

Introduction to accelerators

Wstęp do fizyki akceleratorów



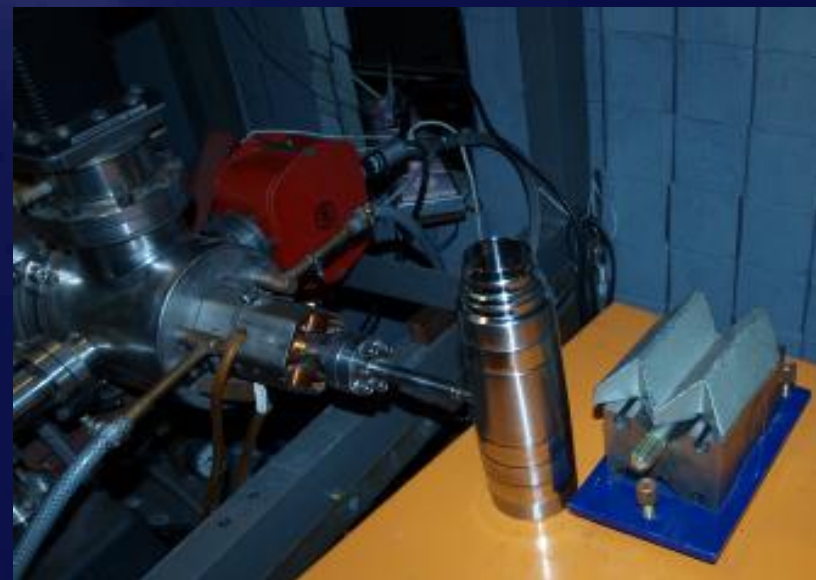
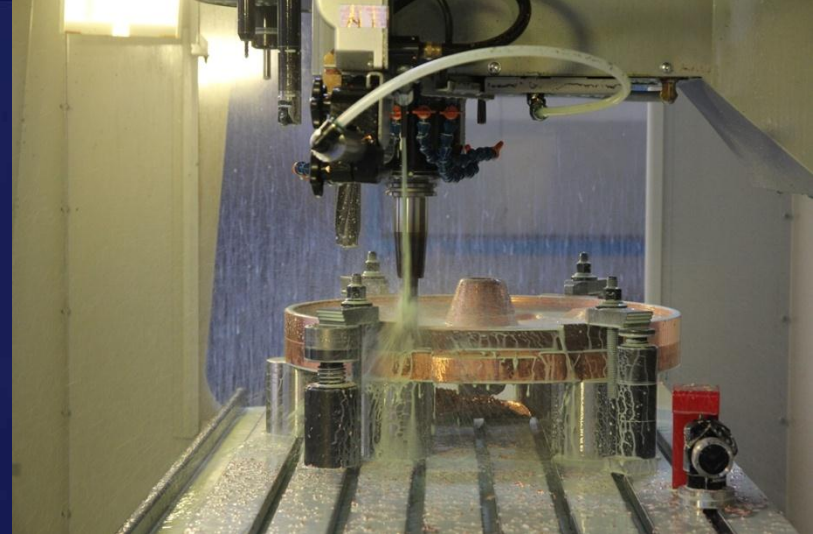
Sławomir Wronka, 21.11.12r





Narodowe Centrum Badań Jądrowych jest jednym z największych instytutów naukowych w Polsce, dysponującym **m.in. jedynym w Polsce jądrowym reaktorem badawczym Maria**. Zatrudniamy **ponad 1000** fizyków, inżynierów i pracowników pomocniczych. Nasza kadra naukowa to ok. 70 profesorów i doktorów habilitowanych i ponad 120 doktorów.

A w szczególności –
wiedza, doświadczenie
i infrastruktura do wytwarzania, uruchamiania,
testowania akceleratorów i ich komponentów na
potrzeby nauki, przemysłu
i medycyny.





Instytut

Aktualności

Badania

Oferta

Edukacja

Inne strony

Dla mediów

Dla pracowników

[Strona główna](#) > [Narodowe Centrum Badań Jądrowych](#) > [Zakłady](#) > [Zakład Fizyki i Techniki Akceleracji Cząstek \(TJ1\)](#) > [Zakład Fizyki i Techniki Akceleracji Cząstek \(TJ1\)](#)

Opis Pracownicy Publikacje

Zakład Fizyki i Techniki Akceleracji Cząstek (TJ1)

Adres

05-400 Otwock, Świerk
tel. +48 22 7180 538
fax +48 22 779 3481
e-mail p10@ipj.gov.pl
www <http://www.ipj.gov.pl/pl/zaklady/z10/default.htm>

Kierownik Zakładu

dr Sławomir Wronka
e-mail: wronka@ipj.gov.pl

Struktura organizacyjna Zakładu

- Pracownia Teorii akceleracji i Metod Obliczeniowych
- Pracownia Struktur Przyspieszających i Układów Wielkiej Częstotliwości
- Pracownia Stanowisk do Badań Eksperymentalnych

Przedmiot badań

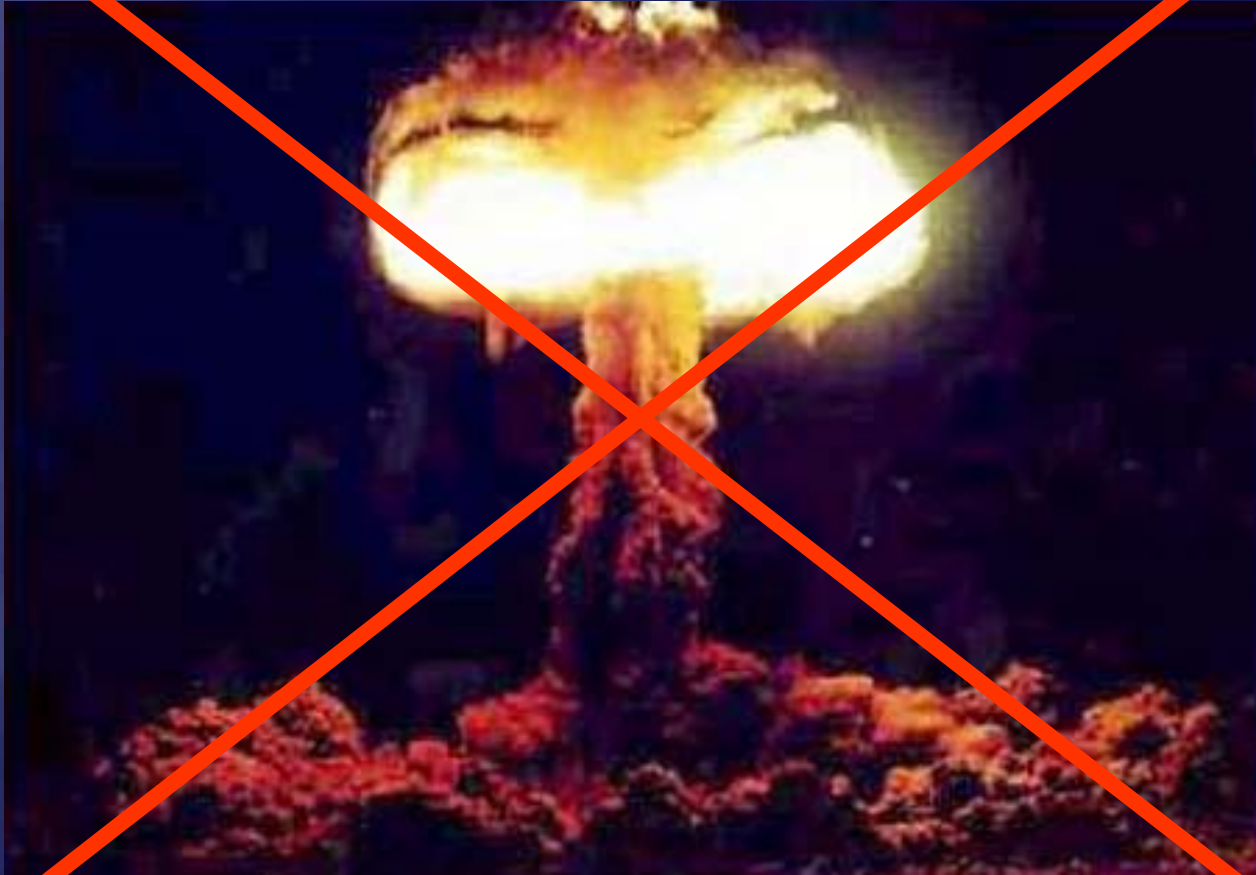
- Prowadzenie prac badawczych i rozwojowych w dziedzinie fizyki przyspieszania cząstek naładowanych oraz projektowania i technologii akceleratorów.
- Wdrażanie nowych opracowań oraz współudział w budowie i wykorzystania różnego typu urządzeń akceleratorowych do celów badawczych oraz dla zastosowań w medycynie, przemyśle, rolnictwie, ochronie środowiska, energetyce jądrowej i innych.
- Podnoszenie i upowszechnienie wiedzy o kierunkach rozwoju i zastosowaniach techniki akceleratorowej. Współpraca z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami fizyki i techniki akceleratorów.



Hala akceleratorów. Foto: Hanna Musiałowa



Polski





Pojęcia podstawowe

- ▣ Prędkość światła
- ▣ Energia
- ▣ Pęd

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

$$E_0 = mc^2$$

$$p = m\gamma\beta c$$

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

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

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

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

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

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

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

▣ Masa spoczynkowa

▪ Elektron

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

▪ Proton

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

▪ Neutron

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

Ruch cząstek w polu elektromagnetycznym

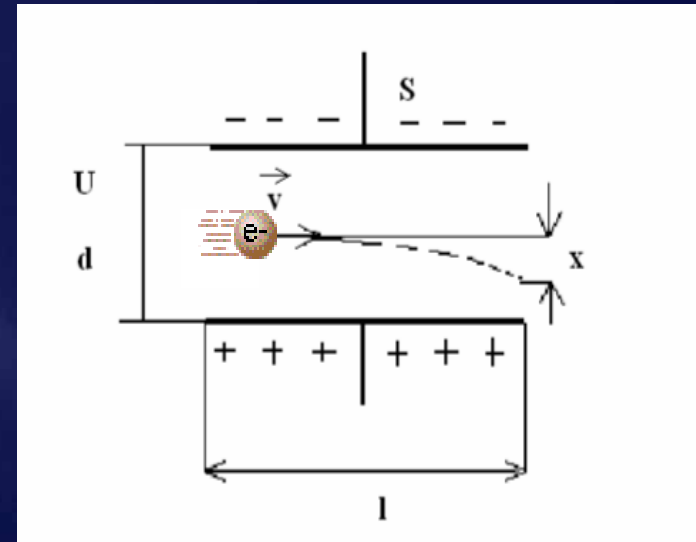
Pod działaniem siły Lorentza

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

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

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

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



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 – co to takiego ?



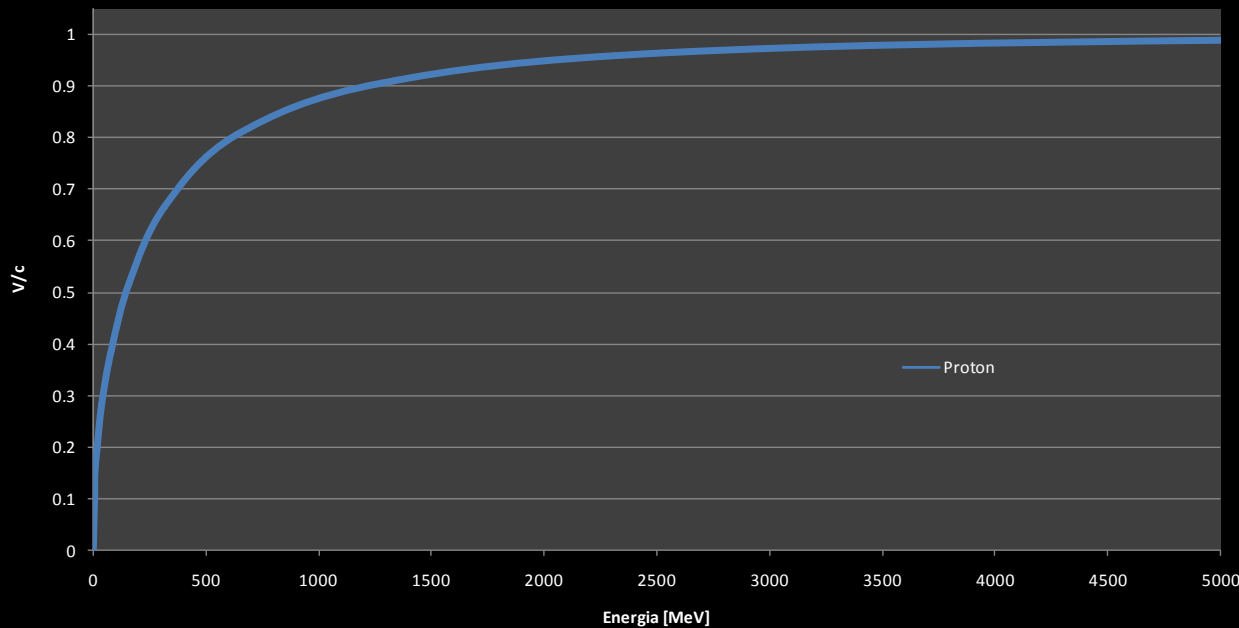
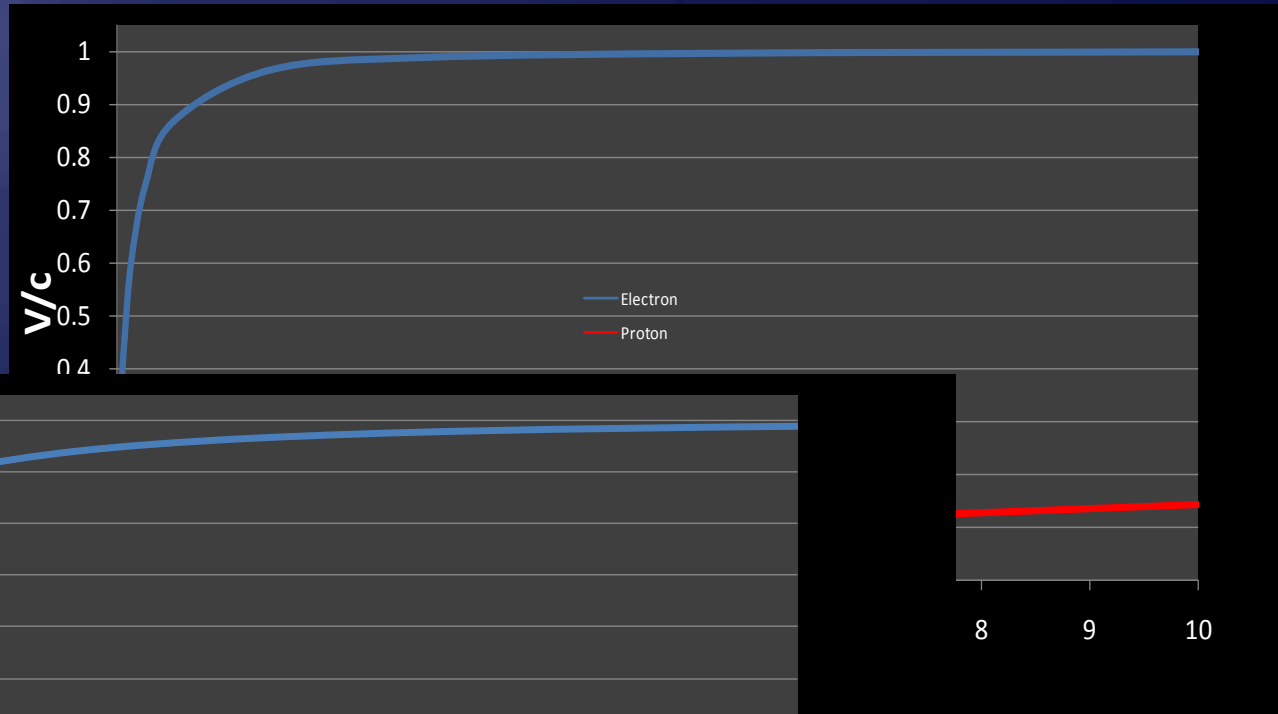
Akcelerator - definicja

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

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

Przyspieszanie ...?

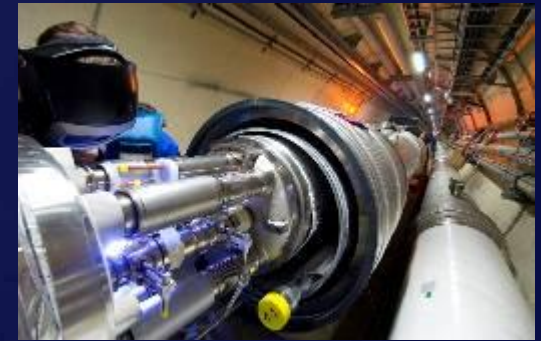
□ v/c



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

Akceleratory - zastosowania

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



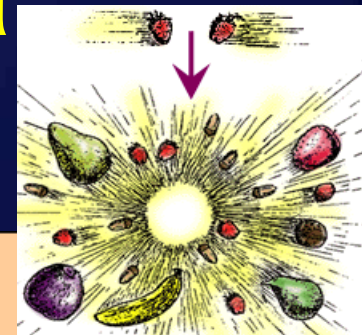
Andrew M. Sessler
Lawrence Berkeley National
Laboratory



Witold Skrzyński
Obrazowanie w
radioterapii

Akceleratory – skala „zainfekowania” świata

Accelerators in the world (2002)



Basic and Applied Research		Medicine	
High-energy phys.	120	Radiotherapy	7500
S.R. sources	50	Isotope Product.	200
Non-nuclear Res.	1000	Hadron Therapy	20
Industry			
Ion Implanters	7000		
Industrial e- Accel.	1500	Total:	17390

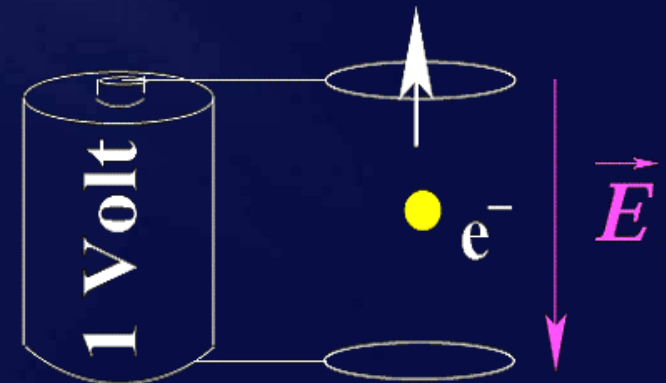
D.Brandt, 2004

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

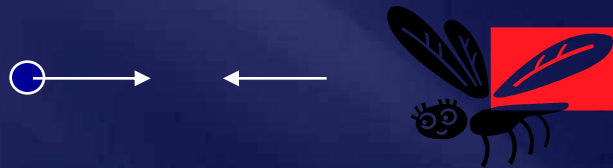
keV, MeV, GeV, TeV
(10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12})

- ▣ Telewizor: 20 keV (20 000 eV)



A ile to 7 TeV ?

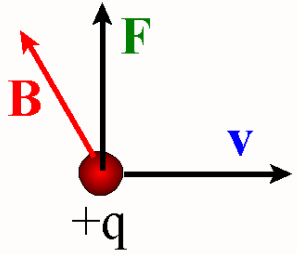
7 TeV LHC Proton = Lecący Komar



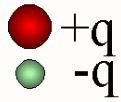
$$7 \text{ TeV} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ J} = \frac{1}{2} mv^2$$

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

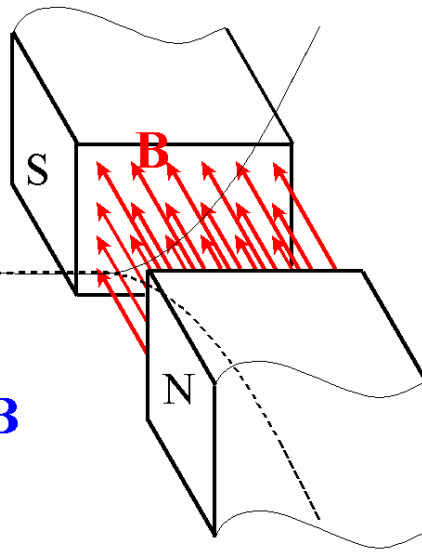
Siła Lorentza



$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

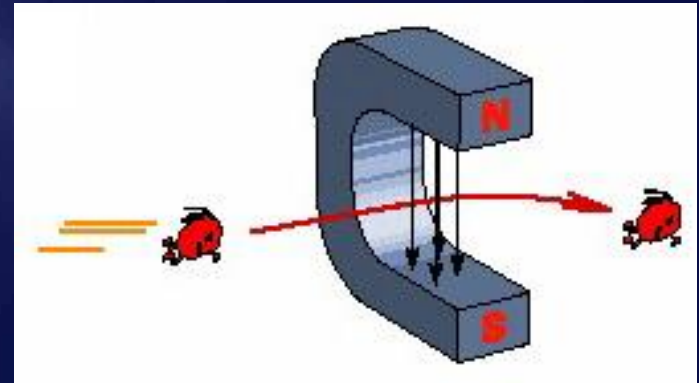
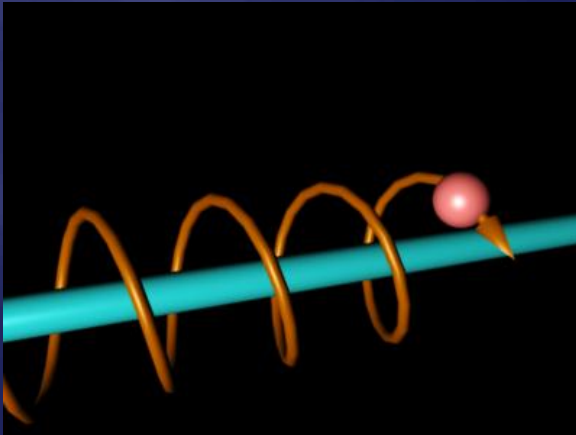


A A 2008



Ładunek w polu magnetycznym

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



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

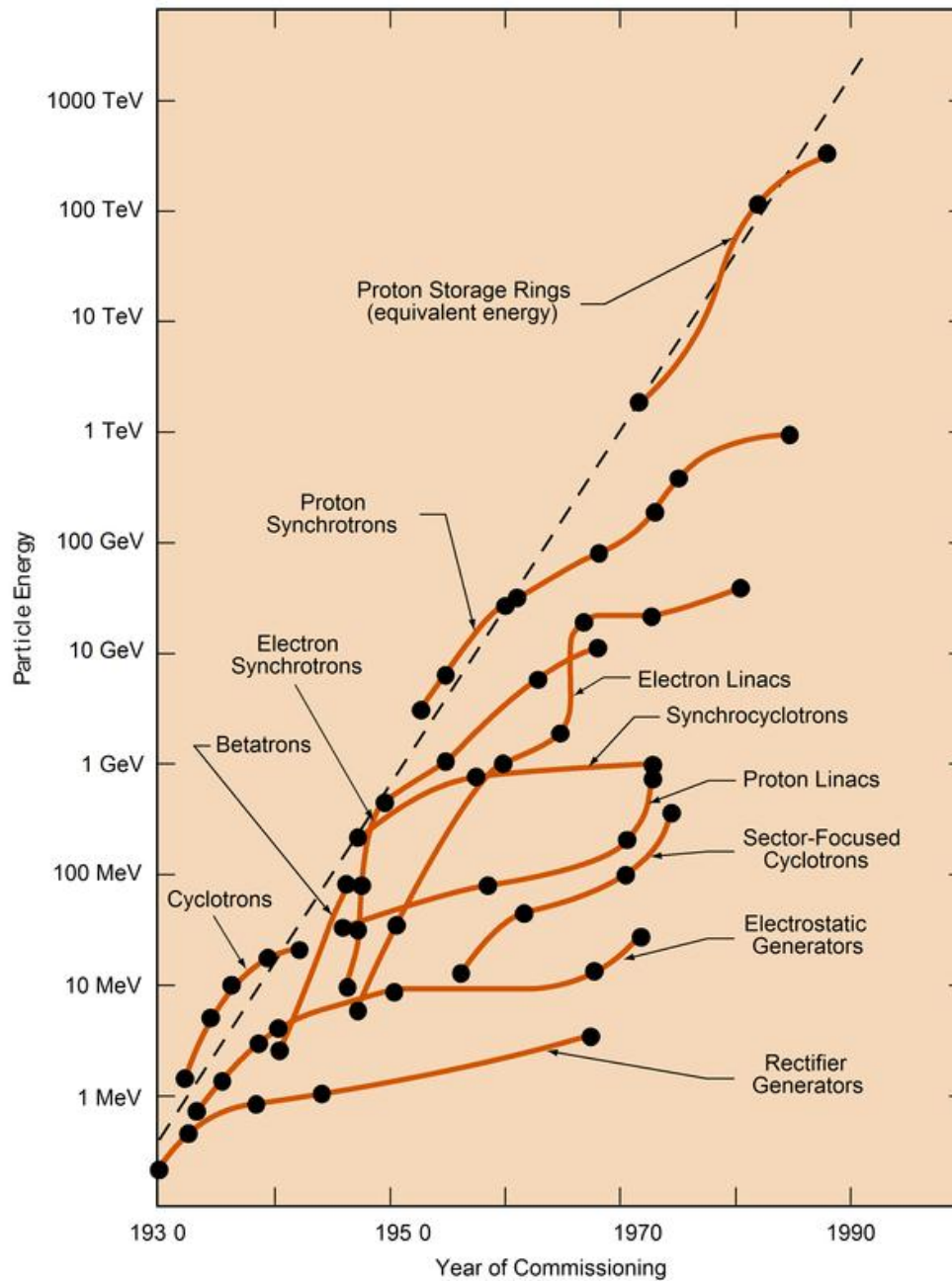
<http://scientopia.org/blogs/galacticinteractions/2012/02/09/charged-particles-and-magnetic-fields/>

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

Pole magnetyczne nie zmienia energii kinetycznej elektronu, zmienia jedynie kierunek jego 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?

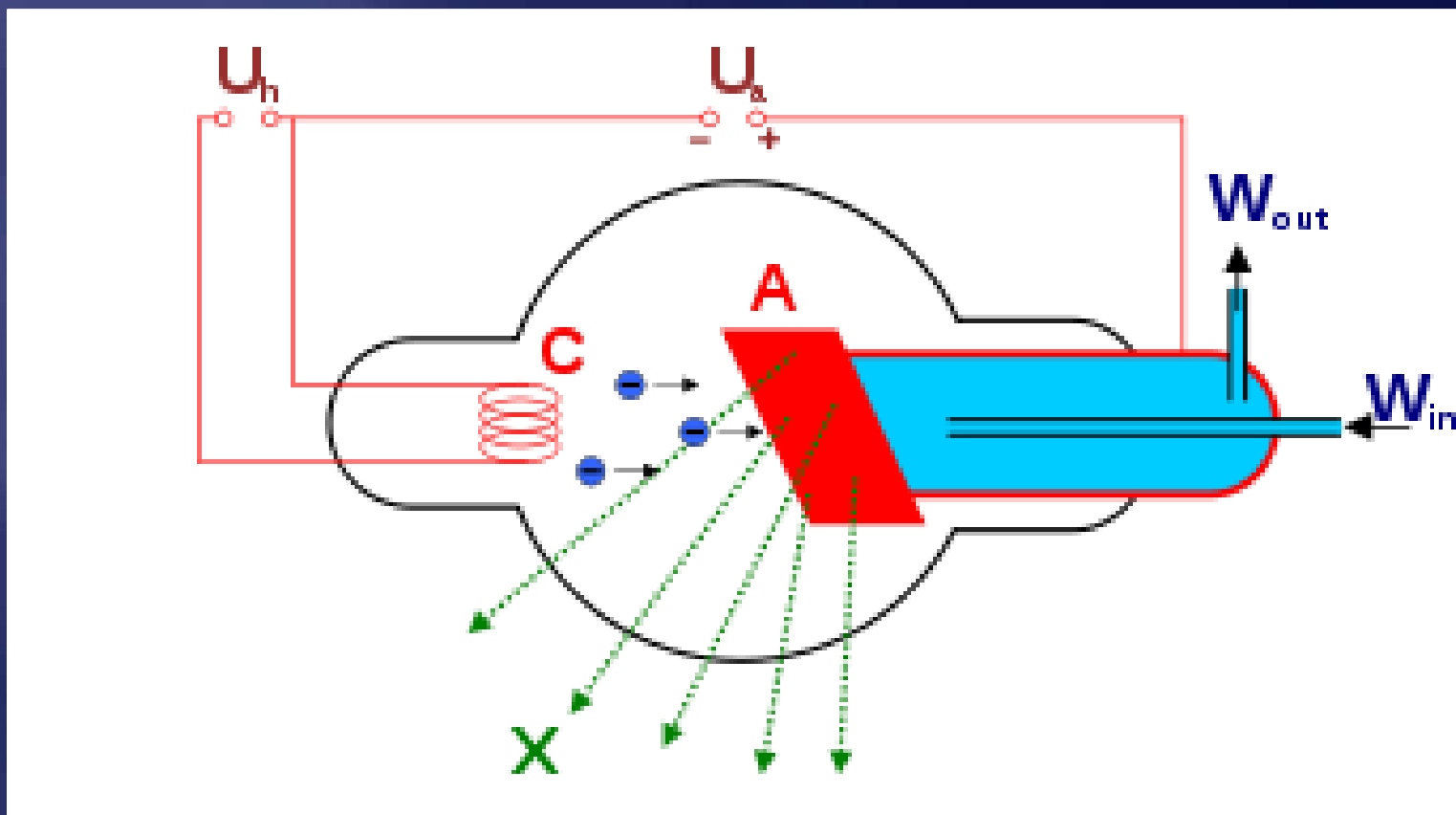
Potrzebowalibyśmy sporo baterii!

Naturalnie były to pierwsze akceleratory

- ▣ Połączenie w szeregu 6 milionów baterii R6, jedna za drugą, dała by różnicę potencjałów 9 milionów wolt – cząstka mógłby 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 !

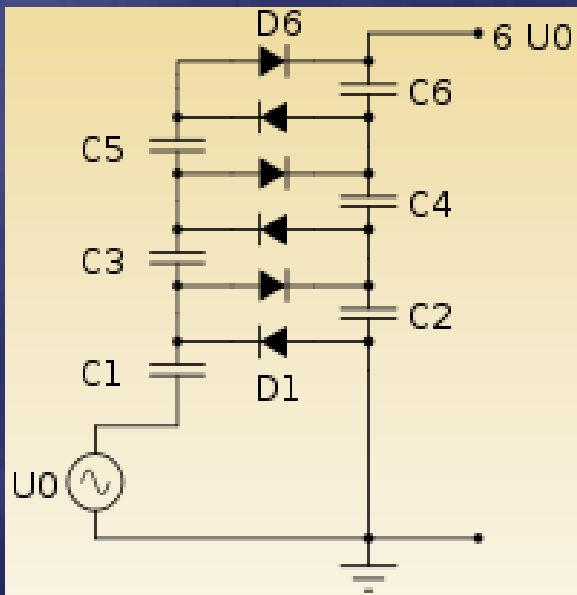


http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_tube

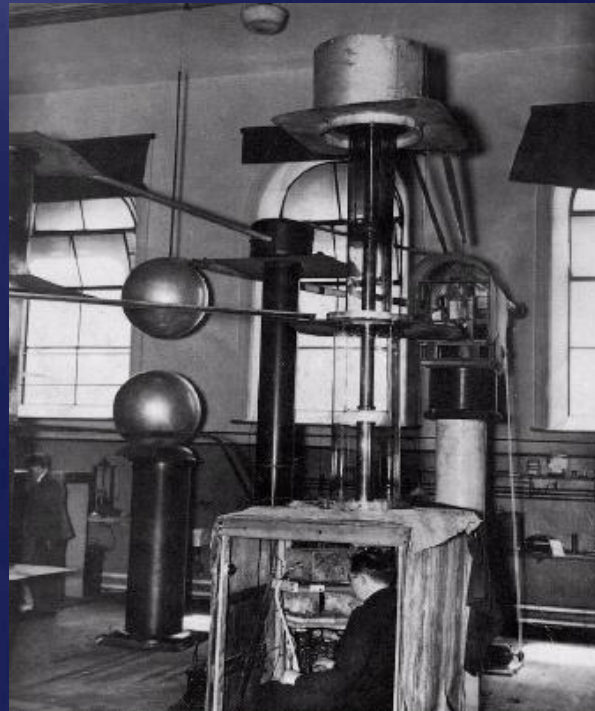
Eksperyment na stałej tarczy

1930' – pierwszy akcelerator

Cockcroft- Walton.



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

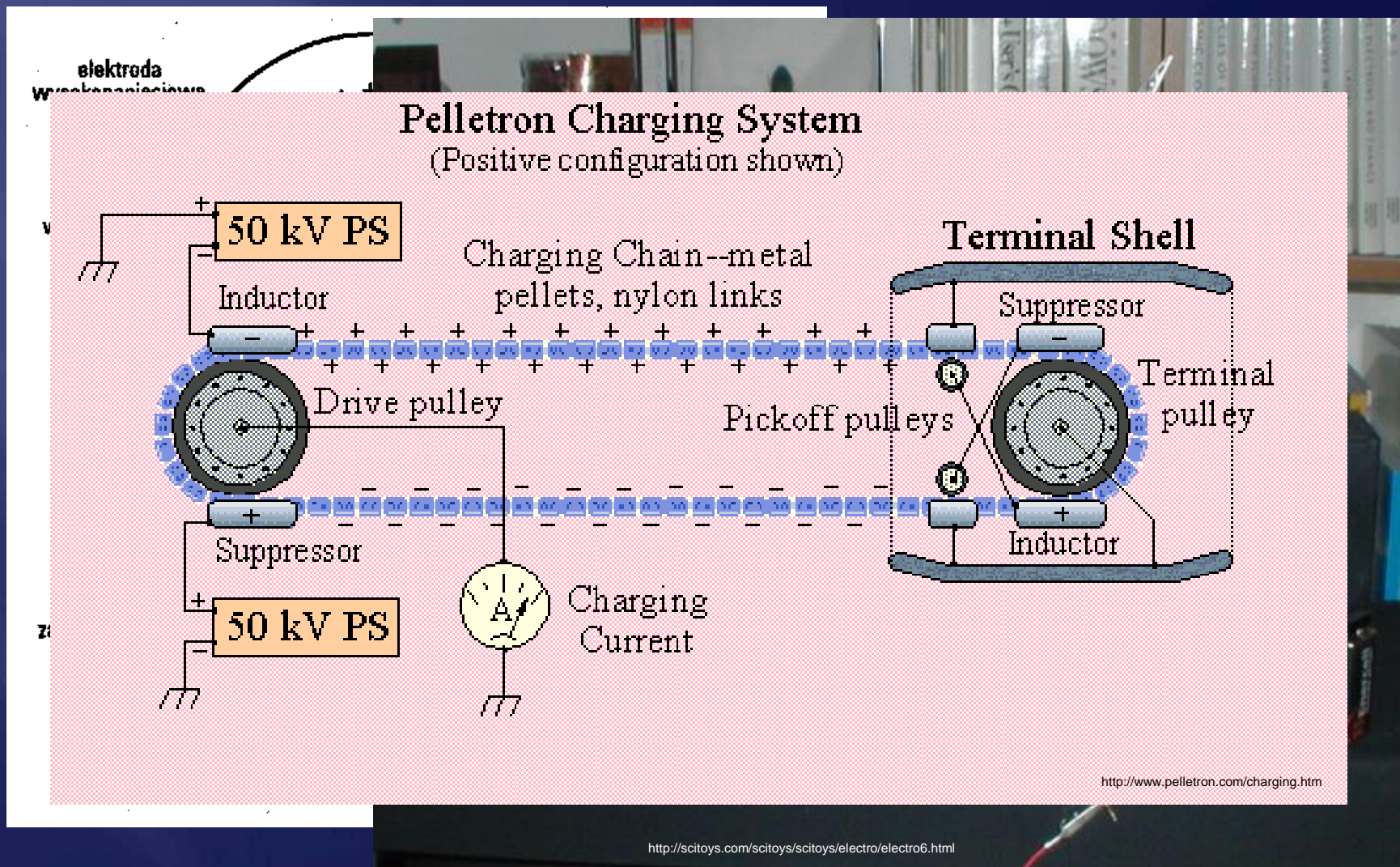


http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_91509.html



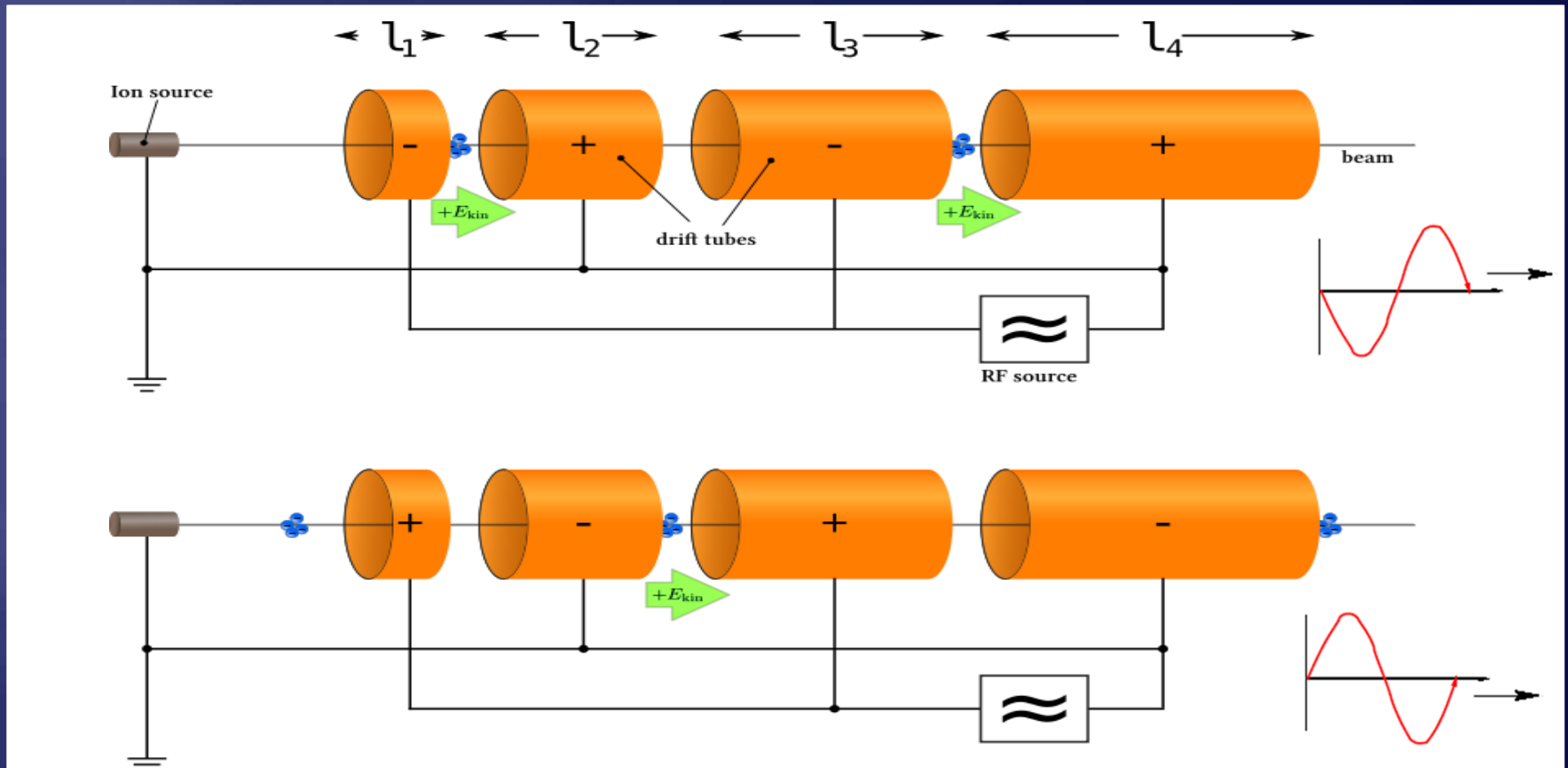
<http://www.bnl.gov/bnlweb/history/images/CN7-1397-69.jpg>

Generator Van de Graaffa



**Oszukujemy potrzebę
wysokiego napięcia**

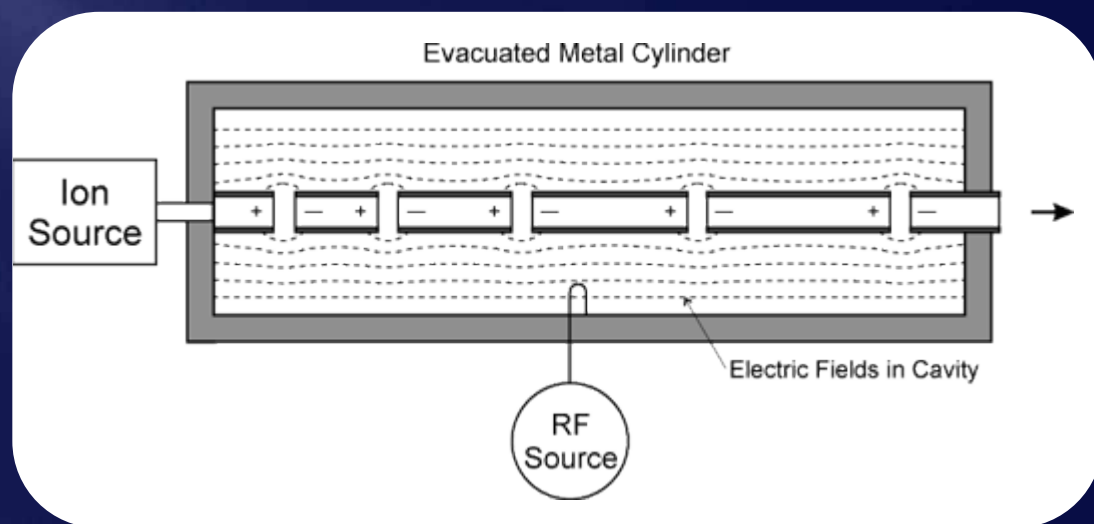
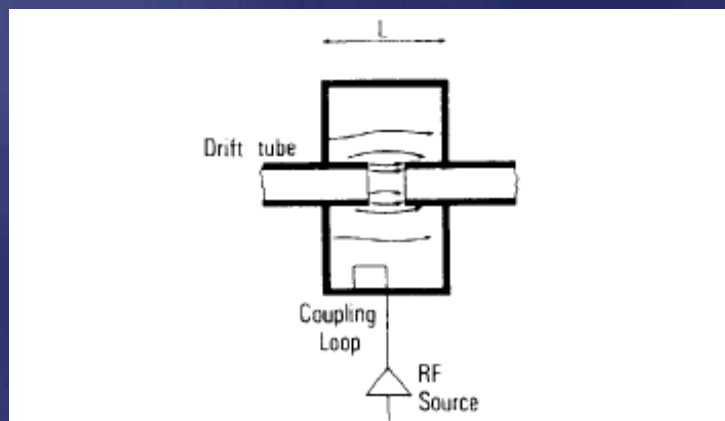
Metoda Wideröe



- 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



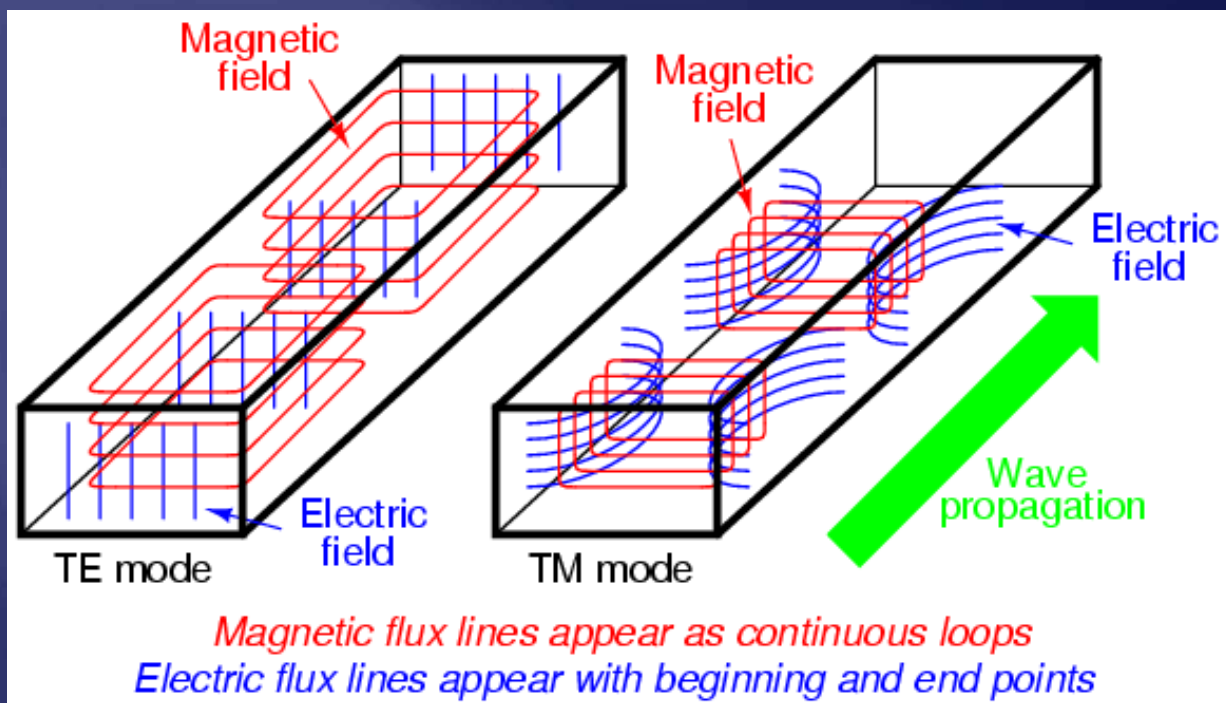
http://www.linacs.com/about/history_p2.html

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

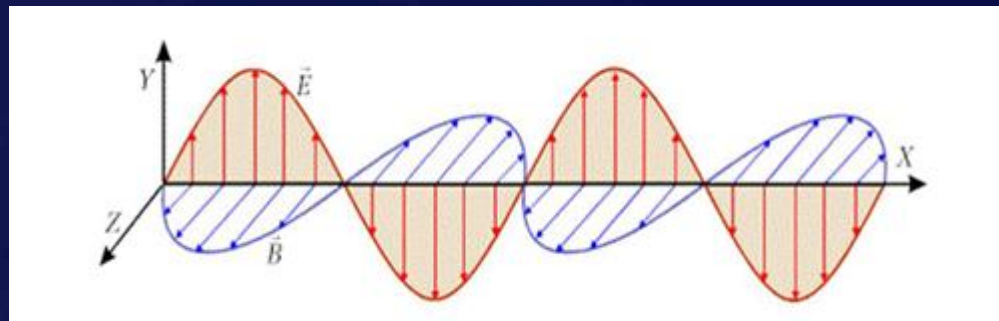


http://www-alt.gsi.de/portrait/presse/Mediathek/Bilderdatenbank/Alle_Bilder_e.html

Fala elektromagnetyczna w falowodzie

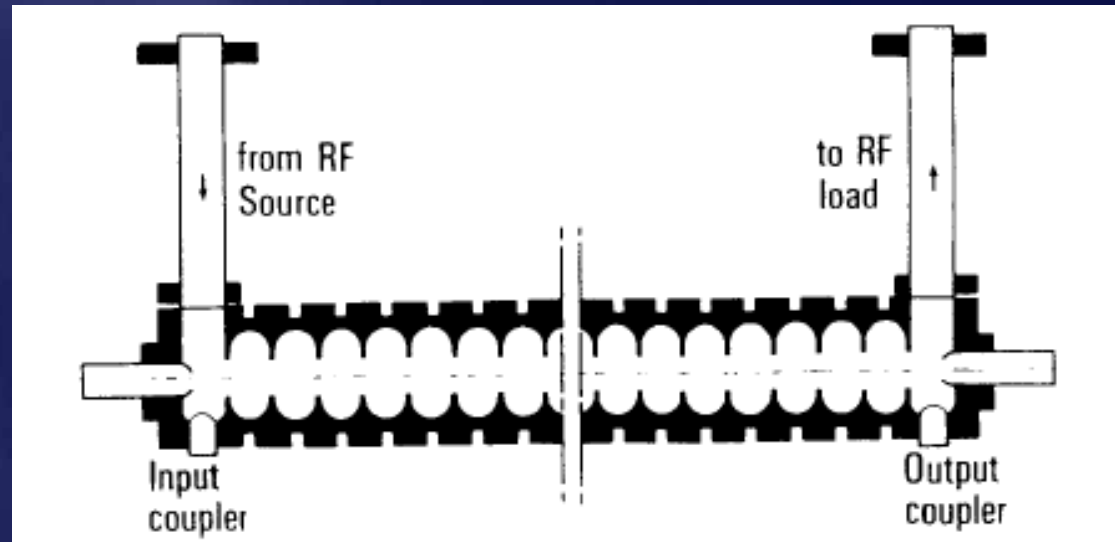
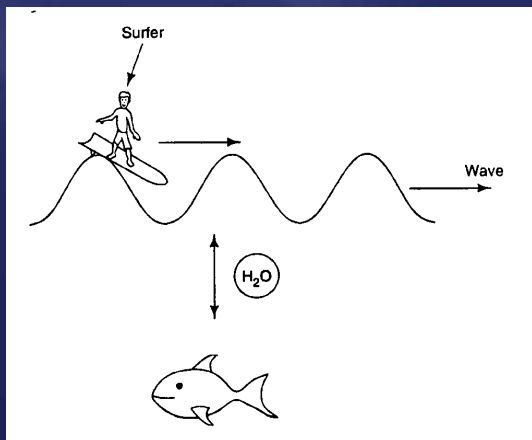


http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_14/8.html



Fala biegnąca

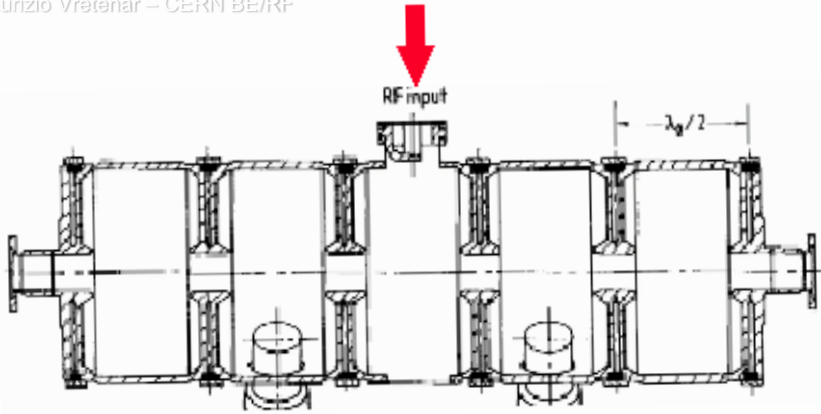
- ▣ Przyspieszanie ciągłe (bez odstępów pomiędzy wnękami).



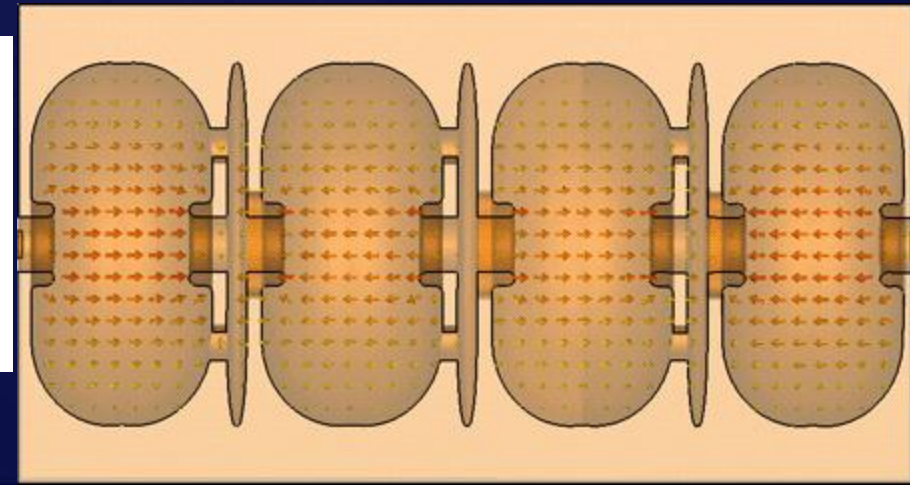
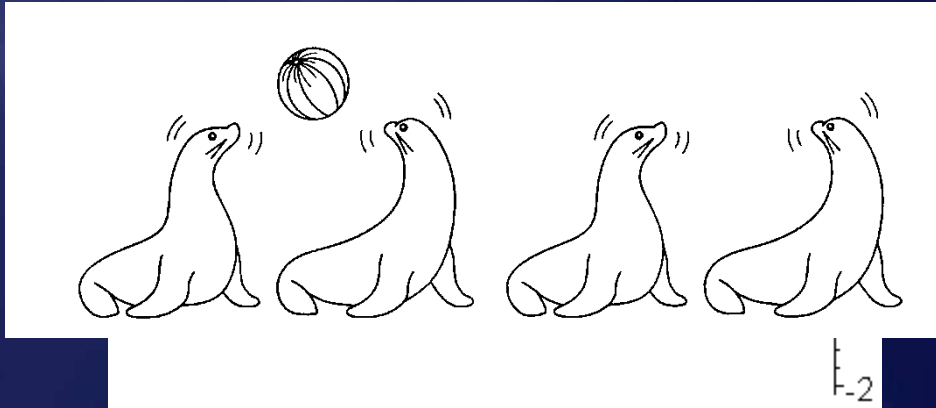
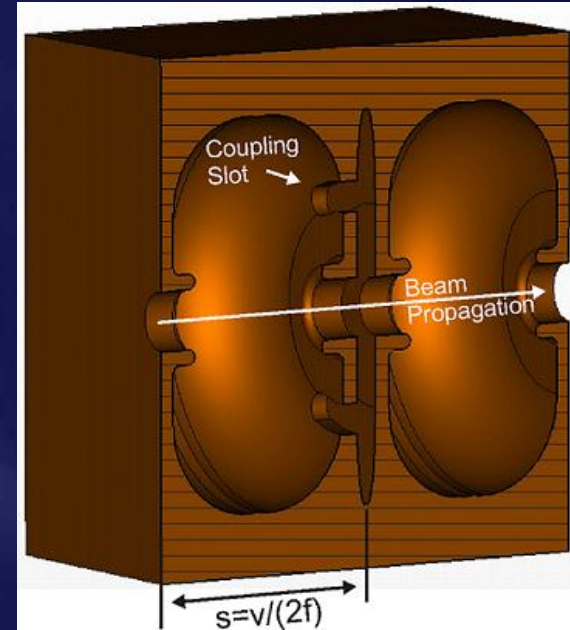
Fala stojąca

CAS, Introduction to RF Linear Accelerators

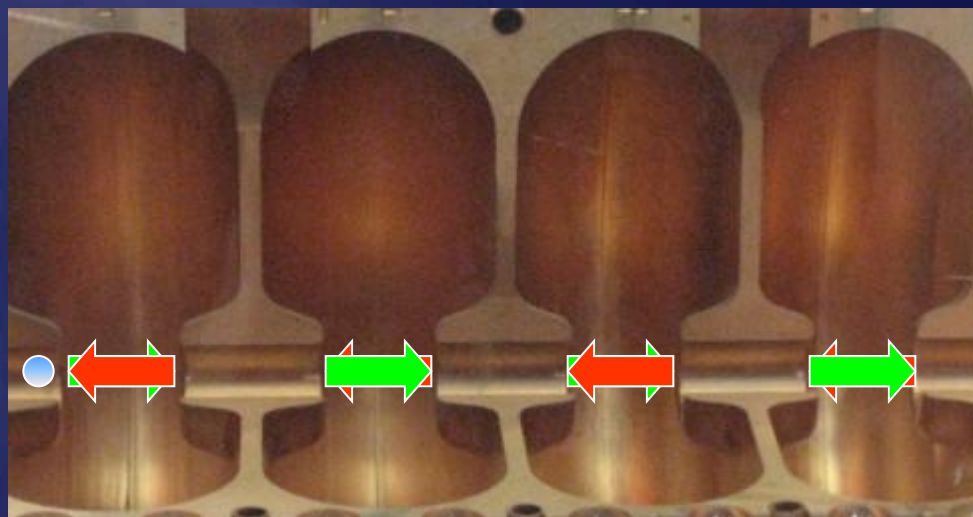
Maurizio Vretenar – CERN BE/RF



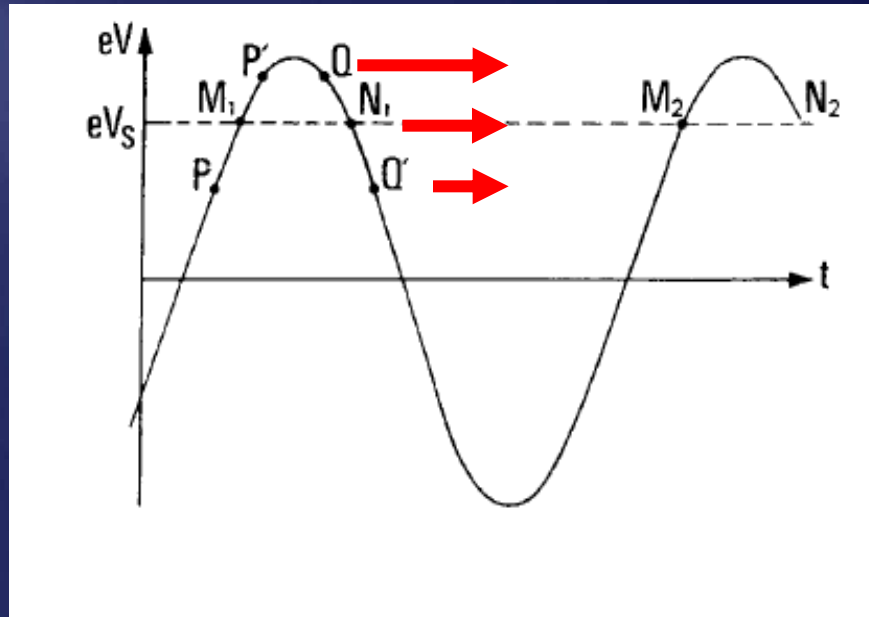
Standing wave



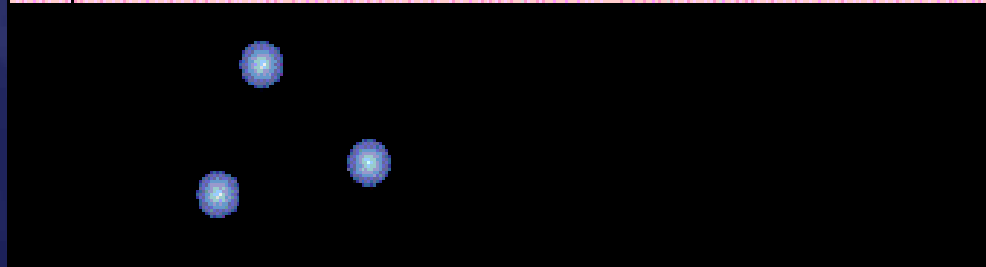
Przyspieszanie jeszcze raz 😊



Przyspieszanie cząstek

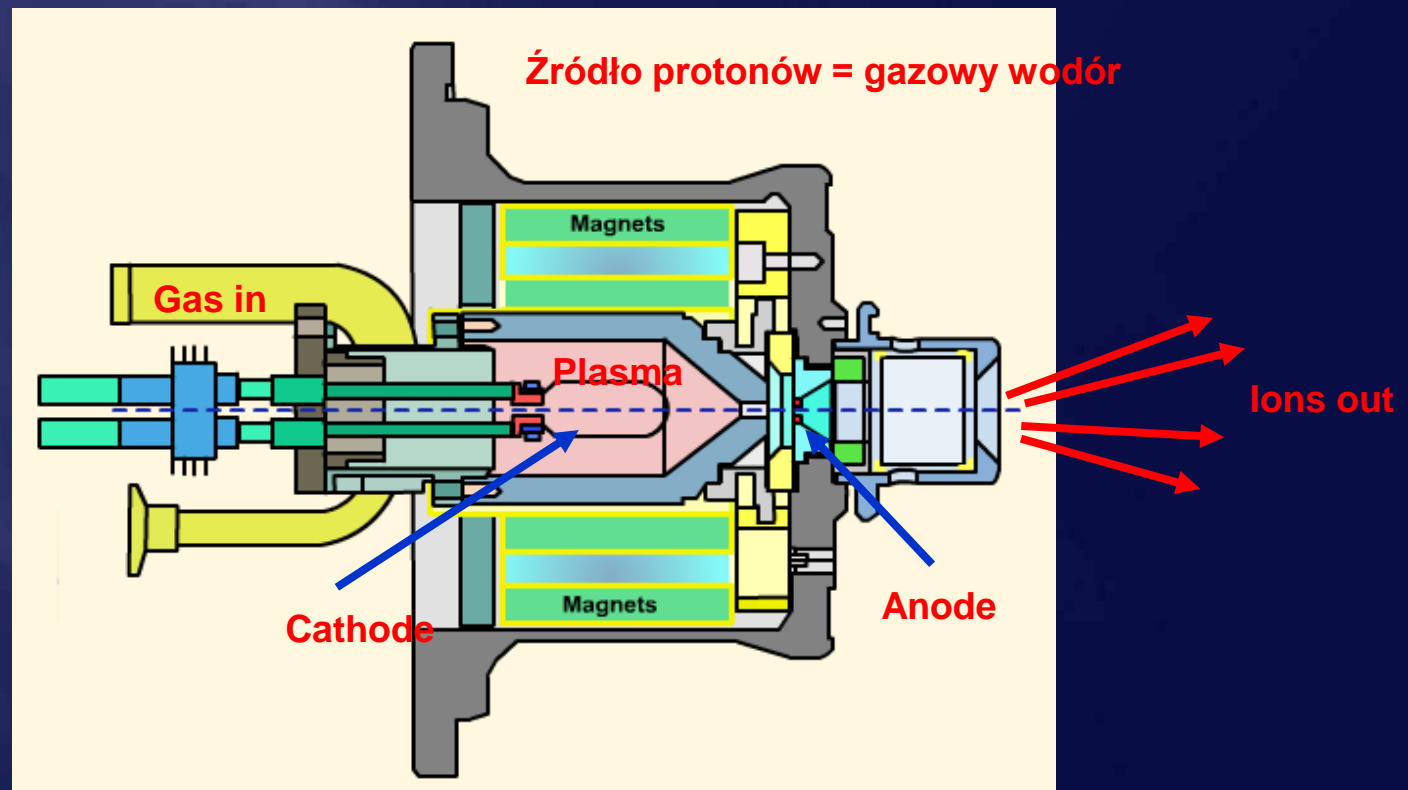


1 Positive particles just sitting there

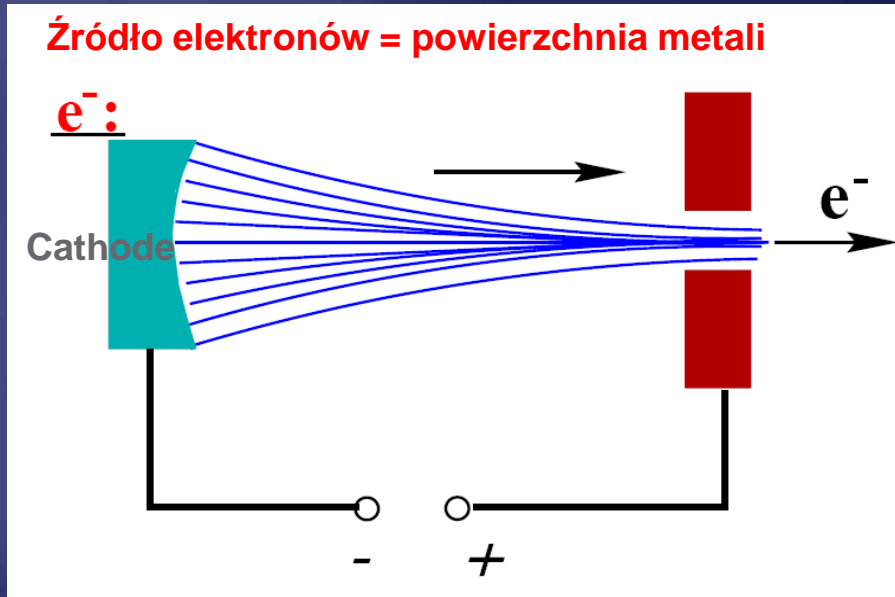


A tak przy okazji – skąd wziąć protony ?

Jonizacja gazu i wyprowadzenie jonów



Skąd wziąć inne cząstki ?



Akceleratorzy – 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:

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

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



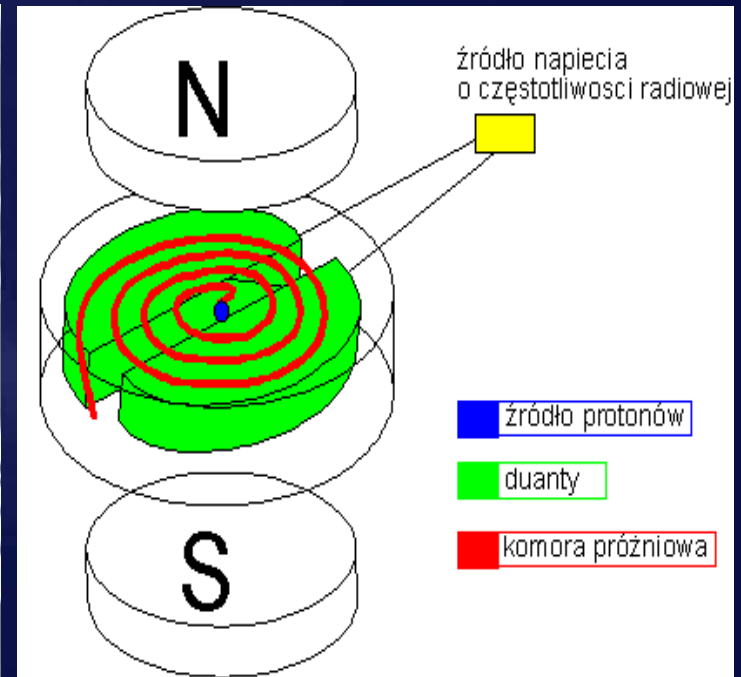
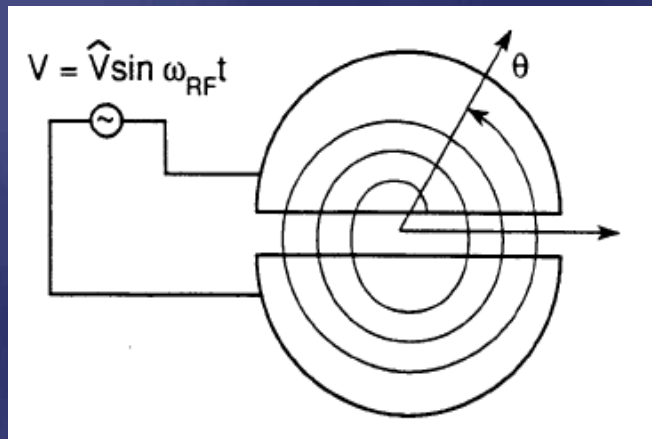
$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$$

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

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

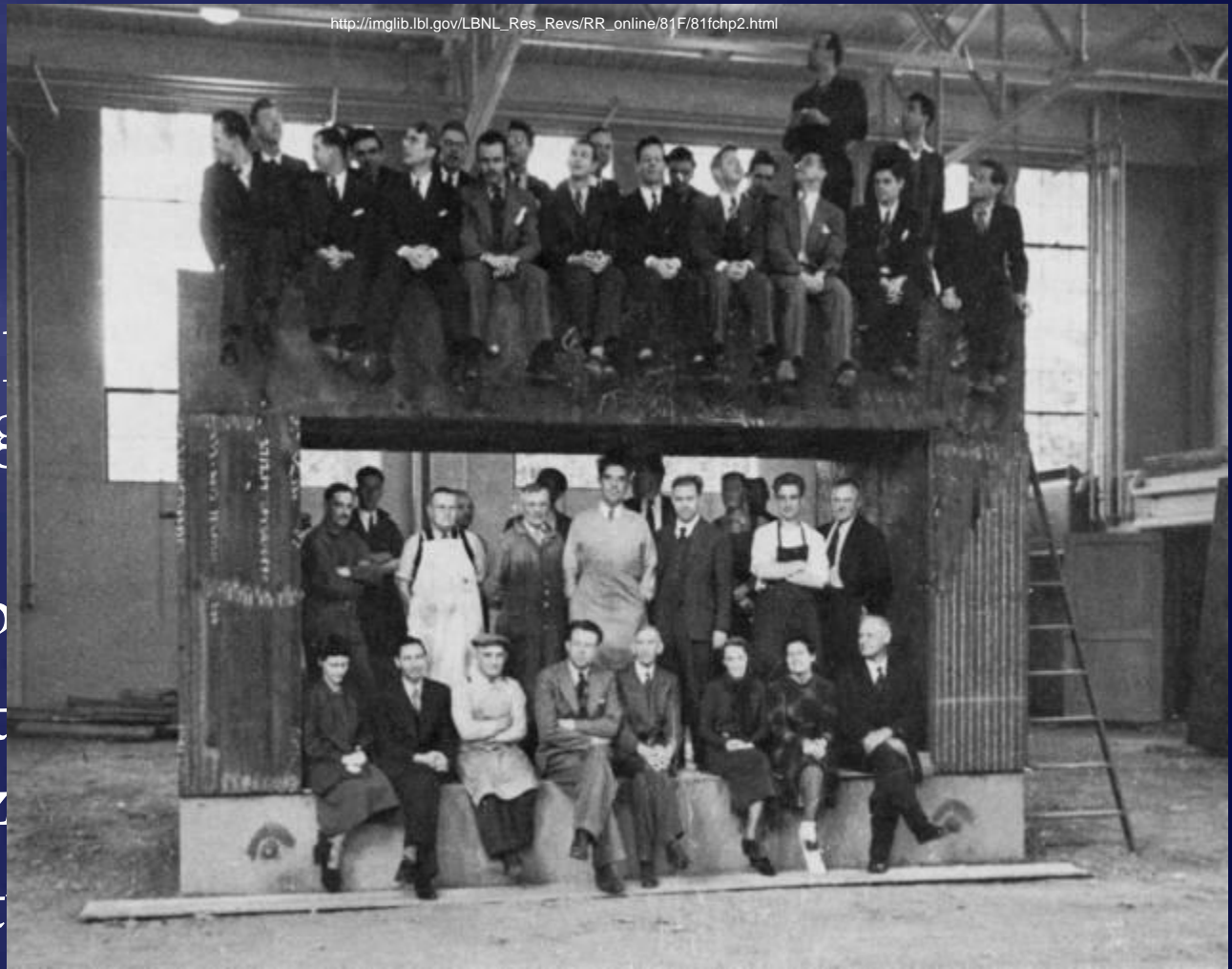
**Częstość cyklotronowa
niezależna od prędkości**

Cyklotron /Lawrence, 1930'/



Nagroda Nobla 1939

- ▣ Cząstki w (elektromagnetycznymi)
- ▣ Zmienne p
- ▣ Ruch cząstki przyspiesz
- ▣ Relatywist



rozsynchronizowuje cały proces – limit energetyczny...

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

Cyklotron

▣ Np. Protony – do 10MeV

▣ **NIE DO ELEKTRONÓW**

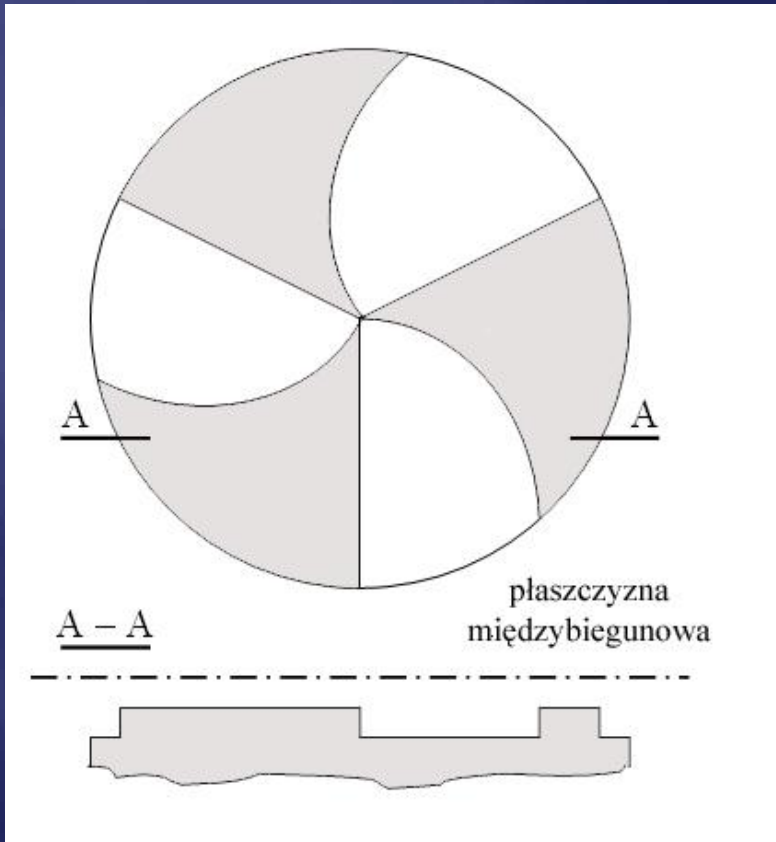
	v/c
1 MeV	0,941

Cyklotron izochroniczny

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

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

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

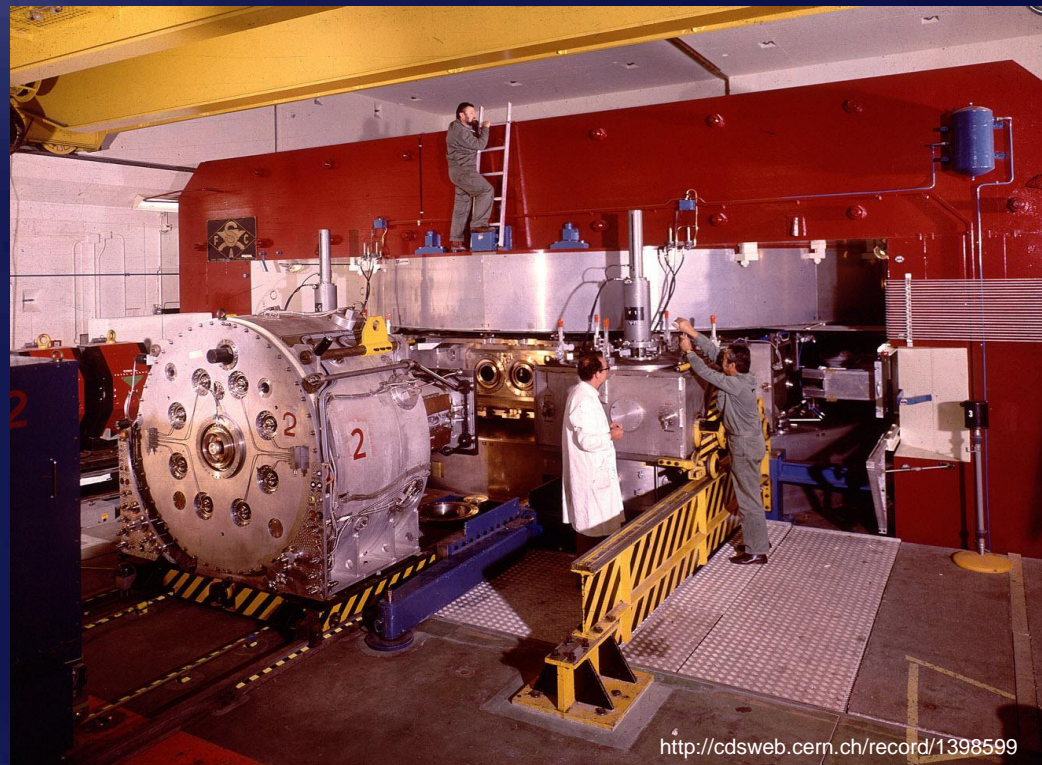


Synchrocyclotron /fazotron/

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

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

- ▣ Np. CERN
600MeV
Pierwszy akcelerator
1957 - 1990



<http://cdsweb.cern.ch/record/1398599>

Fixed Field Alternating Gradient Circular Machines (FFAG)

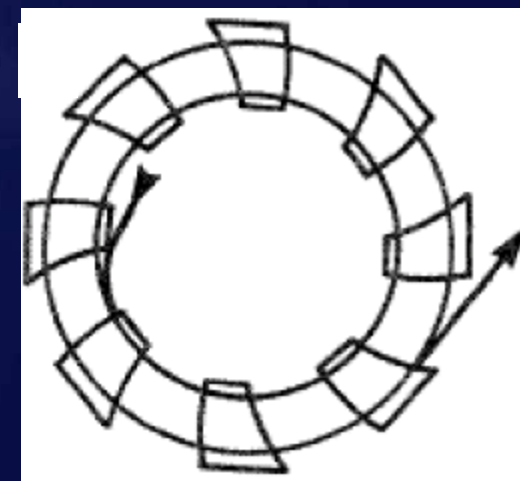
Pole magnetyczne	Częstotliwość RF stała	Częstotliwość RF zmienna
Stałe	Cyklotron klasyczny	Synchrocyklotron
Zmienne	Izochroniczny	FFAG



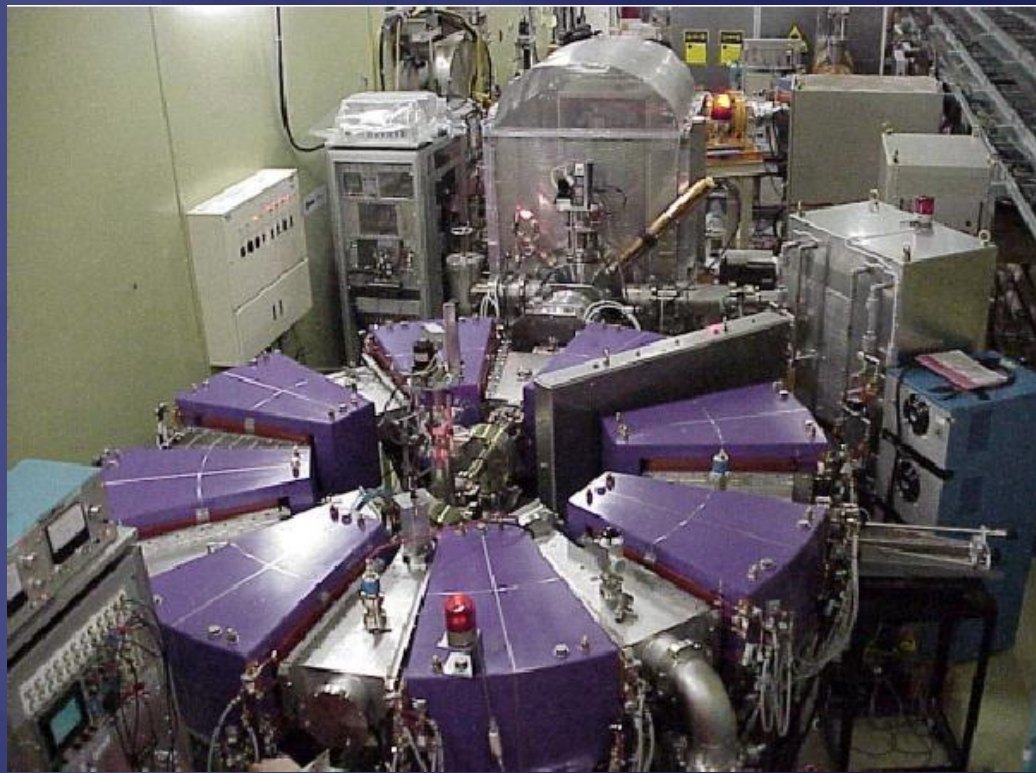
Klasyczny,
synchrocyklotron



izochroniczny



FFAG



<http://basroc.rl.ac.uk/ns-ffags.htm>

**Zachwyt nad uniwersalnością,
rozwój związany m.in.
z radioterapią, wiązkami neutrin.**

Izochroniczny

Klasyczny

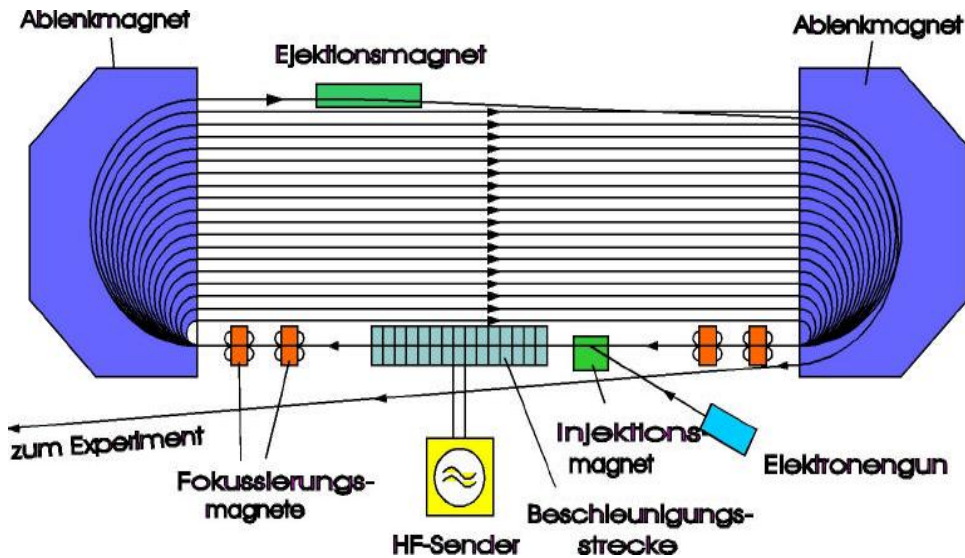
B

FFAG

Synchro-
cyklotron

RF

Mikrotron – dedykowany do e^-



**Opóźnienie równe
dokładnie
jednemu okresowi**

Synchrotron - LHC

Jeśli zsynchronizowana zostanie częstość obiegu cząstek w pierścieniu akceleryacyjnym 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

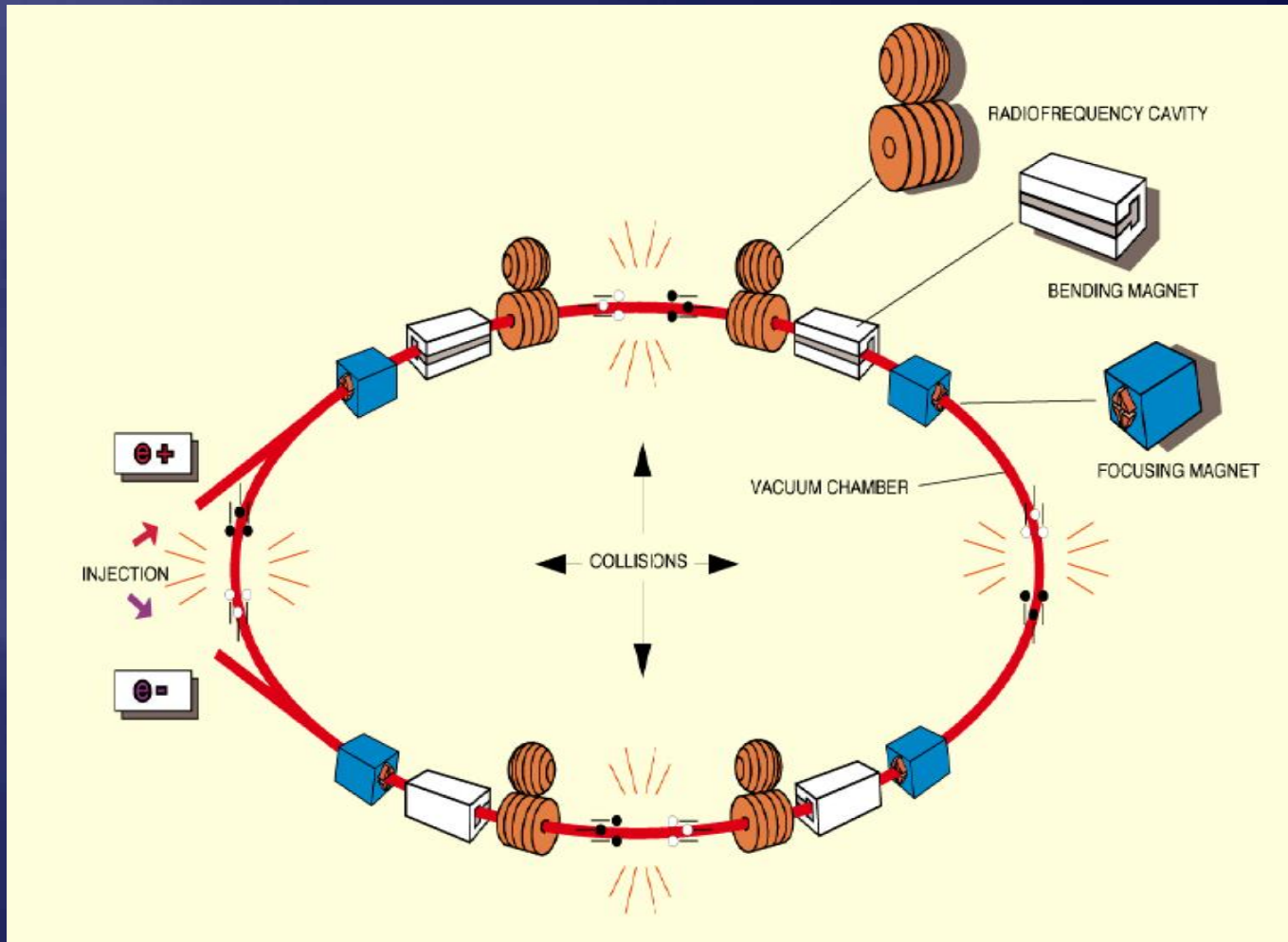
Synchrotron



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

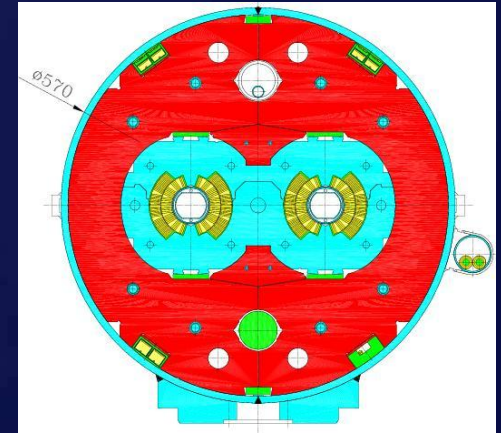
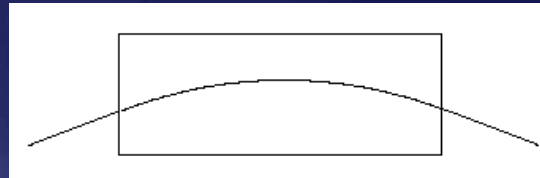
Synchrotron



Magnesy

- Utrzymywanie wiązki na stałej orbicie

→ Dipole



LEP

P = 100 GeV/c

$\rho = 27$ Km

B = 0.0775 Tesla

LHC

P = 7000 GeV/c

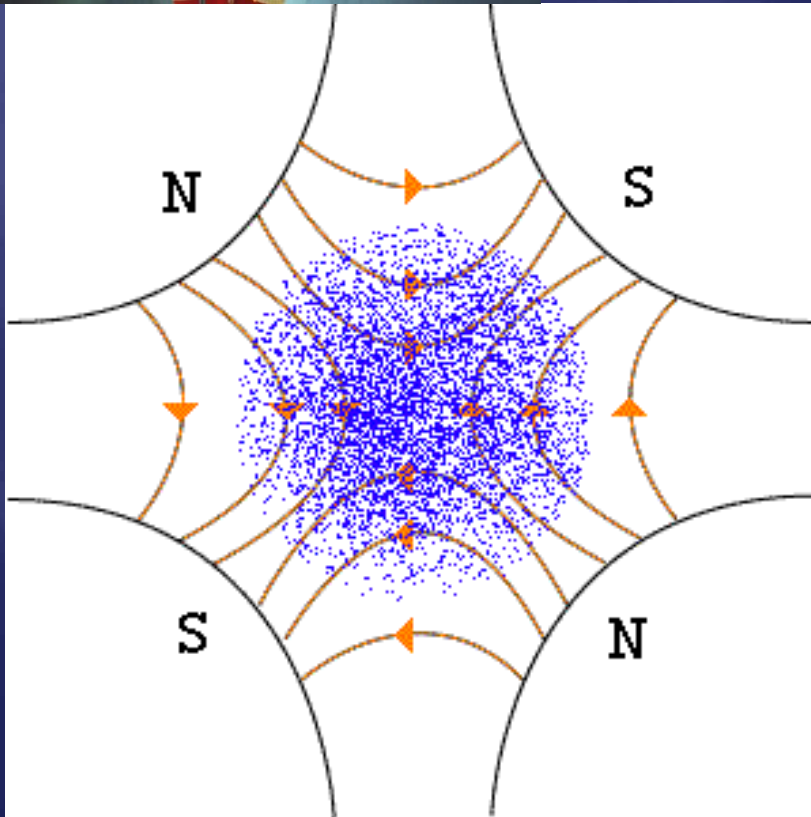
$\rho = 27$ Km

B = 8.33 Tesla



Magnesy kwadrupolowe

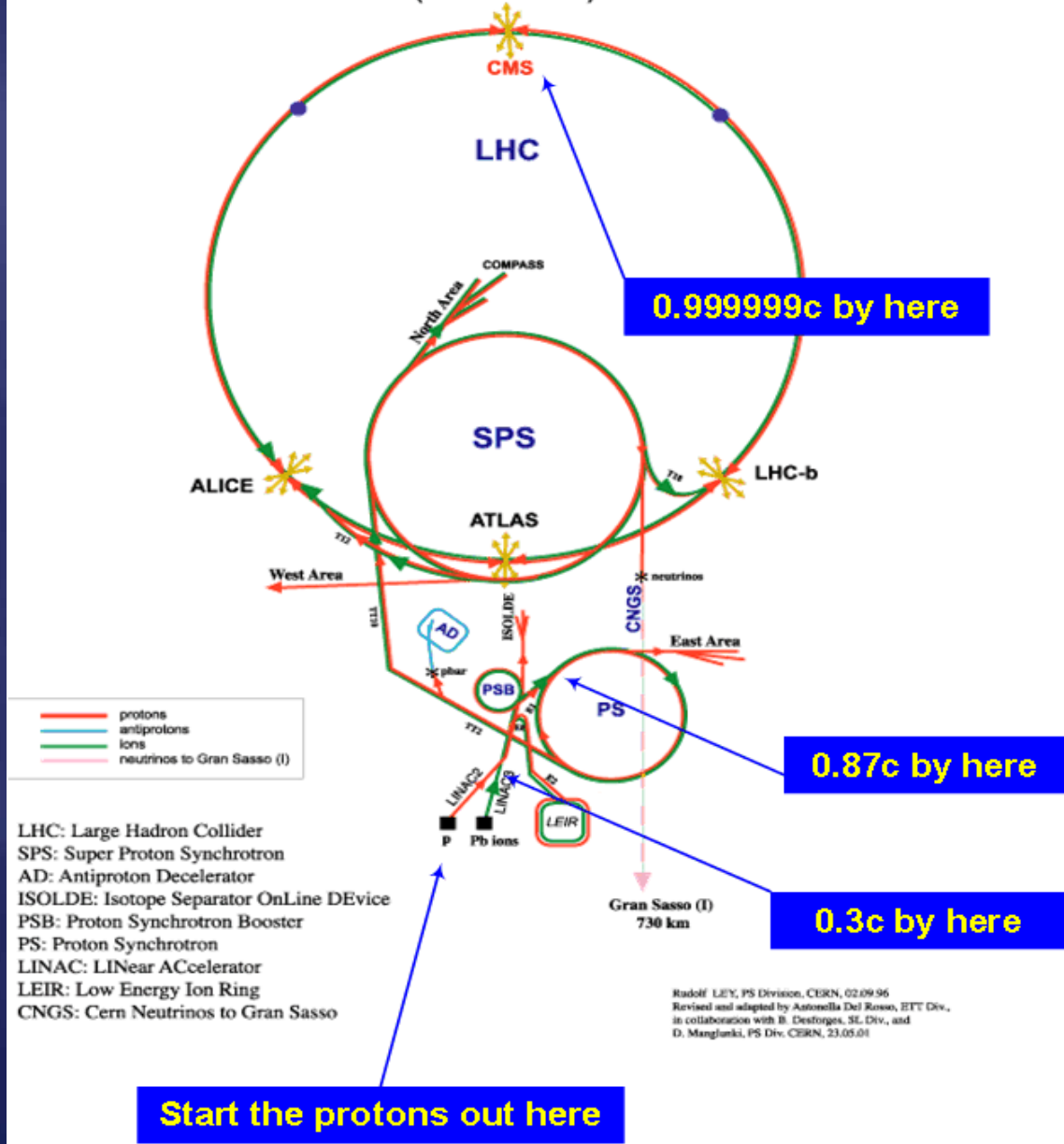
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/kullander/

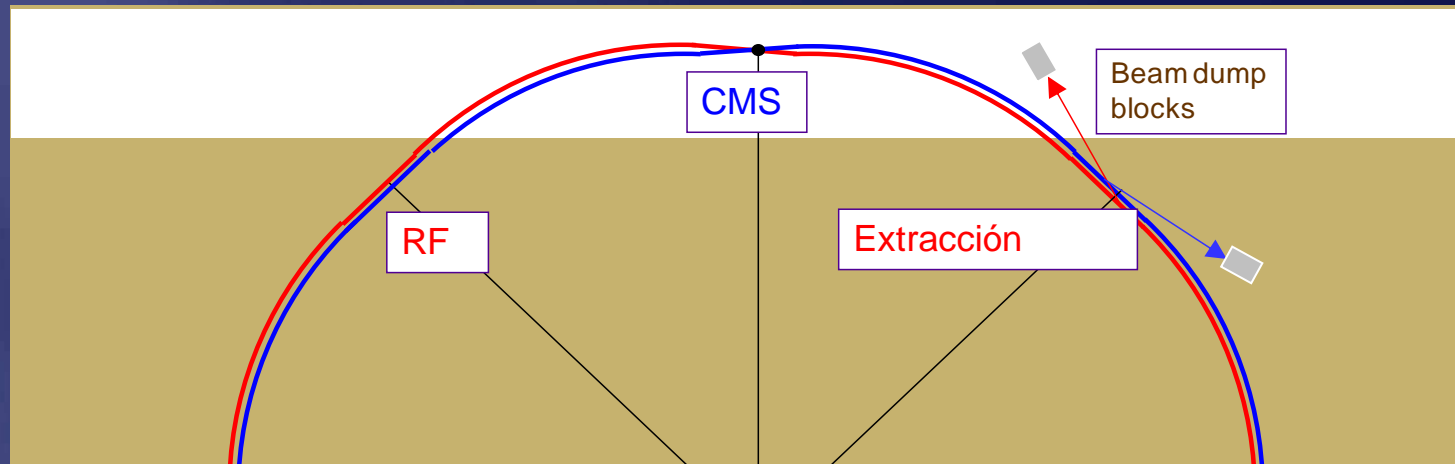


I inne...



CERN Accelerators (not to scale)





Mor
Cle:

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

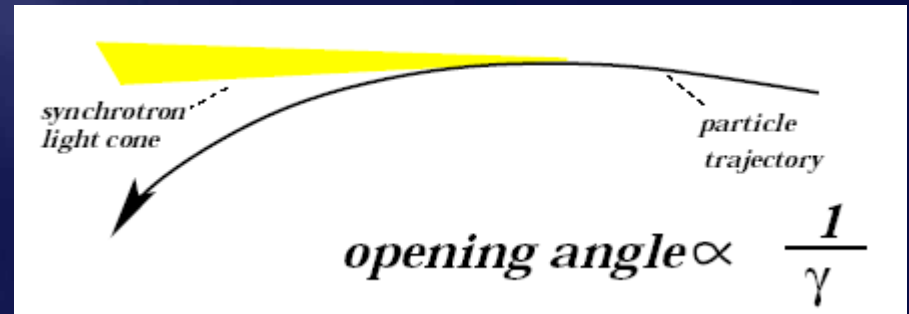
Koncepcja „Luminosity” = „Świetlność”

- ▣ Zderzamy dwie wiązki, prawdopodobieństwo interakcji $\sim N^2/A$
- ▣ Zderzamy je f razy na sekundę
- ▣ Ilość oddziaływań $\sim f * N^2/A$



Dlaczego duże akceleratory ?

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



- ▣ $\text{Straty} \sim E^4 / (r^2 * m_0^4)$

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 ?

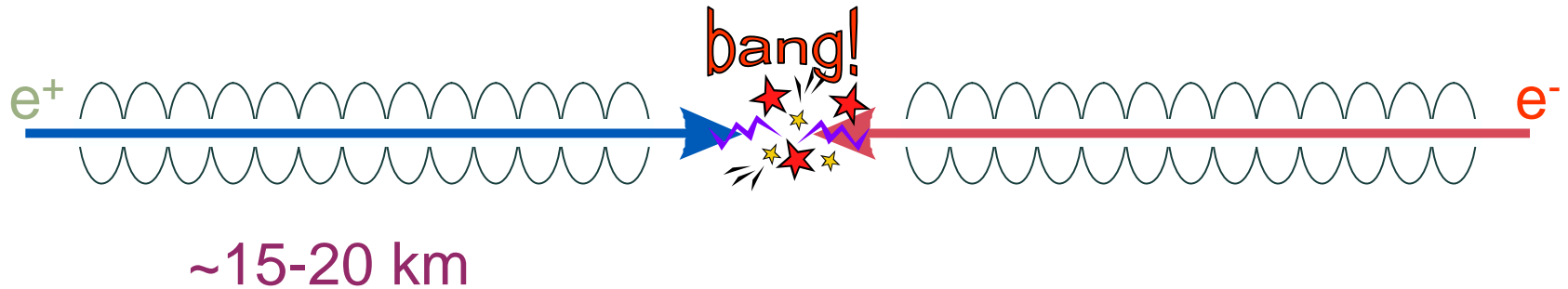
- W przypadku kołowych akceleratorów protonów: pole magnetyczne
 - Pole magnetyczne musi rosnąć wraz ze wzrostem energii wiązki. W praktyce nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż 9-10 T.
- W przypadku protonów akcelerator liniowy musiałby być wielokrotnie większy niż akcelerator kołowy.
- 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
- Elektryony 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 $\Delta E \sim 2\pi R \langle \epsilon \rangle$
- LEP (obwód 27 km) był (prawdopodobnie) ostatnim akceleratorem kołowym e⁺⁻.
- Dalej bardziej opłacalne są akceleratory liniowe:
 $E_{\max} \sim L \langle \epsilon \rangle$

Co dalej ?

Akcelerator liniowy e^+e^-



VLHC ?

40 -200 TeV, 233km

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

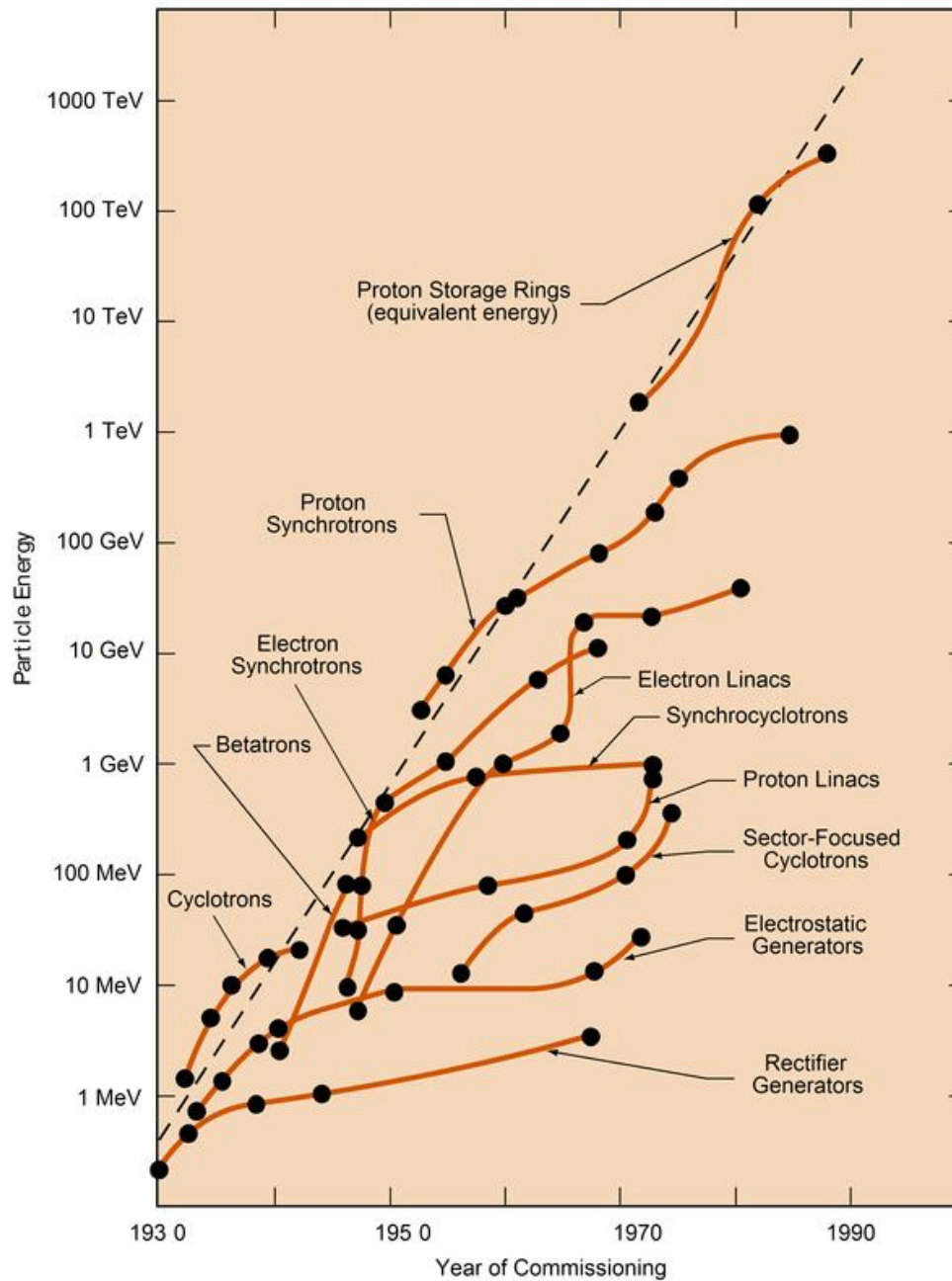
Akcelerator

Wczoraj



Dziś





Dziękuję za uwagę

