

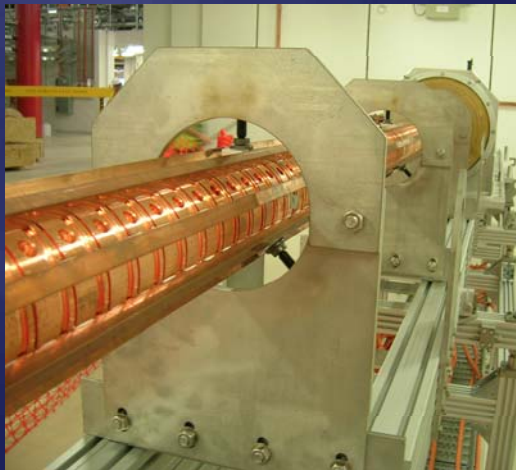
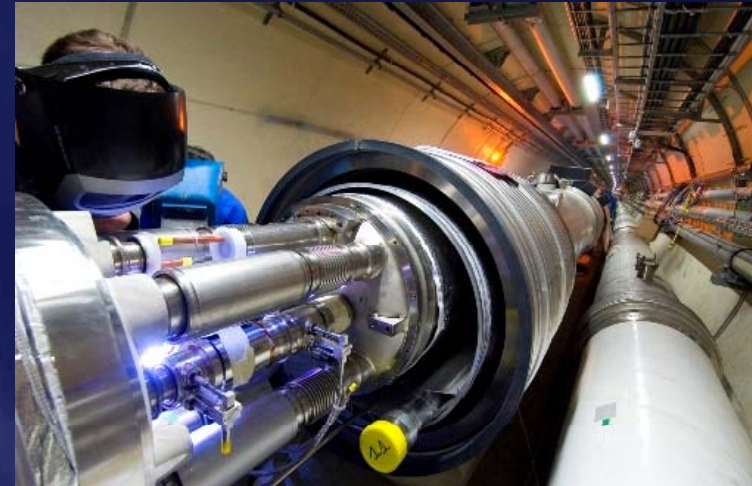
Introduction to accelerators

Wstęp do fizyki akceleratorów



Sławomir Wronka, 27.11.2007r

Akcelerator – co to takiego ?



2007-11-27

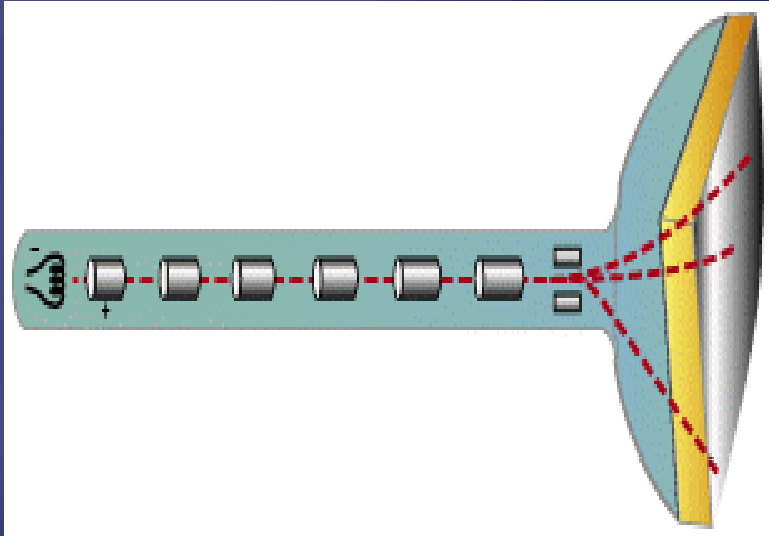
dr Sławomir Wronka, IPJ

Akcelerator - definicja

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

- ▣ 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

Domowy akcelerator: kineskop TV

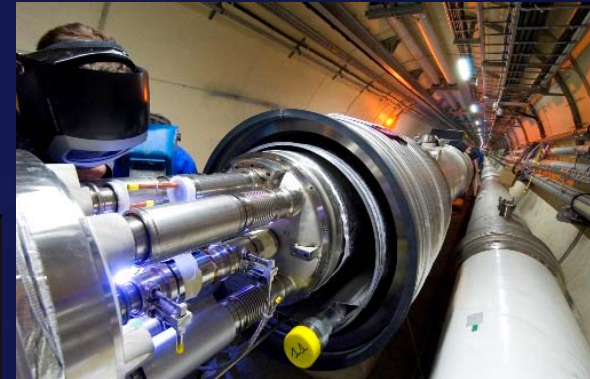


Elektrony są przyspieszane w próżni w kierunku dodatnio naładowanej elektrody. Pola elektromagnetyczne prowadzą wiązkę do ekranu.

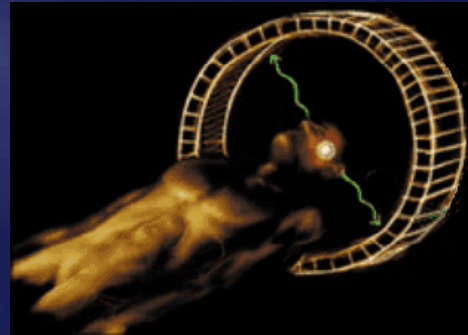
W miejscach, gdzie wiązka uderza, ekran robi się jasny, budując w ten sposób obraz.

Akceleratory – zastosowania

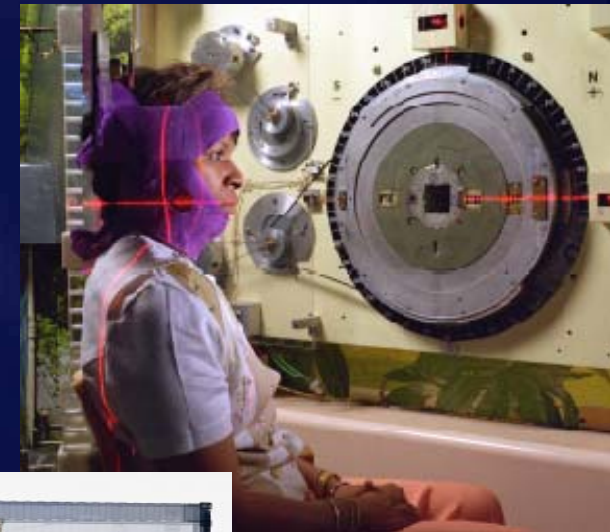
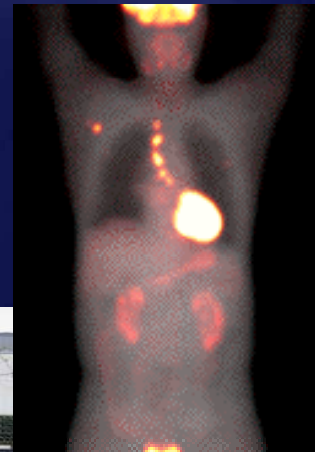
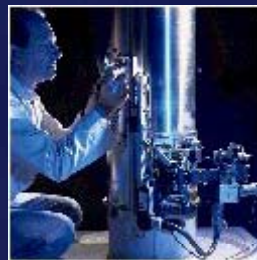
▣ Badania naukowe



▣ Medycyna



▣ Przemysł



▣



Akceleratory – zastosowania

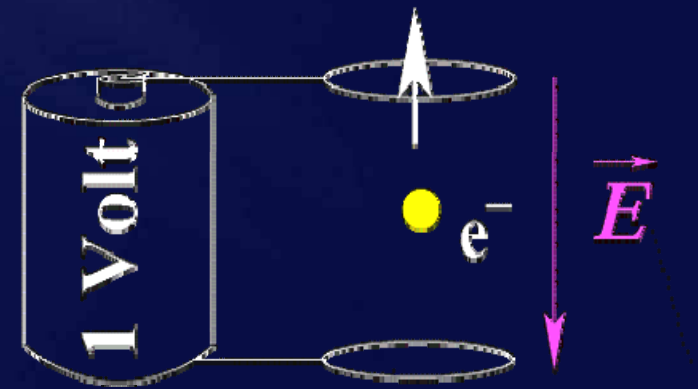
Accelerators in the world (2002)

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

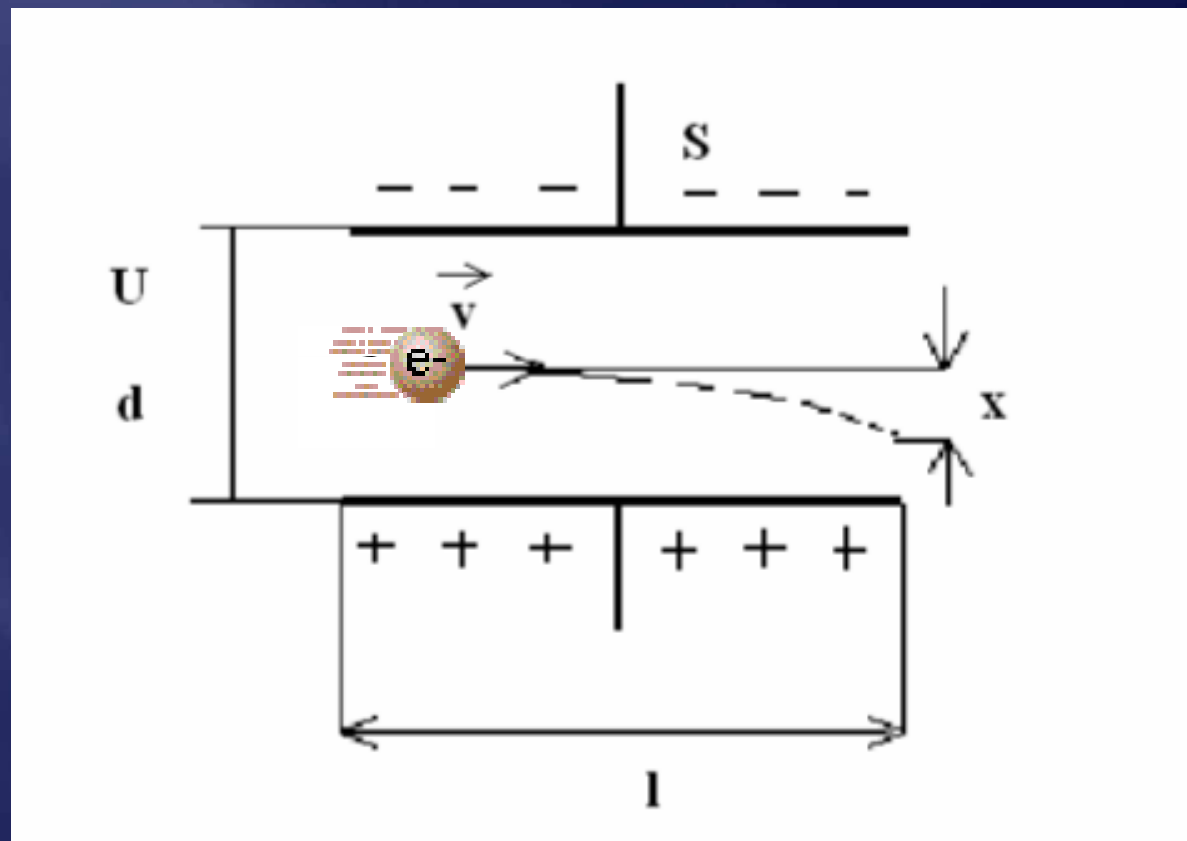
D.Brandt, 2004

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:
 - Światło widzialne: 1,5 – 3,5 eV
 - Telewizor: 20 keV (20 000 eV)



Ruch cząstki w polu elektrycznym



Pole elektryczne powoduje **zmianę**
energii kinetycznej

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

Np. dla elektronu $v = v_0 + 593\sqrt{U} \text{ [km / s]}$

Dla $U = 25\text{kV} \rightarrow v \approx v_0 + 93\,762 \text{ [km / s]}$

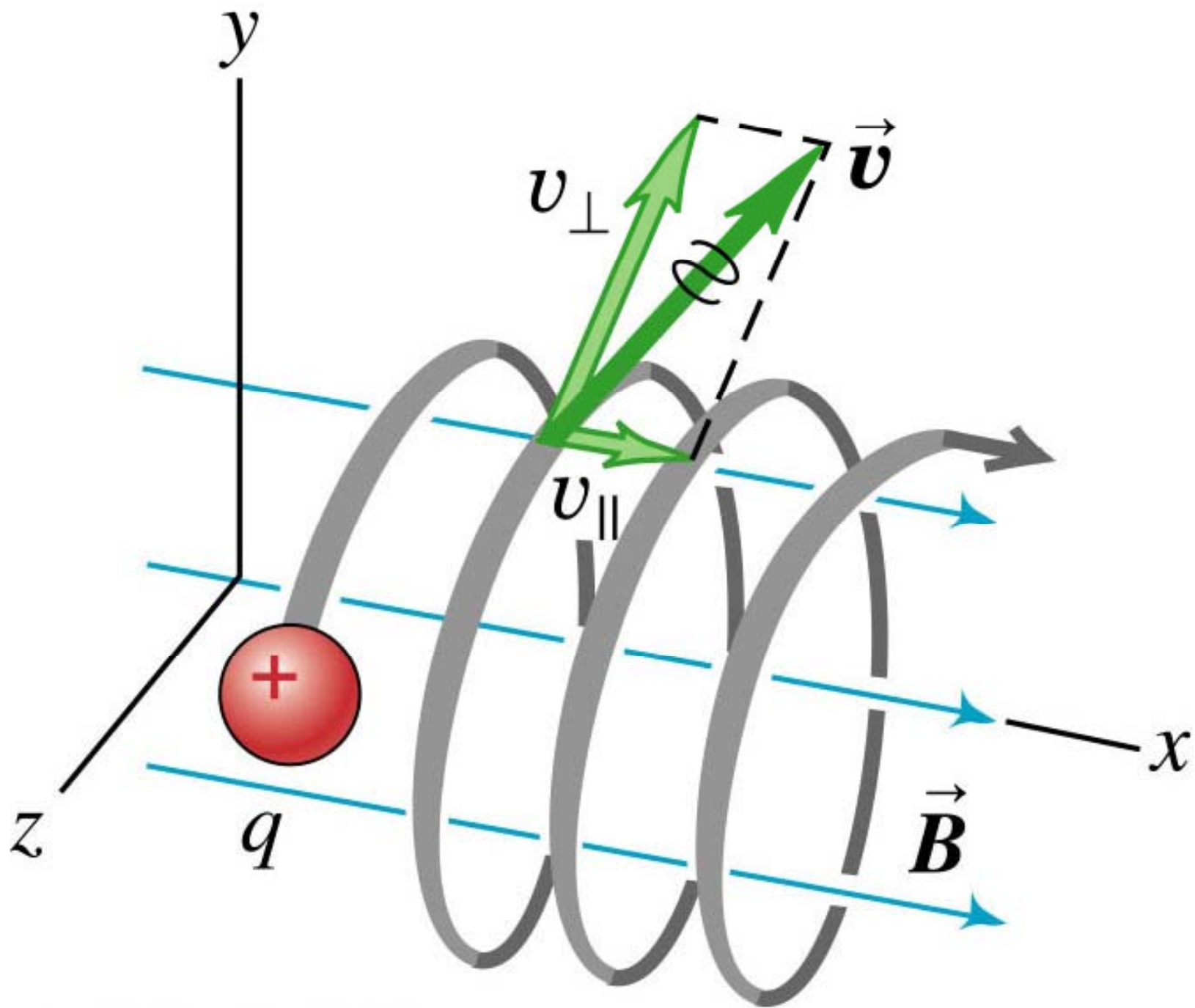
Wyższe energie? Potrzebowalibyśmy sporo baterii!

- ▣ Połączenie w szeregu 6 milionów baterii R6, jedna za drugą, dała by różnicę potencjałów 9 milionów wolt – elektron mógłby być przyspieszony do energii 9 MeV!
- ▣ Niestety, taki układ (gdyby był możliwy do zrealizowania) miałby 300 kilometrów długości.



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

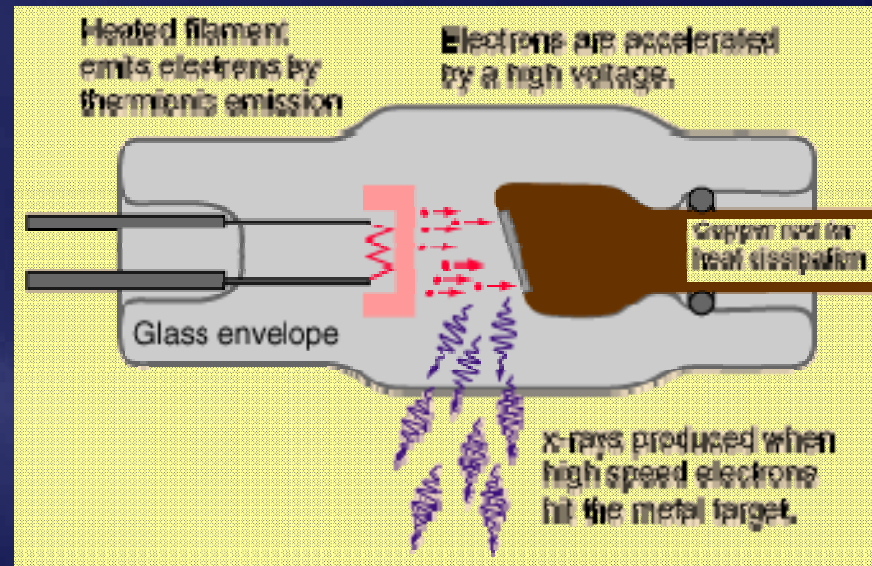
Pole magnetyczne nie zmienia energii kinetycznej elektronu, zmienia jedynie kierunek jego ruchu.



Odkrycie promieniowania X



Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)



Bertha Röntgen's Hand 8 Nov, 1895



Modern radiograph of a hand

Akceleratory – zasada działania

- ▣ Metody DC
- ▣ Akceleratory liniowe
- ▣ Akceleratory kołowe

Akceleratory DC



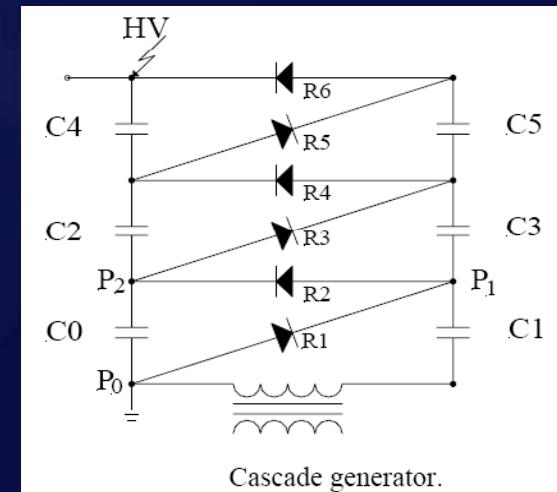
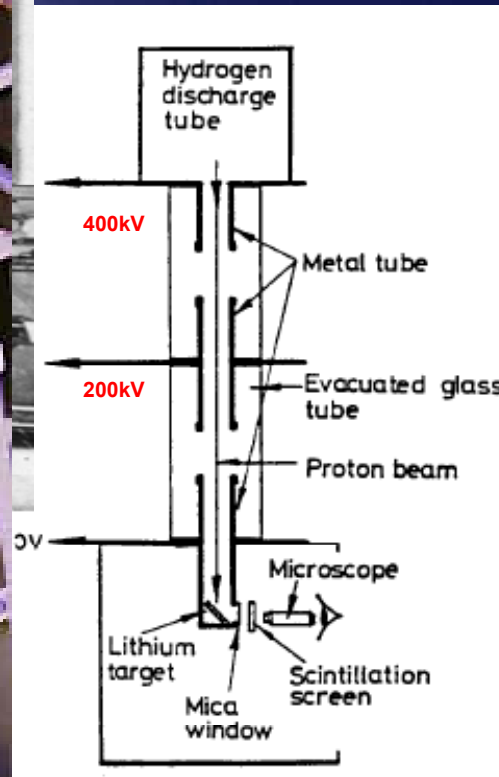
Cząstka nabiera energii poruszając się pomiędzy dwoma potencjałami $\Delta V = V - V_0$.

- Wiązka przechodzi tylko raz
- Im wyższy potencjał tym większa energia

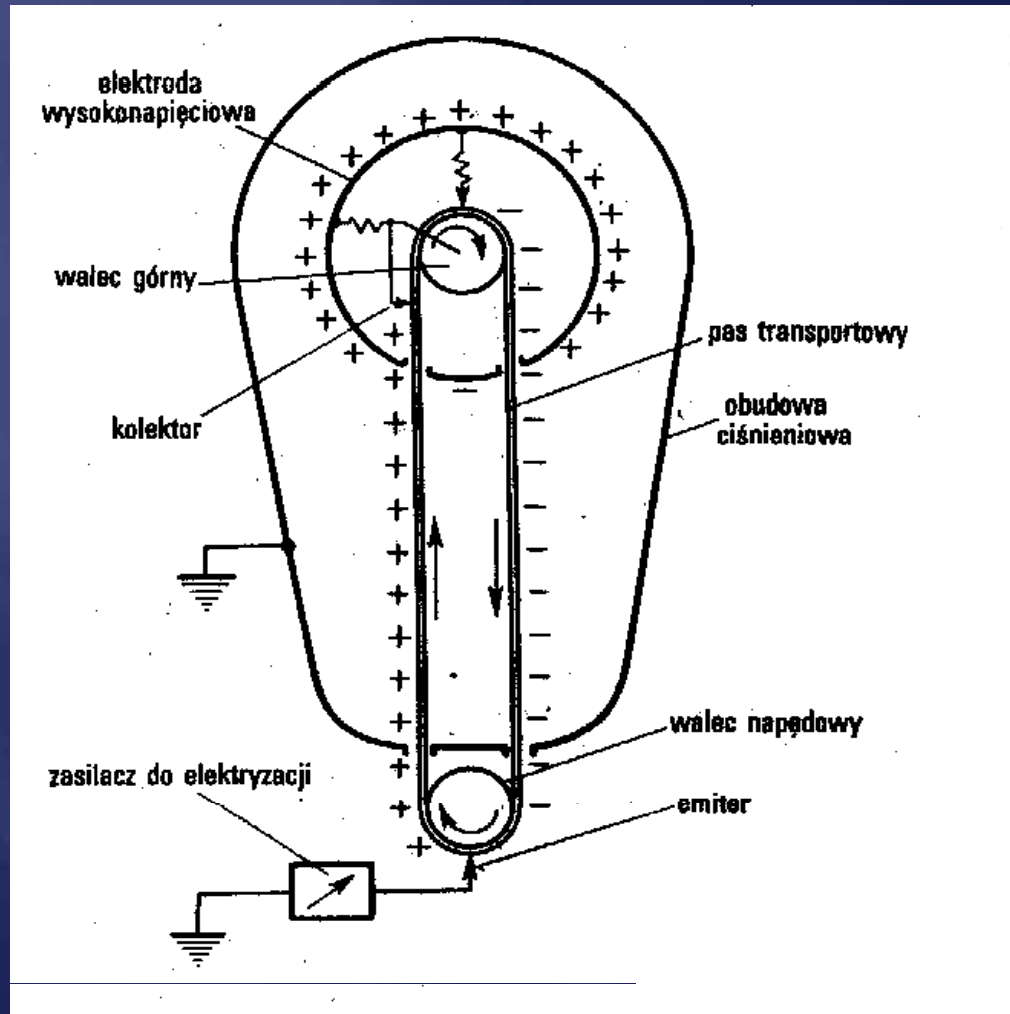
1930' – pierwszy akcelerator

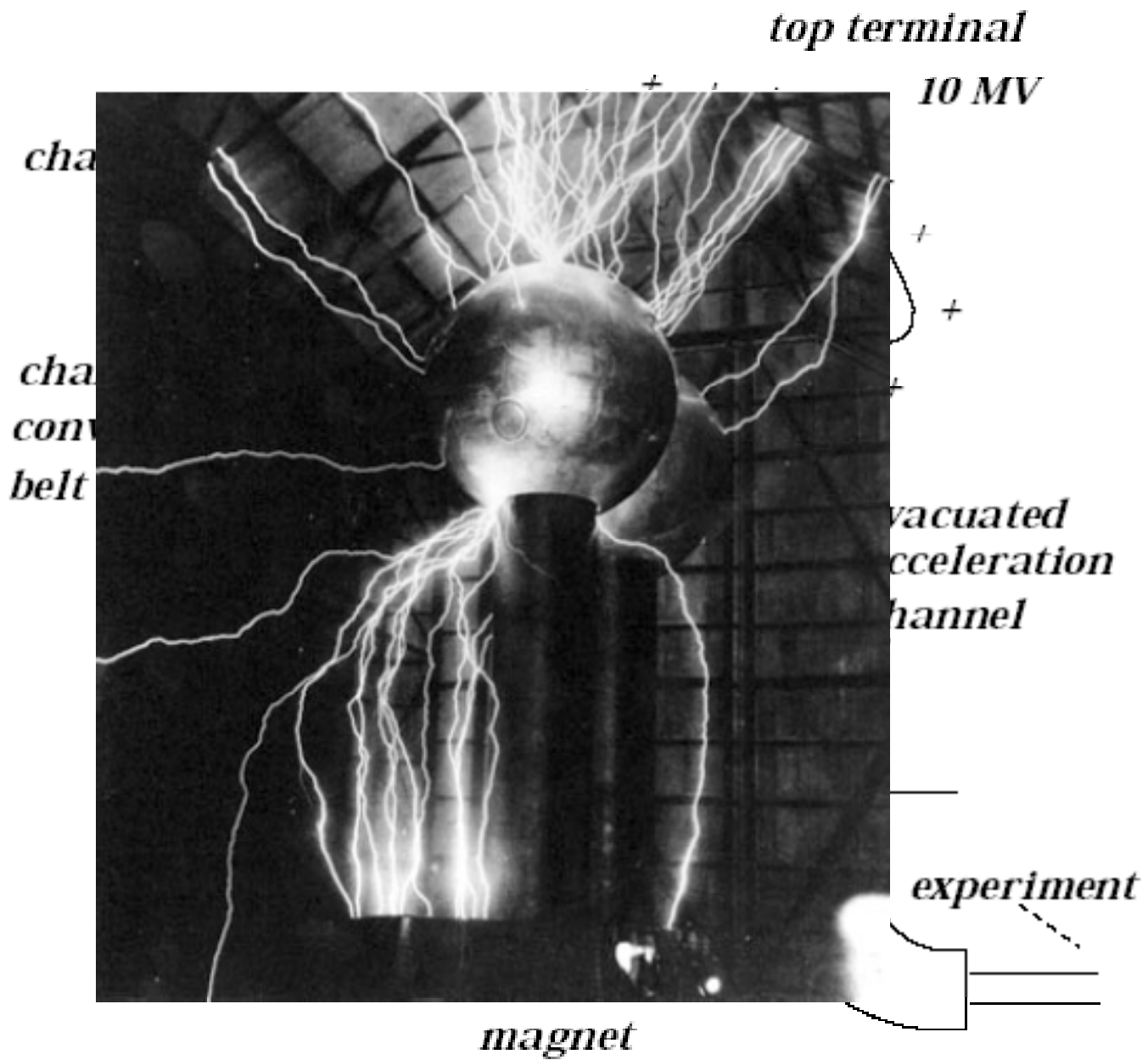


Cockcroft- Walton.

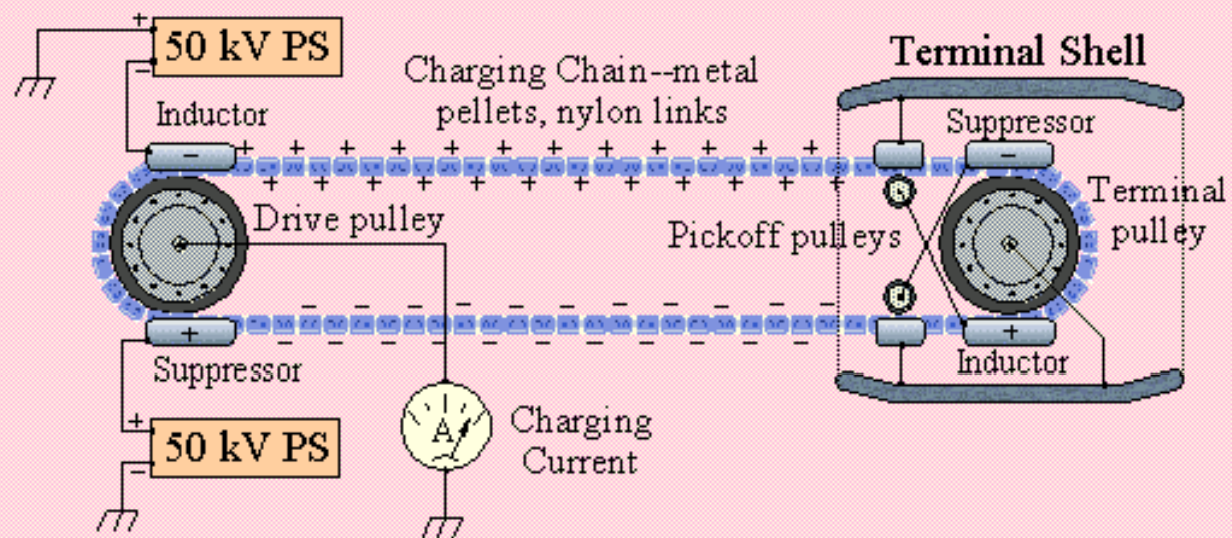


Generator Van de Graaffa



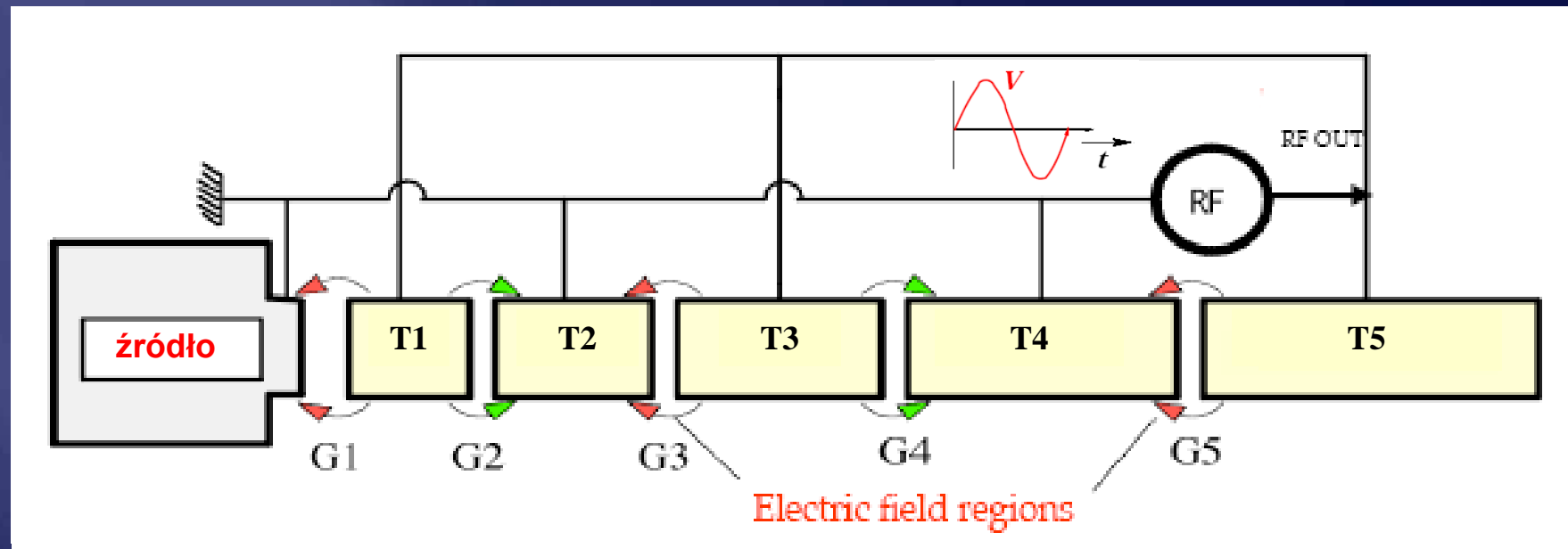


Pelletron Charging System (Positive configuration shown)



Akceleratory liniowe wcz

Metoda Wideröe



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

Metoda Wideröe

An oscillator (7 MHz at that time) feeds alternately a series of drift tubes in such a way that particles see no field when travelling inside these tubes while they are accelerated in between. The last statement is true if the drift tube length L satisfies the synchronism condition:

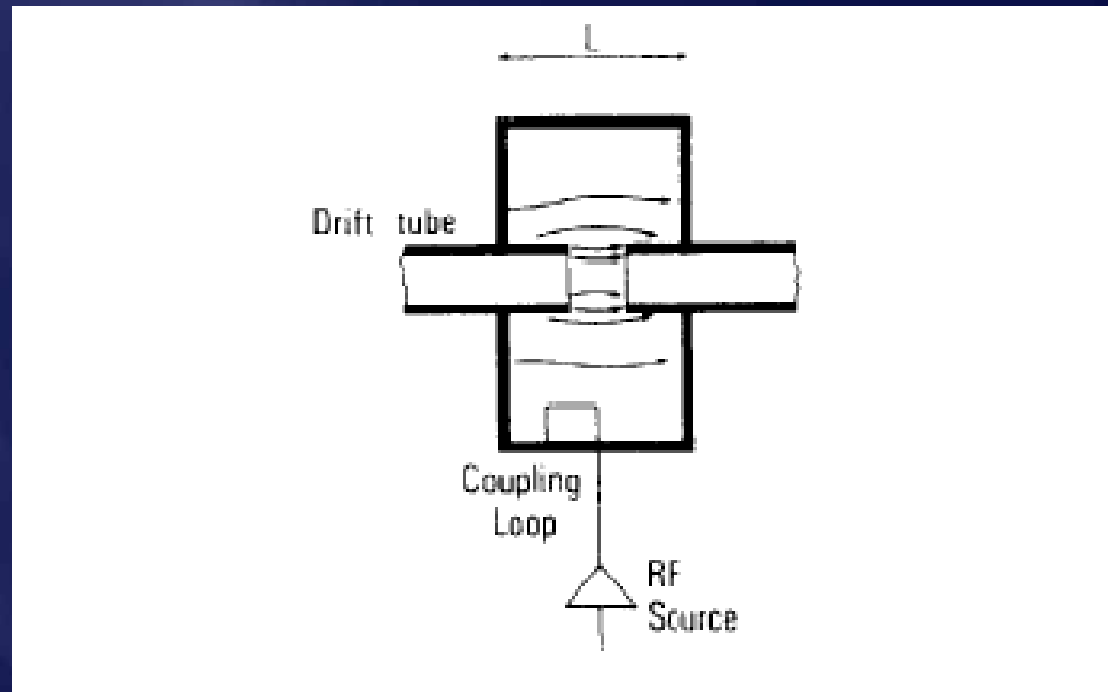
$$L = \frac{vT}{2}$$

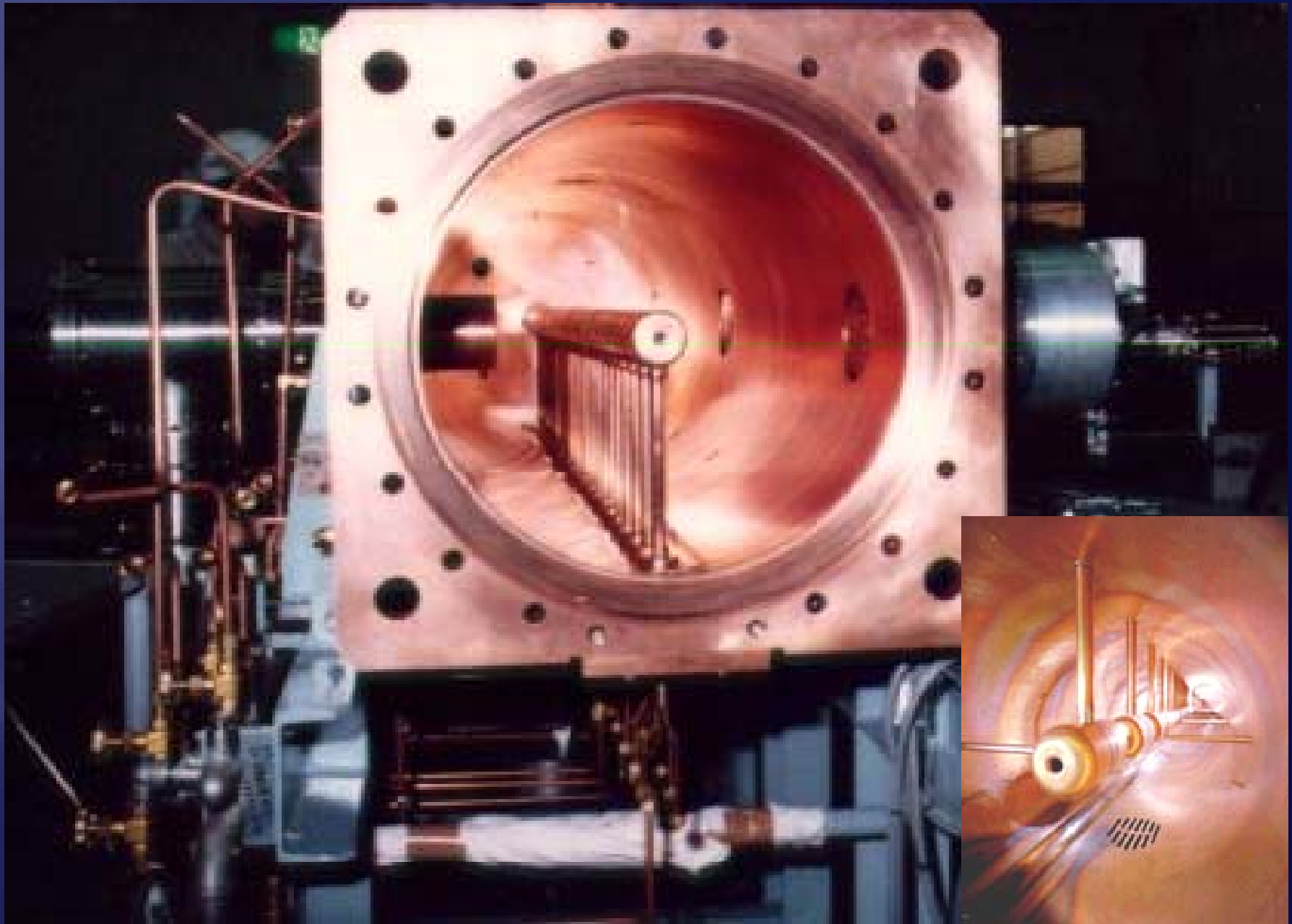
where v is the particle velocity (βc) and T the period of the a.c. field. This scheme does not allow continuous acceleration of beams of particles.

Consider a proton of 1 MeV kinetic energy entering the previous structure. At a frequency of 7 MHz such a particle, with $\beta = v/c = 4.6 \cdot 10^{-2}$, will travel a distance of roughly 1 meter in half a cycle. Clearly the length of the drift tubes will soon become prohibitive at higher energies unless the input RF frequency is increased.

Metoda Alvareza

- ▣ Zamykamy przestrzeń przyspieszania we wnęce o dobranej częstotliwości rezonansowej





2007-11-27

dr Sławomir Wronka, IPJ

Przyspieszanie cząstek relatywistycznych, czyli elektronów

▣ v/c

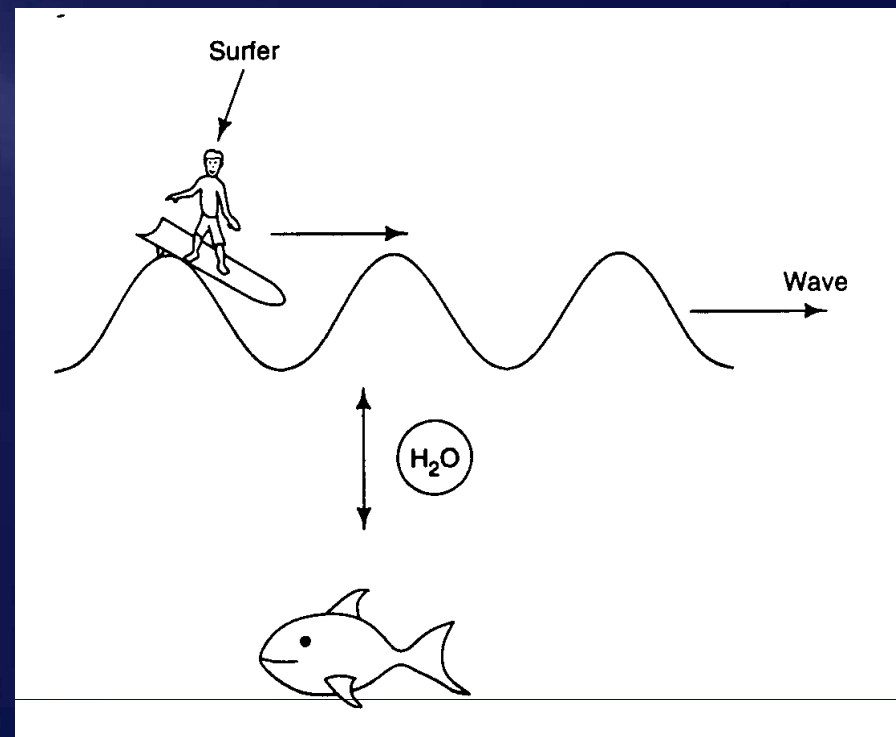
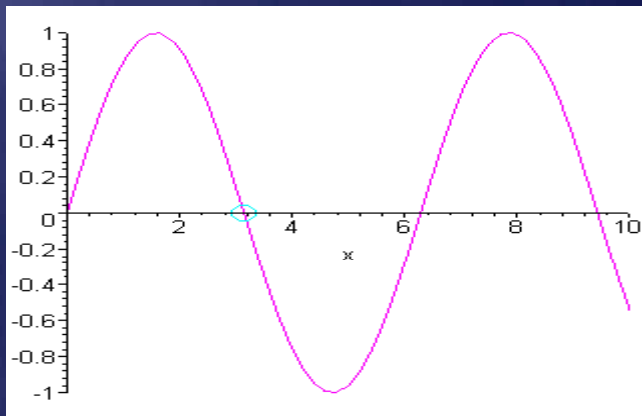
	Elektron	Proton
10 keV	0,195	0,0046
100 keV	0,548	0,0147
1 MeV	0,941	0,0465
5 MeV	0,996	0,1026
10 MeV	0,999	0,1451
1GeV		~1 !!!

Przyspieszanie elektronów

- ▣ Wysoka częstotliwość, ponieważ duża prędkość !
- ▣ Fala 10cm – 3000 MHz

Przyspieszanie elektronów

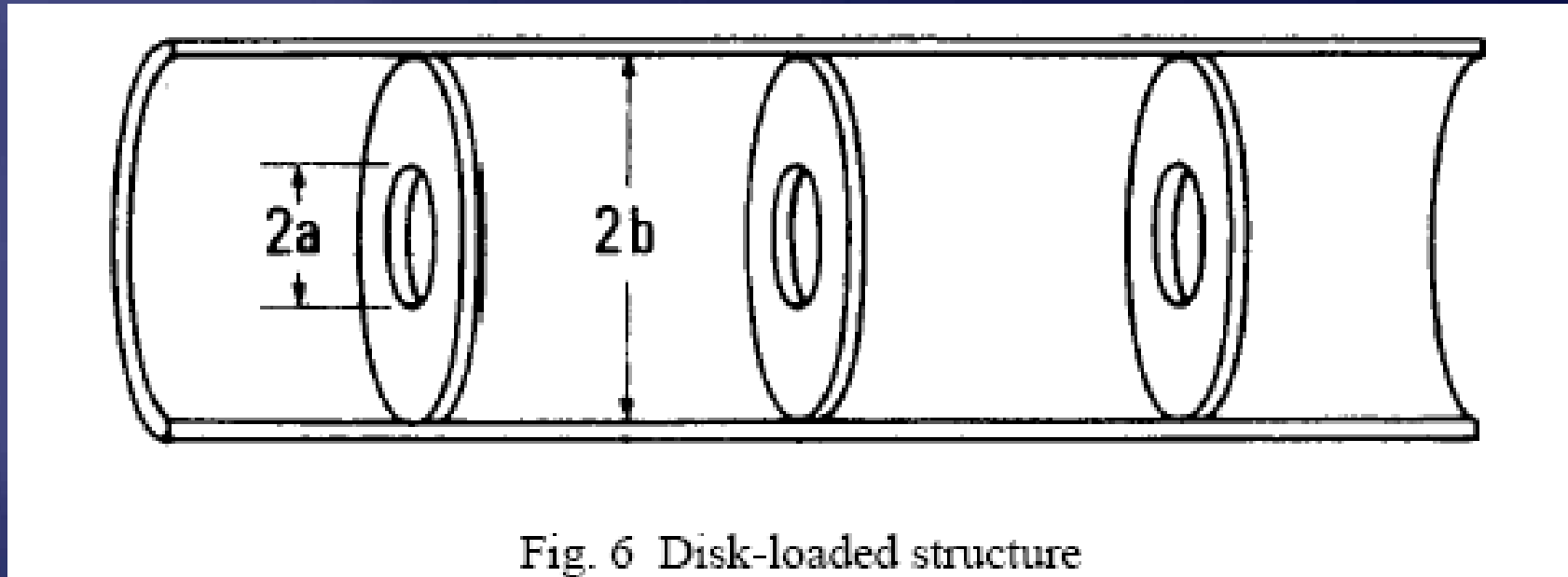
- ▣ Pomysł – może wystarczy wziąć falowód ?
Elektrony będą przyspieszać wraz z poruszającą się falą.



Przyspieszanie elektronów

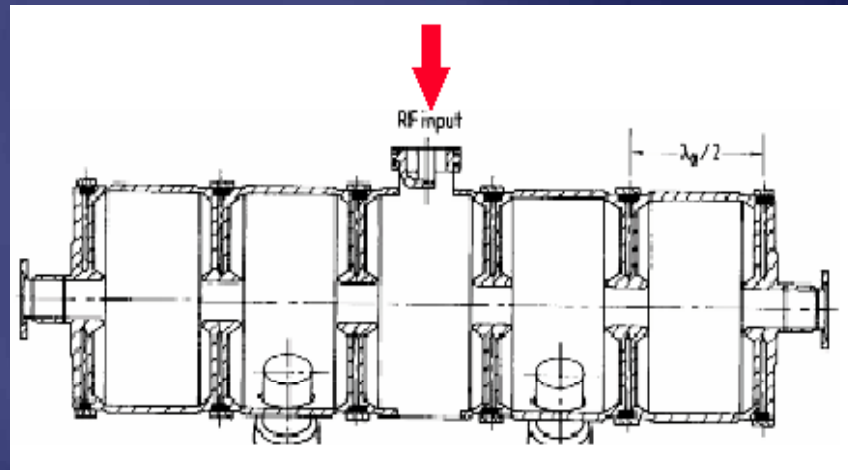
- ▣ Pomysł – może wystarczy wziąć falowod ?
Elektrony będą przyspieszać wraz z poruszającą się falą.
- ▣ Tak, ale jest mały problem – fala elektromagnetyczna o głównej składowej pola E „do przodu” porusza się ZA SZYBKO w kołowych lub prostokątnych falowodach.

Przyspieszanie elektronów

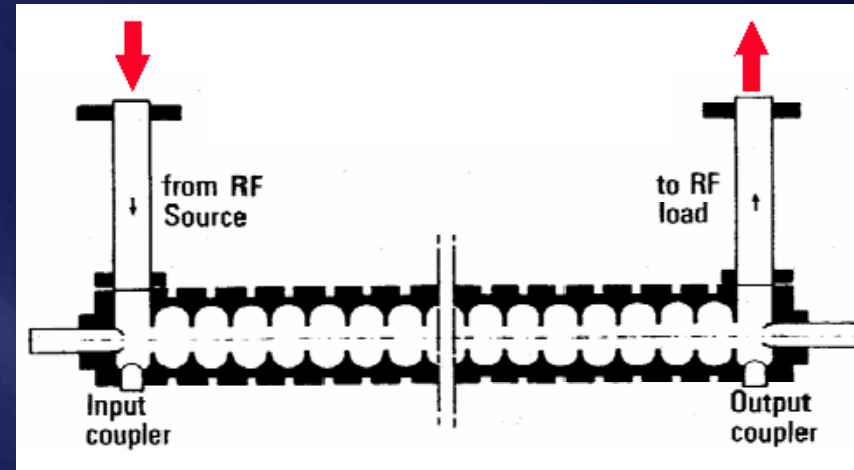
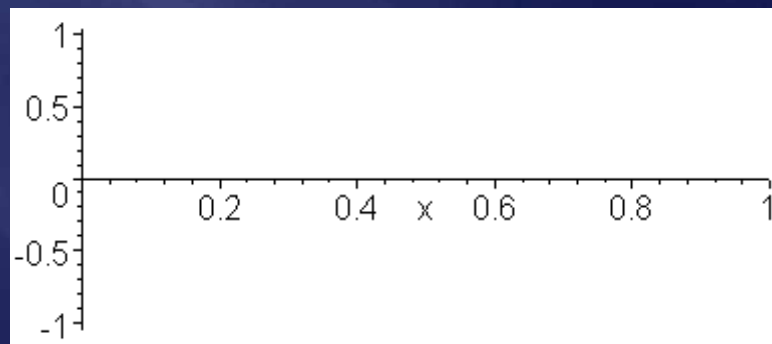


Dyski o odpowiedniej średnicy zapewniają „zwolnienie” rozprzestrzeniania się fali tak, aby zapewnić prędkość porównywalną z prędkością cząstek ($v \sim c$)

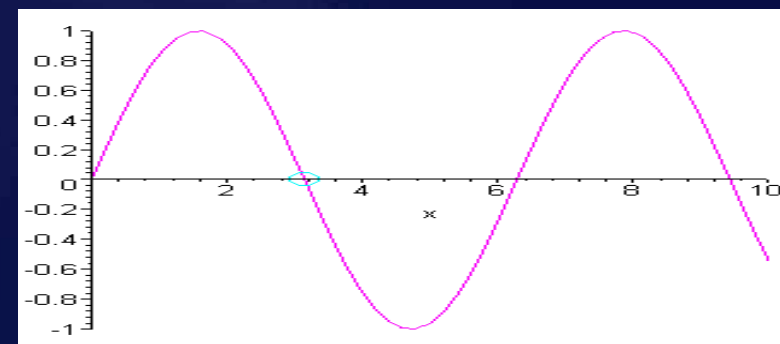
Przyspieszanie elektronów



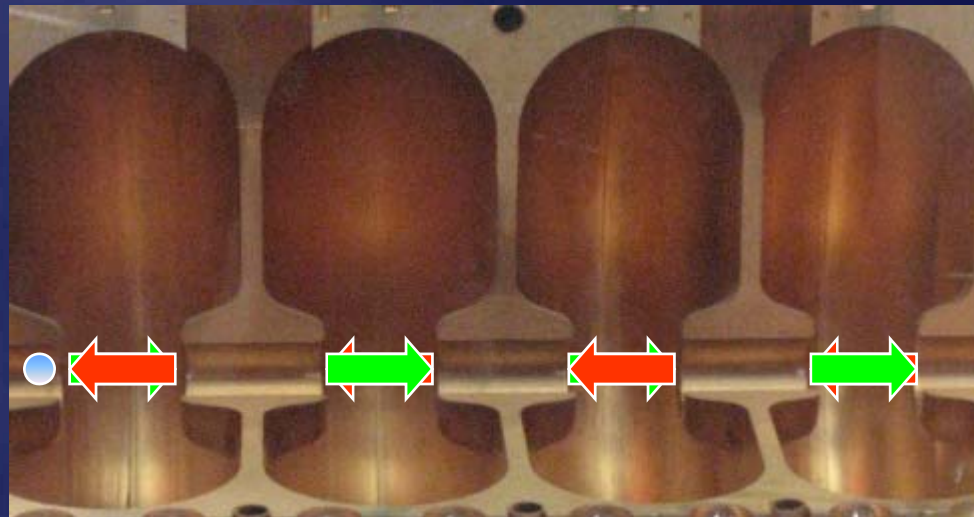
Standing wave



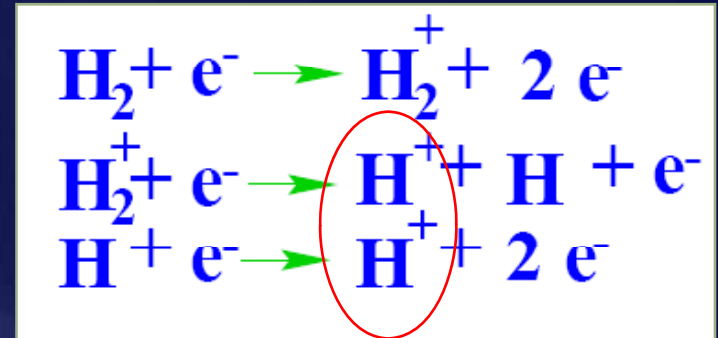
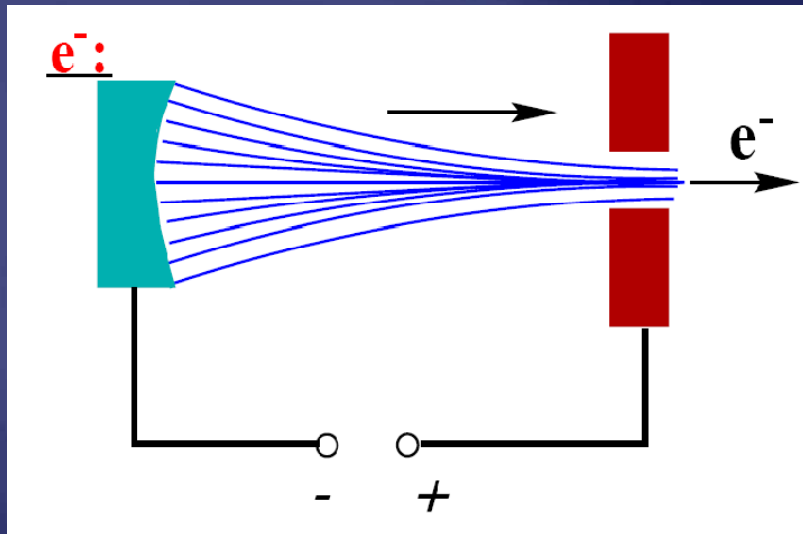
Moving wave



Przyspieszanie jeszcze raz 😊

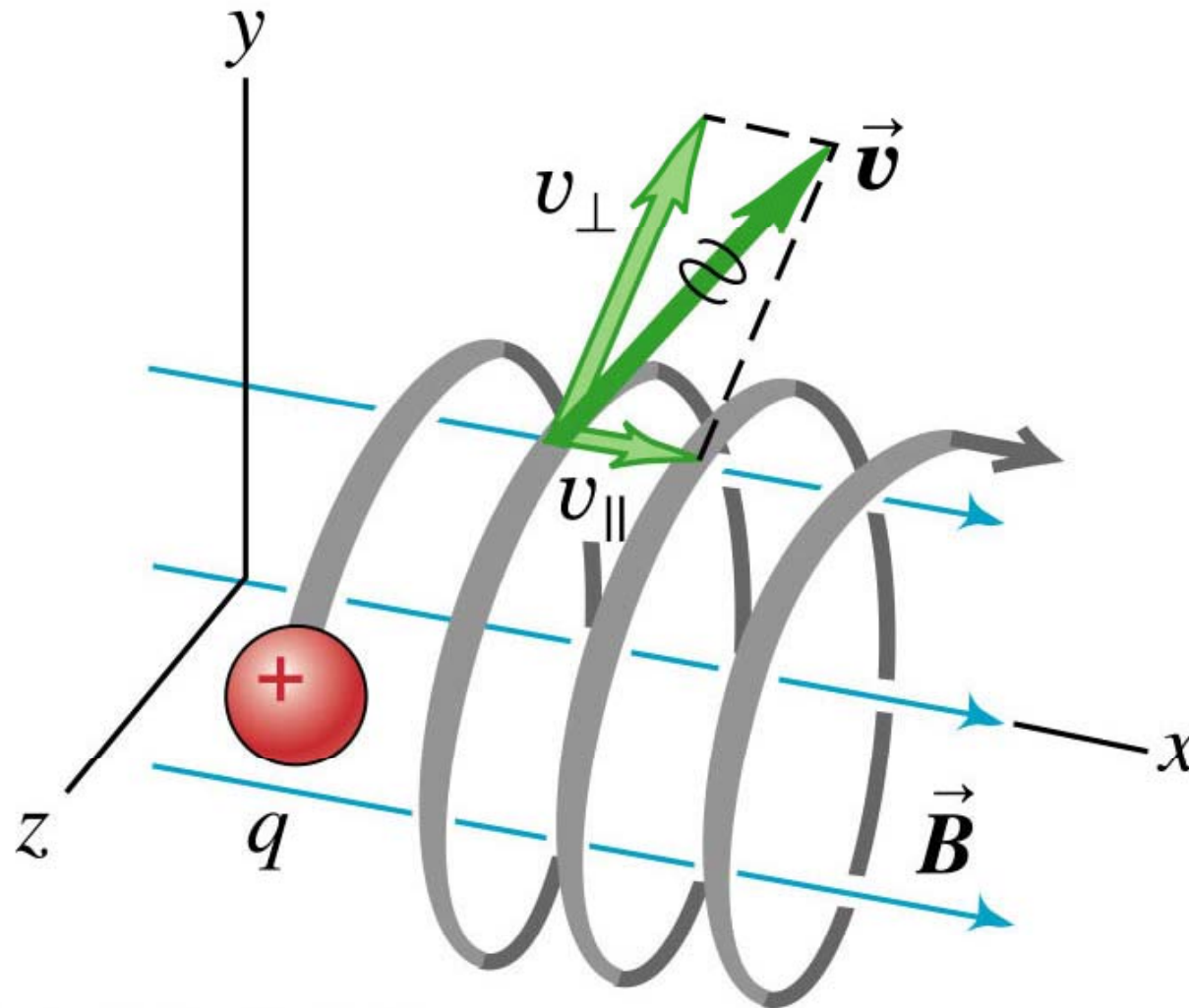


A tak przy okazji – skąd wziąć cząstki ?



Akceleratory kołowe wcz

Ruch cząstki w polu magnetycznym



Copyright © 2004 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

Ruch cząstki w polu magnetycznym

Wartość siły Lorentza:

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

Siła skierowana jest prostopadle do wektora prędkości



Siła Lorentza to siła dośrodkowa

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



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

Ruch cząstki w polu magnetycznym

Okres ruchu:

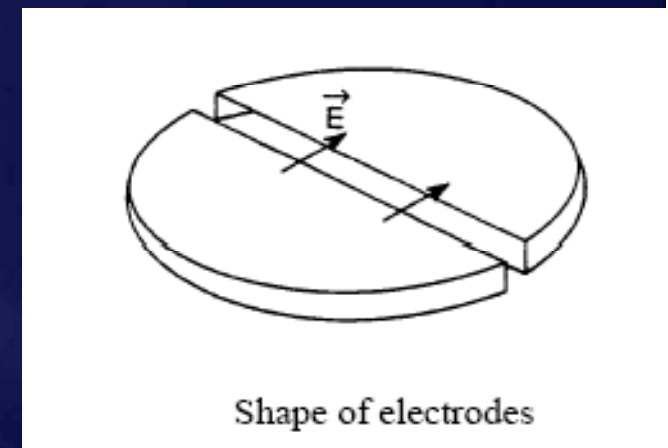
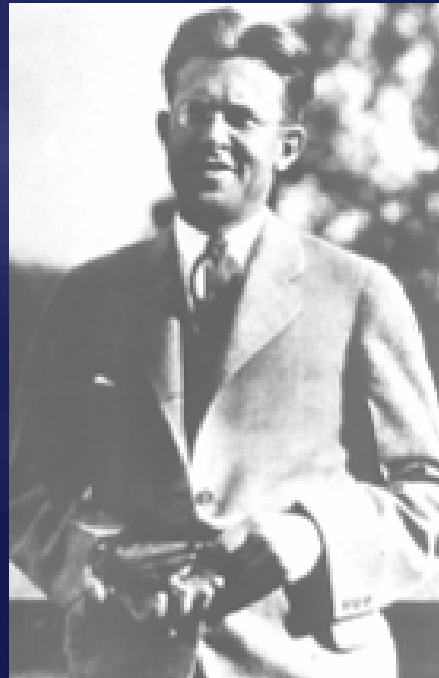
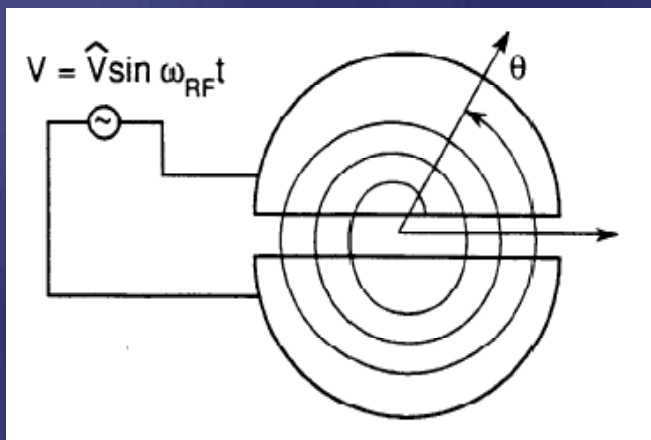
$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B \cdot v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

Częstość kołowa:

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

**Częstość cyklotronowa
niezależna od prędkości**

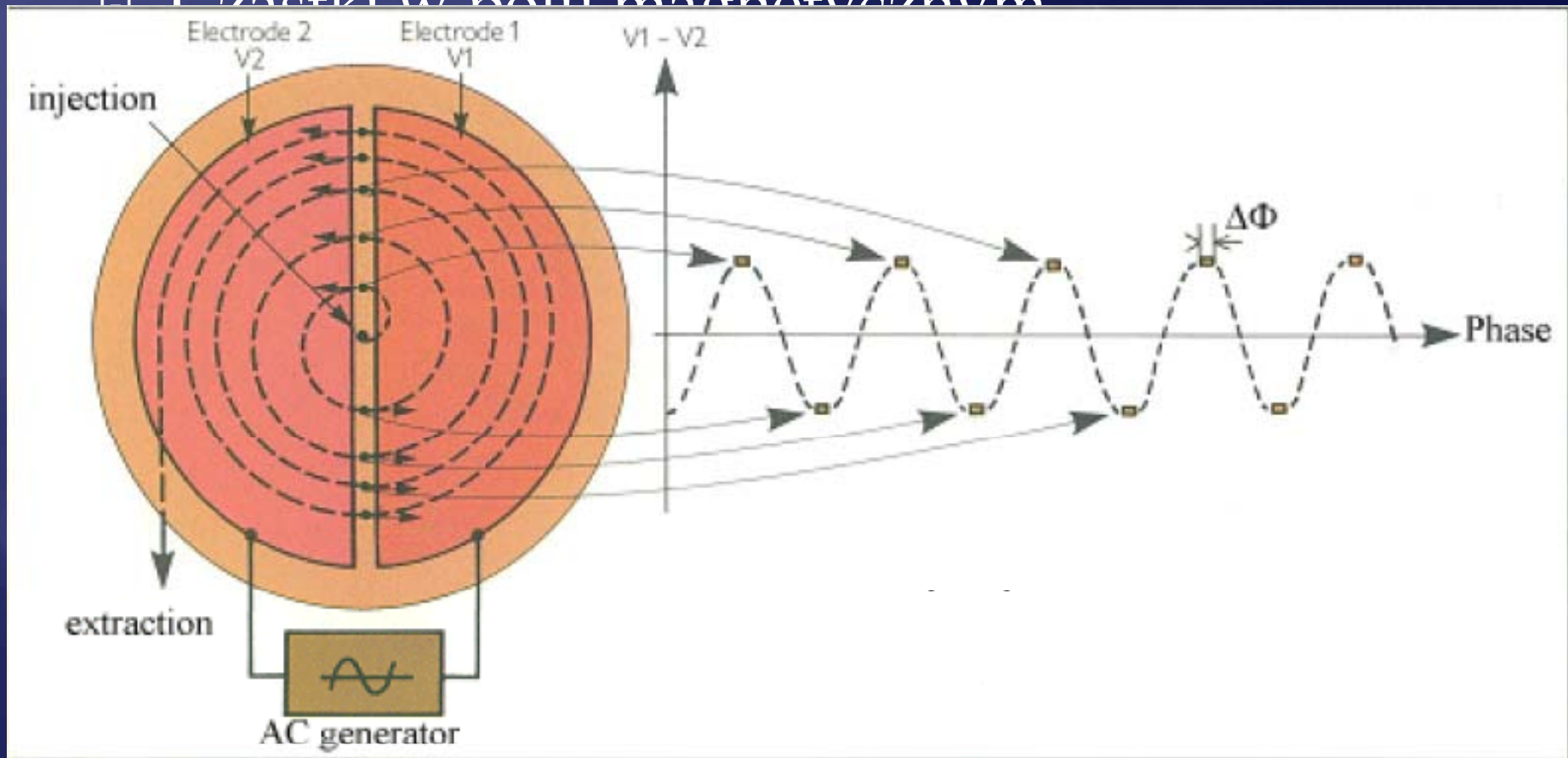
Cyklotron /Lawrence, 1932/



Nagroda Nobla 1939

Cyklotron

□ Cząstki w polu magnetycznym

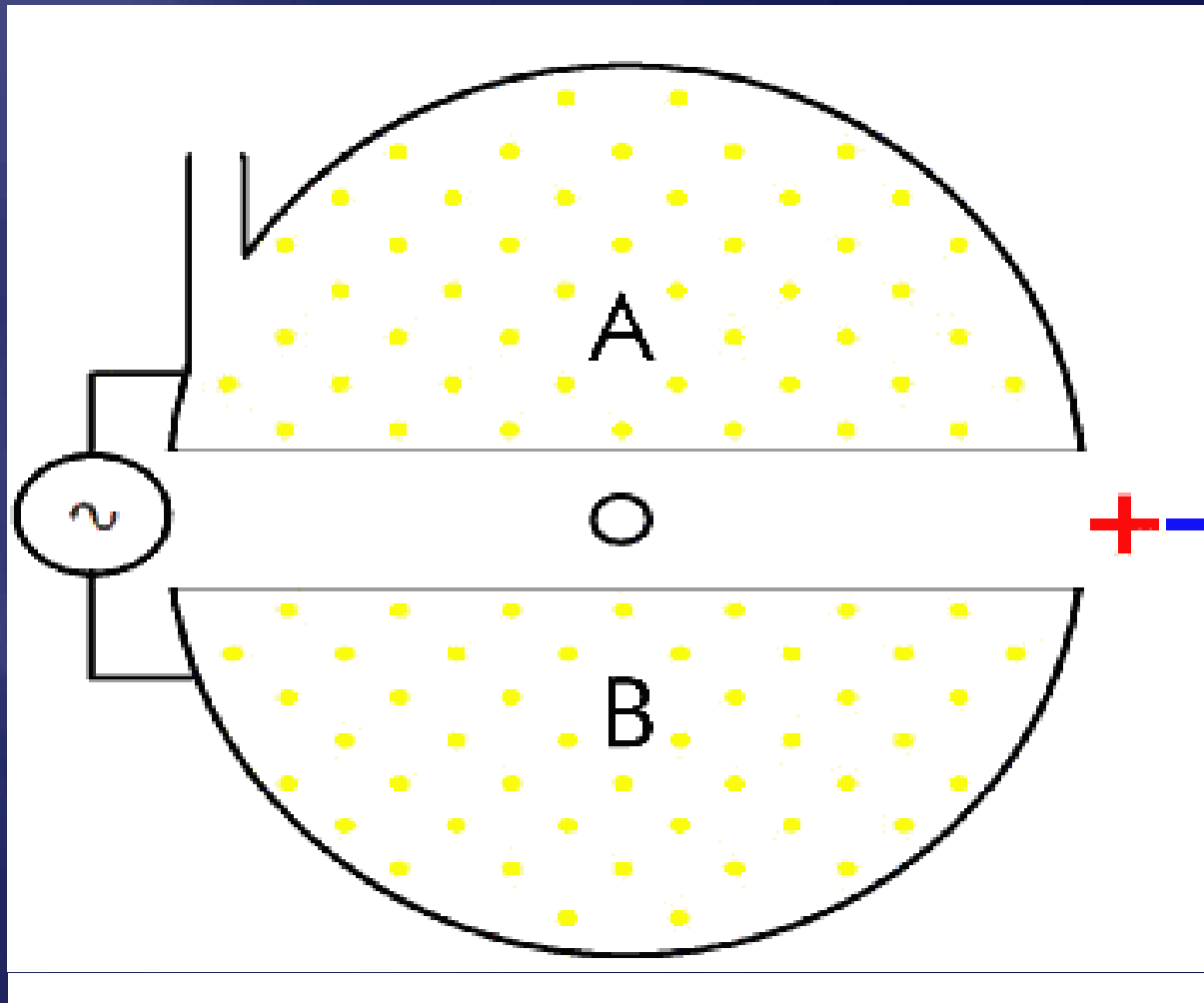


T M

Cyklotron

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

Cyklotron

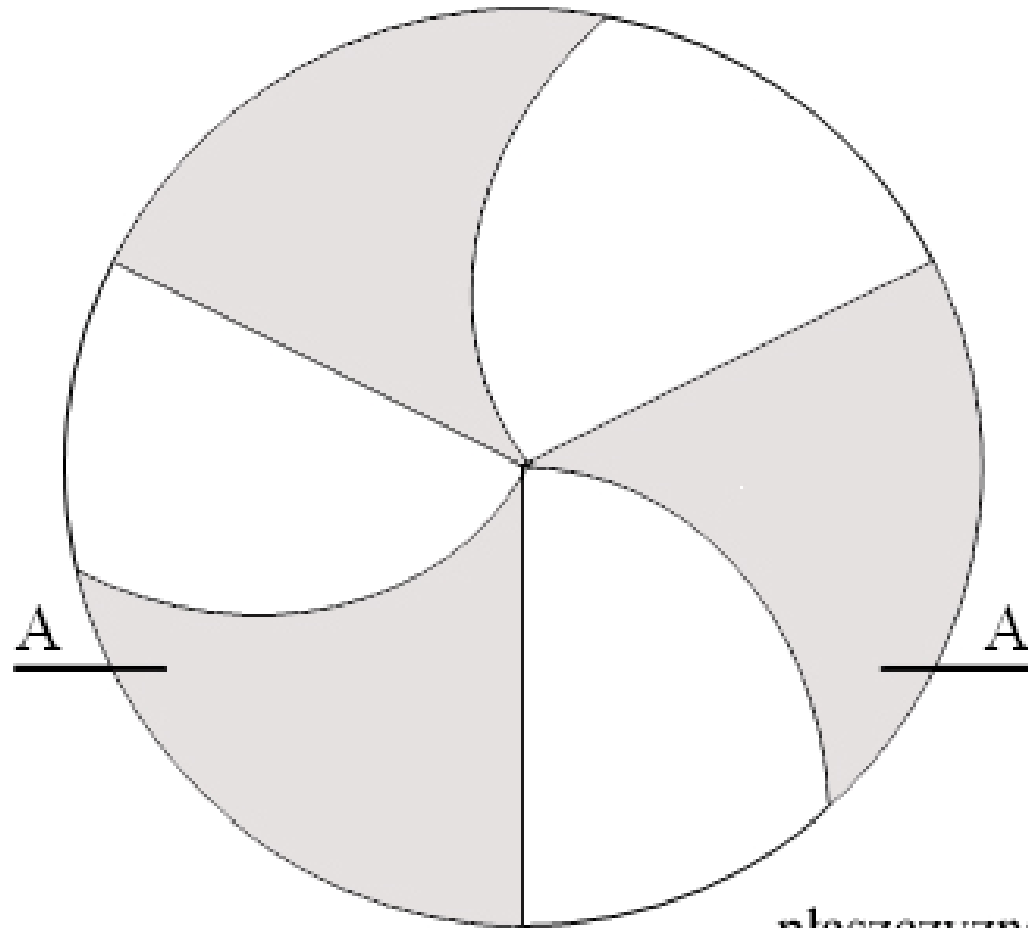


Cyklotron izochroniczny

- ▣ **Cyklotron izochroniczny** - akcelerator z azymutalną modulacją pola - cyklotron, skonstruowany tak by czas jednego obiegu rozprędzanych cząstek był stały (stąd nazwa izochroniczny) pomimo wzrostu masy cząstki wywołanej efektami relatywistycznymi, które występują przy rozprędzaniu cząstek do prędkości porównywalnych z prędkością światła.

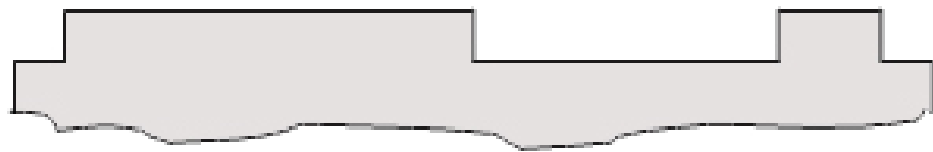
Cyklotron izochroniczny

- ▣ Stały czas obiegu uzyskuje się poprzez odpowiednie ukształtowanie pola magnetycznego zakrzywiającego tor ruchu cząstek. Wzrost pola magnetycznego na zewnątrz uzyskuje się poprzez wykonanie odpowiednich nacięć w rdzeniu elektromagnesu.



A - A

płaszczyzna
międzybiegunowa



Cyklotron izochroniczny

- ▣ Modyfikacja taka upraszcza układ zasilania w napięcie przyspieszające, które jest generatorem o stałej częstotliwości. Umożliwia pracę ciągłą akceleratora a przez to także zwiększa maksymalną energię możliwą do osiągnięcia oraz natężenie wiązki.



2007-11-27

dr Sławomir Wronka, IPJ

Synchrociklotron /fazotron/

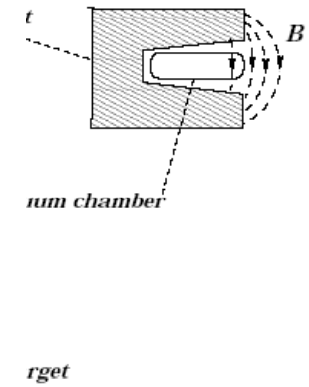
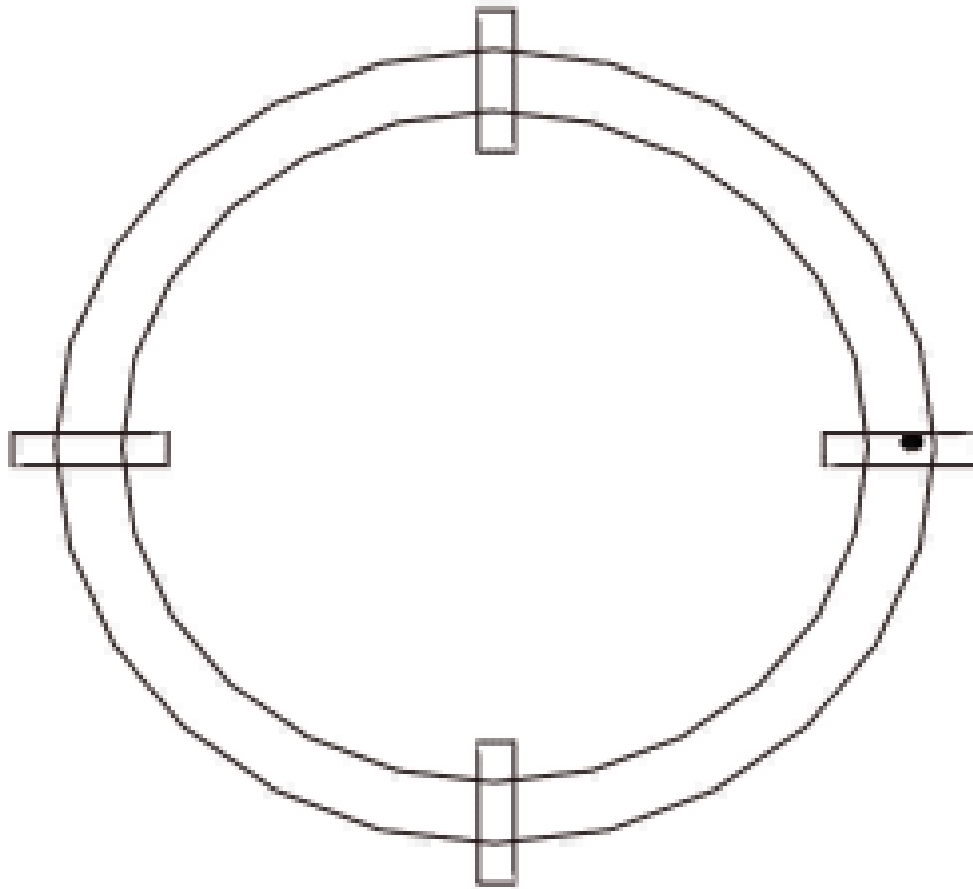
- ▣ Aby skompensować relatywistyczny wzrost masy – możemy zmienić częstotliwość RF
- ▣ Np. CERN, 600MeV, 30.6MHz – 16.6MHz, 30000 obiegów protonów, przyrost energii 20keV/obieg.

Synchrotron

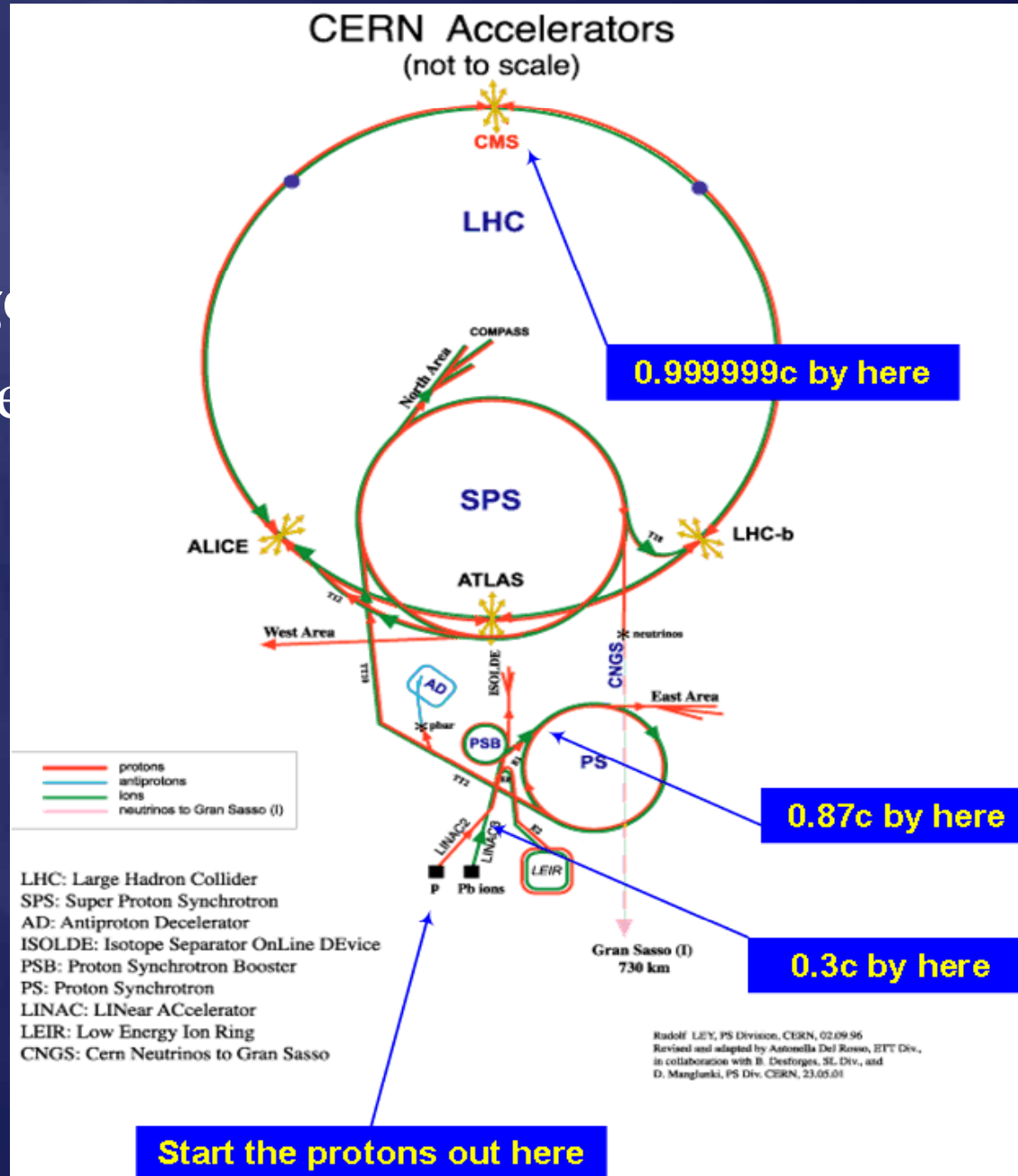
Jeśli zsynchronizowana zostanie częstość obiegu cząstek w pierścieniu akceleryjnym z częstością zmiany pól: elektrycznego i magnetycznego, to proces akceleracji może odbywać się bez zmiany promienia okręgu po którym krążą cząstki.

/Oliphant 1943/

Synchrotron



- Storage
- Collide



m

$$\sqrt{2 + 2E_1 m}$$

115 GeV

Dlaczego duże akceleratory ?

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



- ▣ 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
 $(m_e/m_p)^4 \sim 10^{-13}$

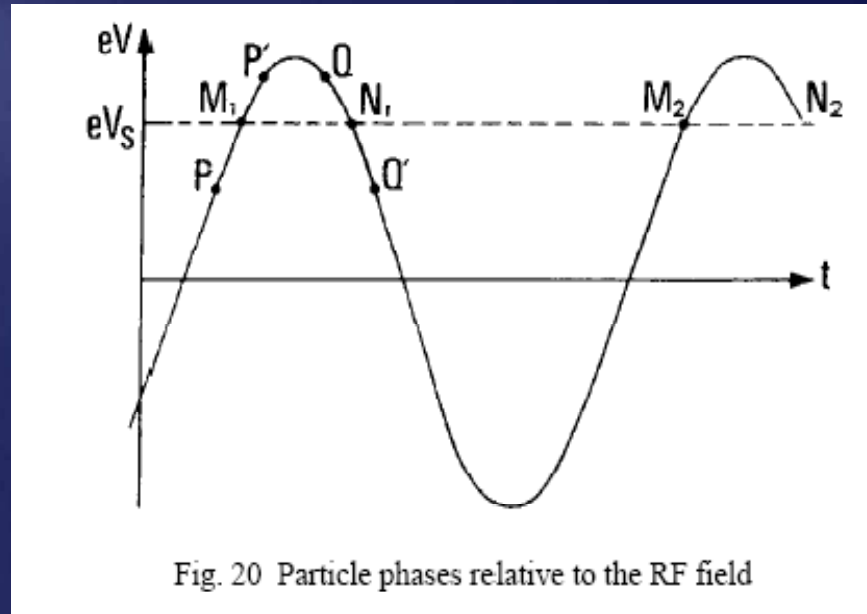
Koncepcja „Luminosity” = „Świetlność”

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

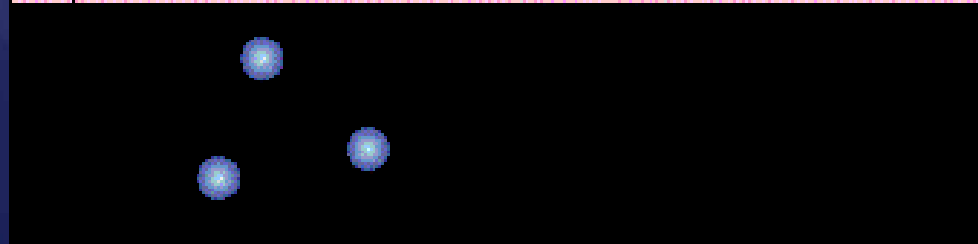


	Energy (GeV)	\mathcal{L}_{max} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	rate s^{-1}	σ_x/σ_y $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Particles per bunch
SPS ($p\bar{p}$)	315x315	$6 \cdot 10^{30}$	$4 \cdot 10^5$	60/30	$\approx 10 \cdot 10^{10}$
Tevatron ($p\bar{p}$)	1000x1000	$100 \cdot 10^{30}$	$7 \cdot 10^6$	30/30	$\approx 30/8 \cdot 10^{10}$
HERA (e^+p)	30x920	$40 \cdot 10^{30}$	40	250/50	$\approx 3/7 \cdot 10^{10}$
LHC (pp)	7000x7000	$10000 \cdot 10^{30}$	10^9	17/17	$11 \cdot 10^{10}$
LEP (e^+e^-)	105x105	$100 \cdot 10^{30}$	≤ 1	200/2	$\approx 50 \cdot 10^{10}$

Przyspieszanie cząstek

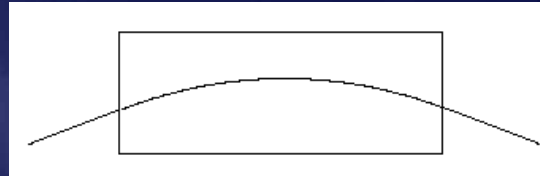


1 | Positive particles just sitting there



Magnesy

- ▣ Utrzymywanie wiązki na stałej orbicie
→ Dipole



Np. LEP

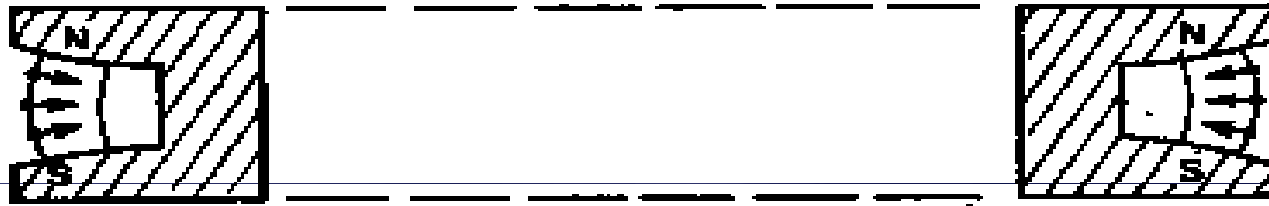
$P = 100 \text{ GeV}/c$

$\rho = 27 \text{ Km}$

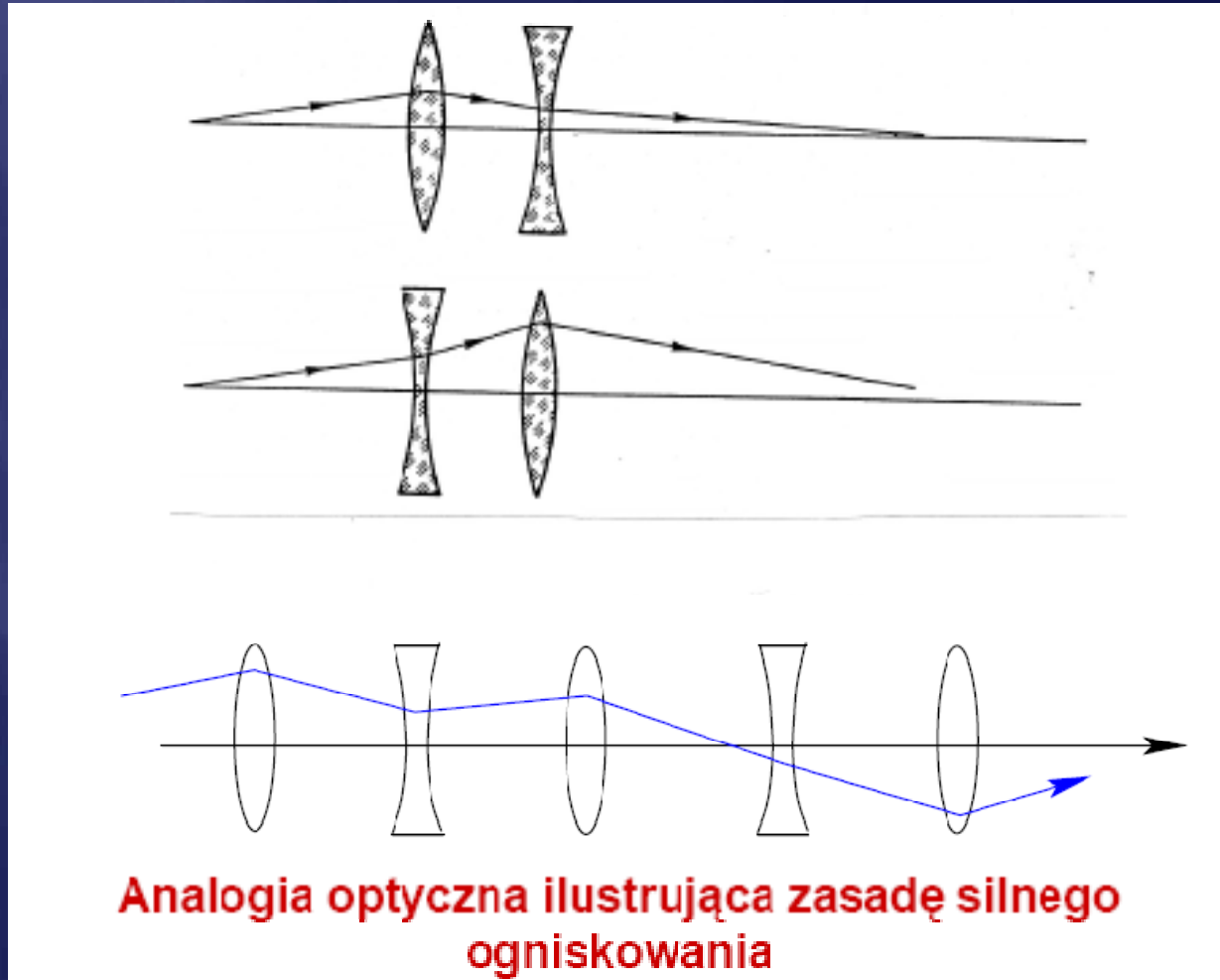
$B = 0.0775 \text{ Tesla}$



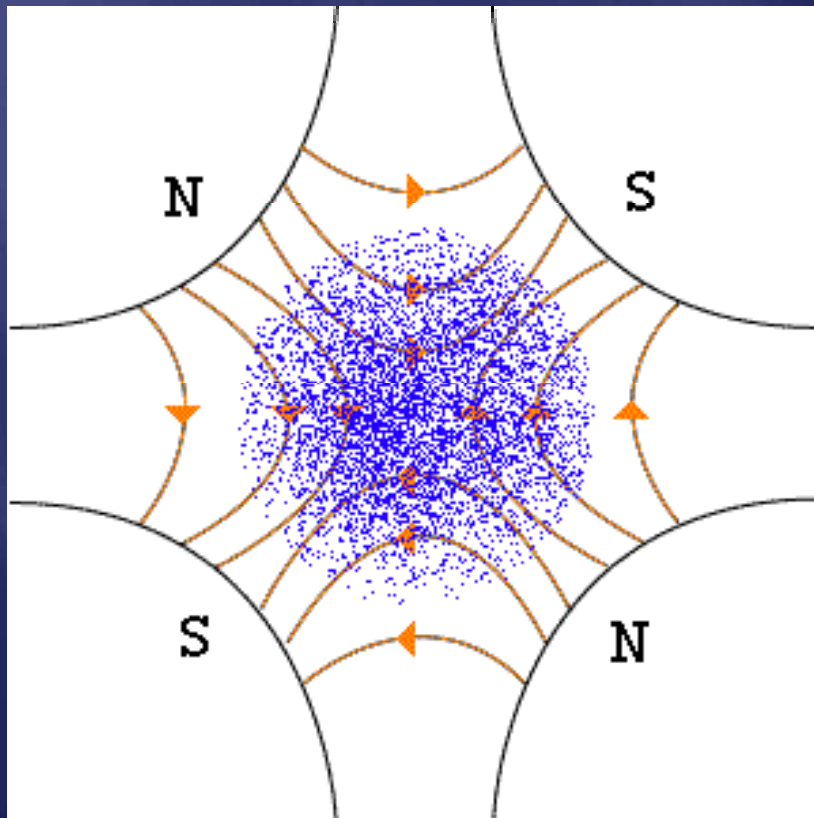
Ogniskowanie słabe



Ogniskowanie silne



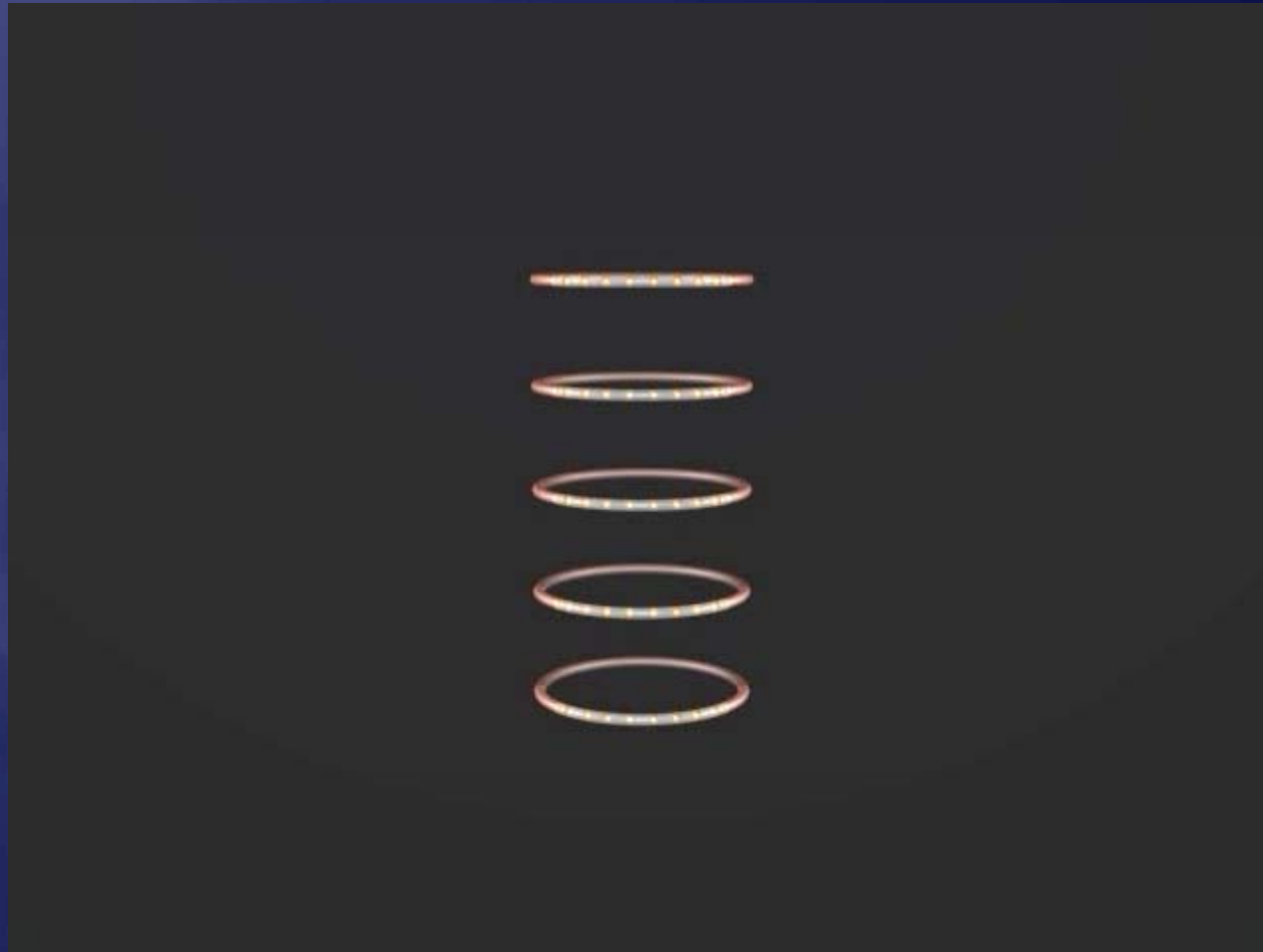
Magnesy kwadropolowe



I inne...



Solenoid



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



LHC – parametry

▣ Synchrotron – $R = \text{const}$

$$\rightarrow B[\text{T}] = \frac{1}{0.3} \cdot \frac{p[\text{GeV}/c]}{R[\text{meter}]}$$

■ *Physics:* $\rightarrow p = 7000 \text{ GeV}/c$

■ *LEP tunel:* $L = 27000 \text{ meter}$

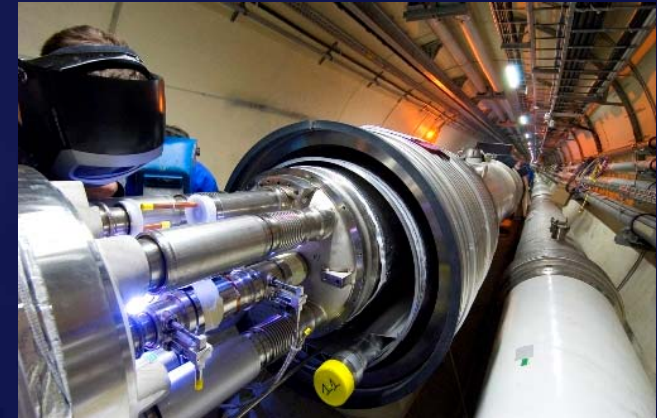
\rightarrow arcs: $L = 22200 \text{ meter}$

$\rightarrow R = 3500 \text{ meter}$

■ *Bending and Focusing:* $\rightarrow R = 2784 \text{ meter}$

$$\rightarrow B_{\text{max}} = 8.38 \text{ T}$$

iron saturation: 2 Tesla
earth: $0.3 \cdot 10^{-4}$ Tesla



LEP

$P = 100 \text{ GeV}/c$

$\rho = 27 \text{ Km}$

$B = 0.0775 \text{ Tesla}$

Elena Wildner

Przyspieszanie polem elektrostatycznym



Cockcroft Walton

Van Der Graff

Przyspieszanie polem wcz



Akcelerator liniowy
Wideroe

Cyclotron
Lawrence

Synchrotron
Oliphant

Synchrocyclotron
McMillan and Veksler

Alvarez Linac

Strong Focusing

- ▣ Ze względu na sposób przyśpieszenia cząsteczek, a więc i budowę, akceleratory dzielimy na **liniowe i kołowe**.
- ▣ Pierścień zapewnia stopniowe przyspieszanie i cząsteczki mogą krążyć wewnątrz niego wiele razy, niestety naładowane cząsteczki tracą energię na skutek promieniowania powstałego podczas ruchu po krzywej. Maksymalnie zredukowanie tego efektu wymaga zbudowania wirazy o wielkim promieniu łuku. **MAGNESY !**
- ▣ Poruszanie się po linii prostej usuwa tę niedogodność. Pociąga jednak konieczność stosowania bardzo wydajnych sposobów przyspieszania, bowiem cząsteczka przebiega przez urządzenie tylko jeden raz. **RF !**

Podsumowanie

- ▣ Przyspieszamy cząstki we wnękach rezonansowych polem RF
- ▣ Kierunek ruchu modyfikujemy polem B
- ▣ Akcelerator liniowy – tylko jedno przejście
- ▣ Akcelerator kołowy – wielokrotne przyspieszanie
- ▣ Zwiększanie promienia zmniejsza straty

Power Consumption

■ LEP:

B = 0.135 Tesla

$$P = R \cdot I^2$$

I = 4500A; R = 1mΩ → P = 20 kW / magnet

ca. 500 magnets → P = 10 MW

■ LHC:

$$B \propto I$$

→ B_{max} = 8.38 T → I = 280000 A

→ P = 78 MW / magnet

ca. 500 magnets → P > 39 GW

→ *superconducting technology!*

8.4 T is at the limit of available technology!

Elena Wildner

Dziękuję za uwagę



Ale fajny ten
akcelerator...

