - Źródła cząstek
 - Liniowe
 - Cyklotrony
 - Synchrotrony
- Trochę więcej fizyki:
 - Równanie ruchu
 - Pola magnetyczne
 - Zderzacze: świetlność (energia)

Typy akceleratorów

Źródła cząstek

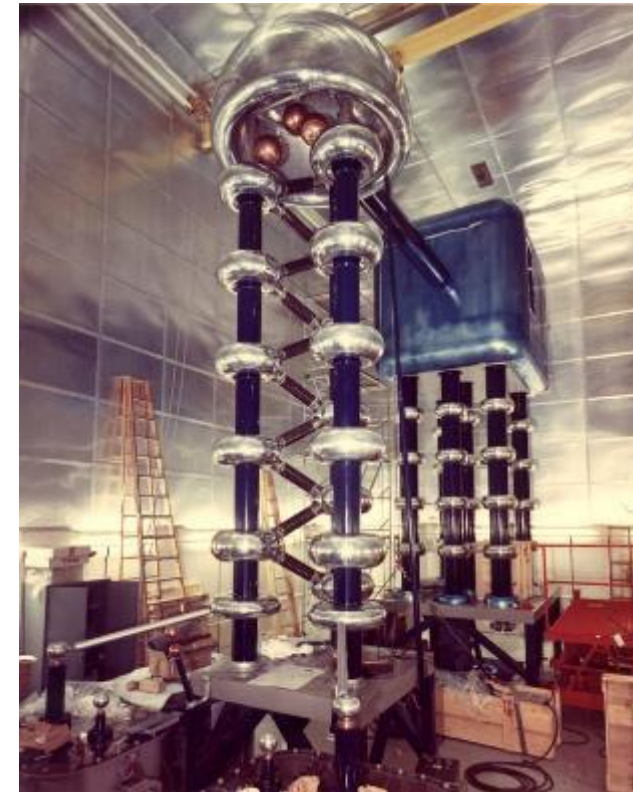
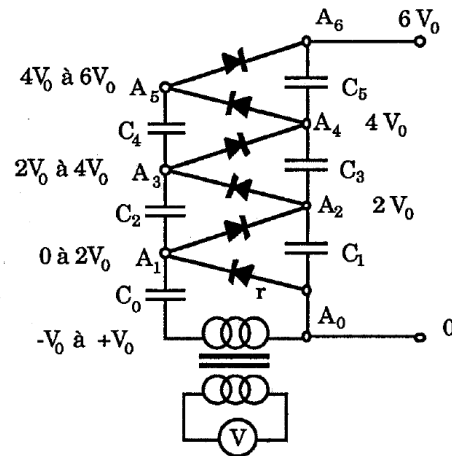
- Elektrony:
 - Termoemisja - rozżarzona katoda, jak w starych telewizorach)
 - emisja pobudzana laserowo (fotoemisja).
- Jony (p, Pb^{+82} ,...)
 - wiele konstrukcji ale wspólna część:
 - jonizacja gazu a następnie zastosowaniu pola elektrycznego/magnetycznego do wypchnięcia jonów w jednym kierunku - *duoplasmatron*



Przyśpieszenie elektrostatyczne

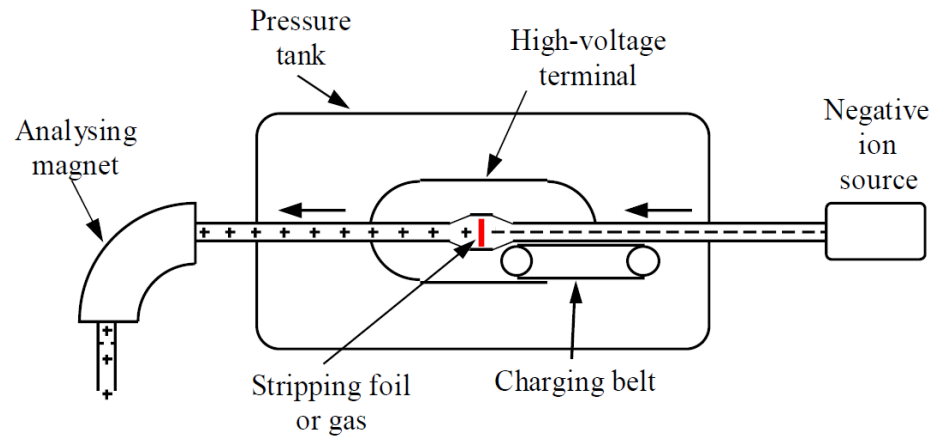
Akcelerator typu Cockcroft-Walton

- Sieć połączonych prostowników wysokiego napięcia
- Wysokie napięcie (przyśpieszające) ograniczone przez iskrzenie w powietrzu (limit ok 1MV)



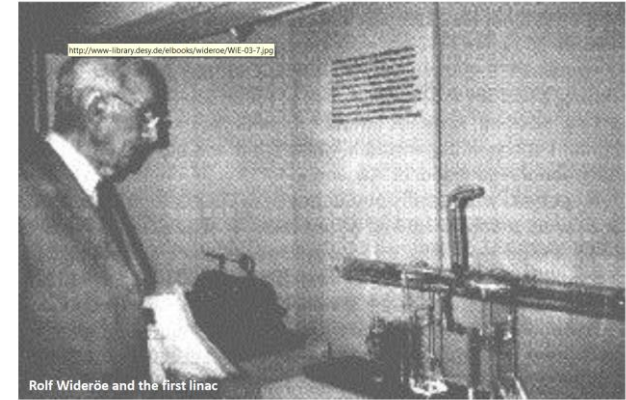
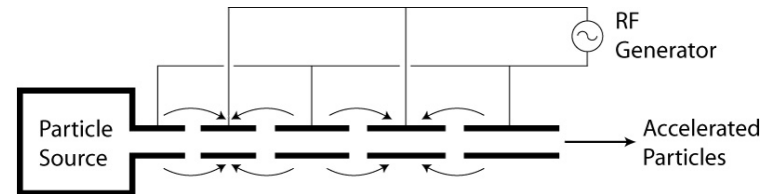
**Używany w CERN do
1993 jako źródło jonów:
750kV**

Generator Van de Graaff'a



- Wydajność do **25MV**
- Zalety:
 - Duże możliwości różnych wiązek
 - Mały rozstrzał energii (duża monochromatyczność wiązki)
- Duże zastosowanie w fizyce jądrowej i spektrometrii masowej

Przyspieszanie zmiennym polem elektrycznym (RF)- rewolucja w akceleracji!



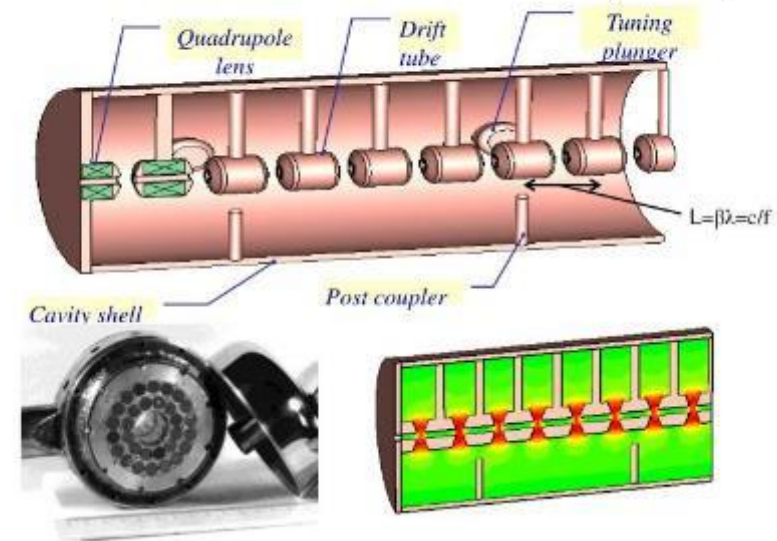
- Omija ograniczenie akceleratorów elektrostatycznych z jedną przerwą
 - Dodaje energii przy każdym przejściu przez przerwę
- 1928 Wideroe, pierwszy działający akcelerator
 - **50 keV, 60cm!**
- Zastrzeżenia i ograniczenia:
 - Cylindry muszą być coraz większe, wraz ze zwiększającą się energią cząstek lub muszą działać z większą częstotliwością
 - Większa częstotliwość -> większe straty związane z pojemnością elektryczną przerwy ($P \sim w C$)
 - Potrzeba **paczek cząstek, wiązka nie może być ciągła!**

Ulepszenie RF, część pierwsza: System Alvarez'a



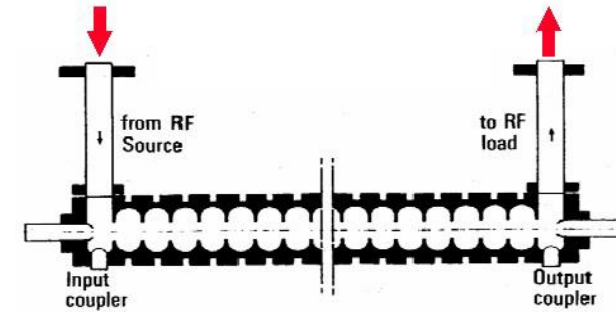
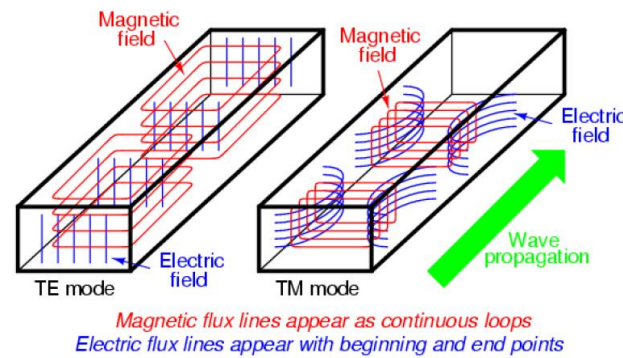
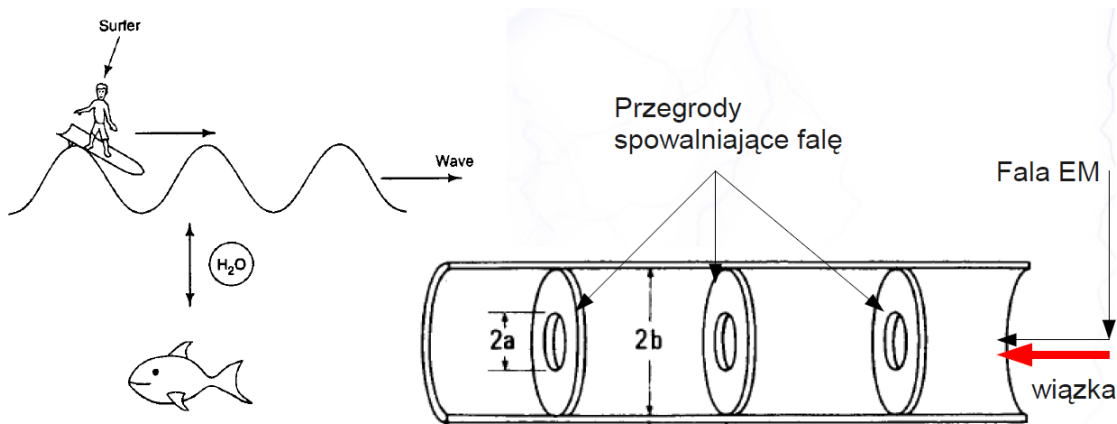
- Dzięki technice radarowej (klystrony),
- Do instalacji Wideroe'a dołożony zbiornik, tak aby jego częstotliwość rezonansowa odpowiadała częstotliwości fali potrzebnej do przyspieszania
- 1947, Alvarez

Alvarez Drift-Tube Linac (DTL)



Ulepszenie RF, część druga: Wnęki rezonansowe (1)

- A może by tak usunąć cylindry i zostawić samą tubę i przegrody?
- Falowód musi być skonstruowany tak aby RF było w modzie TM

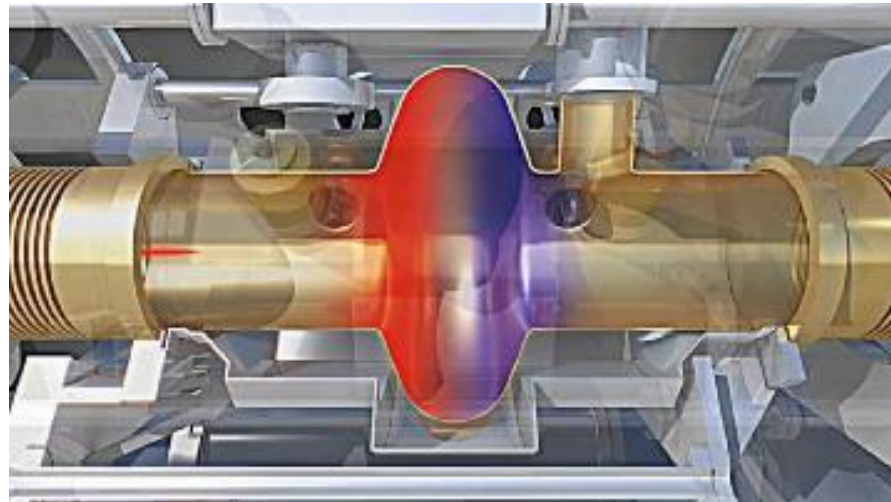


Ulepszenie RF, część druga: Wnęki rezonansowe (2)

- Zmienne pole elektryczne zsynchronizowane z częstotliwością paczek

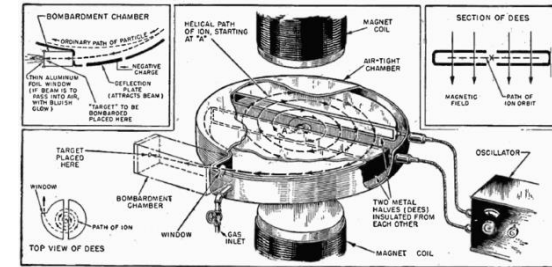
$$\Delta E = qV_0 \sin(\omega_{\text{RF}} t + \phi_s)$$

- Zmiana częstotliwości (podczas przyspieszania) zależy od wielkości maszyny



Cyklotron (1)

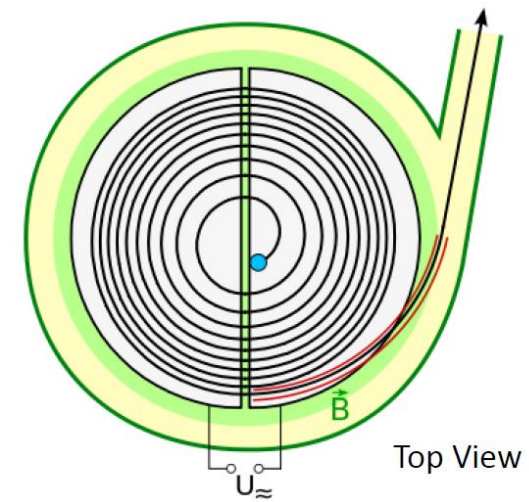
- Zmienne pole elektryczne (RF) pomiędzy dwoma połowami maszyny
- Pole magnetyczne do prowadzenie cząstek w płaszczyźnie poziomej



$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \longrightarrow F_L = q v B \cdot$$

$$F_c = m \frac{v^2}{r}$$

$$F_L = F_c \longrightarrow \omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$



Cyklotron (2)

- Ernest Lawrence, 1931
 - 80keV, 10cm
 - *Do zobaczenia w GLOBie w CERN!*
- **Ograniczenia:**
 - Częstotliwość jest **zależna od masy!**
 - Która dla relatywistycznych cząstek nie jest stała...
 - Klasyczny cyklotron działa do kilku % c
 - *Zupełnie nieużyteczny dla elektronów (relatywistyczne $\sim 500\text{keV}$)*



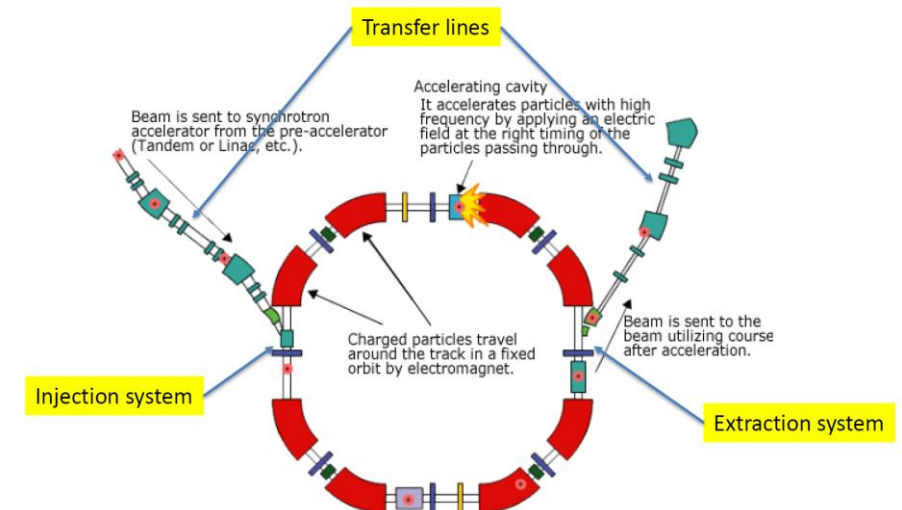
Ernest Lawrence and the first cyclotron

Synchrotron

- Dla cyklotronów: Więsze energie -> większe promienie i ograniczone pole magnetyczne...
- Jeżeli jednak ustalić promień, ρ
- Dodać magnesy dipolowe
 - Tam gdzie wiązki mają zakręcać
- I zmieniać ich pole synchronicznie z polem przyspieszającym
- Wszystkie ,duże' maszyny to sychrotrony
 - Np. LHC, 7TeV, 27km

$$\frac{\cancel{\gamma m_0 v^2}}{\rho} = e * \cancel{v} * B$$

$$\frac{p}{e} = B * \rho$$

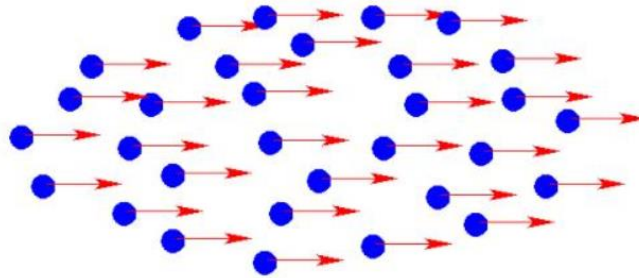


Akcelerator, trochę więcej fizyki

Trajektorie, ogniskowanie, korektory, emitancja, rozmiar wiązki, świetlnosc (efektywnosc!)

Co się dzieje z pojedynczymi cząstkami w wiązce?

- W idealnym (szkolnym!) modelu akceleratora potrzebowalibyśmy tylko magnesów dipolowych,



- Ale świat nie jest doskonały, cząstki w wiązce poddane są:
 - grawitacji,
 - stratom energii w wyniku radiacji (promieniowanie synchrotronowe),
 - oddziaływaniom międzycząsteczkowym,
 - oddziaływaniom z gazami resztkowymi/materia...
- **Wszystko to ma działanie rozogniskujące/ rozpraszające!**

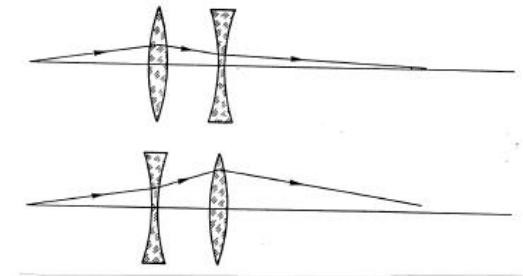
PS. Swoją drogą idealny akcelerator, nie zadziałałby... Potrzebujemy tych niedoskonałości!

Ogniskowanie: Kwadrupole

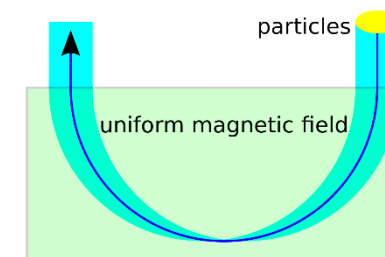
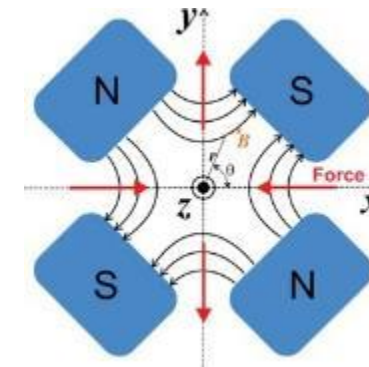
Żeby wiązka była stabilna musimy stworzyć coś, co w optyce przypominałoby zakrzywiony obiektyw w którym przód łączyłby się z tyłem

- Zestaw soczewek (ogniskujących i rozpraszających)
- **Dlaczego stosujemy magnesy rozpraszające?**
 - Bo musimy! Nie ma monopoli magnetycznych...
 - **Ogniskowanie w jednej płaszczyźnie, znaczy działanie odwrotne w drugiej!**

PS. Pierwsze synchrotrony działały bez kwadrupoli ze względu na ogniskowanie dipolowe (stabe!)

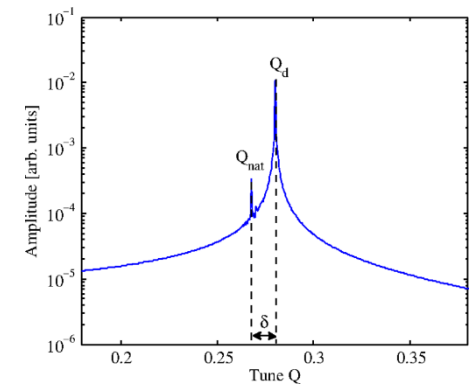
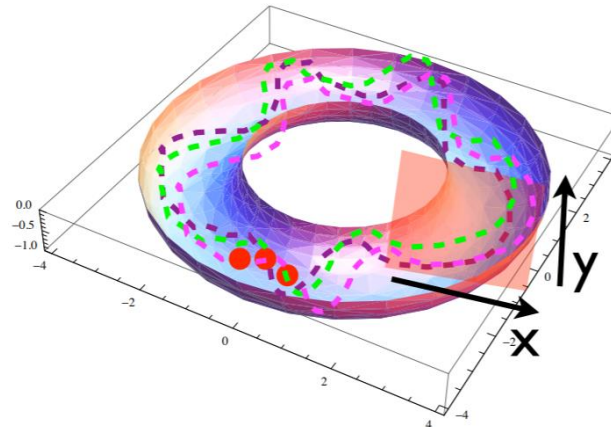
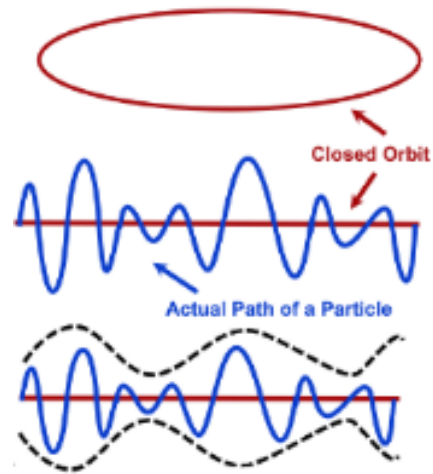
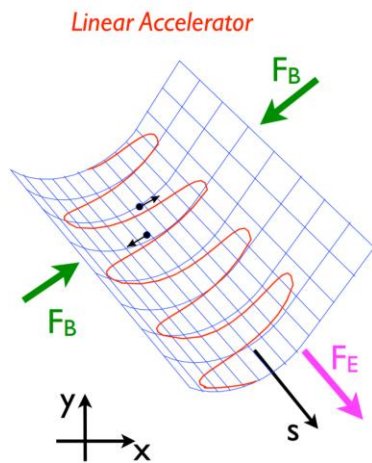


Analogia optyczna ilustrująca zasadę silnego ogniskowania



Trajektoria cząstek: referencyjnej i n -tej

- Cząstki w wiązce oscylują wokół idealnej orbity – względem cząstki referencyjnej.
- Stosujemy magnesy kwadrupolowe aby ograniczyć ich amplitudę.
 - Funkcję opisującą działanie kwadrupoli nazywamy **funkcją beta**.
 - **Częstotliwość oscylacji wiązki** nazywamy **Tunem wiązki**, składa się na nią częstotliwość każdej cząstki...



Jak opisać pole magnetyczne które działa na nasze cząstki?

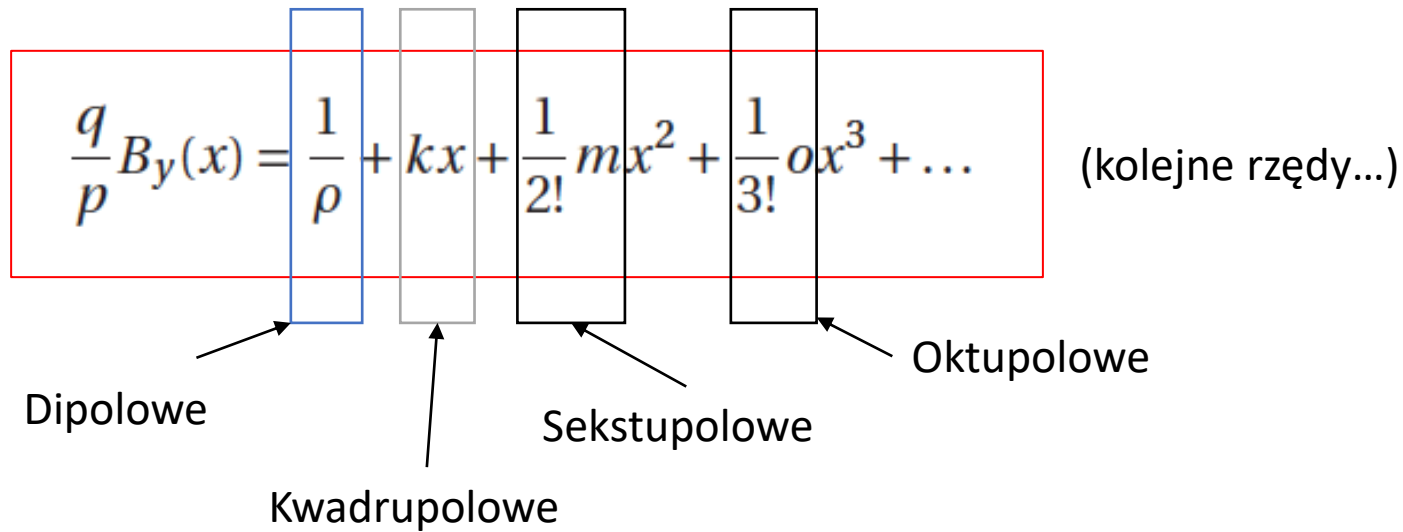
Plus ruch po okręgu

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}),$$



$$B\rho = \frac{p}{q},$$

$$B_y(x) = B_{y0} + \frac{\partial B_y}{\partial x}x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2}x^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 B_y}{\partial x^3}x^3 + \dots$$



Równanie ruchu pojedynczej cząstki

$$\begin{aligned}x''(s) + k_x(s) \cdot x(s) &= \frac{1}{\rho(s)} \frac{\Delta p}{p} \\y''(s) + k_y(s) \cdot y(s) &= 0,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k_x &= \frac{1}{\rho^2} - K(s) = \frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_y}{\partial x} \\k_y &= K(s) = \frac{1}{B\rho} \frac{\partial B_x}{\partial y}.\end{aligned}$$

Równanie Hilla

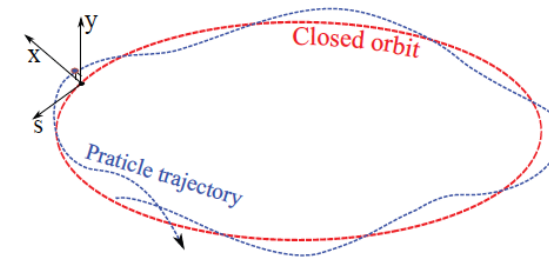
(różniczkowe drugiego rzędu, liniowe, zwykłe)

Opisuje ruch z siłą zwrotną zależną od wychylenia ($k(s)$)!

nasuwa się podobieństwo do

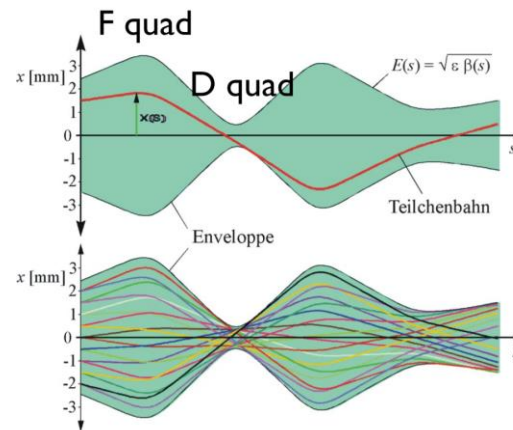
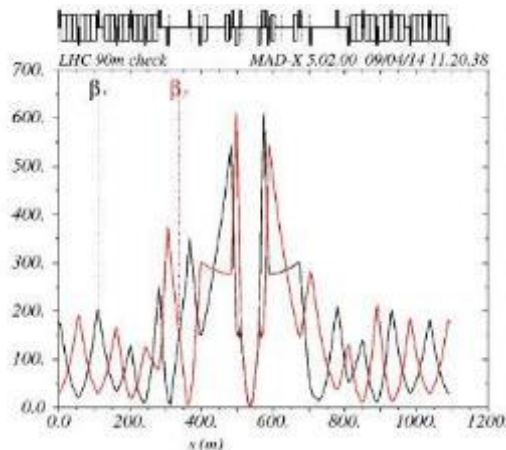
$$F = -kx$$

Rozwiązanie jest funkcją okresową!



Funkcja beta

- Przy pomocy kodów numerycznych obliczamy potrzebną siłę ($k_x k_y$) w kolejnych magnesach kwadrupolowych aby utrzymać zadaną wielkość wiązki.
 - W większości akceleratora utrzymujemy **rozmiar poprzeczny adekwatny do... rury w której nasza wiązka się znajduje,**
 - **Minimalizujemy** dla punktu interakcji (kontynuacja za kilka slidów)

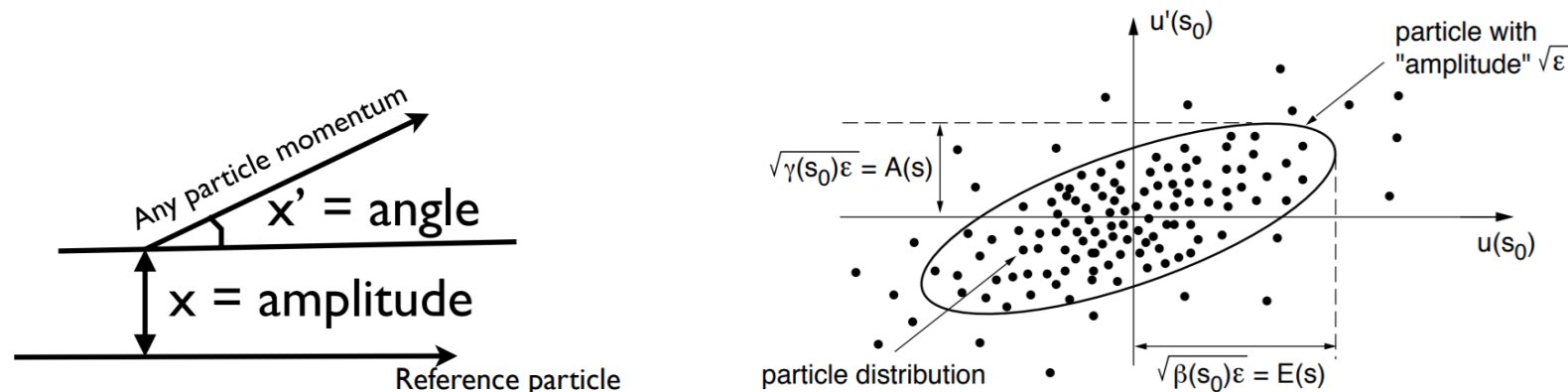


$$u_{\beta}(s) = \sqrt{\epsilon_u \beta_u} \cos(\mu_u(s) + \mu_u(s_0)) ,$$

Emitancja

Rozkład prędkości i kątów, definiuje nam niezmienniczą (względem lokalizacji!) wielkość **emitancję**.

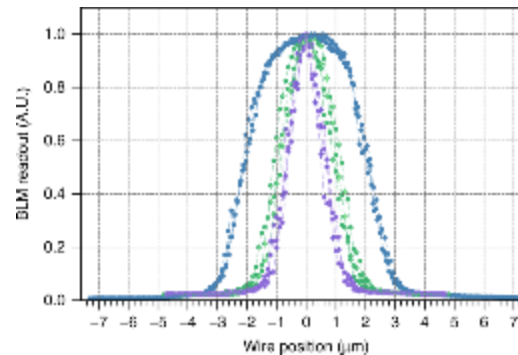
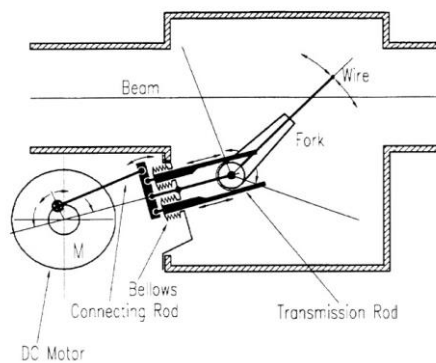
- Jest to parametr wewnętrzny wiązki na który nie mamy instrumentalnego wpływu...
- Emitancja nie maleje, chyba że stosujemy tzw. chłodzenie wiązki albo jeśli przyspieszamy!
- Natomiast możemy dbać o to aby nie rosła niekontrolowanie...



Rozmiar wiązki: jak ustalić?

$$u_{\beta}(s) = \sqrt{\varepsilon_u \beta_u} \cos(\mu_u(s) + \mu_u(s_0)),$$

- Rozmiar wiązki z jednej strony definiuje **emitancja** (amplituda oscylacji)
- Z drugiej **beta-funkcja** $\beta(s)$, która opisuje moc ogniskowania, obwolutę wiązki.
- Jak zmierzyć rozmiar wiązki?
 - Skaner drutowy - szybkie (20m/s) cienkie włókno (30um) przelatuje przez wiązkę obrazując rozmiar poprzez oddziaływanie wtórne:

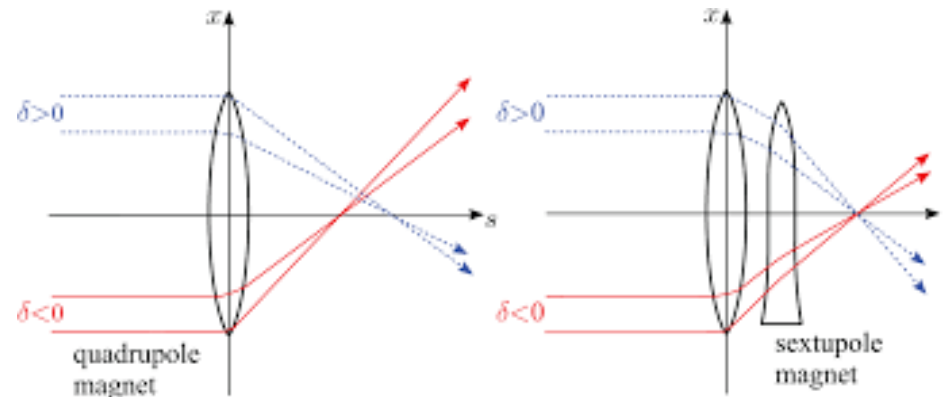
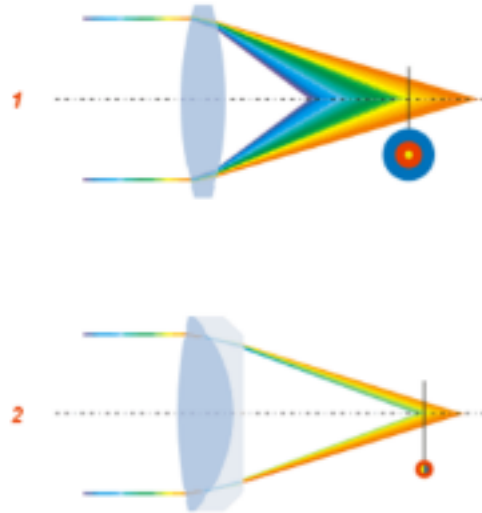


Typowe rozmiary wiązki w LHC:

- Średni $\sim 200\mu\text{m}$
- W punkcie zderzeń $\sim 15\mu\text{m}$..
Wiązka ma profil gausowski (w pierwszym przybliżeniu!)

Magnesy korekcyjne, więcej magnesów... (1)

- Akceleratory (szczególnie te duże) mają widoczne niedoskonałości:
 - **Aberacja Chromatyczna** różna ogniskowa dla różnych częstotliwości – znana przypadłość w fotografii...



Magnesy korekcyjne, więcej magnesów... (2)

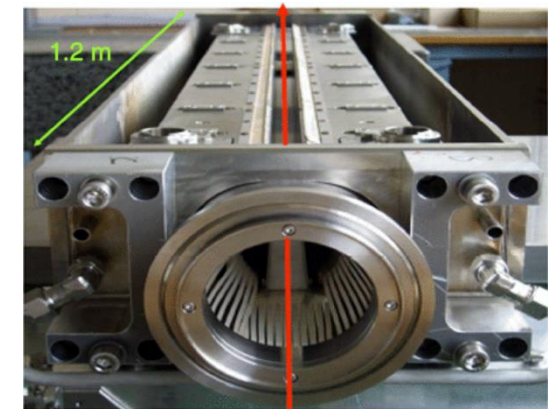
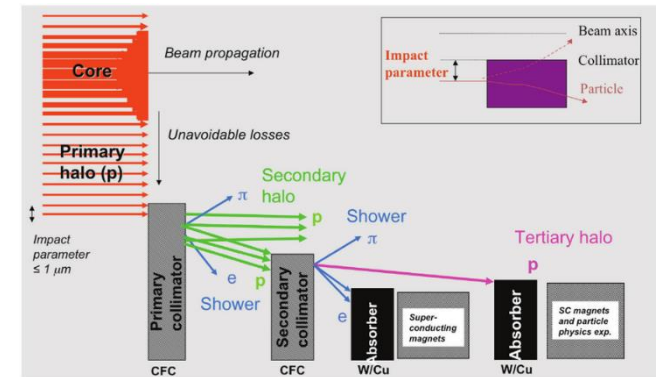
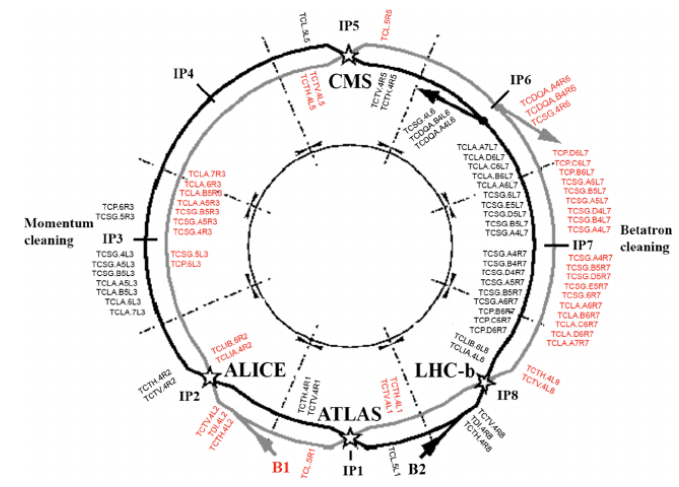
- Akceleratory (szczególnie te duże) mają widoczne niedoskonałości:
 - Niedoskonałe pole dipolowe
 - **Niedoskonałe pozycjonowanie**
 - Albo źle ustawione
 - Albo w wyniku drgań np. trzęsienie ziemi...

LHC: Wynik jednego (z 398) źle ustawionego kwadrupola o parę um!



Bezpieczeństwo akceleratora

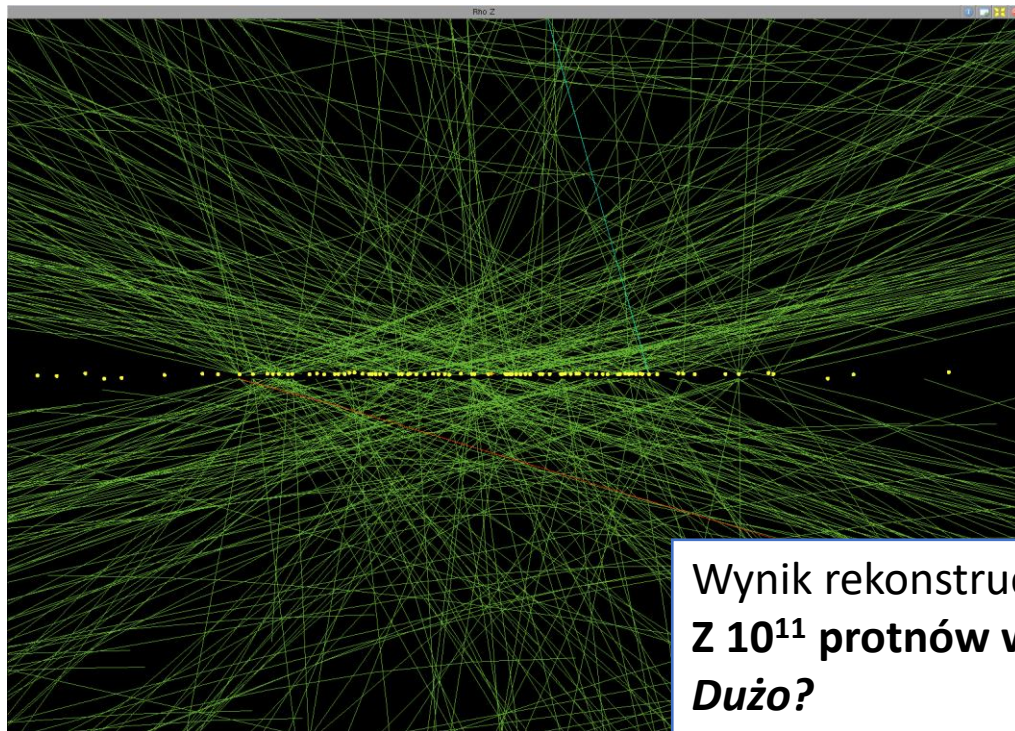
- Wysoko intensywne i wysoko energetyczne zderzacze (np. LHC) muszą być chronione...
 - Przed samym sobą (energia w magnesach!)
 - Przed orbitującymi wiązkami, energiach do **360MJ!**
- **„Czyszczeniem”** cząstek które mają zbyt dużą amplitudę drgań (trajektoria w połączeniu z funkcją beta!) , zajmują się (pasywnie!) **kolimatory!**
 - **Bezpiecznie wychwytyują pojedyncze tysiące cząstek!**



362 MJ proton beam

Wydajność zderzacza (1)

- **Ilość potencjalnych nowych cząstek** w jednostce czasu jest wprost proporcjonalna **do przekroju czynnego** (prawdopodobieństwa) na daną wielkość (np. bozon Higgosa) **i ilości zderzeń** (powtórzeń) na sekundę.

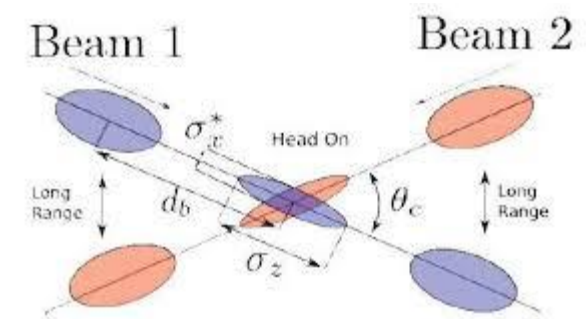


Wynik rekonstrukcji zderzenia jednej pary paczek...
Z 10^{11} protonów w każdej z nich zderzyło się $\sim 30!$
Dużo?

Wydajność zderzacza (1)

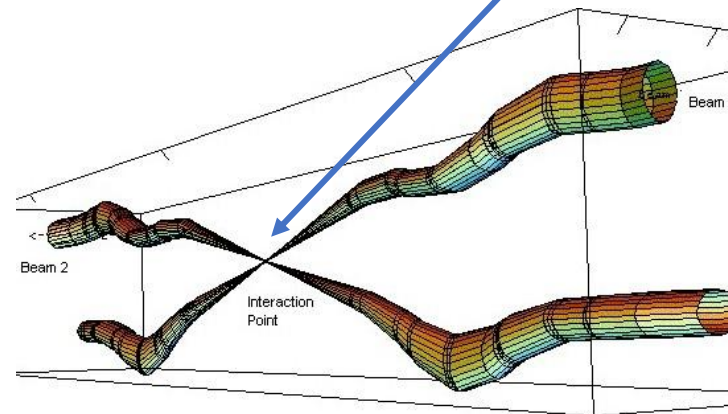
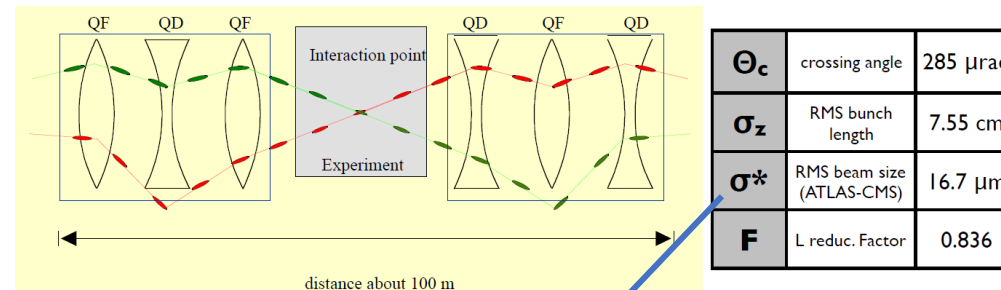
- Wydajność zderzacza (**światłość** L) mierzy się w ilości zderzeń na sekundę. Definiuje ją ilość cząstek (N) ilość paczek (k) częstotliwość zderzeń (f) oraz rozmiar wiązki ($\sigma = \sqrt{\beta \varepsilon}$) Ale:
 - **Im więcej cząstek (N) tym mniej stabilnie!**
 - **Nałożnie się wielu ,zdarzeń'** naraz (sytuacja z poprzedniego slajdu staje się jeszcze bardziej nieczytelna...
 - Trzeba znaleźć złoty środek...
- Co więcej, tak naprawdę L jest obarczone karą za geometrię zderzenia $\rightarrow F(\theta) < 1$ (ok. 0.81...)

$$L = \frac{kN^2 f}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} F(\theta)$$

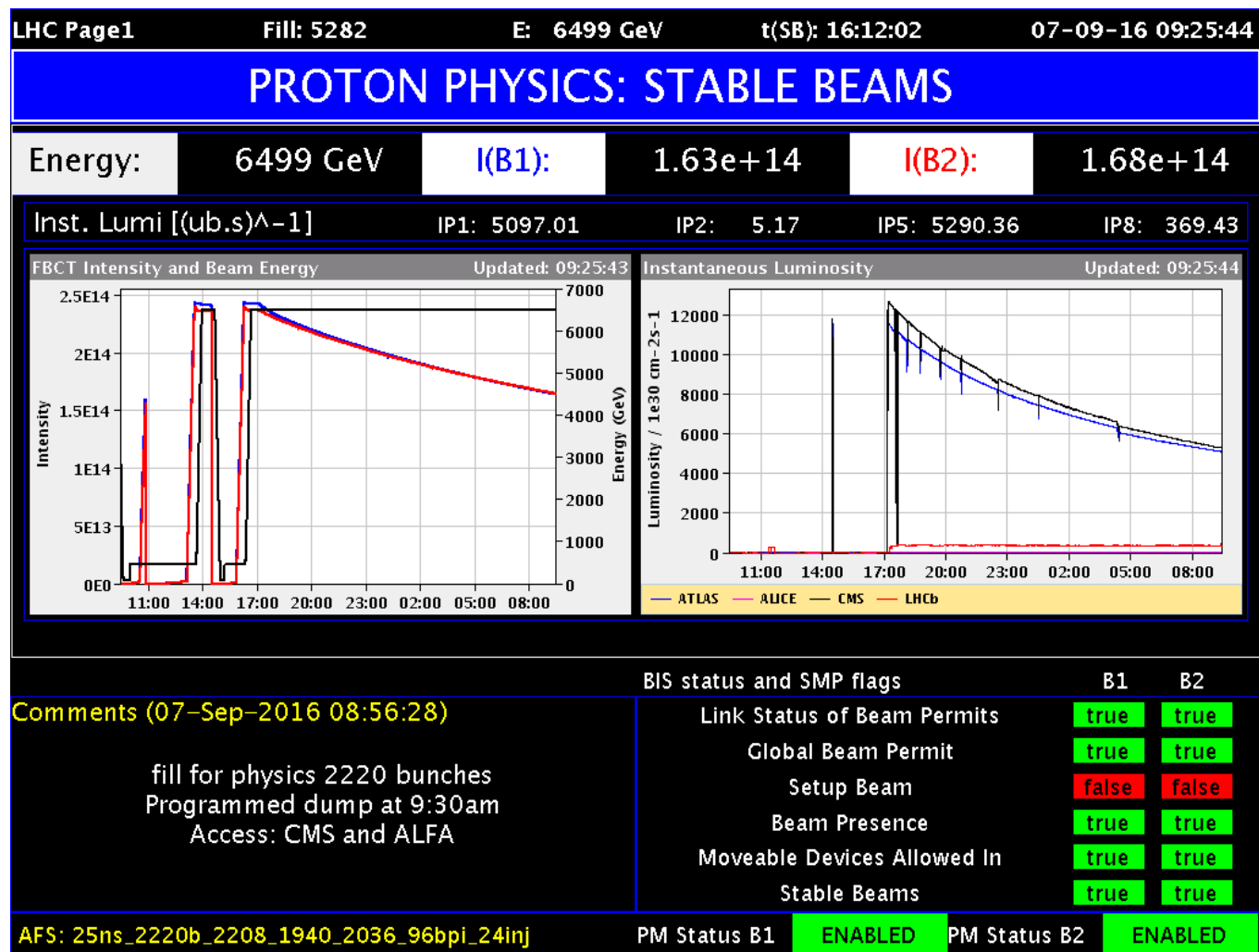


Wydajność zderzacza (2)

- Aby uzyskać największe podbicie świetlności.
 - **Mocno ogniskujemy tylko w miejscu zderzeń!**



Przykład *okresu produkcji* w LHC



(krótkie) Podsumowanie

- Akceleratory: liniowe i kołowe
 - Różne zastosowanie i różne problemy
- Cyclotrony oraz synchrotrony
 - Relatywistyczne efekty
- Trajektorie kontrolowane przez pole magnetyczne
 - Zakrzywianie
 - Ogniskowanie
 - Korekcja
- Dla zderzaczy punkt zderzenia – **światłość!**



Akceleratorzy w CERN (i poza)

Arek Gorzawski

ESS Operations Division

CERN Beams Department