



Introduction to accelerators Wprowadzenie do akceleratorów

Sławomir Wronka, NCBJ



NATIONAL
CENTRE
FOR NUCLEAR
RESEARCH
ŚWIERK



Pojęcia podstawowe

- Prędkość światła
- Energia
- Pęd

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$$

$$E = mc^2 = m_0 \gamma c^2$$

$$p = mv = m_0 \gamma \beta c$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{ultrarelatywistyczne czastki} \quad \beta \approx 1 \quad E \approx pc$$

- Relacja E-p
- Energia kinetyczna
- Równanie ruchu pod działaniem sił Lorentza

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2 + m_0^2 c^2$$

$$T = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{f} \Rightarrow m_0 \frac{d}{dt}(\gamma \vec{v}) = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Pojęcia podstawowe

- Ładunek elektronu

$$e = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ Coulombs}$$

- Elektronowolt

$$1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

- Energia w eV

$$E[\text{eV}] = \frac{mc^2}{e} = \frac{m_0 \gamma c^2}{e}$$

- Masa spoczynkowa

- Elektron

$$m_0 = 511.0 \text{ keV}/c^2 = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

- Proton

$$m_0 = 938.3 \text{ MeV}/c^2 = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

- Neutron

$$m_0 = 939.6 \text{ MeV}/c^2 = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Ruch cząstek w polu elektromagnetycznym

Pod działaniem siły Lorentza

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$$

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

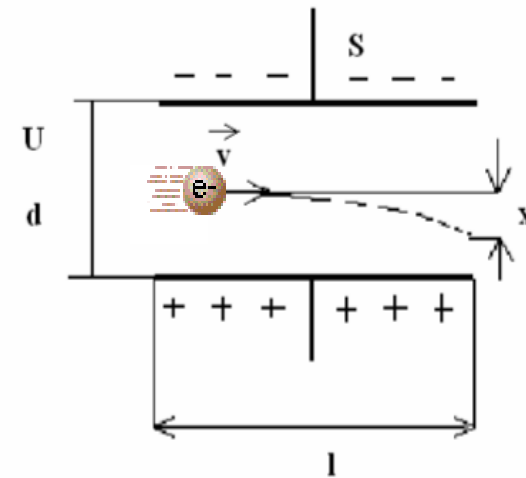
$$\Rightarrow E \frac{dE}{dt} = c^2 \vec{p} \cdot \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{dE}{dt} = \frac{qc^2}{E} \vec{p} \cdot (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) = \frac{qc^2}{E} \vec{p} \cdot \vec{E}$$

iloczyn skalarny z iloczynem wektorowym = 0.

Pole magnetyczne nie zmienia energii cząstek.

Może to zrobić tylko **pole elektryczne**.



Pole elektryczne powoduje zmianę energii kinetycznej

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = q \cdot U \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2q}{m} \cdot U}$$

Np. dla elektronu

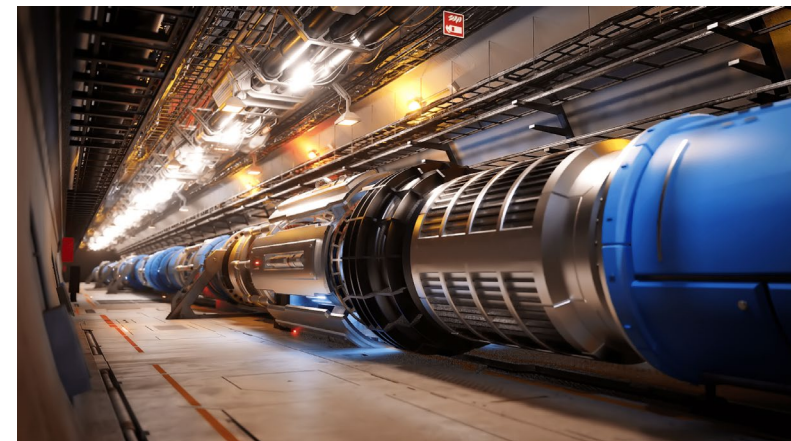
$$v = 593\sqrt{U} \text{ [km / s]}$$

$$\text{Dla } U = 20\text{kV} \rightarrow v \approx 83863 \text{ [km / s]}$$

Akcelerator - definicja

Akcelerator to urządzenie do przyspieszania cząstek, w którym możemy kontrolować parametry wiązki.

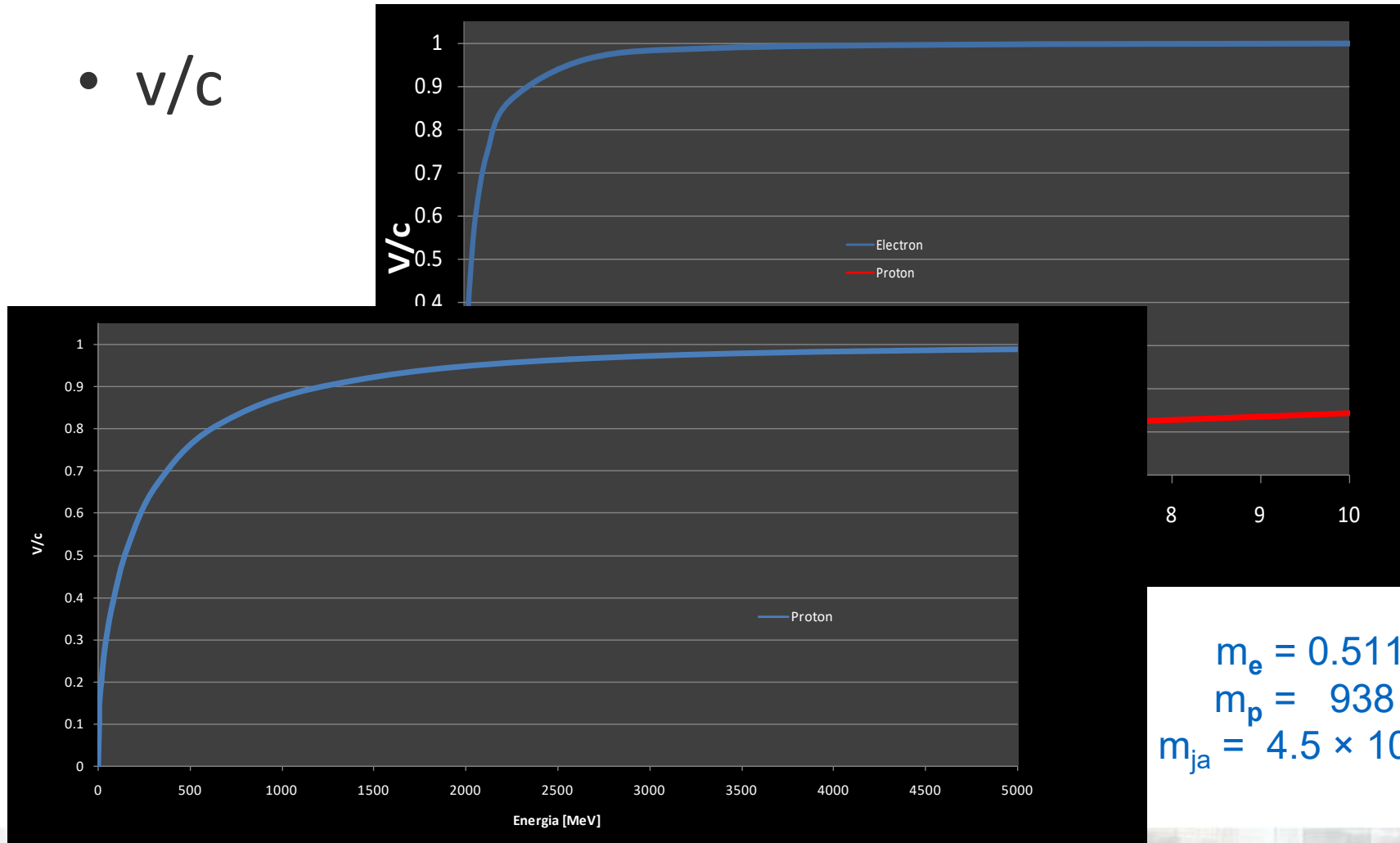
- Źródło
- Przyspieszanie
- Wytworzenie wiązki użytecznej
- Przechowywanie lub...
- Wyprowadzenie lub...
- Zderzanie



<https://www.popsci.com/science/large-hadron-collider-future-circular-collider/>

Przyspieszanie ...?

- v/c



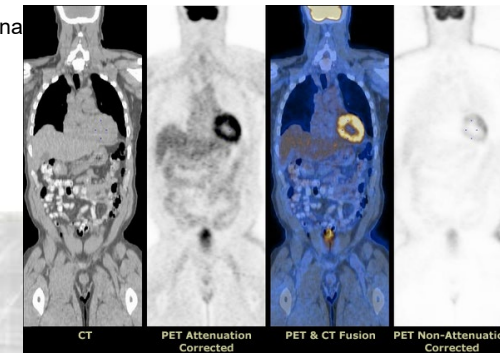
$$\begin{aligned}m_e &= 0.511 \text{ MeV}/c^2 \\m_p &= 938 \text{ MeV}/c^2 \\m_{ja} &= 4.5 \times 10^{37} \text{ eV}/c^2\end{aligned}$$

Akceleratorzy - zastosowania

- Badania naukowe
- Medycyna
- Przemysł
- Ochrona granic
- Archeologia
- Ochrona zabytków
- Ochrona środowiska
- ...

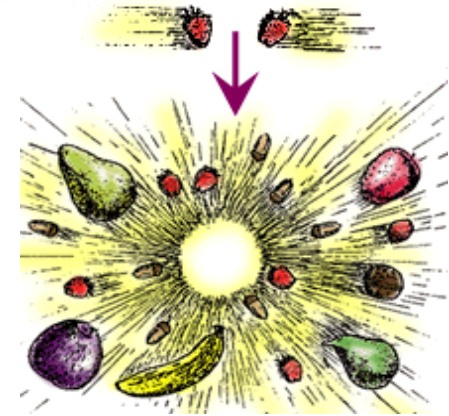


Andrew M. Sessler
Lawrence Berkeley National
Laboratory



Witold Skrzyński
Obrazowanie w
radioterapii

Akceleratorzy – skala „zainfekowania” świata



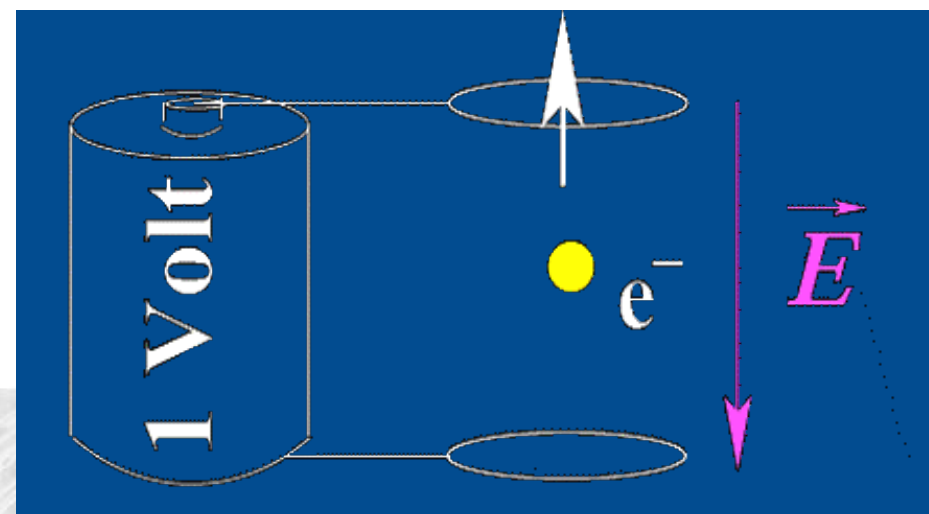
Ponad 30 tys. akceleratorów, z czego 1% w nauce, pozostałe urządzenia – przede wszystkim w przemyśle i medycynie.

W Polsce ~1% (szac.)

Ładunek w polu elektrycznym

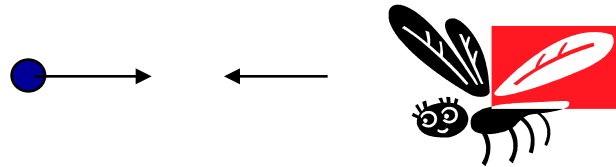
- Różnica potencjałów powoduje ruch ładunków – cząstki nabierają energii.
- Miarą energii cząstki jest elektronowolt (eV).
- Różnica potencjałów 1 V powoduje przyspieszenie elektronu do energii 1 eV.
- 1 eV to bardzo mało

keV, MeV, GeV, TeV
(10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12})



A ile to 7 TeV ?

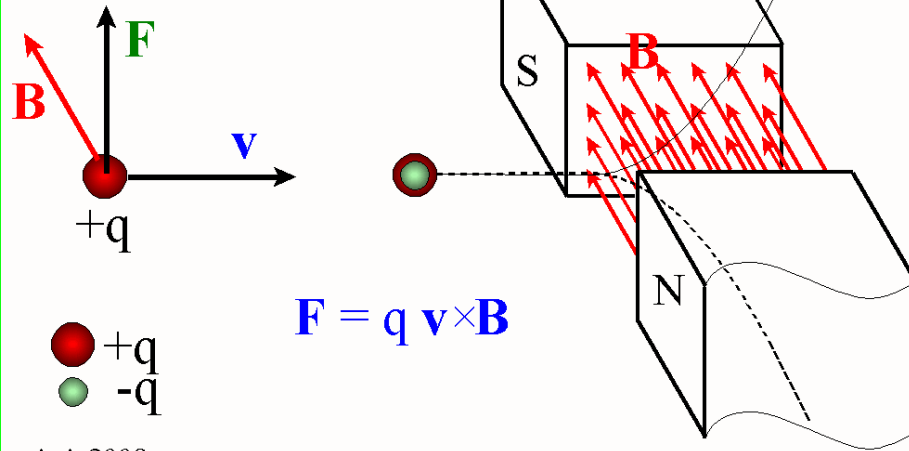
7 TeV LHC Proton = Lecący Komar



$$7 \text{ TeV} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ J} = \frac{1}{2} mv^2$$

$$m \sim 2 \text{ mg}, v = 1,1 \text{ m/s}$$

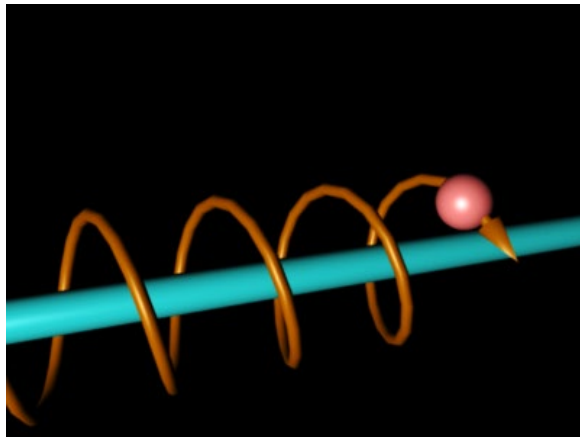
Siła Lorentza



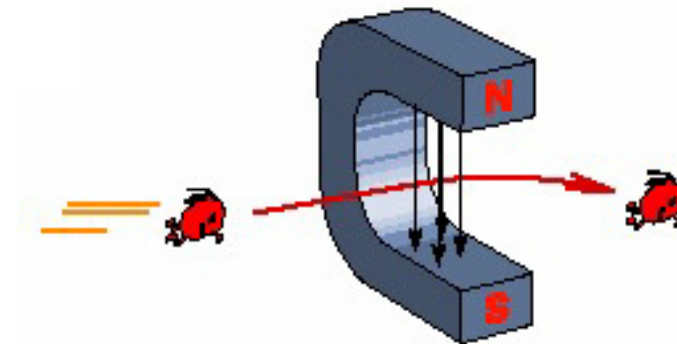
A A 2008

http://www.if.pw.edu.pl/~bibliot/archiwum/adamczyk/WykLadFO/FoWWW_35.html

Ładunek w polu magnetycznym



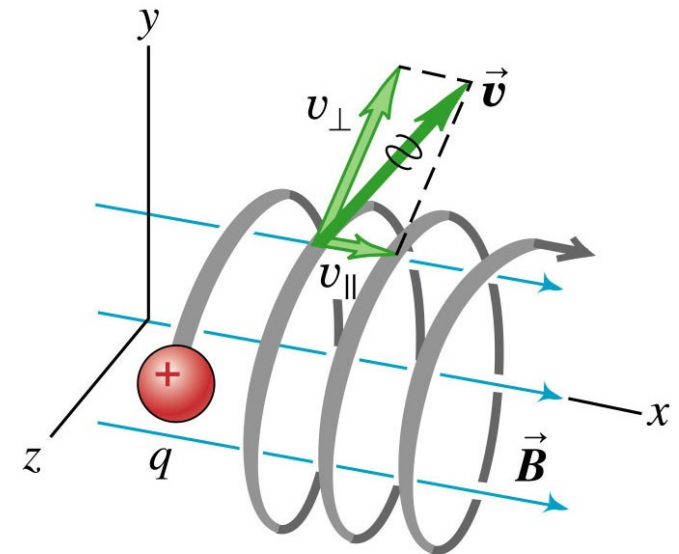
<http://scientopia.org/blogs/galacticinteractions/2012/02/09/charged-particles-and-magnetic-fields/>



<http://www.fuw.edu.pl/~ajduk/Public/mhybground.html>

Ładunek dostający się w obszar pola skośnie do indukcji $\vec{B}$ porusza się po torze spiralnym o promieniu r i skoku h .

Pole magnetyczne **nie zmienia energii kinetycznej cząstki**, zmienia jedynie kierunek jej ruchu.



Akcelerator – podstawy działania

- Przyspieszanie odbywa się za pomocą pola elektrycznego
- Tylko cząstki niosące ładunek
- Do skupienia cząstek w wiązkę oraz do nadania im pożądanego kierunku używa się odpowiednio ukształtowanego, w niektórych konstrukcjach także zmieniającego się w czasie, pola magnetycznego lub elektrycznego

Wyższe energie?

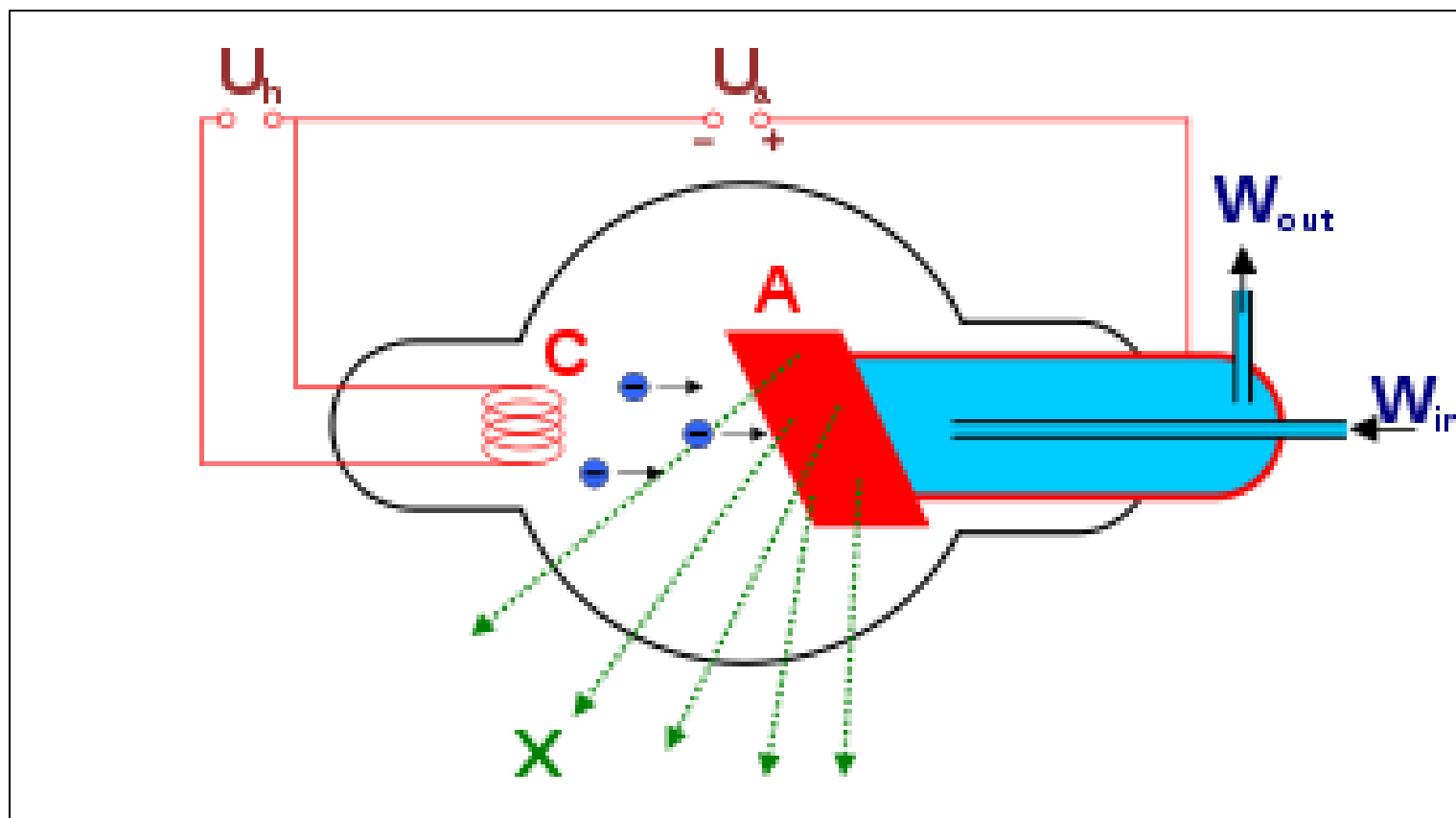
Potrzebowalibyśmy sporo baterii!

Naturalnie były to pierwsze akceleratorzy

- Połączenie w szeregu 6 milionów baterii R6, jedna za drugą, dałoby różnicę potencjałów 9 milionów wolt – cząstka mogłaby być przyspieszona do energii 9 MeV!
- Niestety, taki układ (gdyby był możliwy do zrealizowania) miałby 300 kilometrów długości.
- Wyższe ENERGIE !!! Nauka, aplikacje.



Lampa RTG – akcelerator, XIX w !

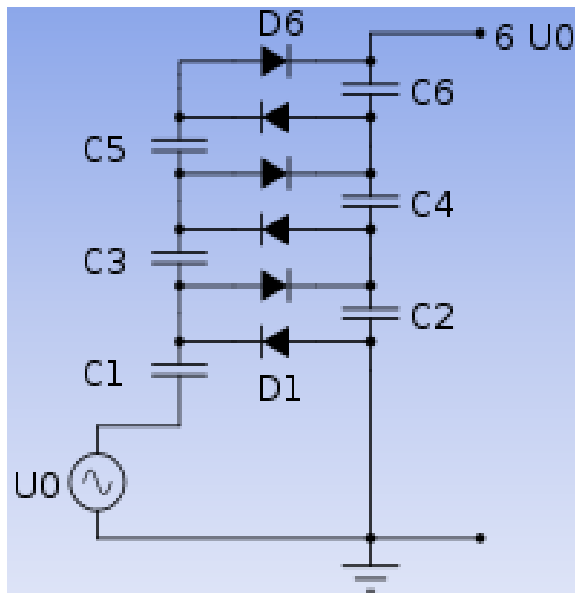


http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_tube

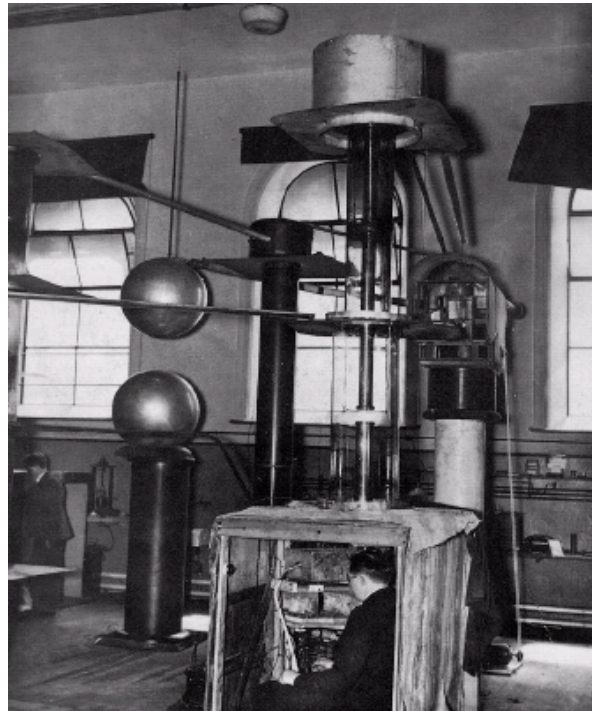
Eksperyment na stałej tarczy

1930' – pierwszy akcelerator

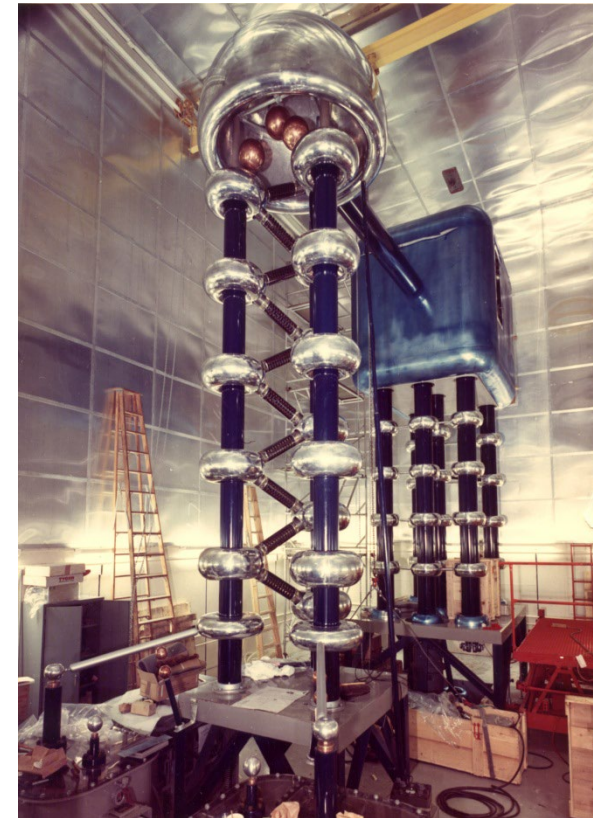
Cockcroft- Walton.



http://pl.wikipedia.org/wiki/Generator_kaskadowy

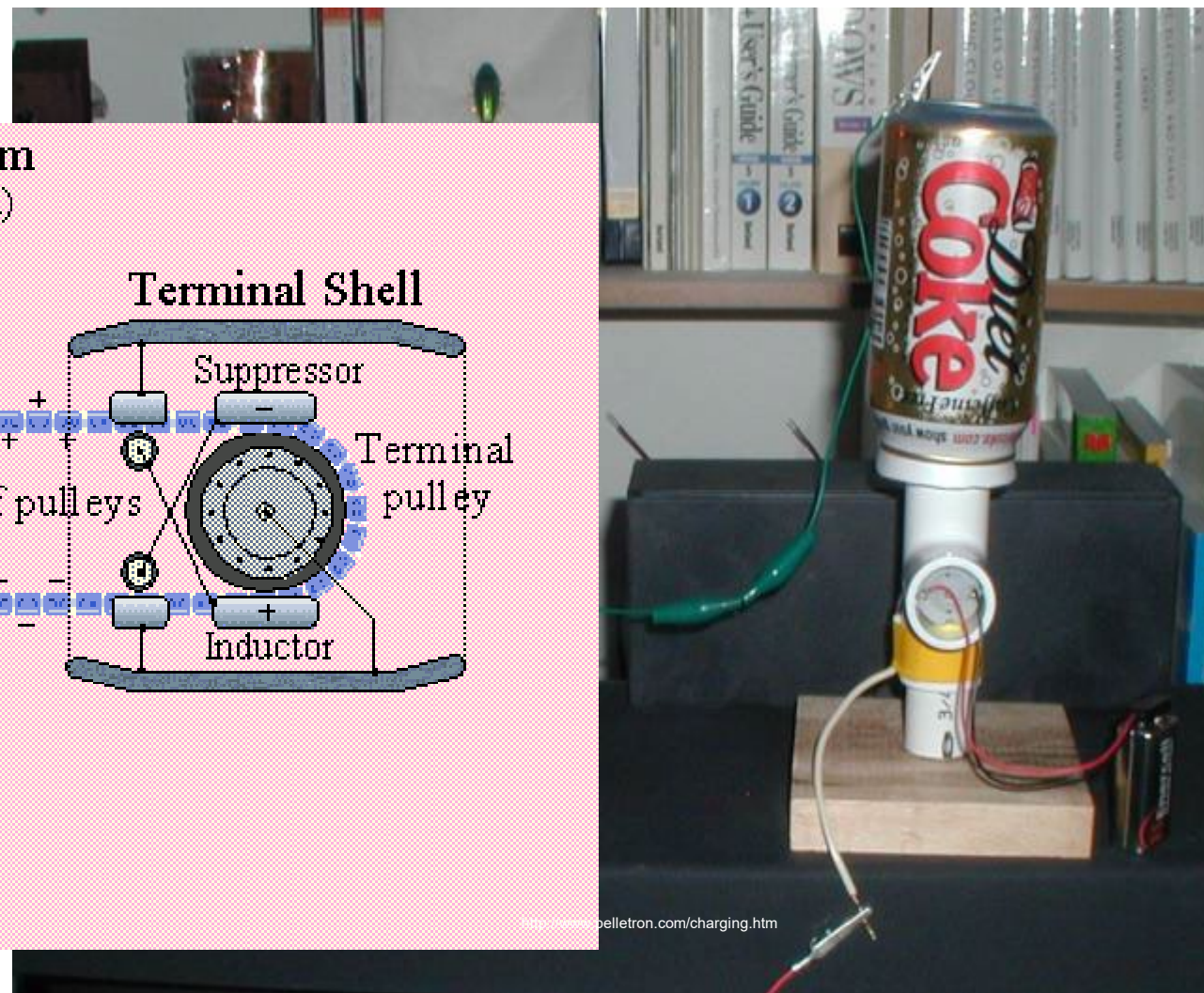
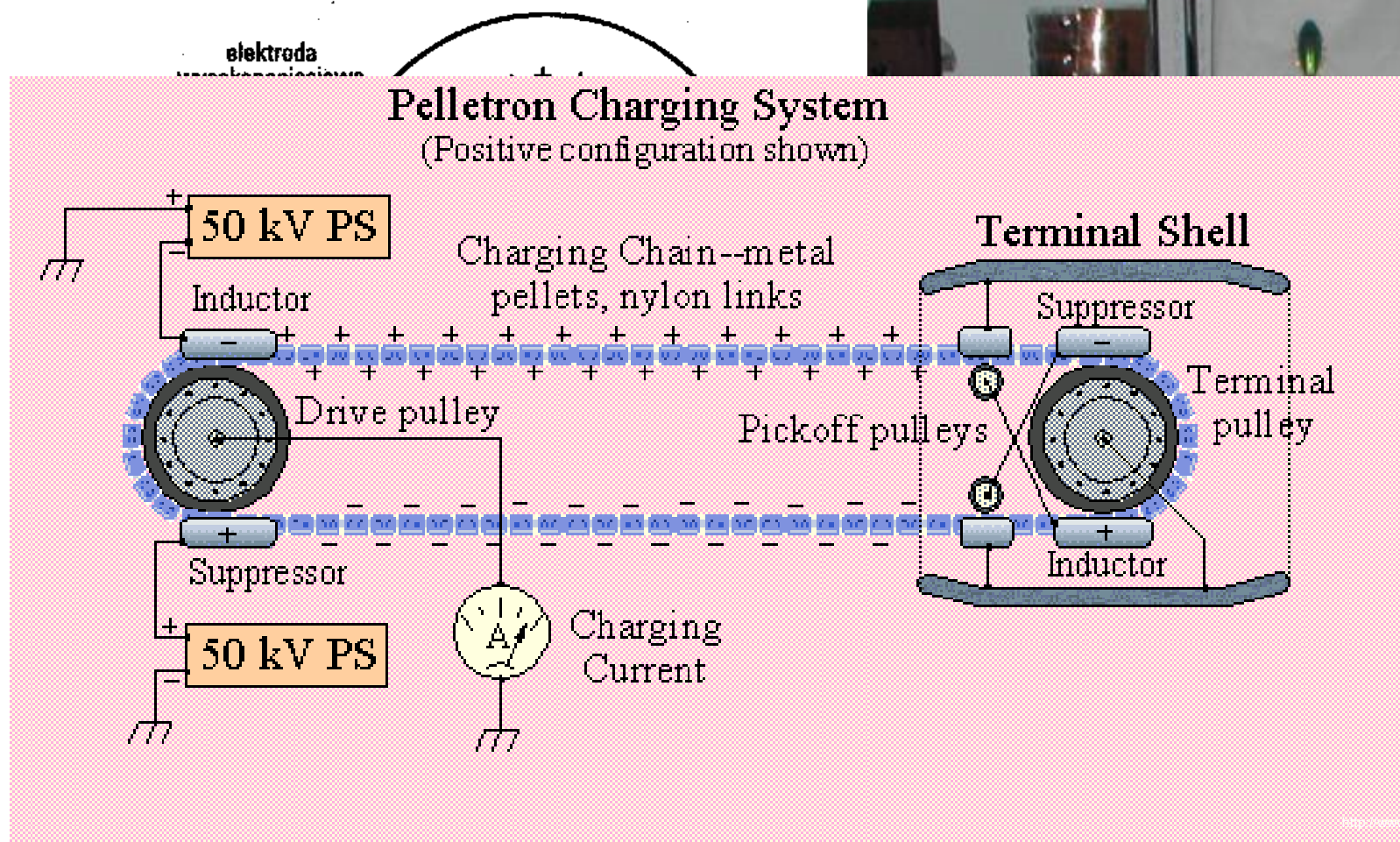


http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_91509.html



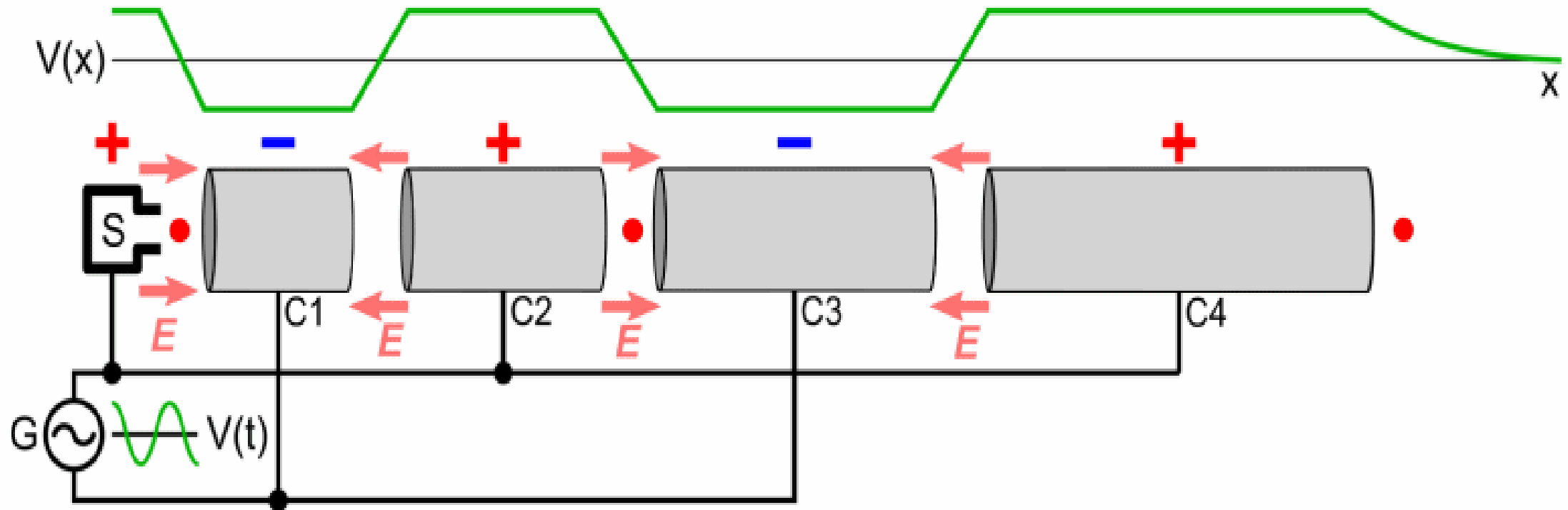
<http://www.bnl.gov/bnlweb/history/images/CN7-1397-69.jpg>

Generator Van de Graaff



Oszukujemy potrzebę wysokiego napięcia

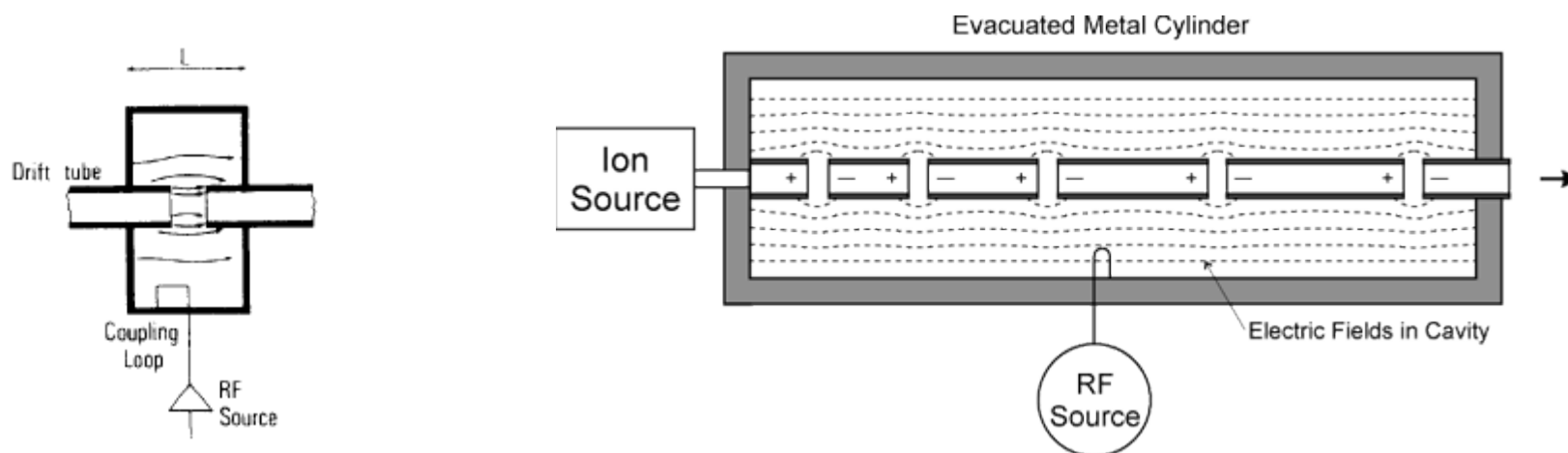
Metoda Wideröe



- Cząstki przyspieszane pomiędzy komorami dryfowymi – w paczkach !
- Konieczność coraz dłuższych komór
- Ograniczenia: **rozmiary** (dla 7MHz, proton 1MeV pokonuje 2m/cykl), straty radiacyjne dla wyższych częstotliwości

Akcelerator Alvareza

- Zamykamy przestrzeń przyspieszania we wnęce o dobranej częstotliwości rezonansowej

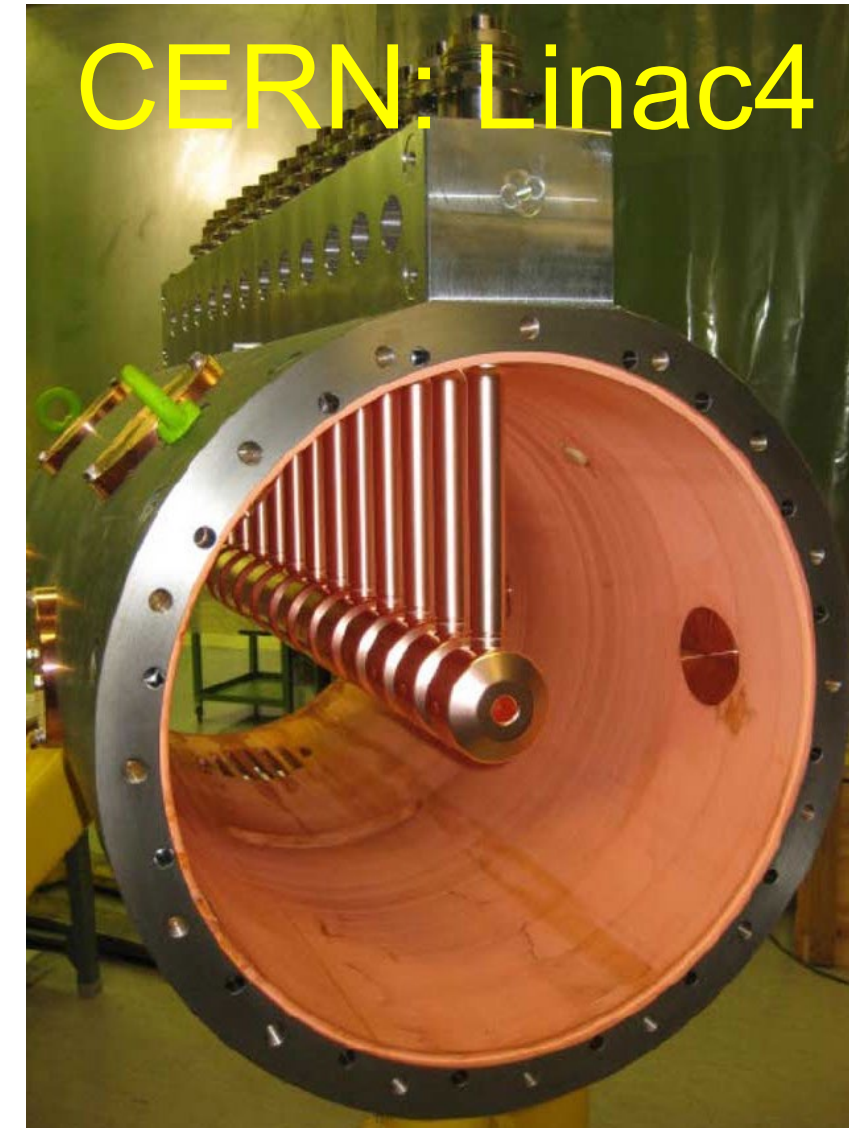
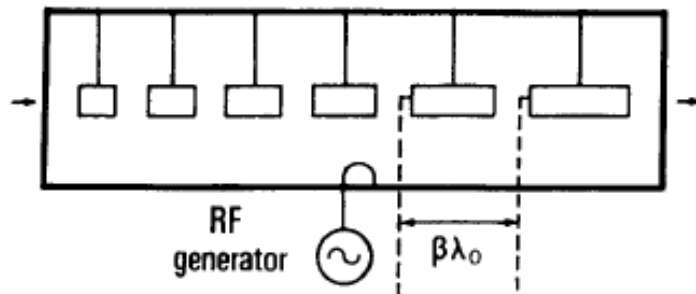


http://www.linacs.com/about/history_p2.html

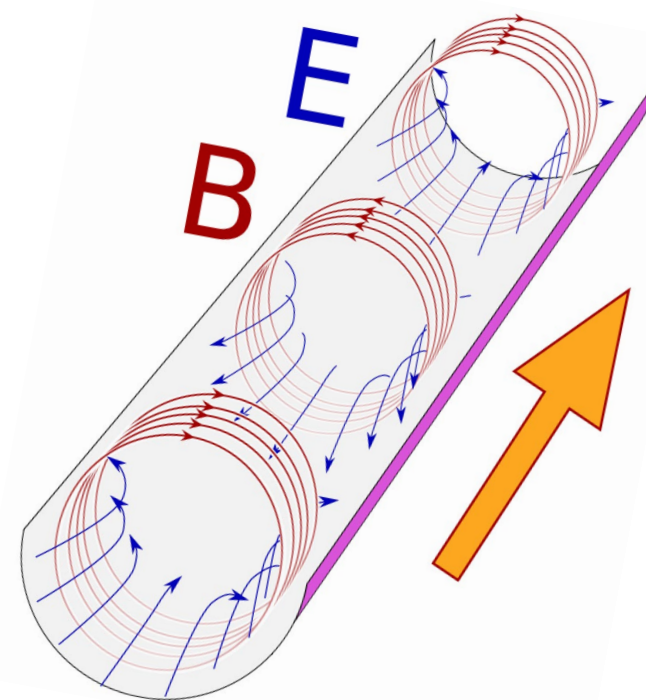
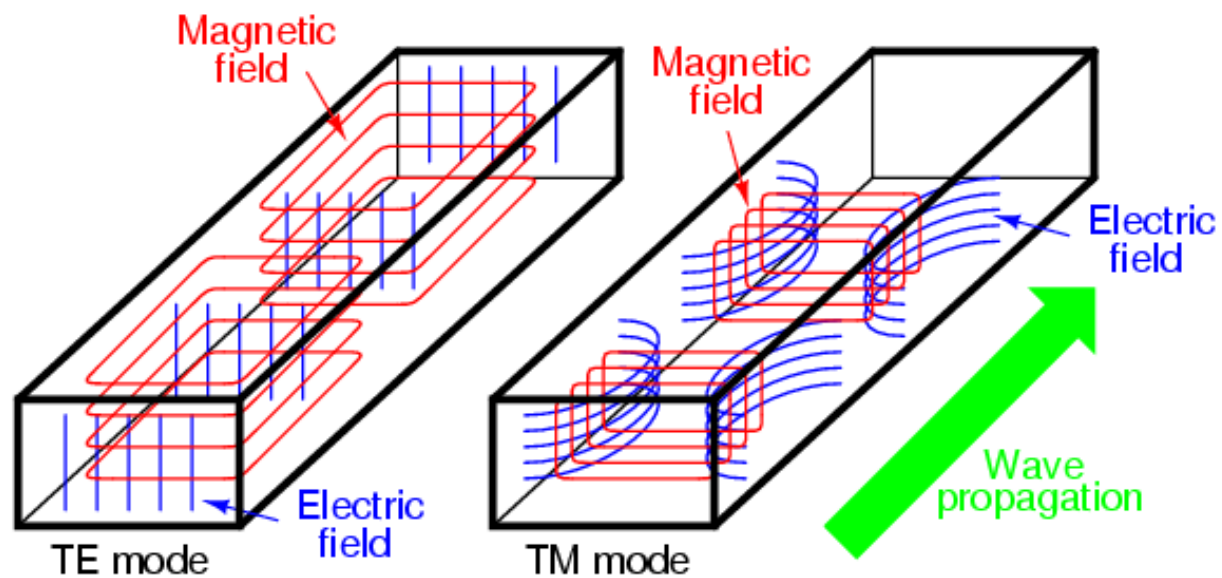
- RF – źródła mikrofalowe „pożyczone” z techniki radarowej – 1946 -200 MHz

Metoda Alvareza

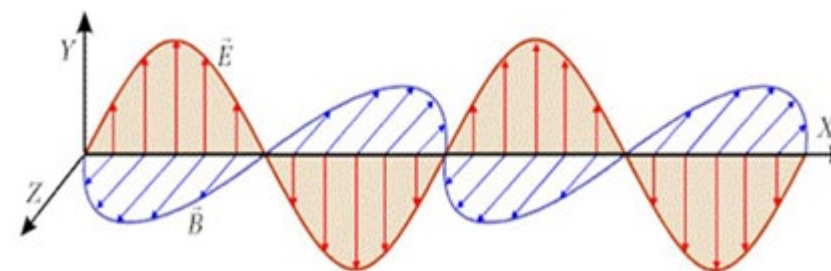
- Pierwszy akcelerator Alvareza zbudowany został w 1946r. Przyspieszał protony do energii 32 MeV, zasilany ze źródła 200MHz.
- Używane do dziś dla ciężkich cząstek.



Fala elektromagnetyczna w falowodzie

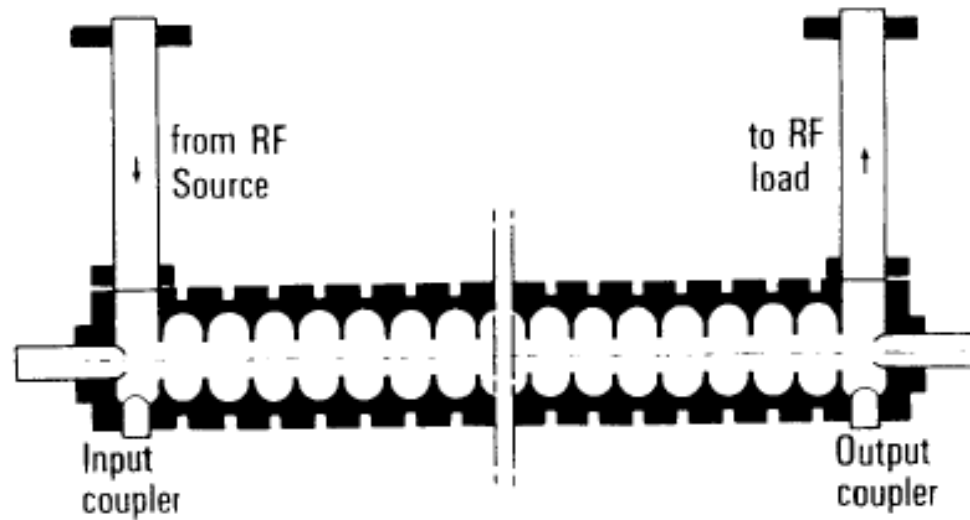
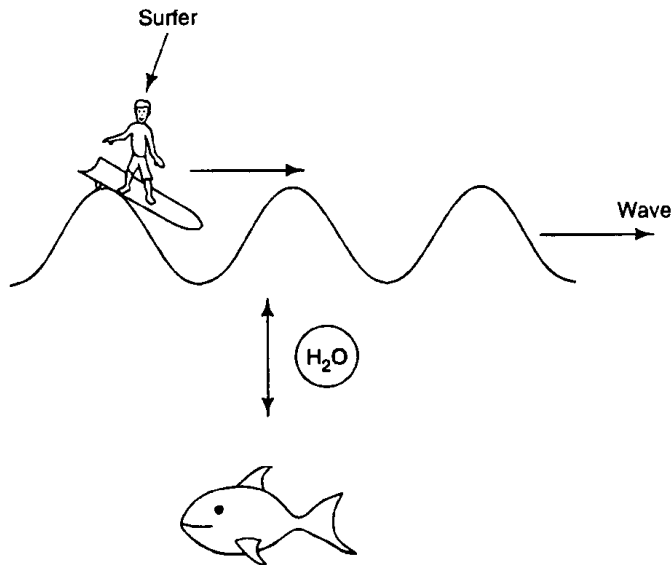


http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_14/8.html

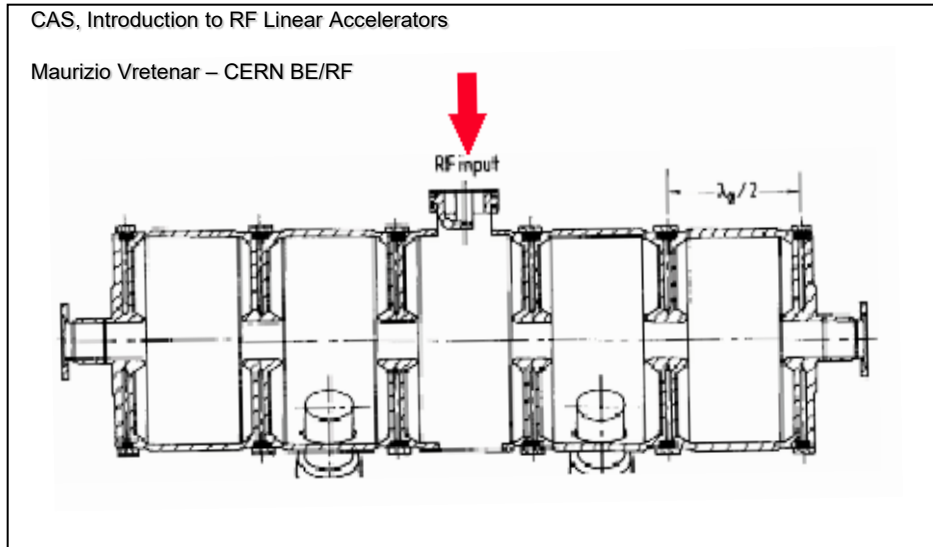


Fala biegnąca

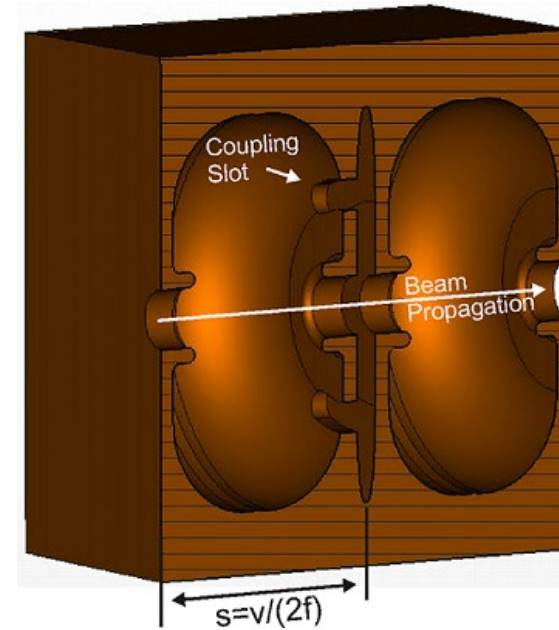
- Przyspieszanie ciągłe (bez odstępów pomiędzy wnękami).



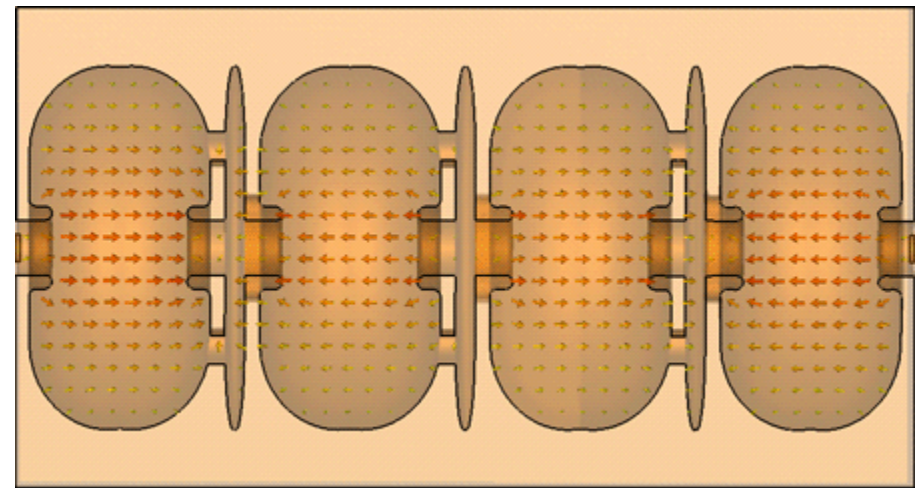
Fala stojąca



Standing wave

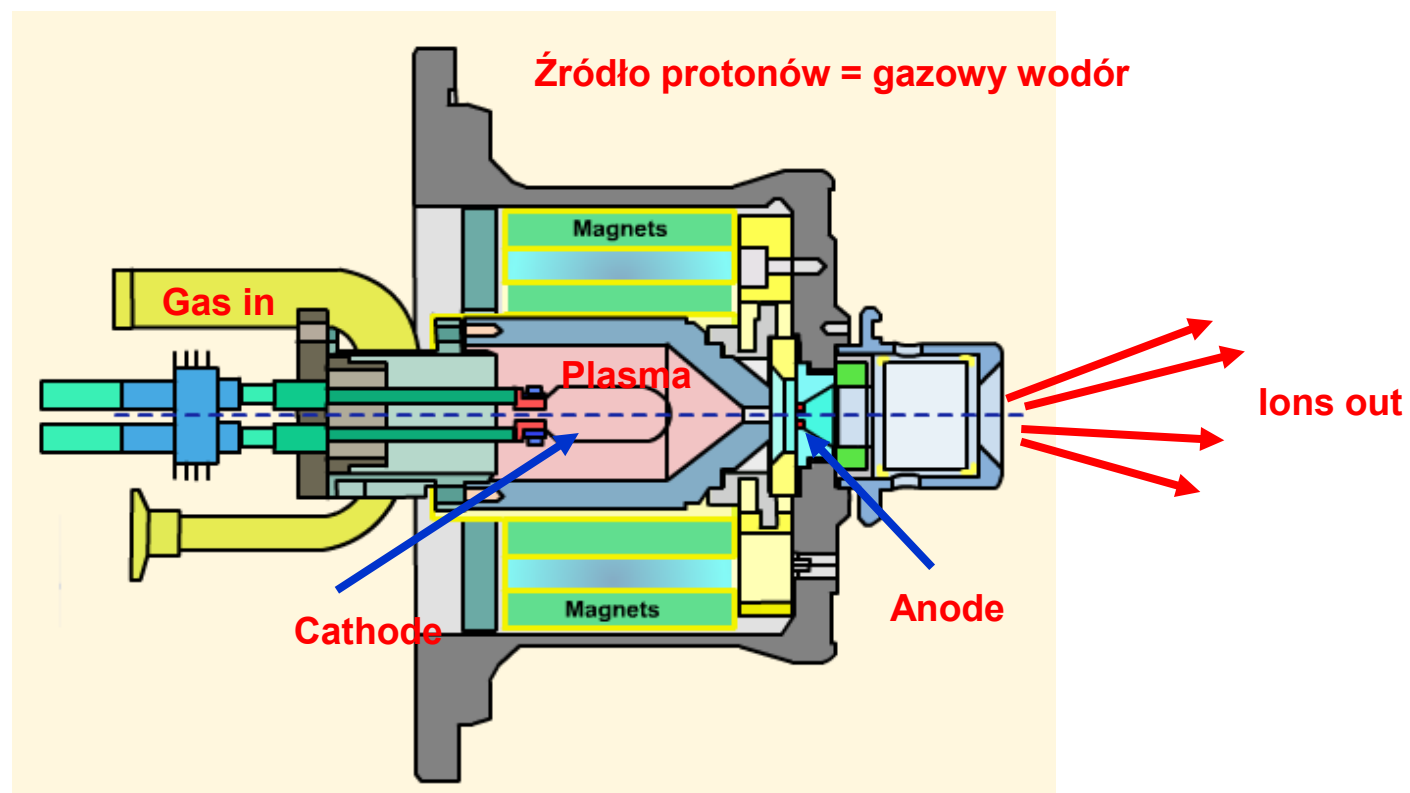


<http://www.cst.com/Content/Applications/Article/C-Band+On-Axis+Coupled+Standing+Wave+Linear+Accelerator>



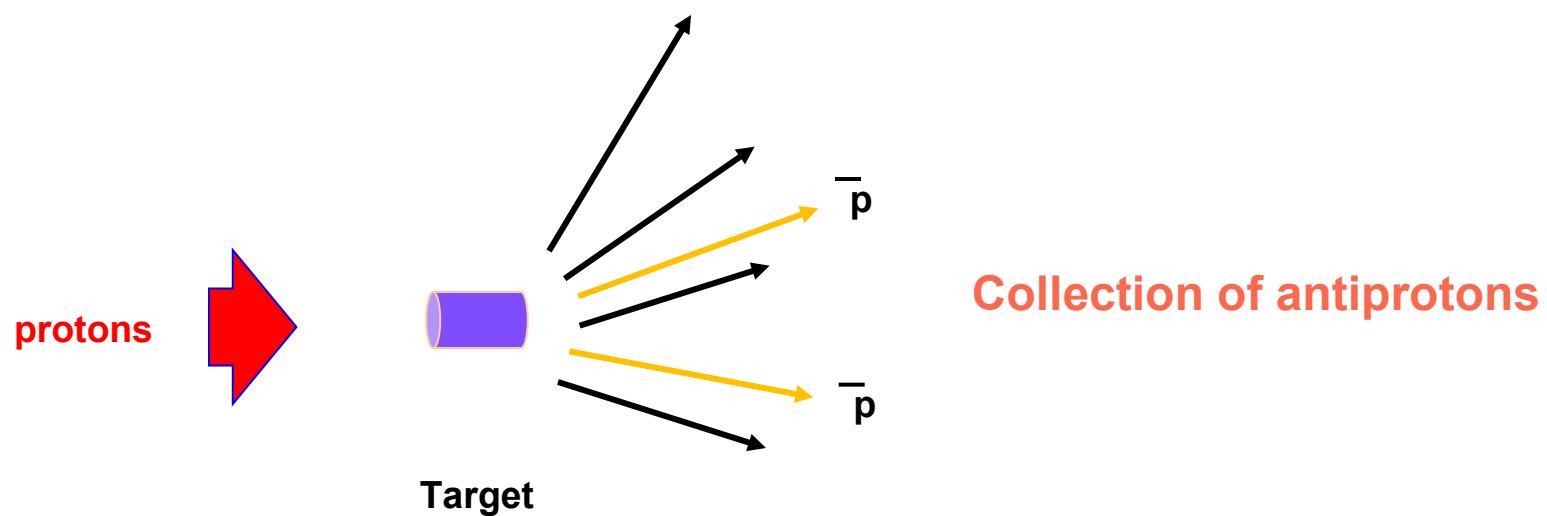
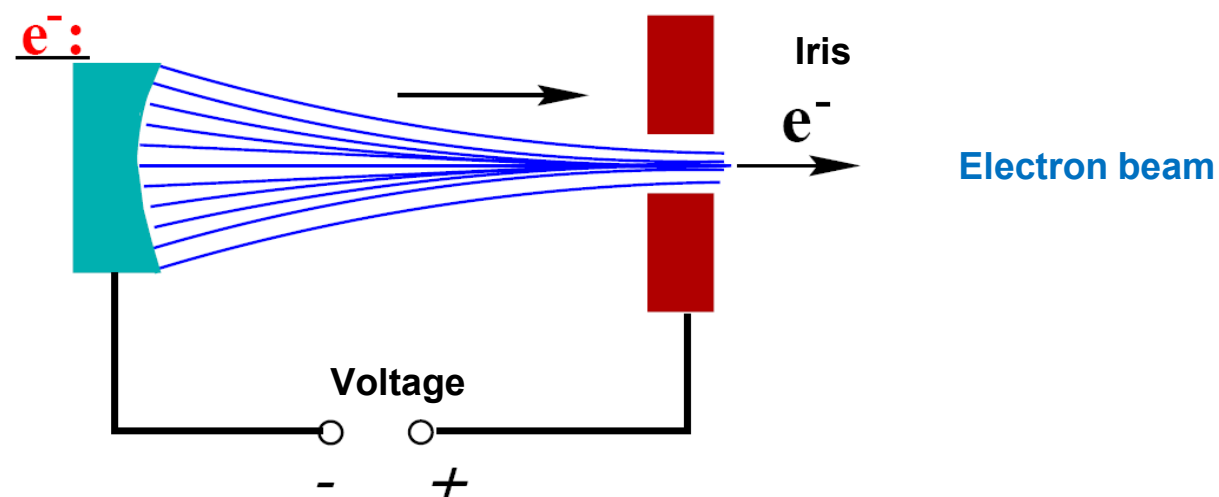
A tak przy okazji – skąd wziąć protony ?

Jonizacja gazu i wyprowadzenie jonów



Skąd wziąć inne cząstki ?

Źródło elektronów = powierzchnia metali



Akceleratory – podział

- Liniowe
 - Wiązka przelatuje tylko raz
 - Maksymalizuj przyspieszenie!
- Kołowe
 - Wiązka przelatuje tyle razy ile trzeba – nie spiesz się
 - Limitem są magnesy i/lub promień i/lub straty

Ruch cząstki w polu magnetycznym

Wartość siły Lorentza:

$$F = q \cdot v_{\perp} \cdot B$$

$$q \cdot v_{\perp} \cdot B = \frac{m v_{\perp}^2}{r}$$



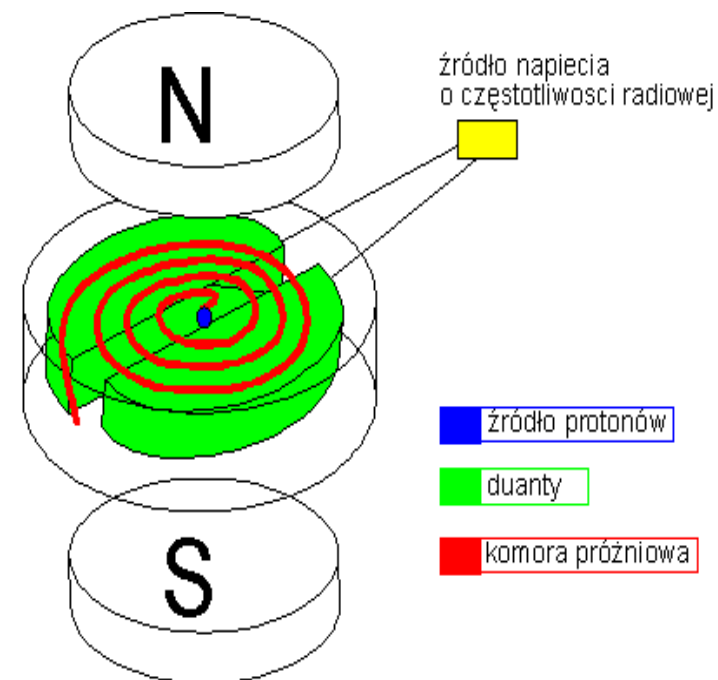
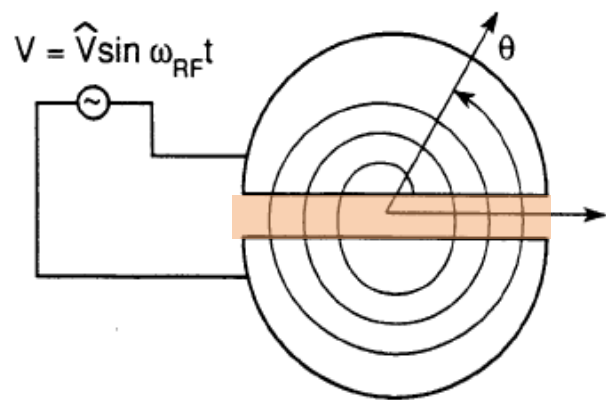
$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B \cdot v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{q \cdot B}{m}$$

**Częstość cyklotronowa
niezależna od prędkości**

Cyklotron /Lawrence, 1930'/



Nagroda Nobla 1939

- Cząstki w polu magnetycznym (nabiegunność)
- Zmienne pole magnetyczne
- Ruch cząstek w polu magnetycznym przyspieszającym
- Relatywistyczny opis całego procesu – limit energetyczny...



$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{q \cdot B}{m}$$

Cyklotron

- Np. Protony – do 10MeV
- **NIE DO ELEKTRONÓW**

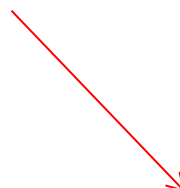
	v/c
1 MeV	0,941

Cyklotron izochroniczny

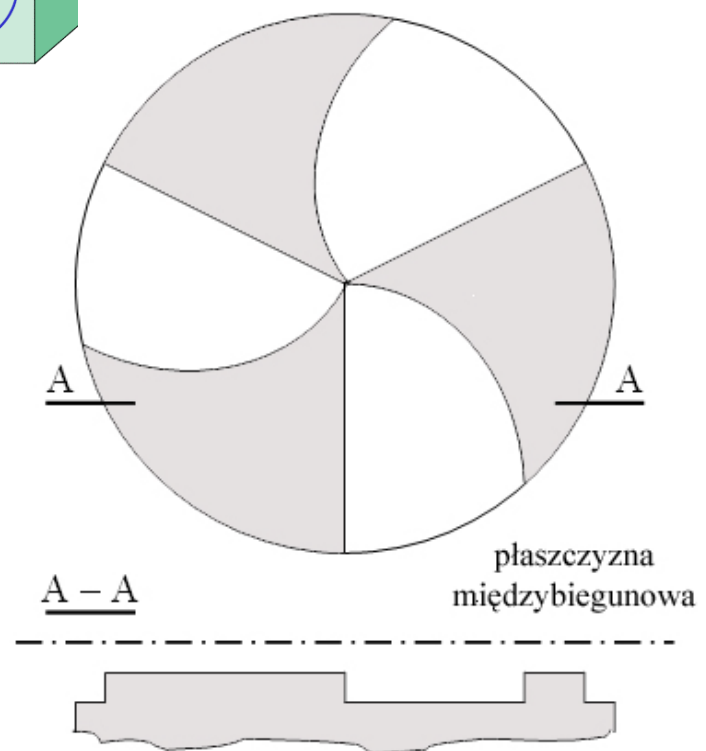
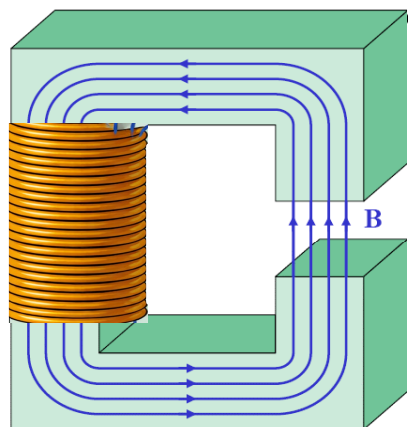
- **Cyklotron izochroniczny** - akcelerator z azymutalną modulacją pola.

Czas jednego obiegu rozpędzanych cząstek jest stały pomimo wzrostu masy cząstki wywołanej efektami relatywistycznymi.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{q \cdot B}{m}$$

00 010 0000 111 1 11CBJ

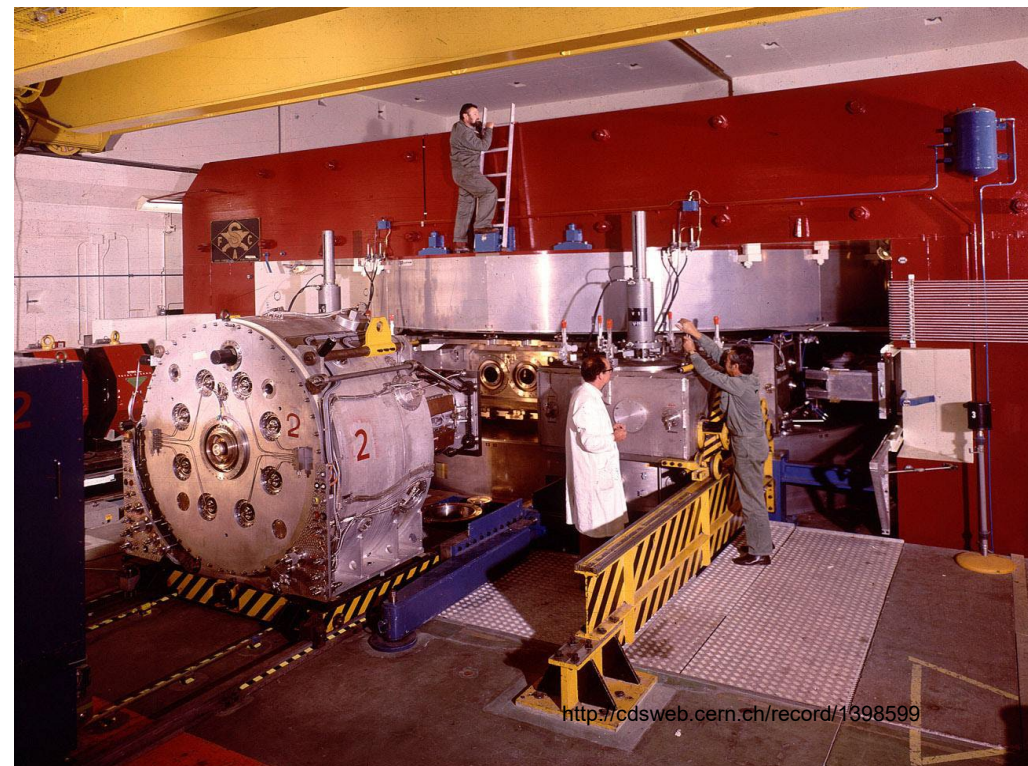


Synchrocyclotron /fazotron/

- Aby skompensować relatywistyczny wzrost masy – możemy **zmienić częstotliwość** RF

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{q \cdot B}{m}$$

- Np. CERN
600MeV
1957 - 1990



Fixed Field Alternating Gradient Circular Machines (FFAG)

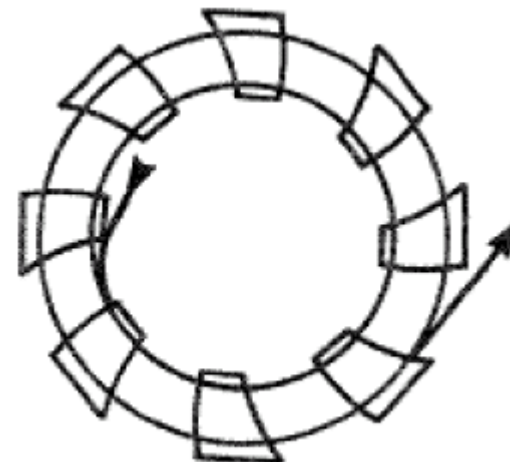
Pole magnetyczne	Częstotliwość RF stała	Częstotliwość RF zmienna
Stałe	Cyklotron klasyczny	Synchrocyklotron
Zmienne	Izochroniczny	FFAG



Klasyczny,
synchrocyklotron

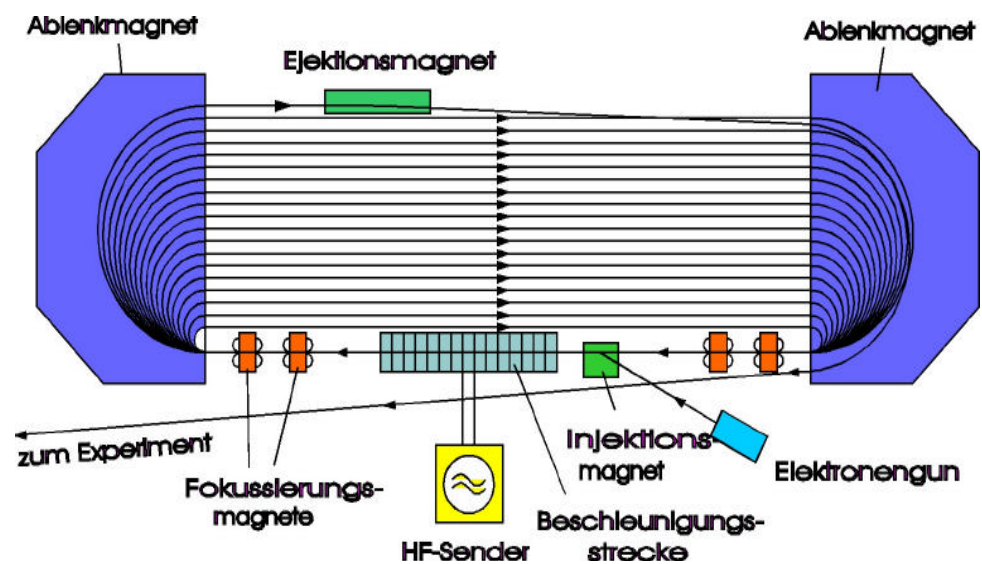


izochroniczny



FFAG

Mikrotron – dedykowany do e^-



Synchrotron - LHC

Jeśli zsynchronizowana zostanie częstość obiegu cząstek w pierścieniu akceluracyjnym z częstością zmiany pól: elektrycznego i magnetycznego, to proces akceleracji może odbywać się bez zmiany promienia okręgu po którym krążą cząstki.

/Oliphant 1943/

Machine	RF frequency f	Magnetic Field B	Orbit Radius ρ	Comment
Cyclotron	constant	constant	increases with energy	Particles out of synch with RF; low energy beam or heavy ions
Isochronous Cyclotron	constant	varies	increases with energy	Particles in synch, but difficult to create stable orbits
Synchro-cyclotron	varies	constant	increases with energy	Stable oscillations
Synchrotron	varies	varies	constant	Flexible machine, high energies possible
FFAG	varies	constant in time, varies with radius	increases with energy	Increasingly attraction option for 21 st century designs

Synchrotron

Na obwodzie umieszczamy:

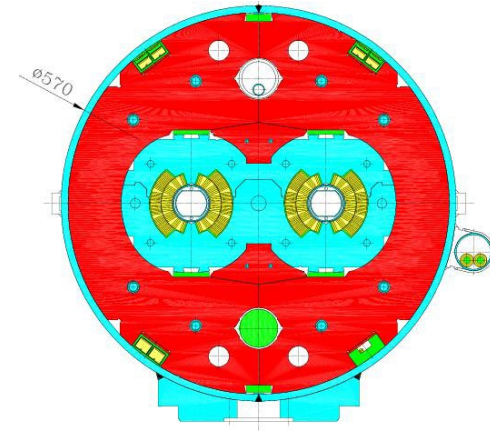
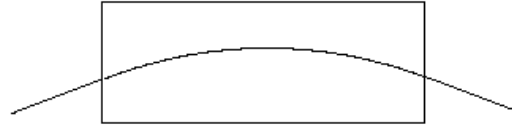
- Wnęki przyspieszające RF
- Magnesy zakrzywiające
- Elementy skupiające – magnesy kwadrupolowe
- Pompy próżniowe (zła próżnia = pogorszenie parametrów wiązki, fałszywe wyniki exp., spadek wydajności)
- Monitory wiązki



Magnesy

- Utrzymywanie wiązki na stałej orbicie

→ Dipole



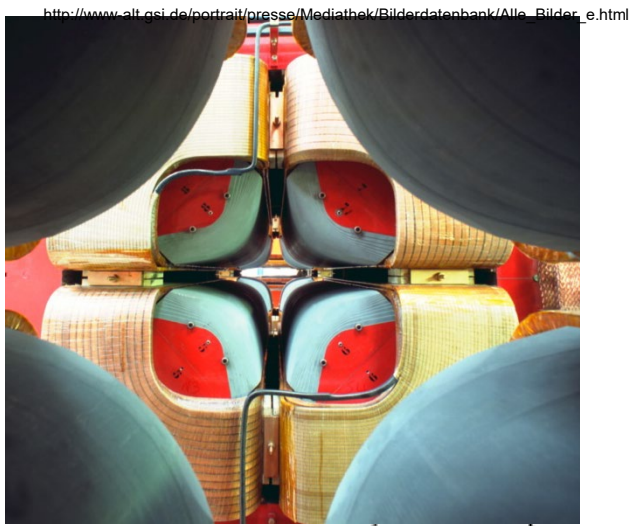
LHC

$P = 7000 \text{ GeV/c}$

$\rho = 27 \text{ Km}$

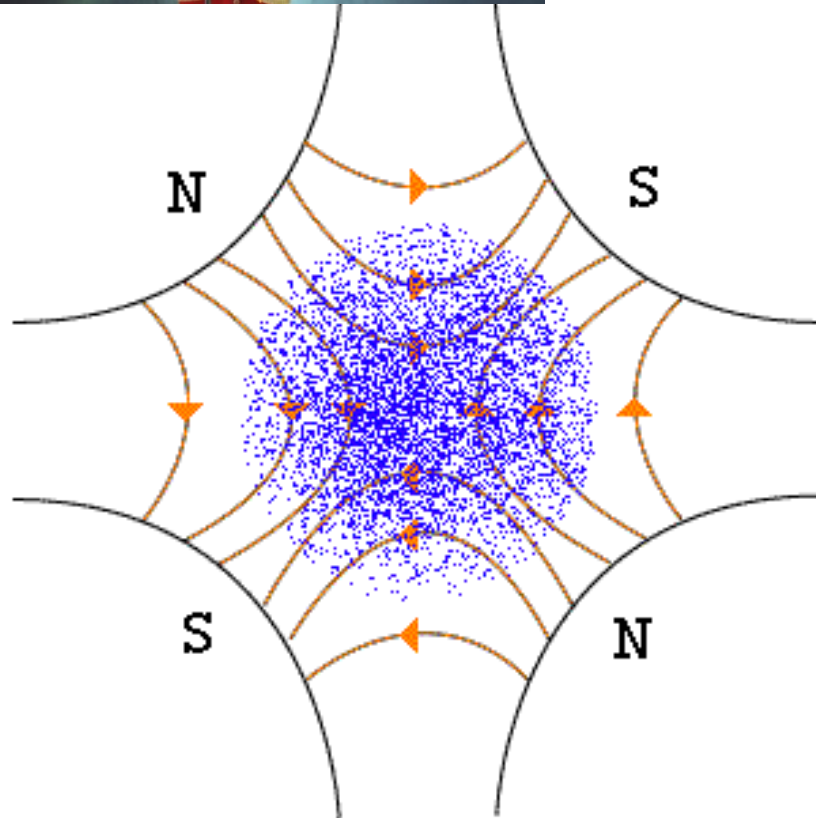
$B = 8.33 \text{ Tesla}$





Magnesy kwadrupolowe

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/kullander/

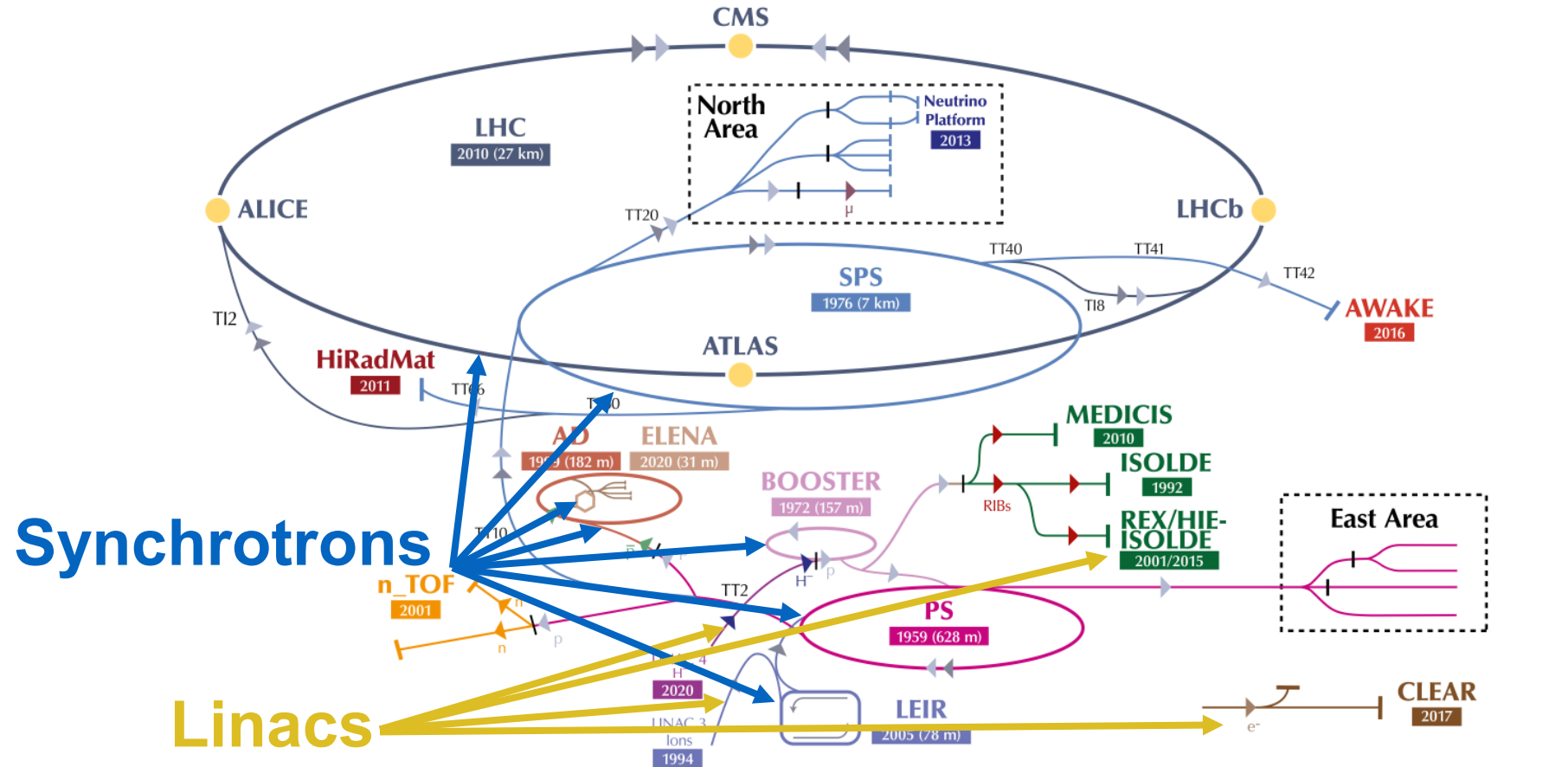


I inne...



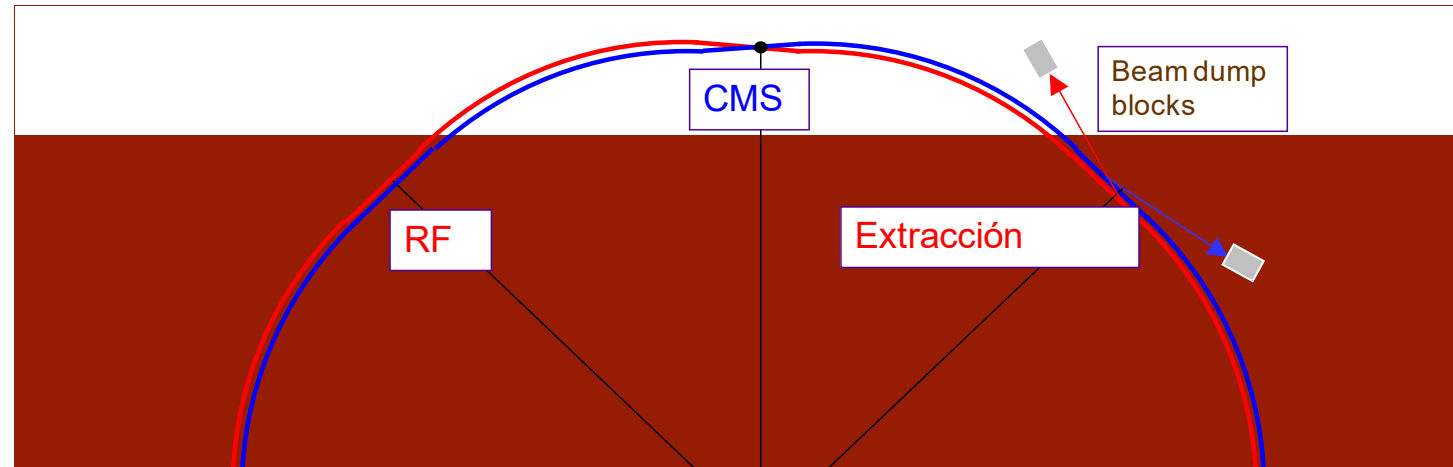
The CERN accelerator complex

Complexe des accélérateurs du CERN



► H^- (hydrogen anions) ► p (protons) ► ions ► RIBs (Radioactive Ion Beams) ► n (neutrons) ► $\bar{p}$ (antiprotons) ► e^- (electrons) ► μ (muons)

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-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



More
Clear

Two beams: $E_1, \vec{p}_1, E_2, \vec{p}_2, m_1 = m_2 = m$

$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Collider versus fixed target:

Fixed target: $\vec{p}_2 = 0 \rightarrow E_{cm} = \sqrt{2m^2 + 2E_1m}$

Collider: $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2 \rightarrow E_{cm} = E_1 + E_2$

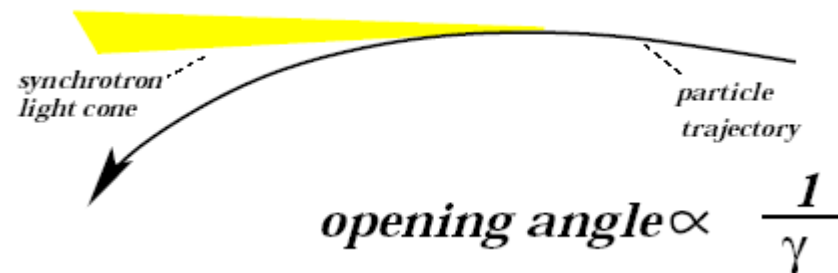
LHC (pp): 14000 GeV versus ≈ 115 GeV

Punkt zderzenia

- Wiązki ogniskowane z około 0.1 mm do około 0.02 mm, (ludzki włos – 0.05 mm)
- Miliony zderzeń na sekundę

Dlaczego duże akceleratory ?

- Każda cząstka zakrzywiana w polu magnetycznym wypromieniowuje energię – promieniowanie synchrotronowe



- Straty $\sim E^4/(r^2 \cdot m_0^4)$



1 MeV/obrót dla 10 GeV
2.5 GeV/obrót dla 100 GeV
156 GeV/obrót dla 500 GeV
 $(m_e/m_p)^4 \sim 10^{-13}$

Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

- W przypadku kołowych akceleratorów protonów: pole magnetyczne
 - Pole magnetyczne musi rosnąć wraz ze wzrostem energii wiązki. W praktyce nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż 9-10 T.
- W przypadku protonów akcelerator liniowy musiałby być wielokrotnie większy niż akcelerator kołowy.
- Aby uzyskiwać coraz wyższe energie zderzających się wiązek musimy budować coraz większe i większe akceleratory.

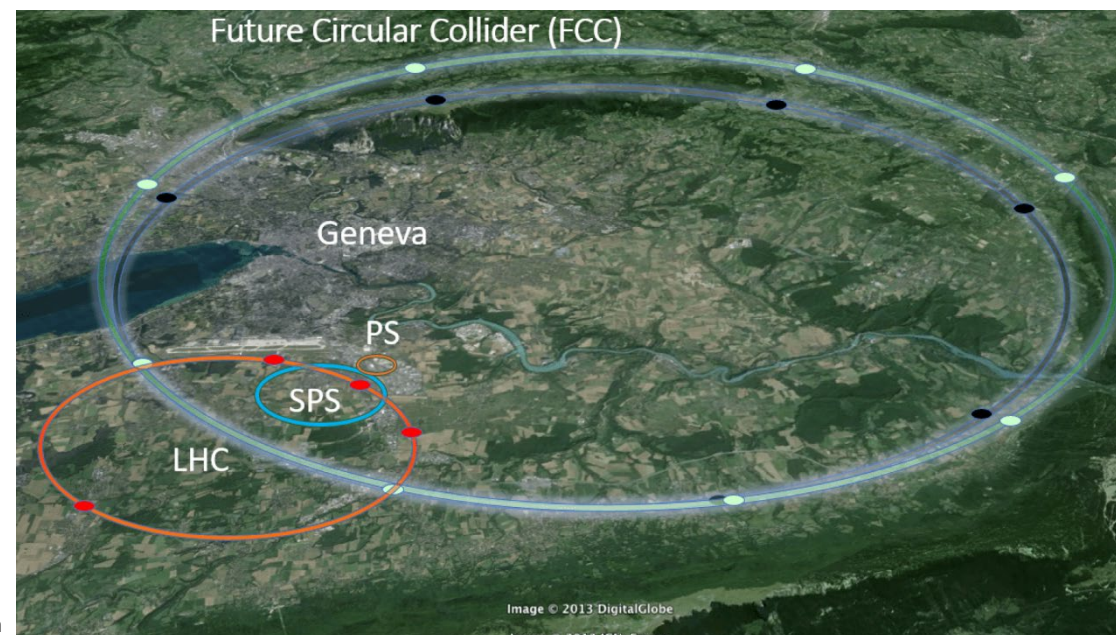
Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

- W przypadku akceleratorów kołowych e+- : pole przyśpieszające
- Elektrony krążące po orbicie tracą energie na promieniowanie synchrotronowe.
 - Średnia energia tracona na jeden obieg: $\Delta E \sim E^4/R$
- Energia która możemy dostarczyć jest proporcjonalna do obwodu akceleratora i średniego pola ε : $\Delta E \sim 2\pi R \langle \varepsilon \rangle$
- LEP (obwód 27 km) był (prawdopodobnie) ostatnim akceleratorem kołowym e+-.
- Dalej bardziej opłacalne są akceleratory liniowe:
 $E_{\max} \sim L \langle \varepsilon \rangle$

Co nas czeka w przyszłości ?

Future Circular Collider w CERN ?

- Tunel ok. **90–100 km** (LHC ma 27 km)
- Energia nawet **100 TeV** (LHC ma ~14 TeV)
- Start: ~2040–2050 (FCC-ee, potem FCC-hh)



Wielki Zderzacz Hadronów pozwoił odnaleźć nową cząstkę subatomową – ogłosili naukowcy z CERN

Niedawno rozpoczął się nowy, ostatni przed wielką modernizacją sezon badań w Wielkim Zderzacz Hadronów – największym i najpotężniejszym akceleratorze cząstek na świecie. Tymczasem naukowcy z CERN ogłosili, że eksperyment LHCb wykrył nową cząstkę subatomową przypominającą proton, lecz czterokrotnie cięższą.



 Tech

 Testy

 Moto

 Nauka

 Publicystyka

Po latach poszukiwań naukowcy z CERN odkryli nową cząstkę. Wygląda jak proton, ale ma zupełnie inne właściwości

[Learn More](#)



Aleksander Kowal

📅 23.03.2026 | ⌚ Przeczytasz w 2 minuty

Fabryki egzotycznych cząstek i izotopów

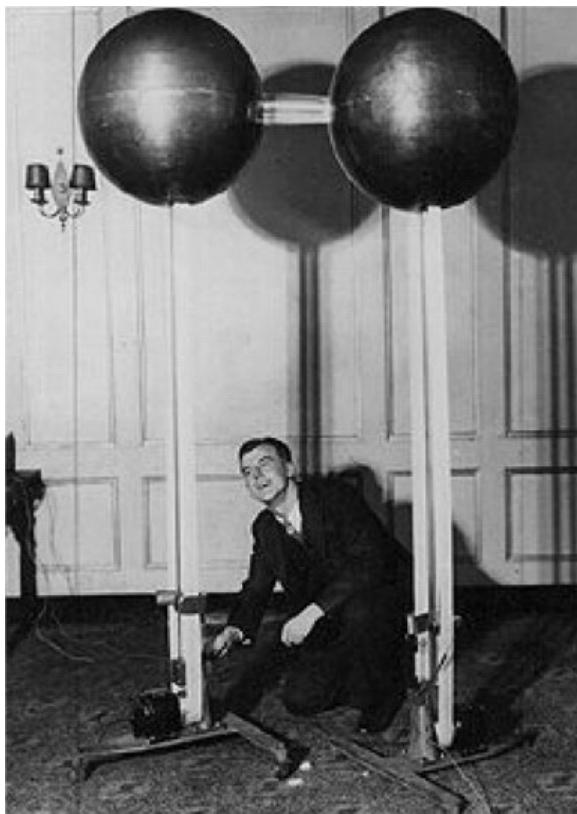
- Nie wszystkie kombinacje kwarków zaobserwowano
- Być może niektóre nie będą tworzyć cząstek
- Dochodzą tetra – pentakwarki (obserwowano już m.in. **ccud** i **cccc**, ale również **ccuud**, **ccuds**) – czy to cząstki, czy mezon+barion ?
- Nowe izotopy (2025/2026), m.in.:
 - Japonia (Cr72, Mn74, Fe77, Co79...)
 - USA (Ti65, Ti66...)
 - Chiny (Am231...)
- Znamy już ~3000, pozostaje ... ~5000 do odkrycia

Podsumowanie

- Przyspieszamy cząstki w polach elektrostatycznych i we wnękach rezonansowych polem RF
- Kierunek ruchu modyfikujemy polem B
- Akcelerator liniowy – tylko jedno przejście czastek
- Akcelerator kołowy – wielokrotne przyspieszanie
- Zwiększanie promienia zmniejsza straty i umożliwia uzyskiwanie większych energii, stąd potrzeba dużych akceleratorów

Akcelerator

Wczoraj

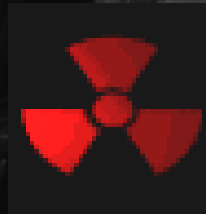


Dziś





Dziękuję za uwagę



NATIONAL
CENTRE
FOR NUCLEAR
RESEARCH
ŚWIERK

www.ncbj.gov.pl

