Introduction to accelerators

Wstęp do fizyki akcelaratorów
czyli
Jak to działa

Sławomir Wronka, 21.05.2007r

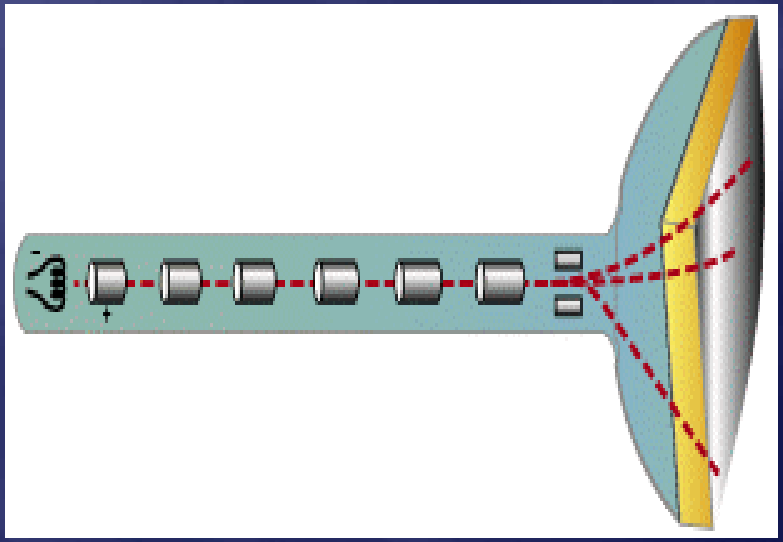
Akcelerator – co to takiego ?

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

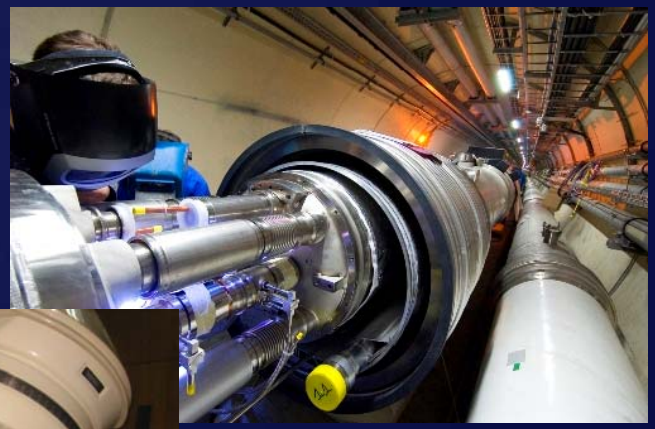


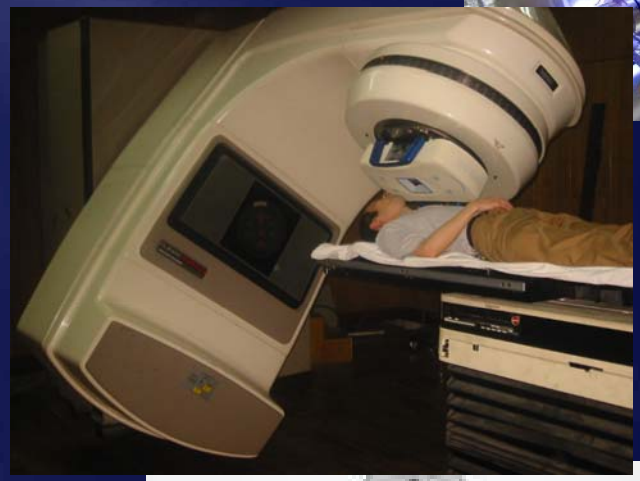
Elektrony są przyspieszane w próżni w kierunku dodatnio naładowanej elektrody. Pola elektromagnetyczne prowadzą wiązkę do ekranu.

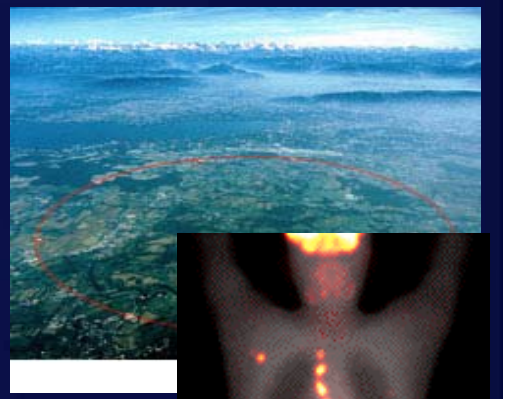
W miejscach, gdzie wiązka uderza, ekran robi się jasny, budując w ten sposób obraz.

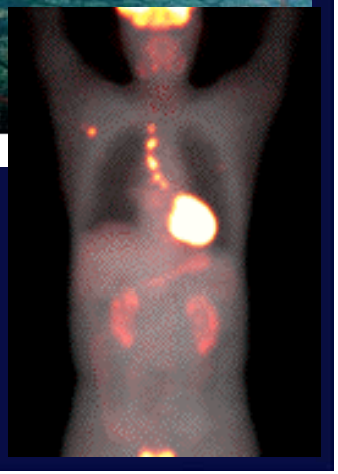
Akceleratory – do czego ?

- Badania naukowe
- Medycyna
- Przemysł
- .....









Akceleratory – a po co ?

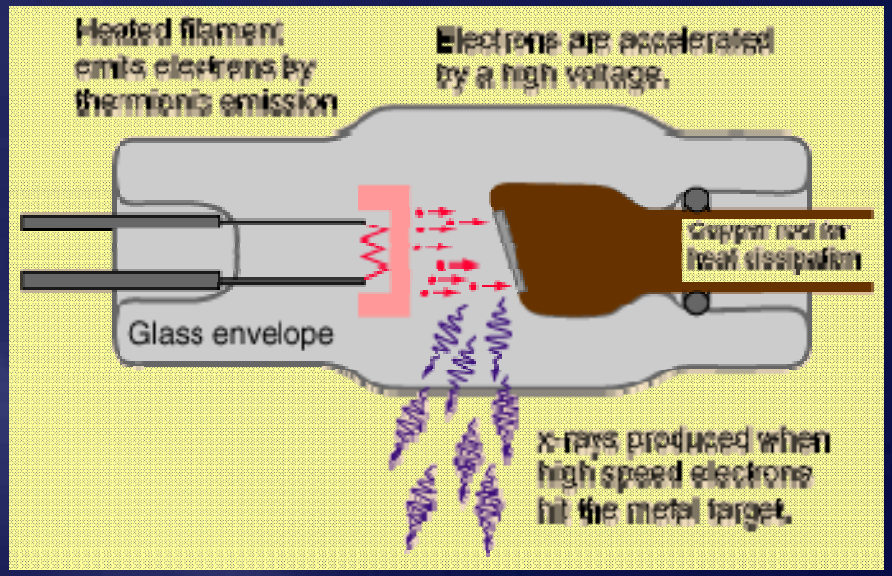
Accelerators in the world (2002)

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

Odkrycie promieniowania X

Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)



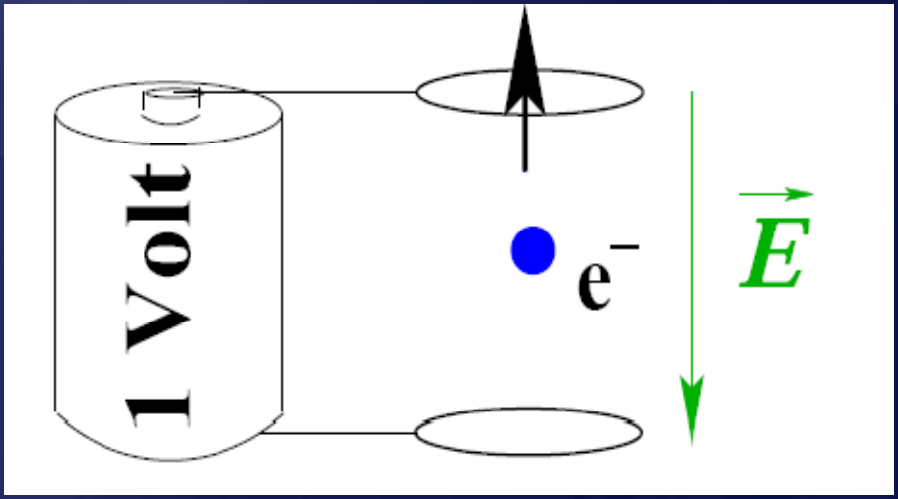
Bertha Röntgen's Hand 8 Nov, 1895

Modern radiograph of a hand

Akceleratory – jak ?

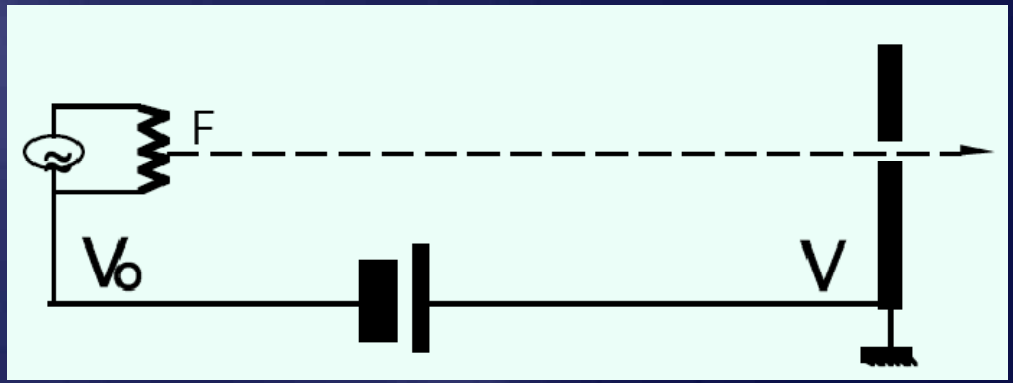
- Metody DC
- Akceleratory liniowe
- Akceleratory kołowe

1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ J



keV, MeV, GeV, TeV

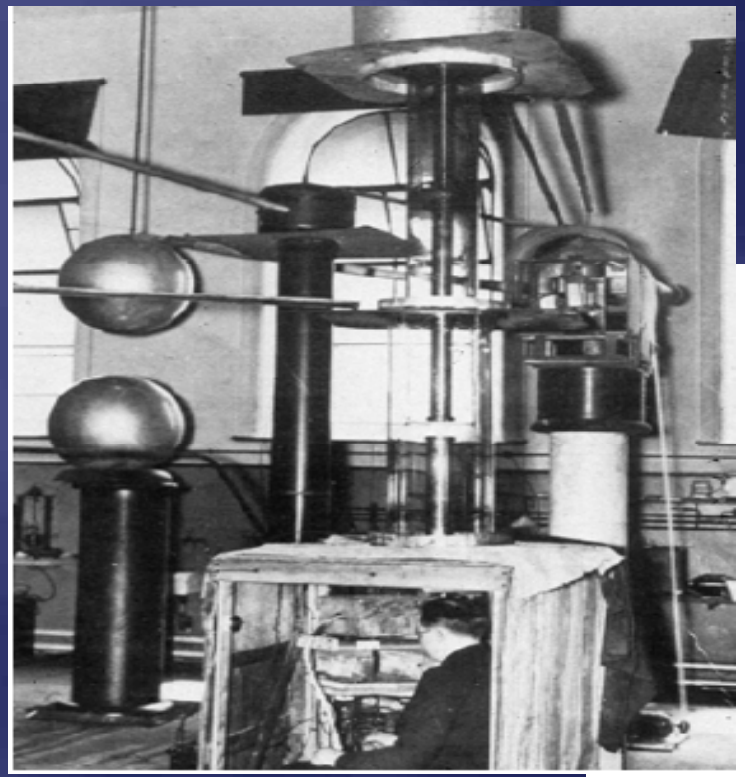
Akceleratory DC



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

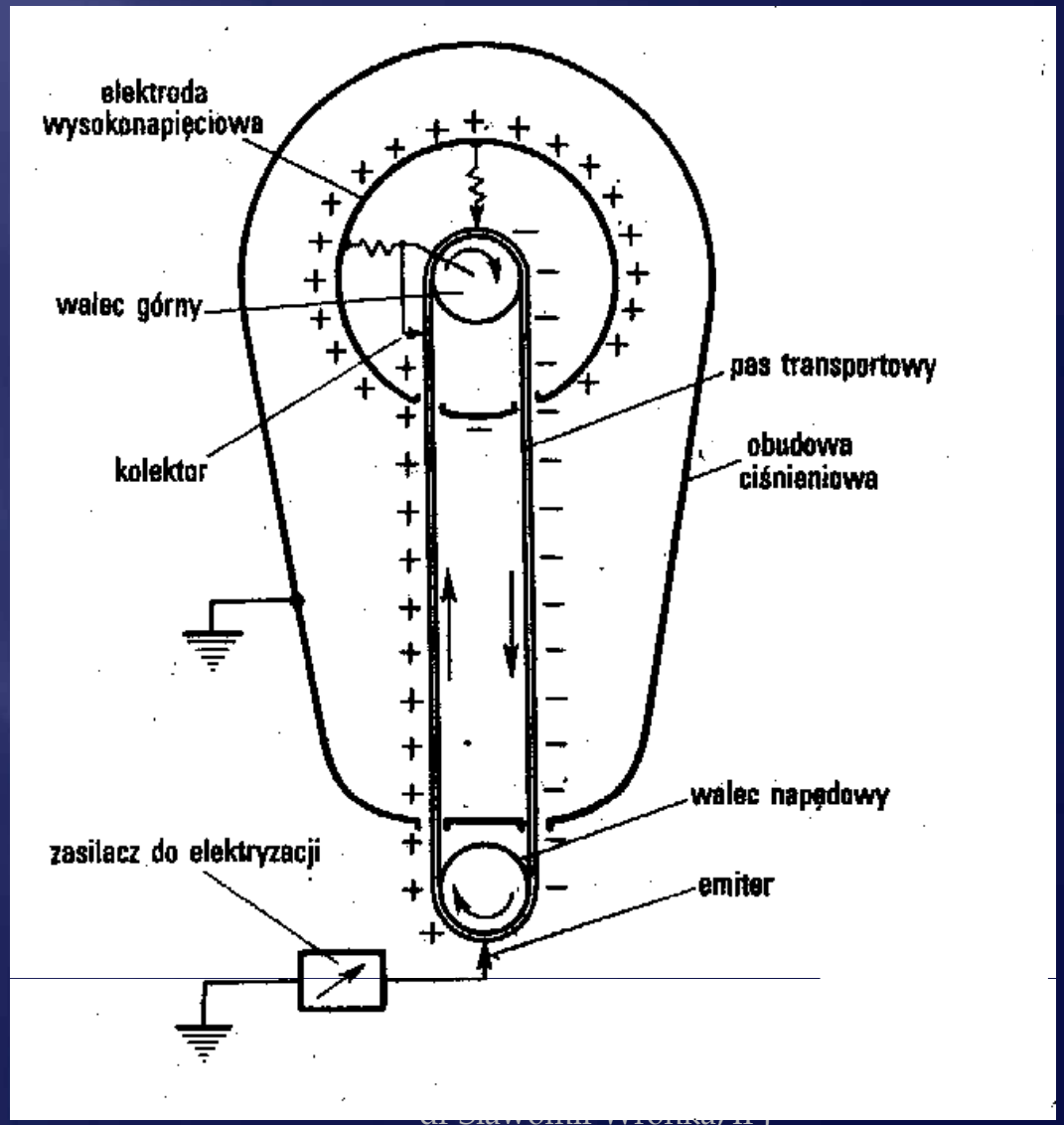
- Wiązka przechodzi tylko raz
- Im wyższy potencjał tym większa energia

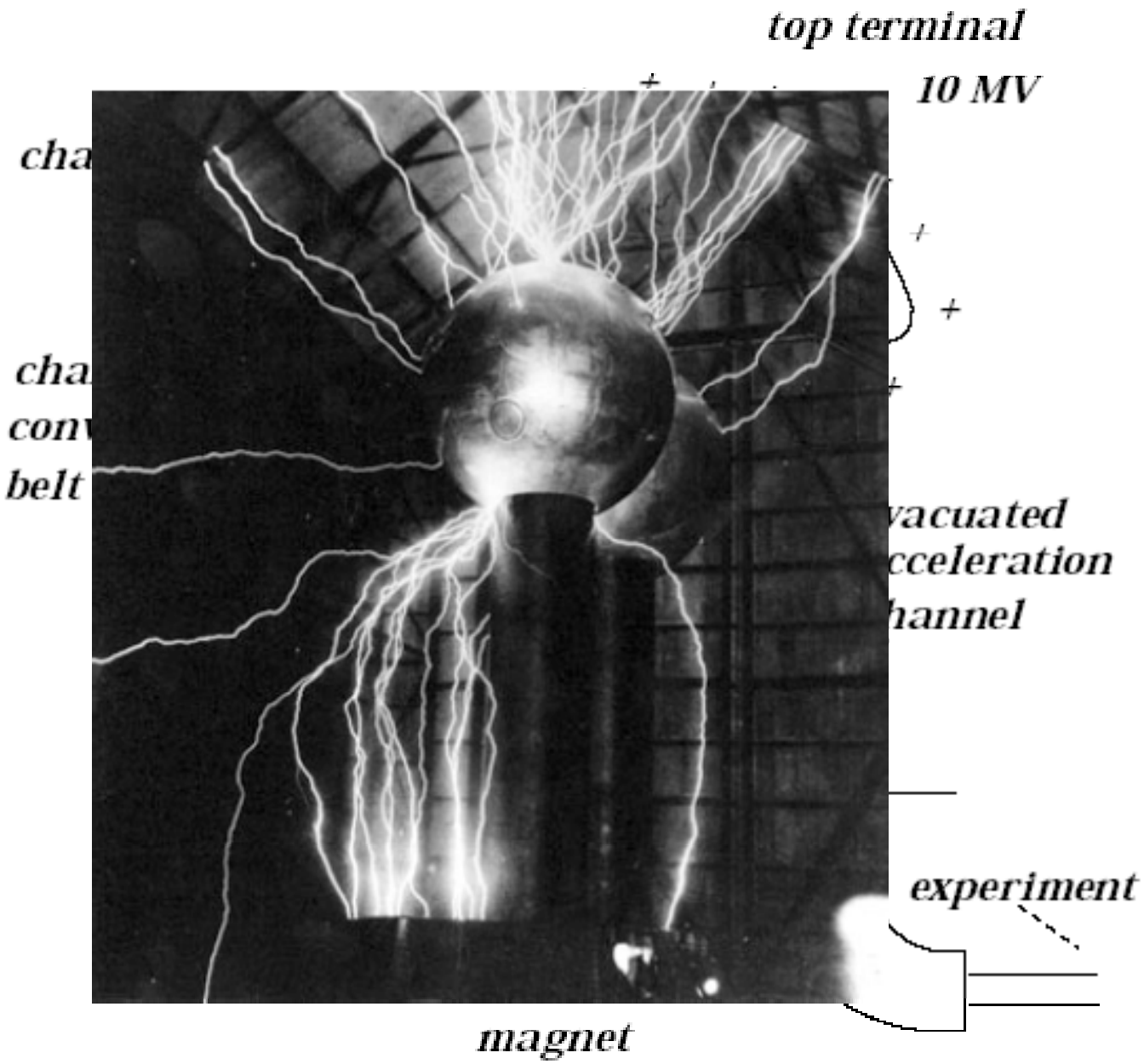
1932 – pierw



Earth 0V

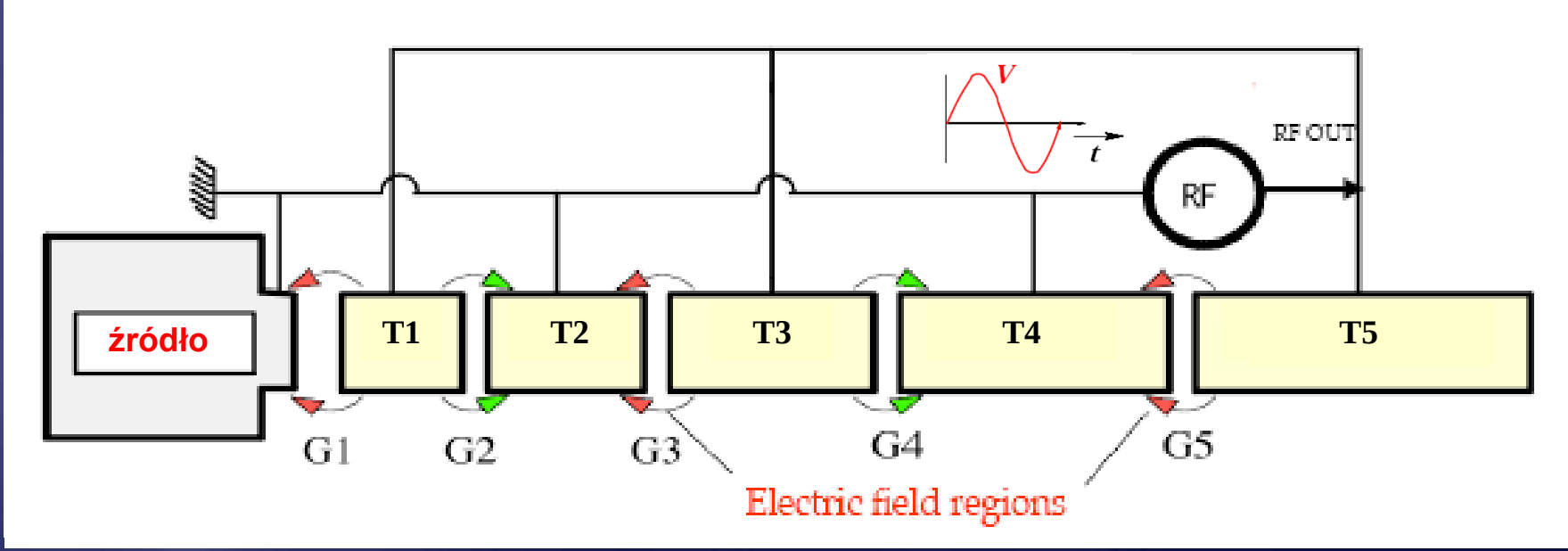
Generator Van de Graaffa




top terminal
10 MV
cha
cha
con
belt
vacuated
cceleration
hannel
experiment
magnet

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:

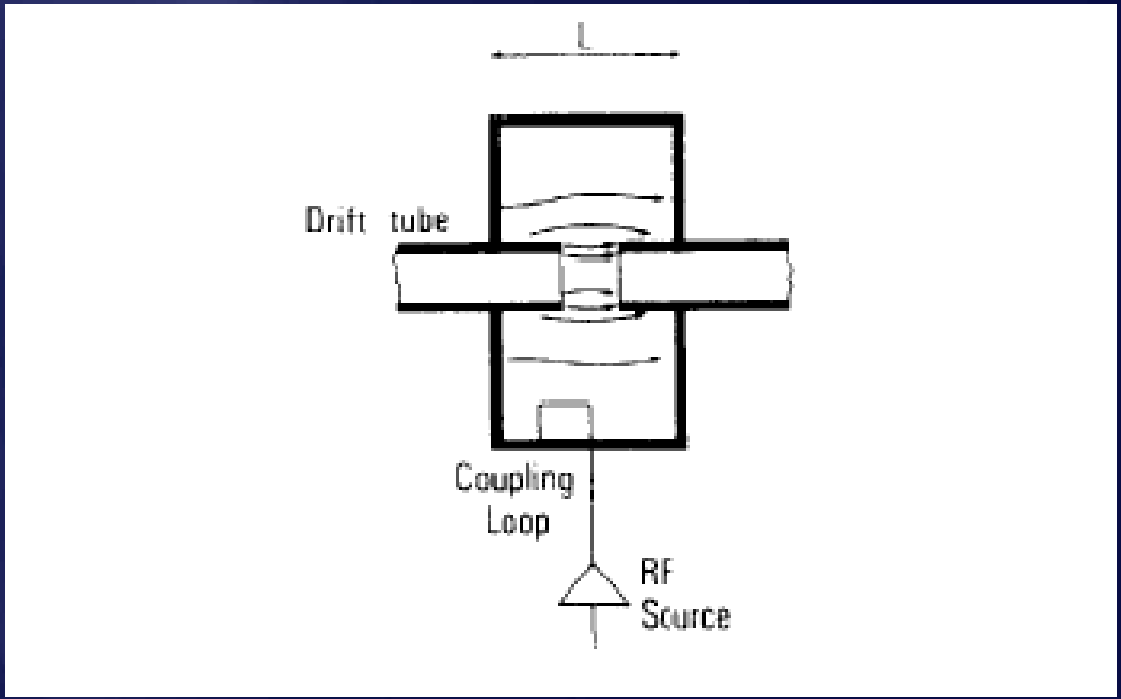
$$L = \frac{vT}{2}$$

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 $\beta = v/c = 4.6\ 10^{-2}$, 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



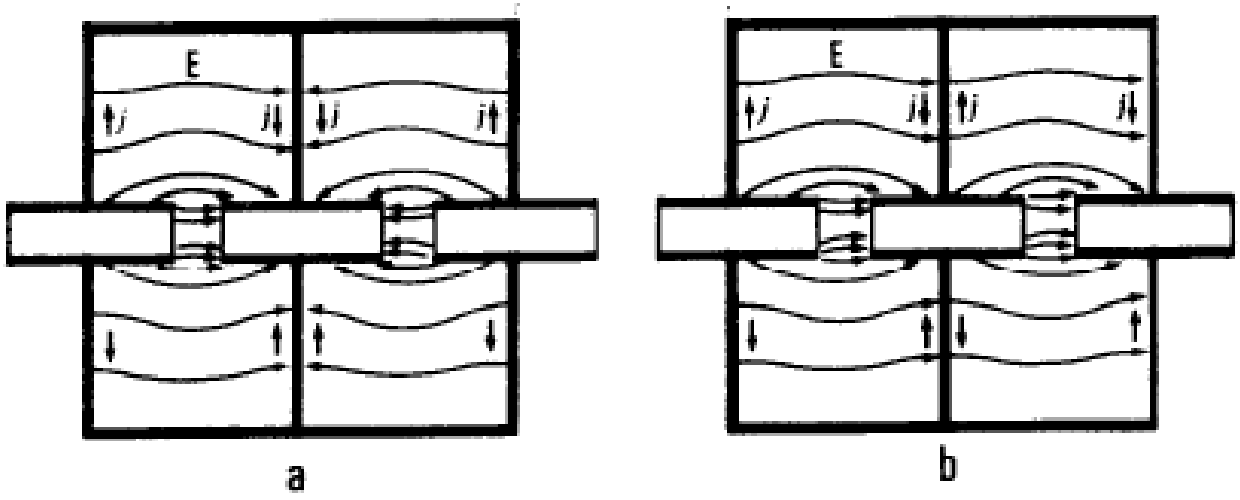


Fig. 4 Adjacent single-gap cavities: a) π mode, b) 2π mode

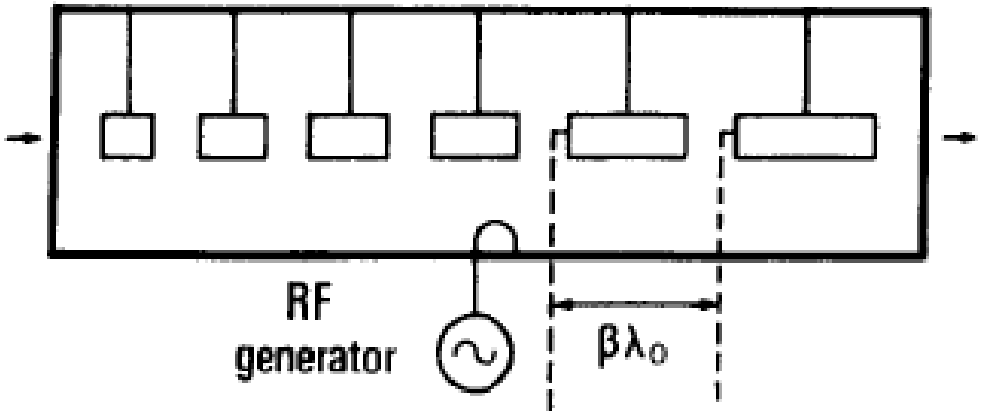
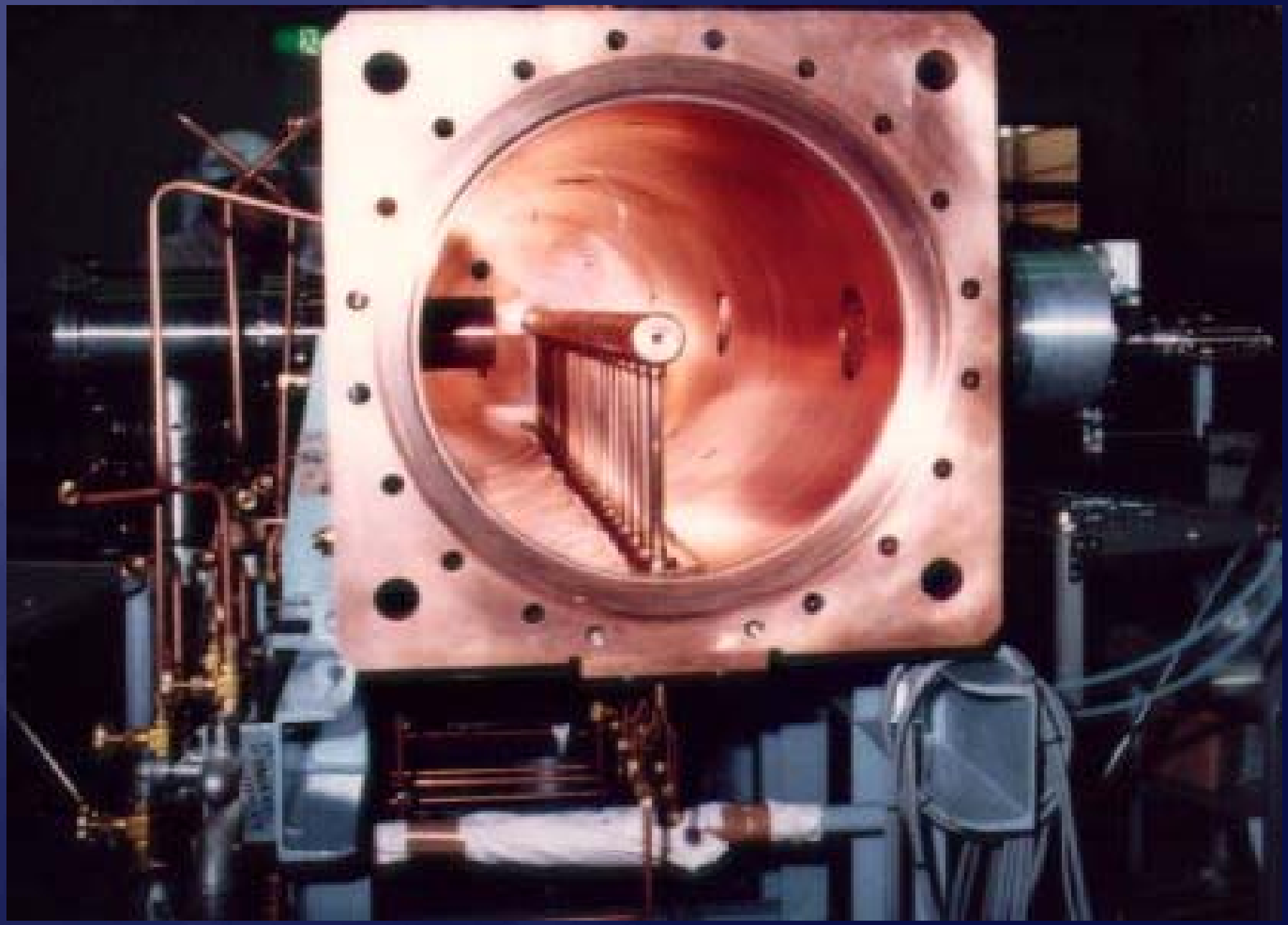


Fig. 5 Alvarez-type structure

In the 2π mode of operation the synchronism condition is:

$$L = vT = \beta\lambda_0$$



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.

- 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

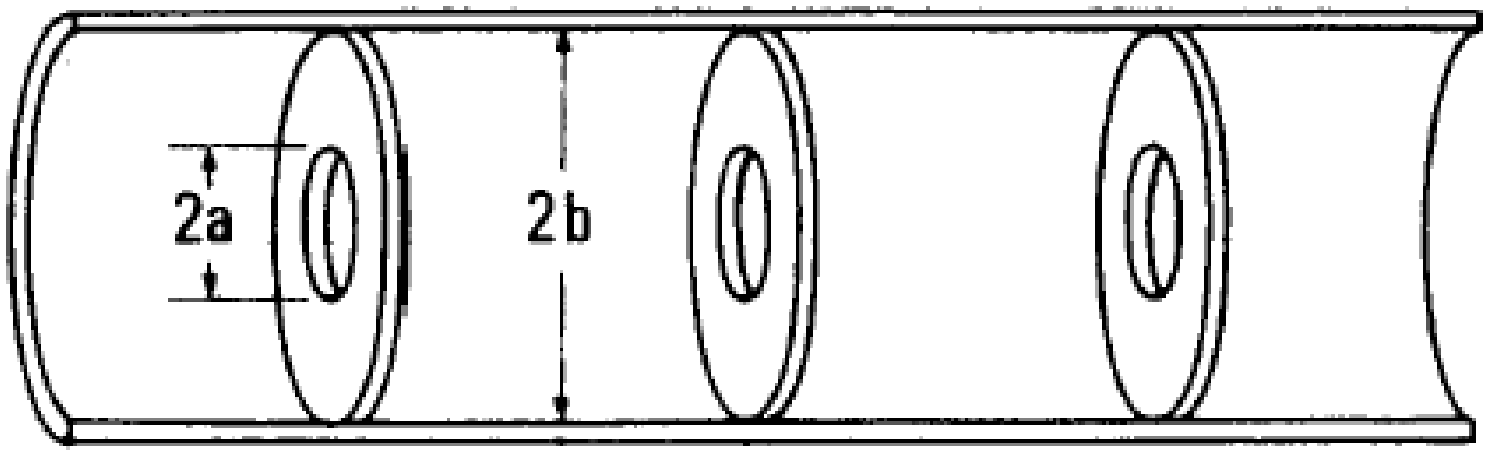
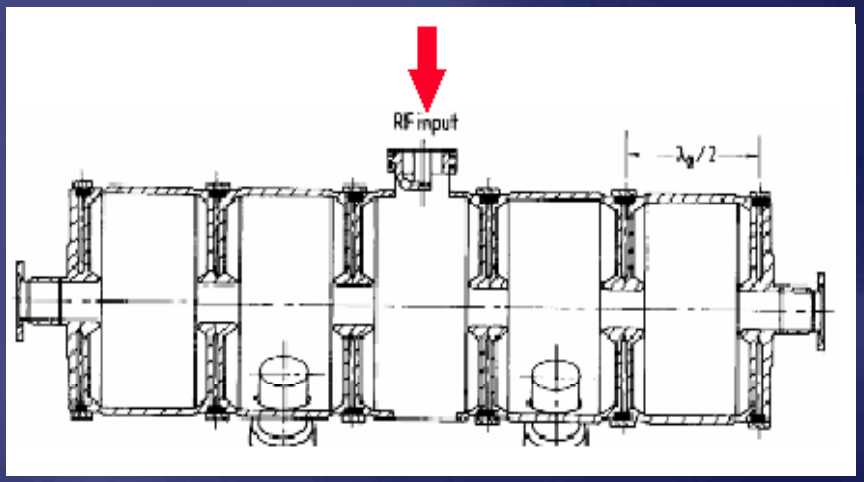


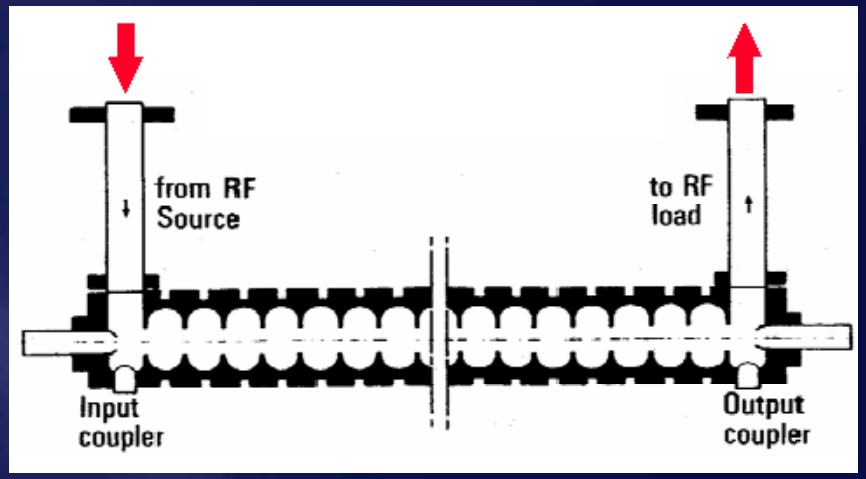
Fig. 6 Disk-loaded structure

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

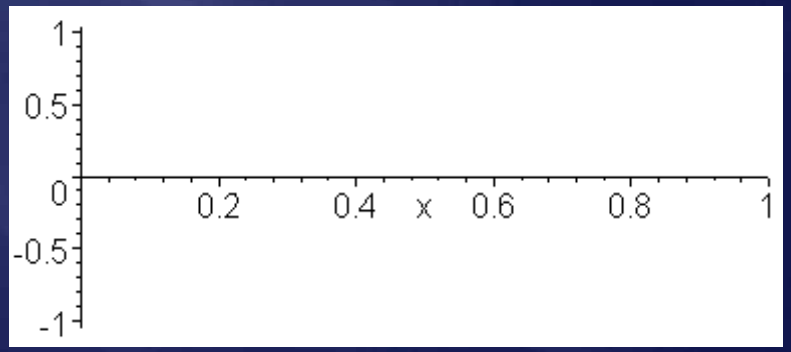
Przyspieszanie elektronów

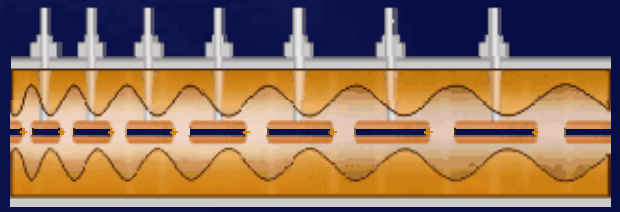


Standing wave

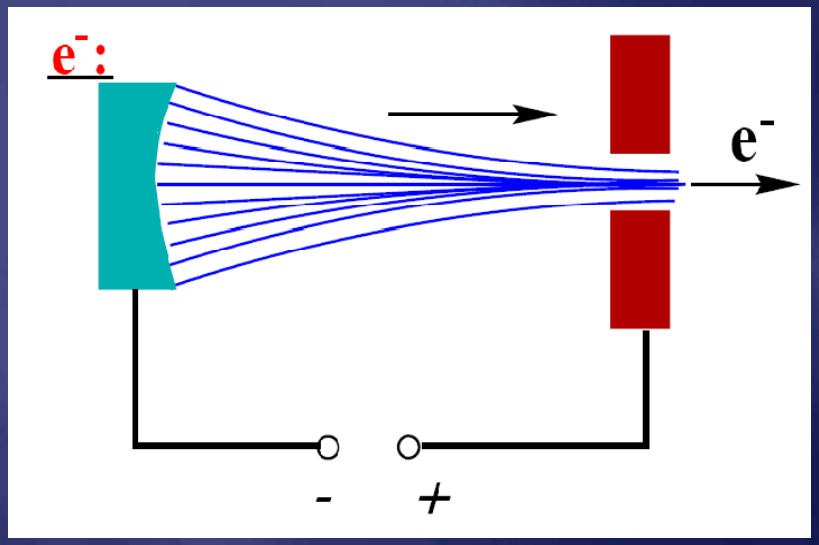


Moving wave





A tak przy okazji – skąd wziąć cząstki ?

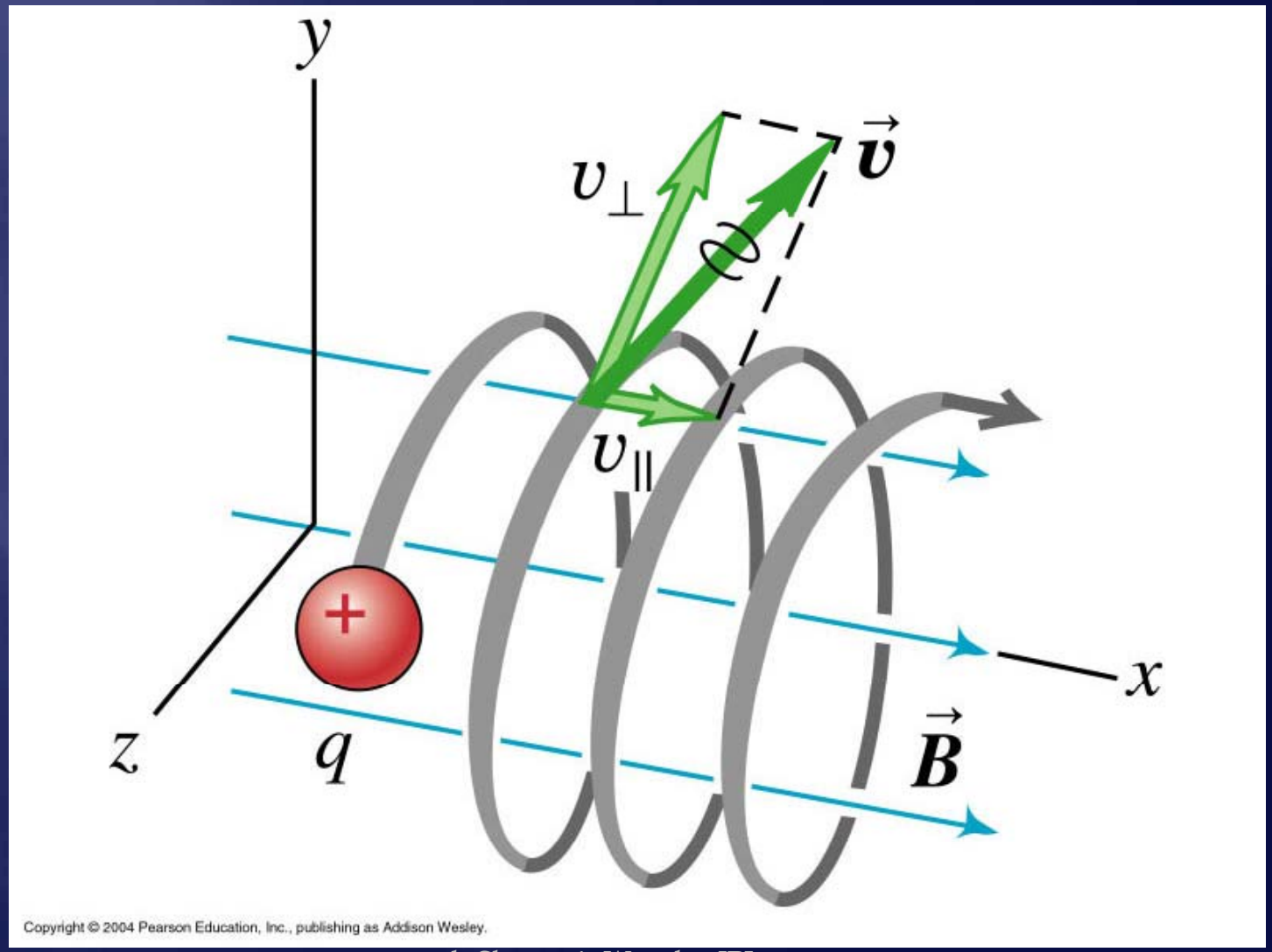


p
Butla z wodorem:

$$H_2 + e^- \rightarrow H_2^+ + 2\,e^-$$
$$H_2^+ + e^- \rightarrow H^+ + H + e^-$$
$$H + e^- \rightarrow H^+ + 2\,e^-$$

Akceleratory kołowe wcz

Ruch cząstki w polu magnetycznym



Ruch cząstki w polu magnetycznym

Wartość siły Lorenza: $$F = q \cdot v_{\perp} \cdot B$$

Siła skierowana jest prostopadle do wektora prędkości

↓

Siła Lorenza to siła dośrodkowa

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

Ładunek w polu magnetycznym

Okres ruchu:

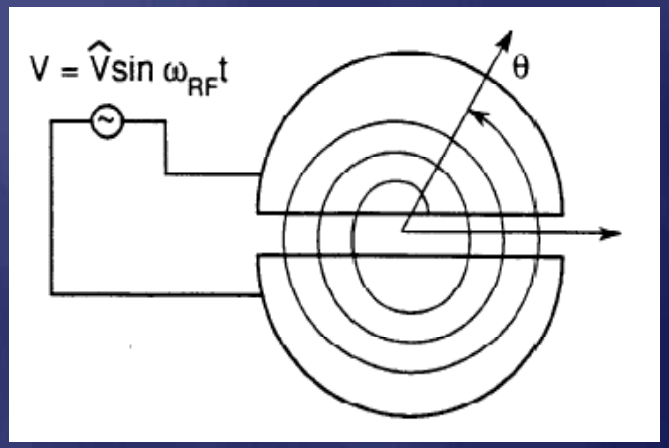
$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v_\perp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v_\perp}{q \cdot B \cdot v_\perp} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

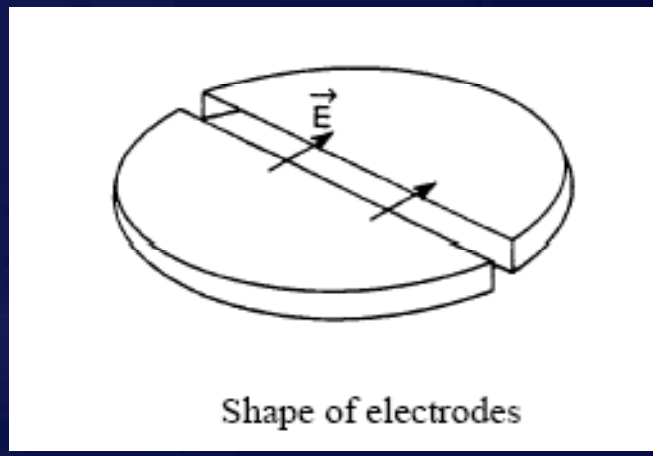
Częstość kołowa:

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

Częstość cyklotronowa niezależna od prędkości

Cyklotron /Lawrence, 1932/

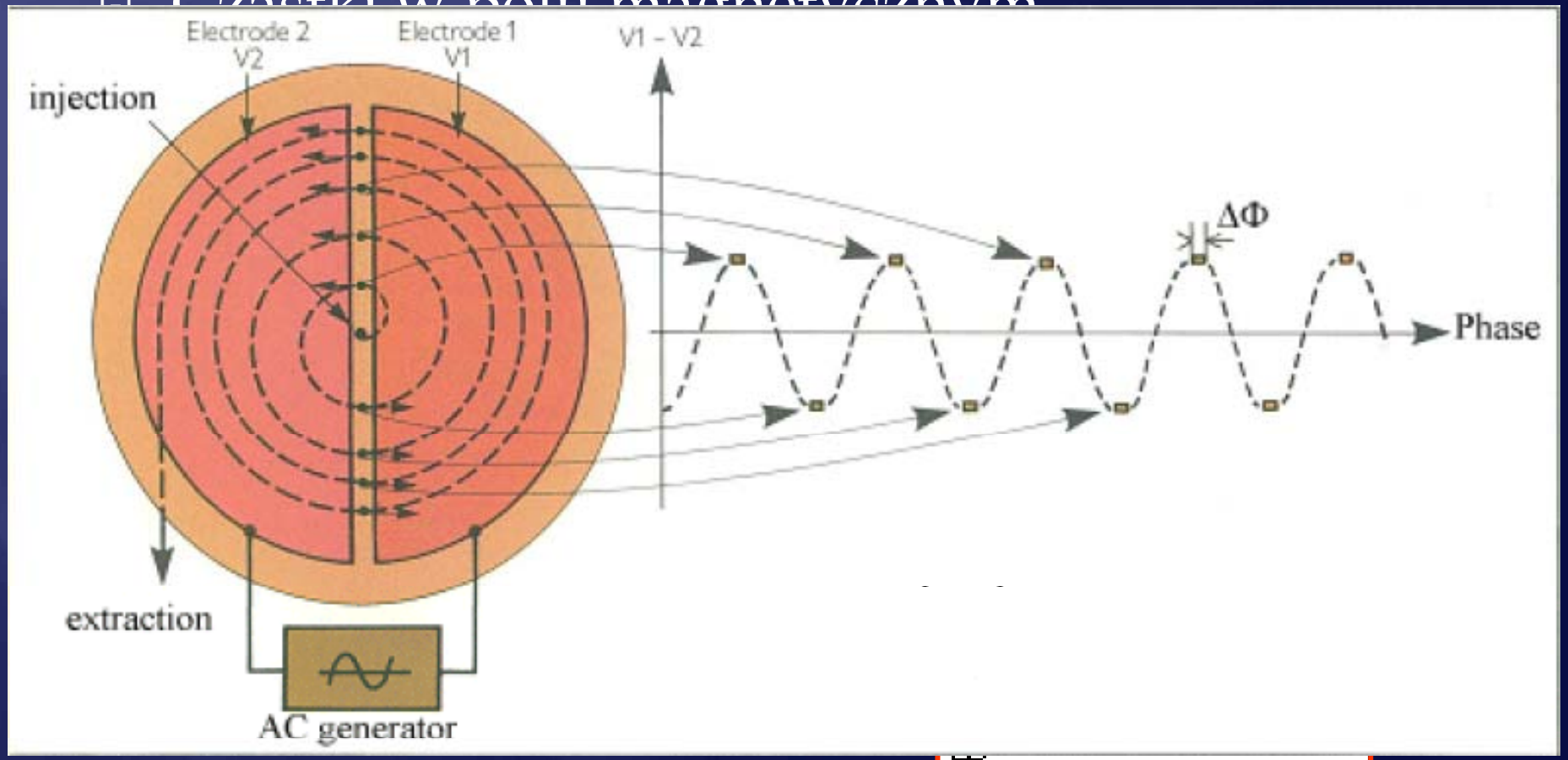




Nagroda Nobla 1939

Cyklotron

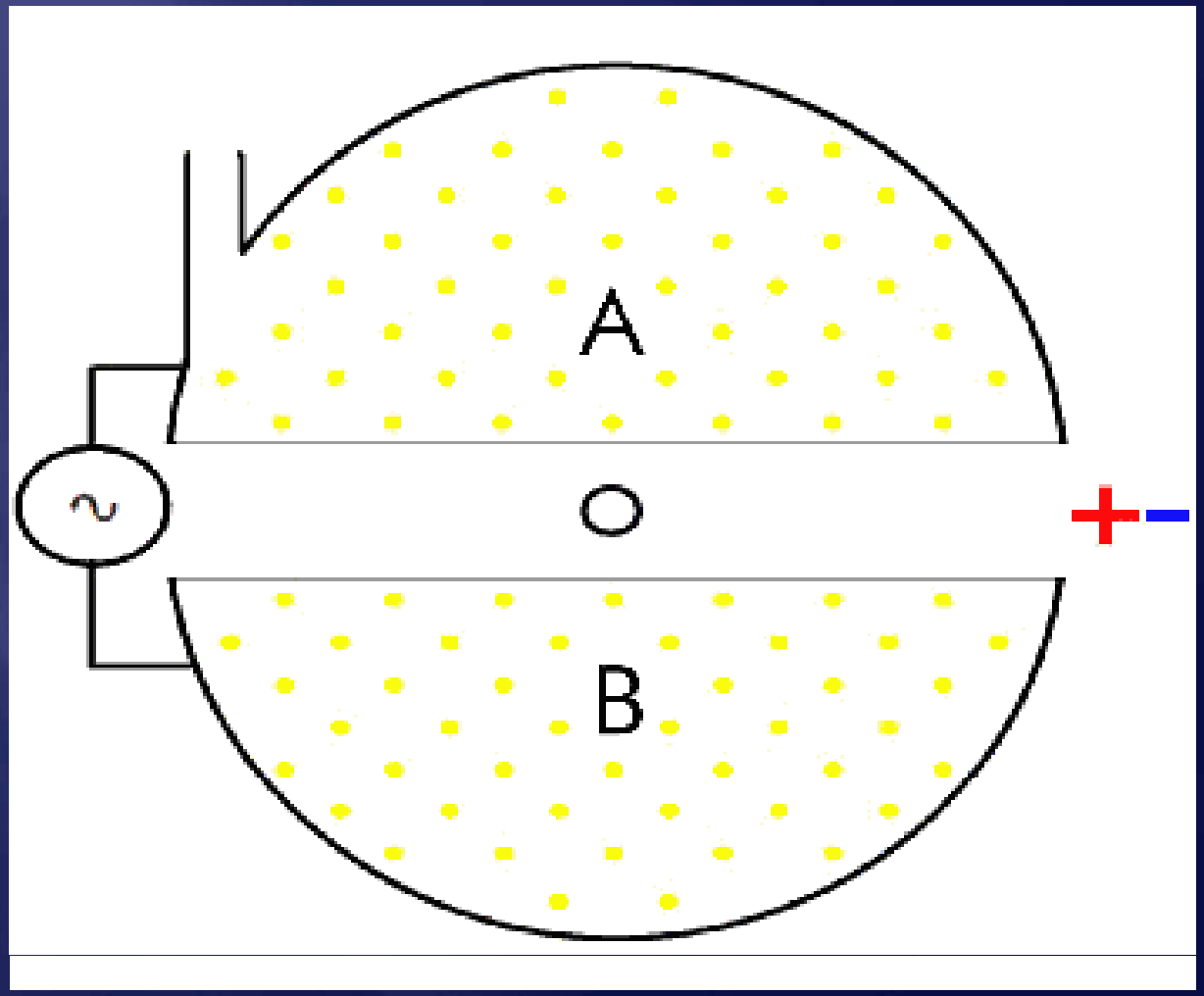
- Cząstki w polu magnetycznym



Cyklotron

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

Cyklotron

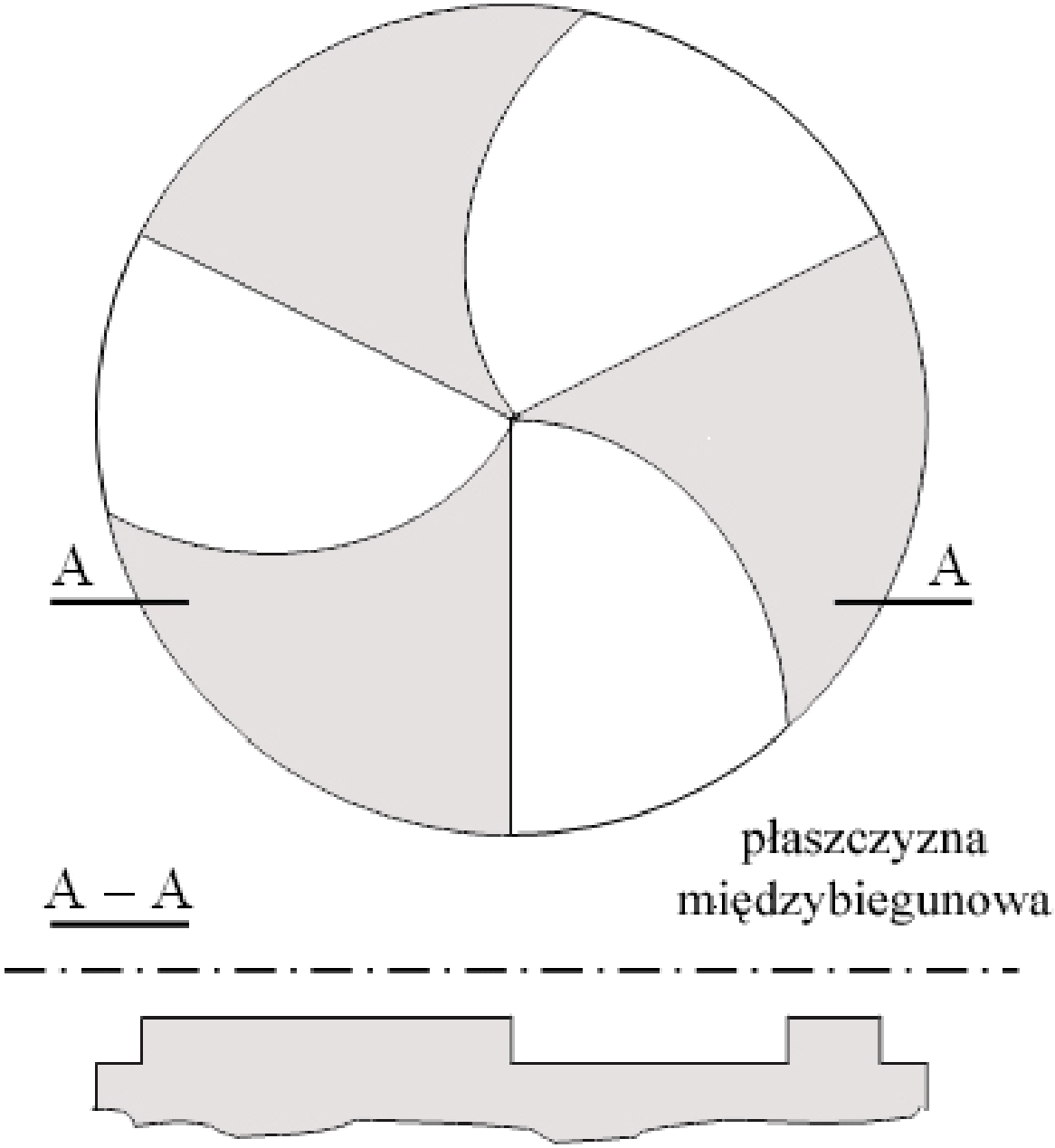


Cyklotron izochroniczny

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

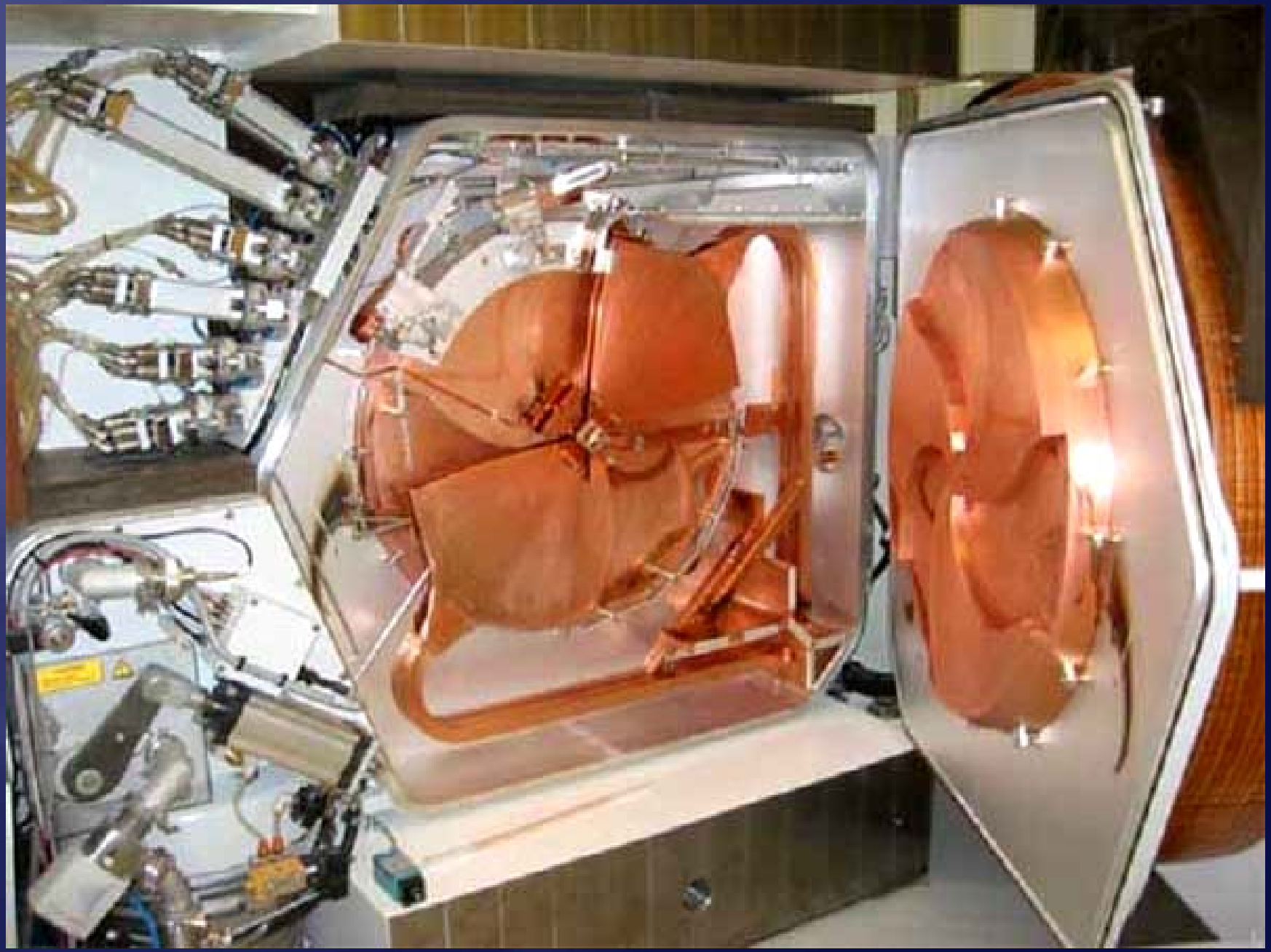
Cyklotron izochroniczny

- 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
A – A

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.



Synchrocyklotron /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

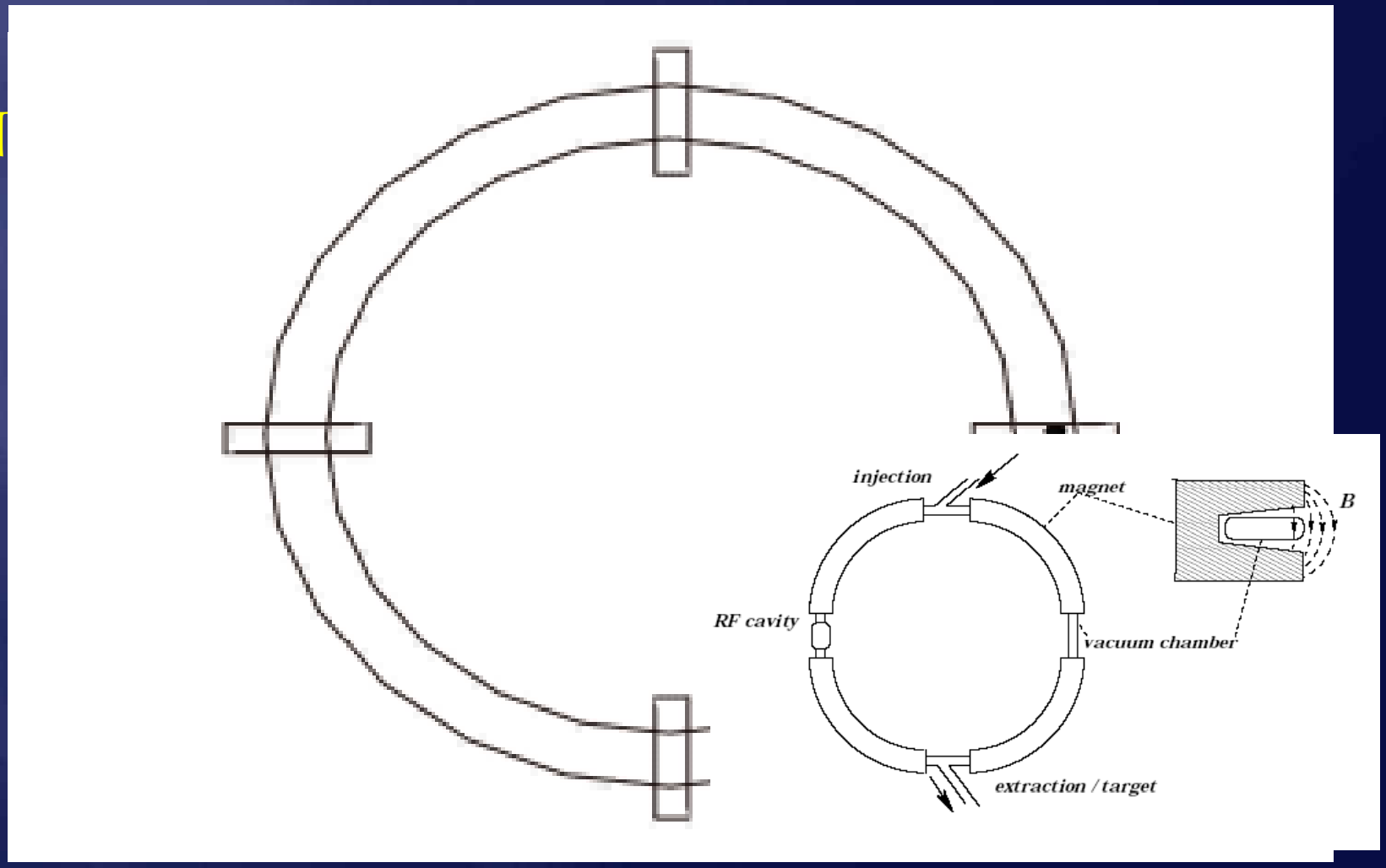
Jeśli zsynchronizowana zostanie częstość obiegu cząstek w pierścieniu akceleracyjnym z częstością zmiany pól: elektrycznego i magnetycznego, to proces akceleracji może odbywać się bez zmiany promienia okręgu po którym krążą cząstki.

/Oliphant 1943/

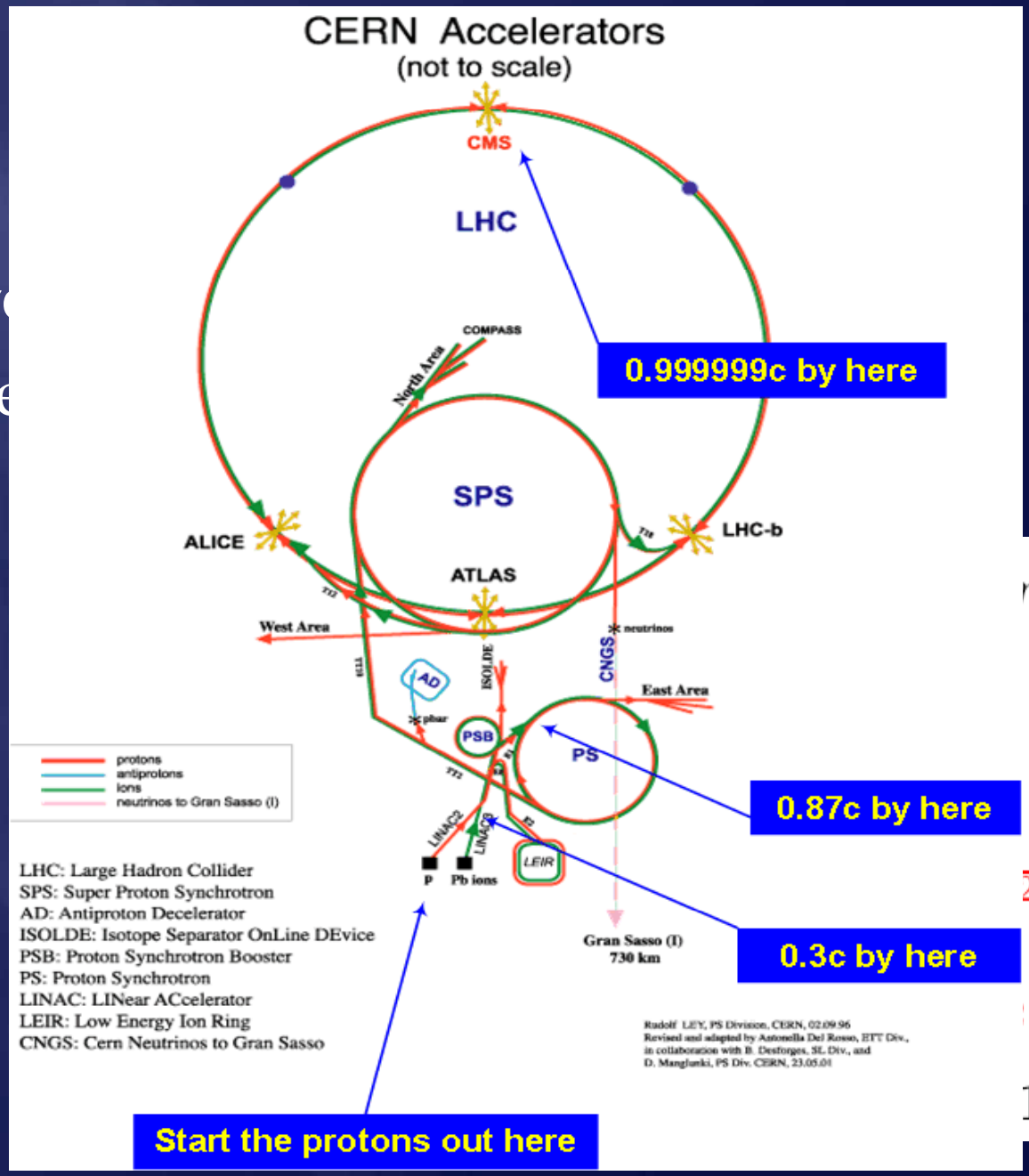
Synchrotron

N

-
-
-



- Storag
- Collide



m

$^2 + 2E_1 m$

115 GeV

Dlaczego duże akceleratory ?

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

- Moc strat $\sim 1/(r^2 * m_0^4)$

Koncepcja „Luminosity” = „Świetlność”

- Zderzamy dwie wiązki, prawdopodobieństwo interakcji ~ N^2/A
- Zderzamy je f razy na sekundę

- Ilość oddziaływań ~ $f * N^2/A$

MIN

MAX

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

Przyspieszanie cząstek

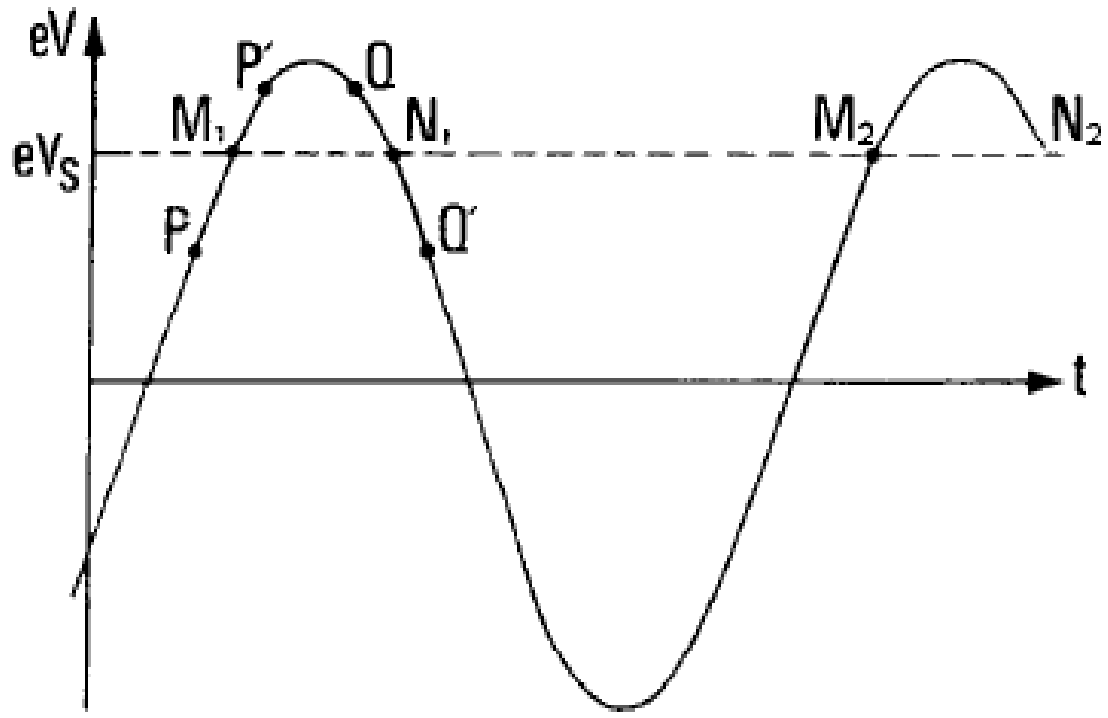
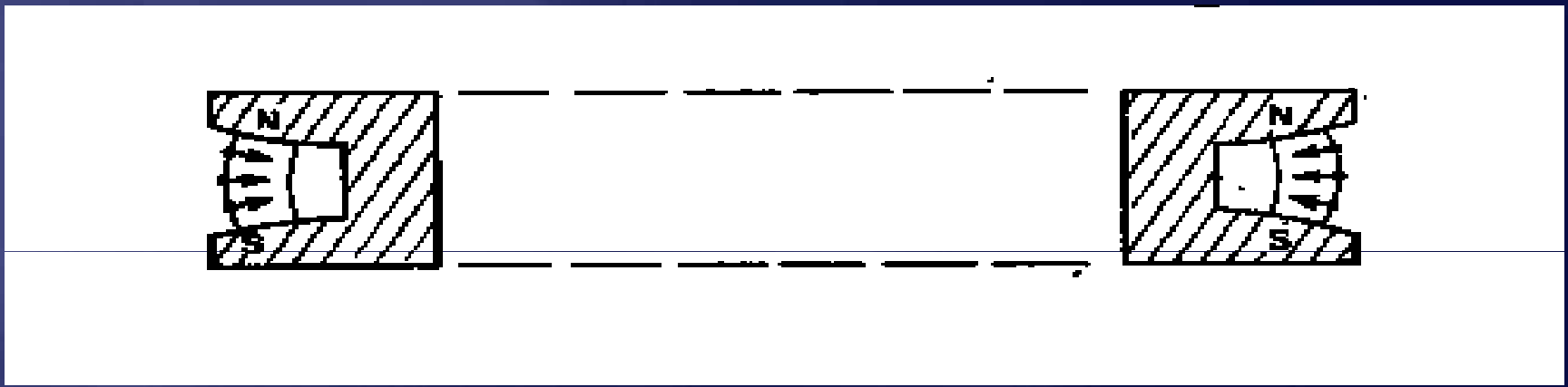
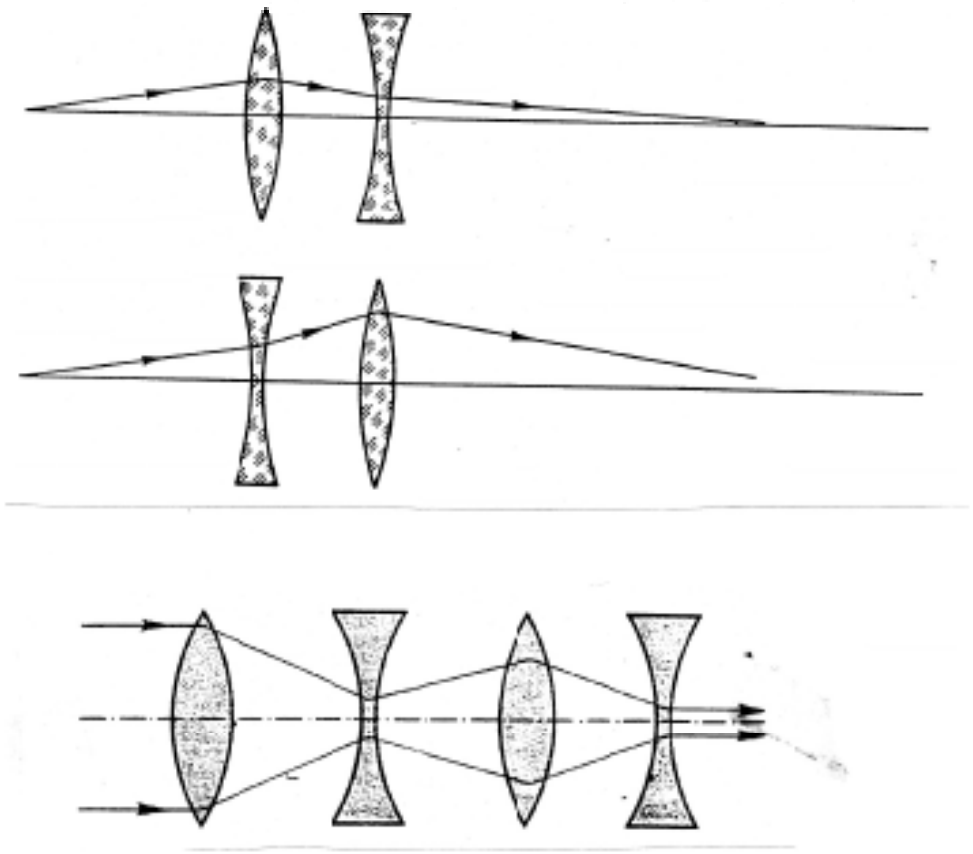


Fig. 20 Particle phases relative to the RF field

Ogniskowanie słabe

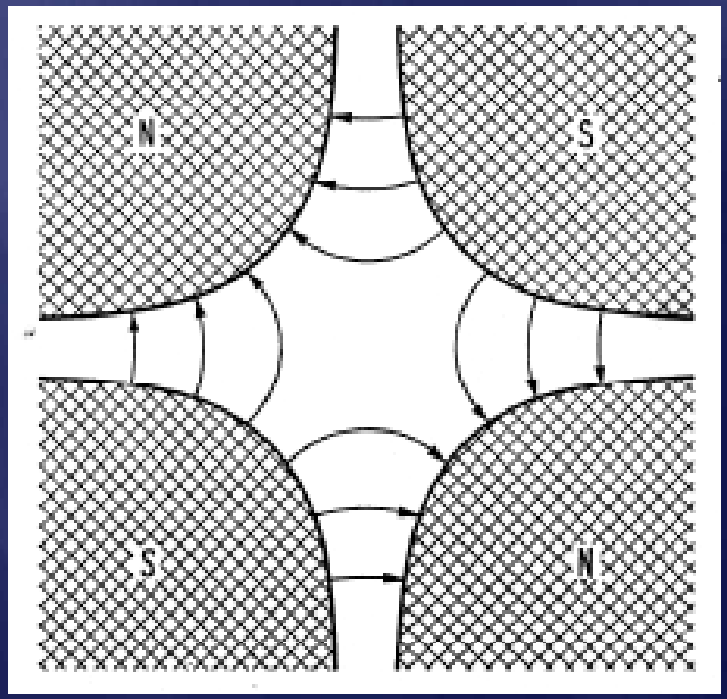


Ogniskowanie silne



Analogia optyczna ilustrująca zasadę silnego ogniskowania

Magnesy kwadrupolowe



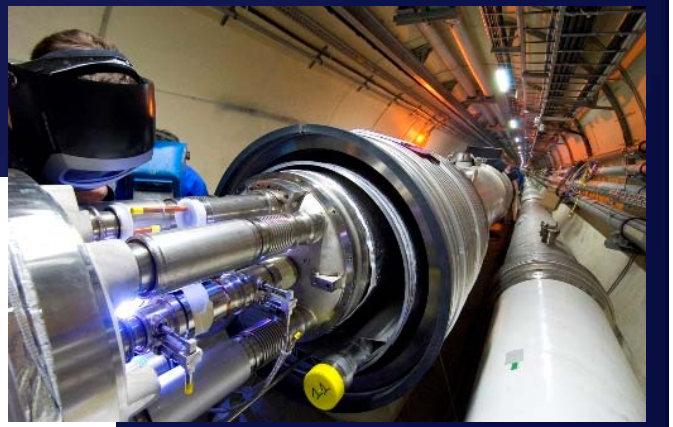
Synchrotron

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=const



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

- *Physics:* → p = 7000 GeV/c
- *LEP tunel:* L = 27000 meter
  - → arcs: L = 22200 meter
  - → R = 3500 meter
- Bending and Focusing: → R = 2784 meter

→ $B_{max} = 8.38$ T → *iron sarturation: 2 Tesla*, *earth: $0.3 * 10^{-4}$ 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 Courant and Snyder

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