

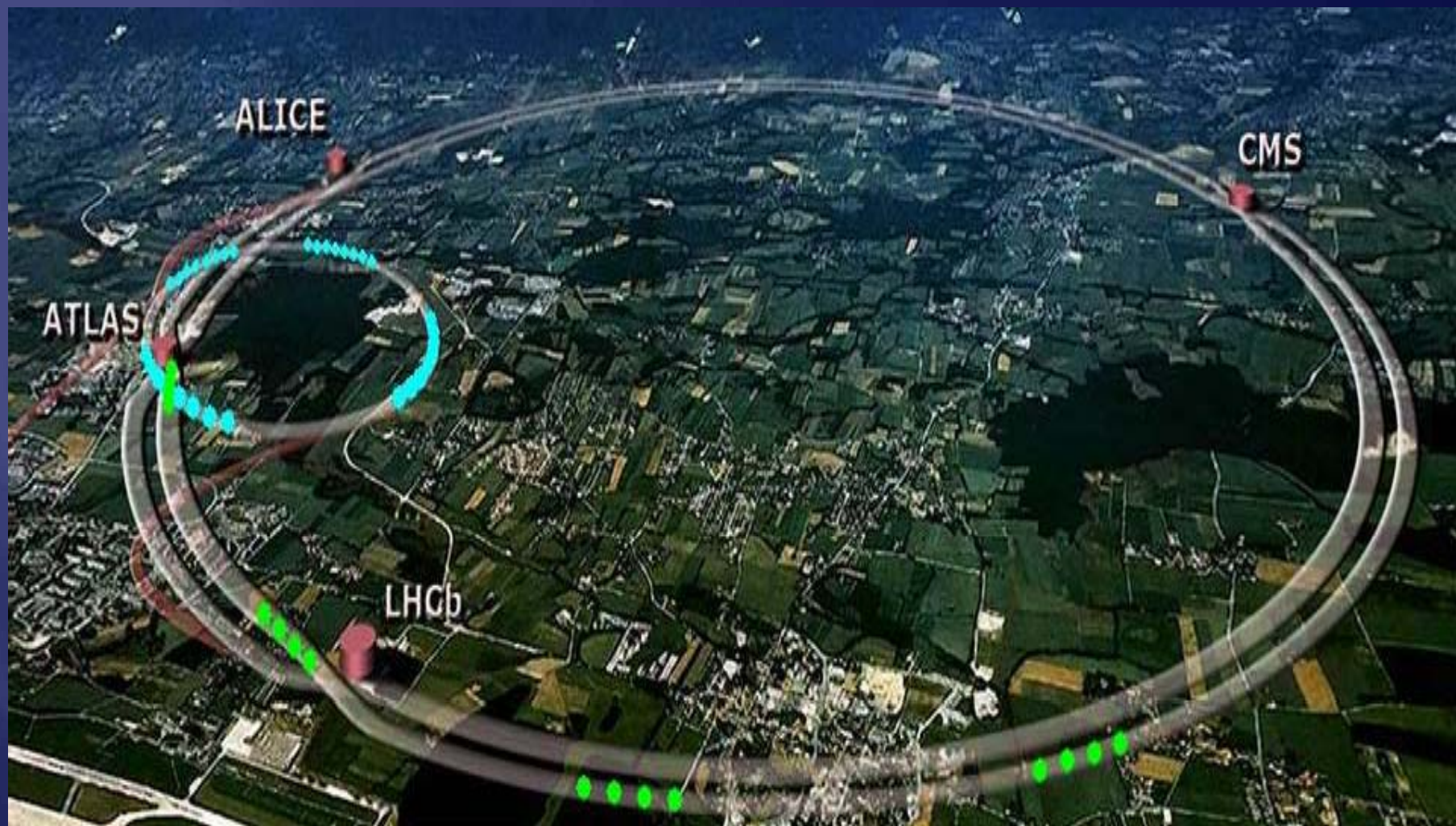


**Introduction to accelerators**

**Wstęp do fizyki akceleratorów**



Sławomir Wronka, 01.04.09r



2009-04-01

dr Sławomir Wronka, IPJ



# 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

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

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

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

# 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

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

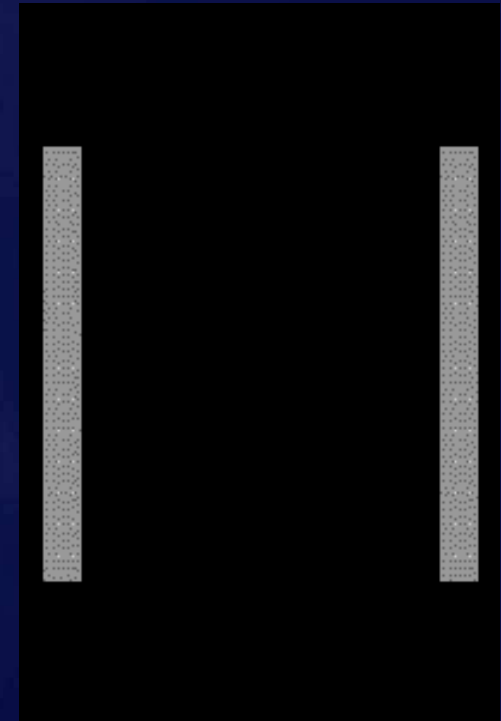
$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

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

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

**Pole magnetyczne** nie zmienia energii cząstek.

Może to zrobić tylko **pole elektryczne**.



# Akcelerator – co to takiego ?



2009-04-01

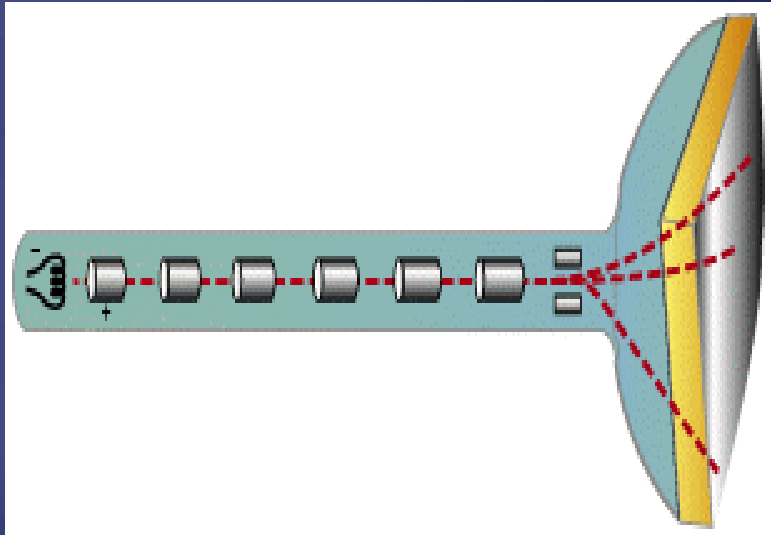
dr Sławomir Wronka, IPJ

# 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.



Pole elektryczne powoduje **zmianę energii** kinetycznej

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

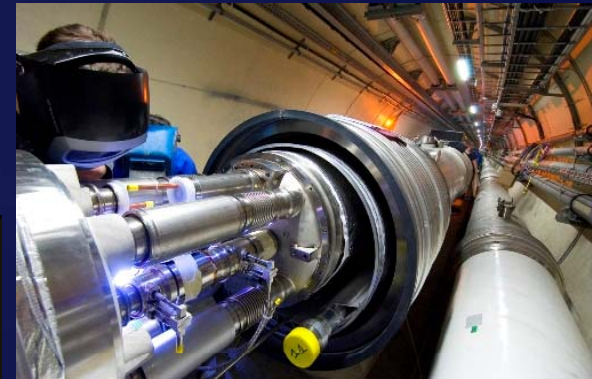
**Np. dla elektronu**

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

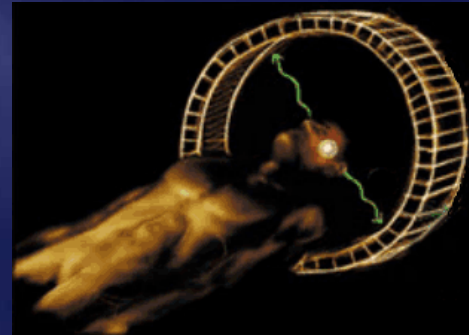
$$\text{Dla } U = 20\text{kV} \rightarrow v \approx 71133 \text{ [km/s]}$$

# Akceleratory – zastosowania

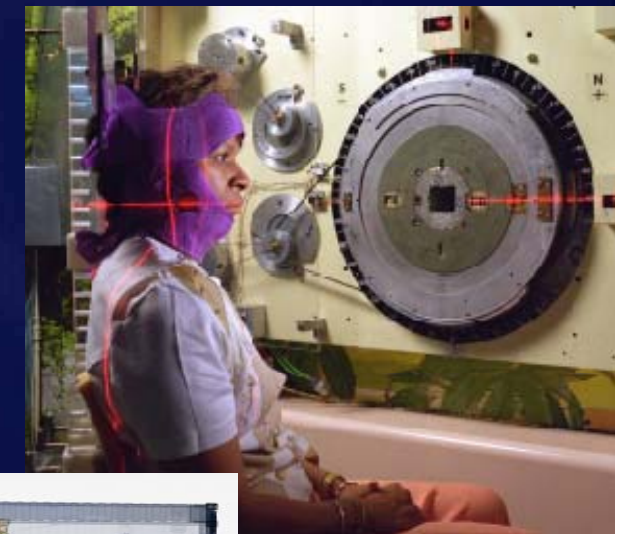
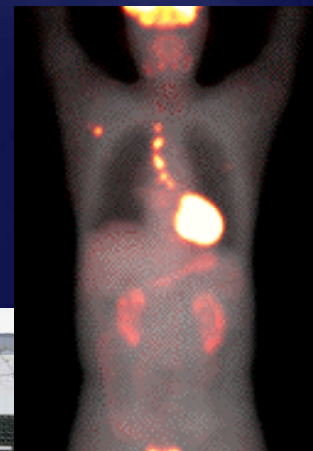
▣ Badania naukowe



▣ Medycyna



▣ Przemysł

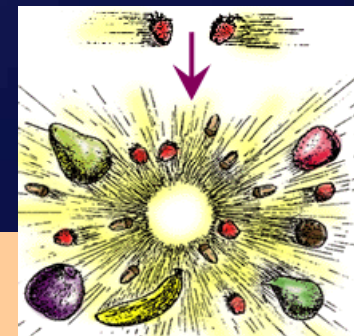


▣ .....



# 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	<b>Total:</b>	<b>17390</b>

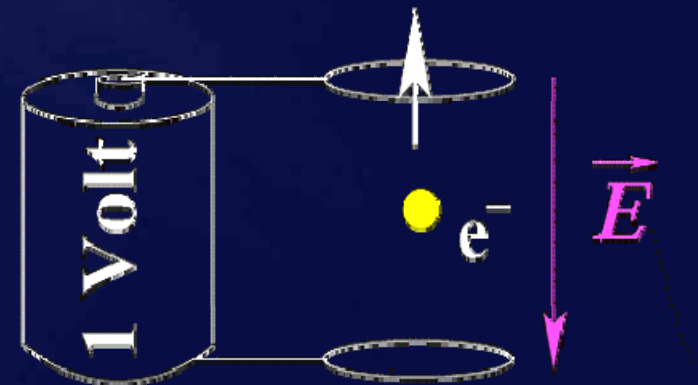
D.Brandt, 2004

# 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*  
( $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$ )

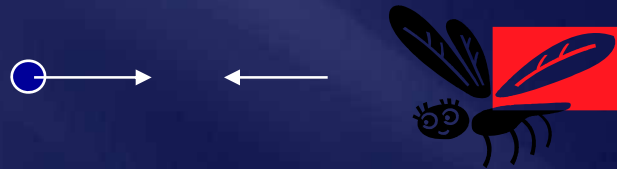
- ▣ Telewizor: 20 keV (20 000 eV)





# A ile to 7 TeV ?

7 TeV LHC Proton = Lecący Komar



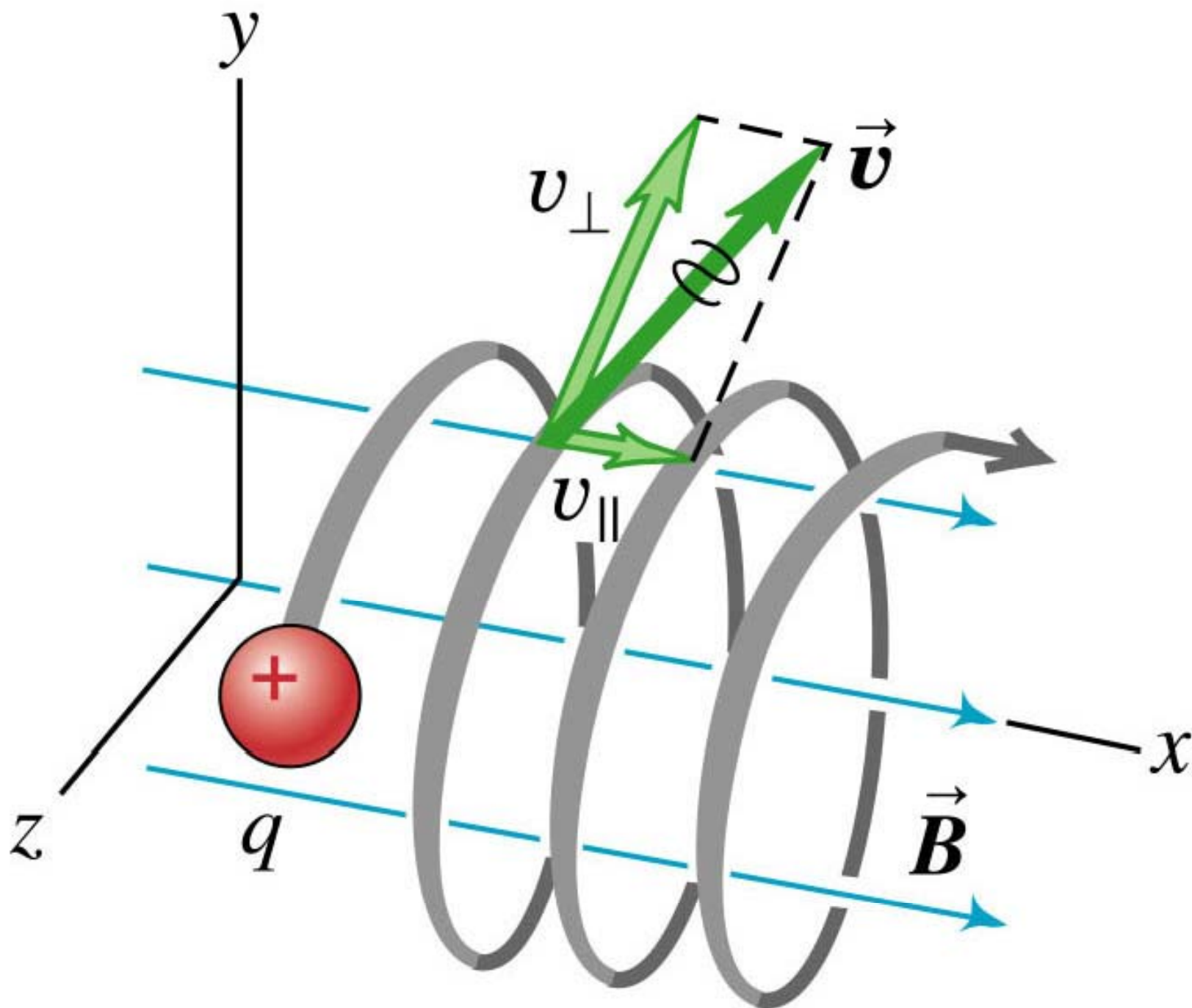
## Wyższe energie? Potrzebowalibyśmy sporo baterii!

- ▣ 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.





# Akceleratorzy – zasada działania

- ▣ *Metody DC*
- ▣ *Akceleratorzy liniowe wcz*
- ▣ *Akceleratorzy kołowe wcz*

# Akceleratory DC

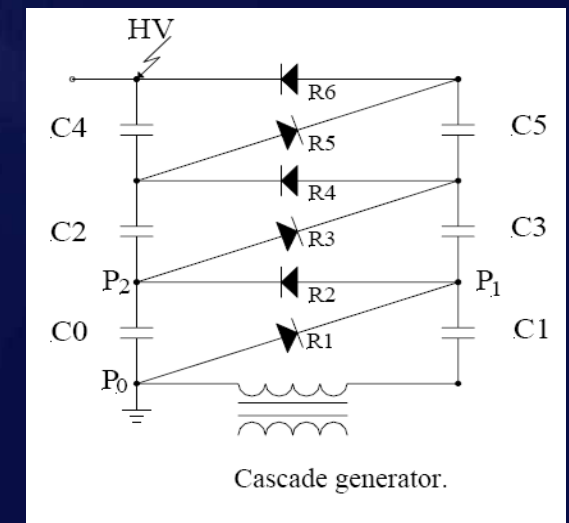
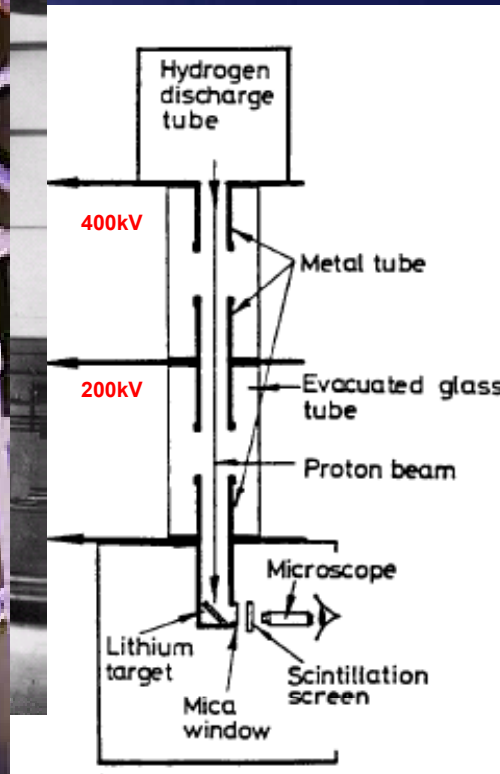


Cząstka nabiera energii poruszając się pomiędzy dwoma potencjałami  $\Delta V = V - V_0$ .

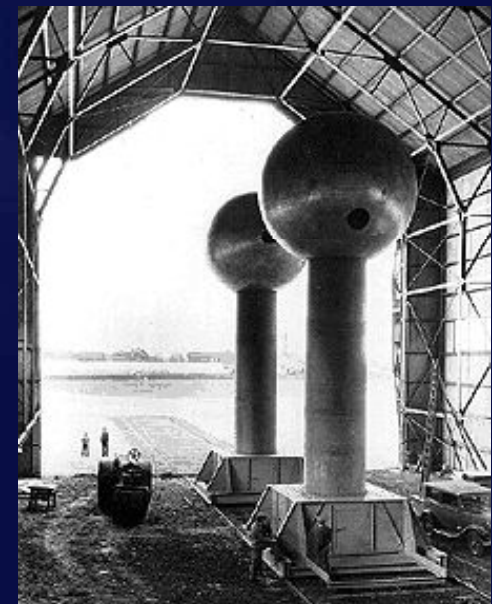
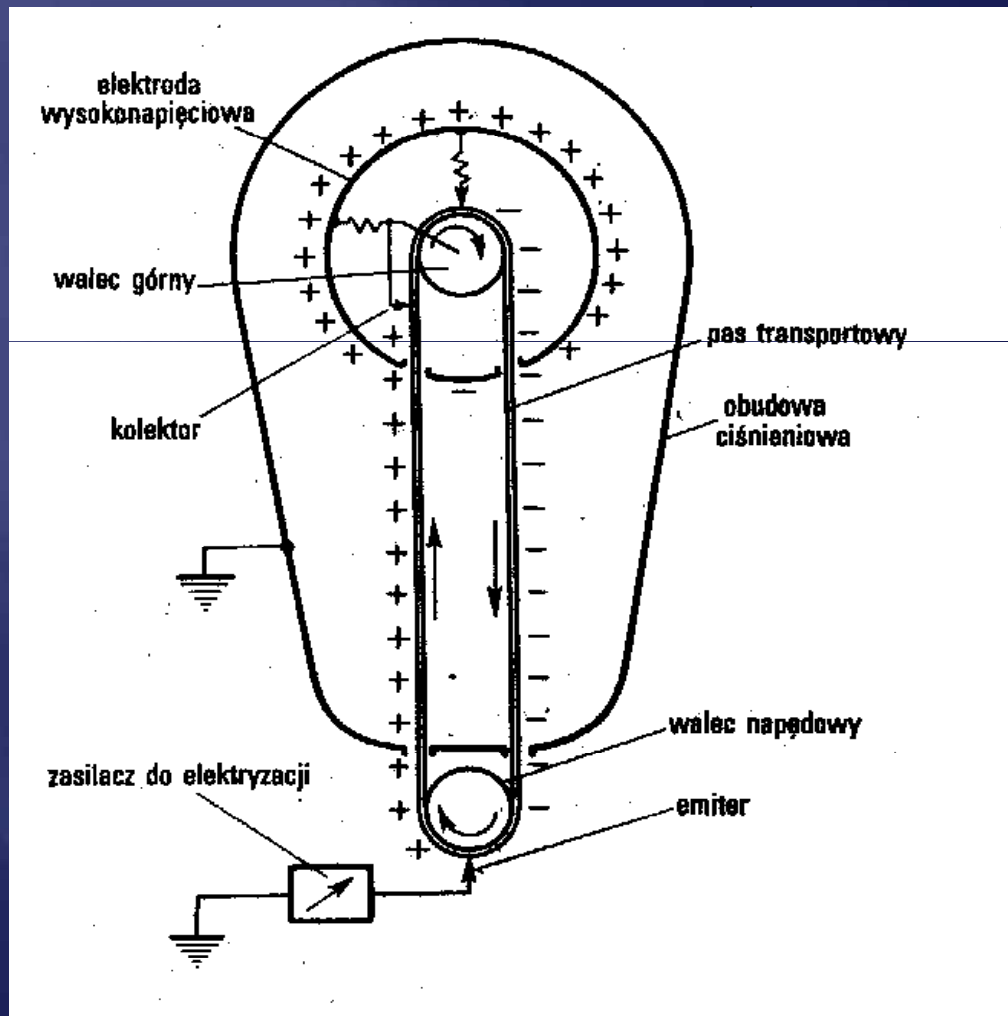
- Wiązka przechodzi tylko raz
- Im wyższy potencjał tym większa energia

# 1930' – pierwszy akcelerator

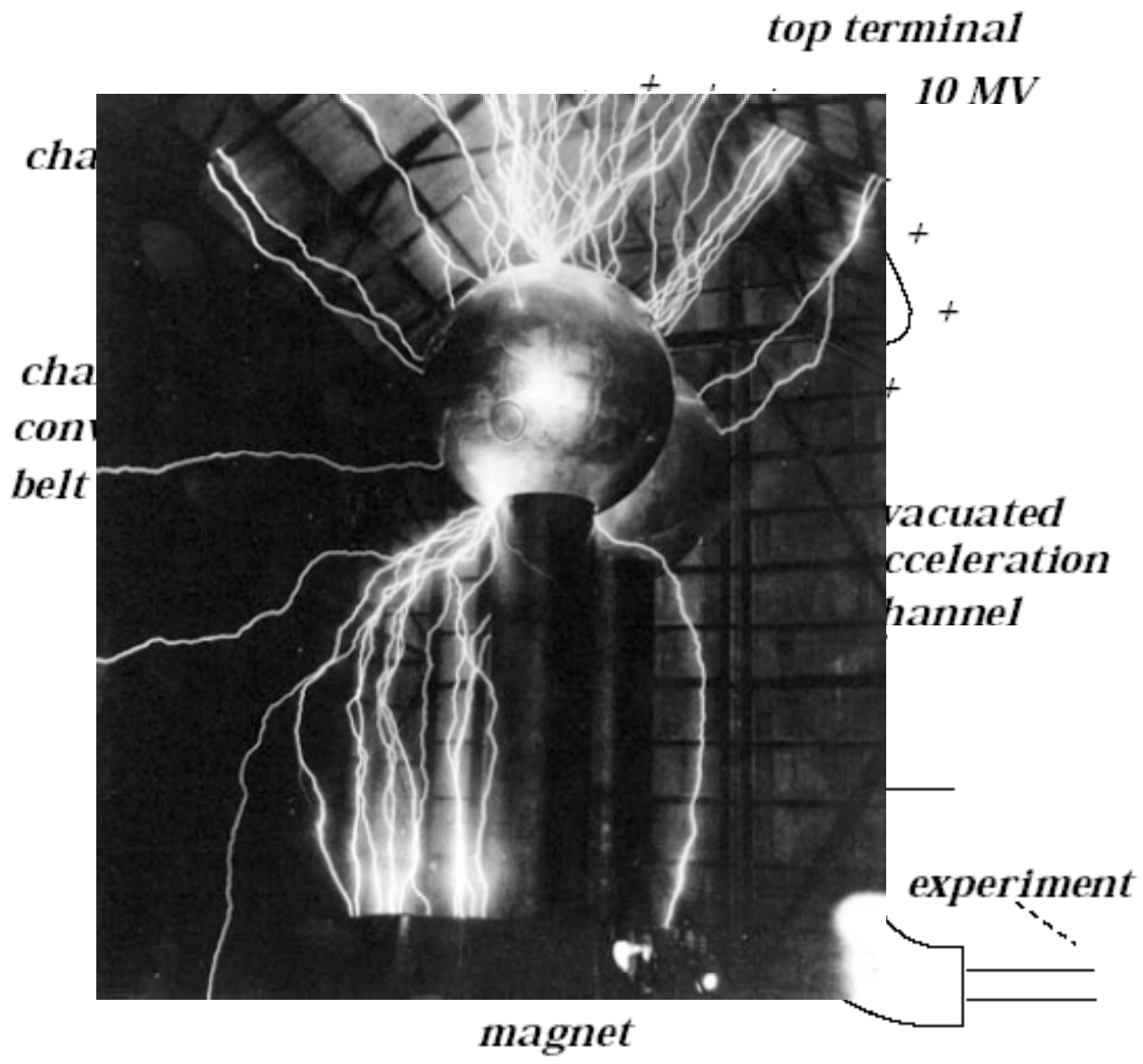
Cockcroft- Walton.



# Generator Van de Graaffa







## Pelletron Charging System

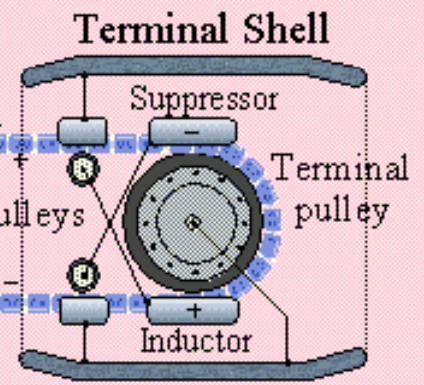
(configuration shown)



Chain--metal  
nylon links

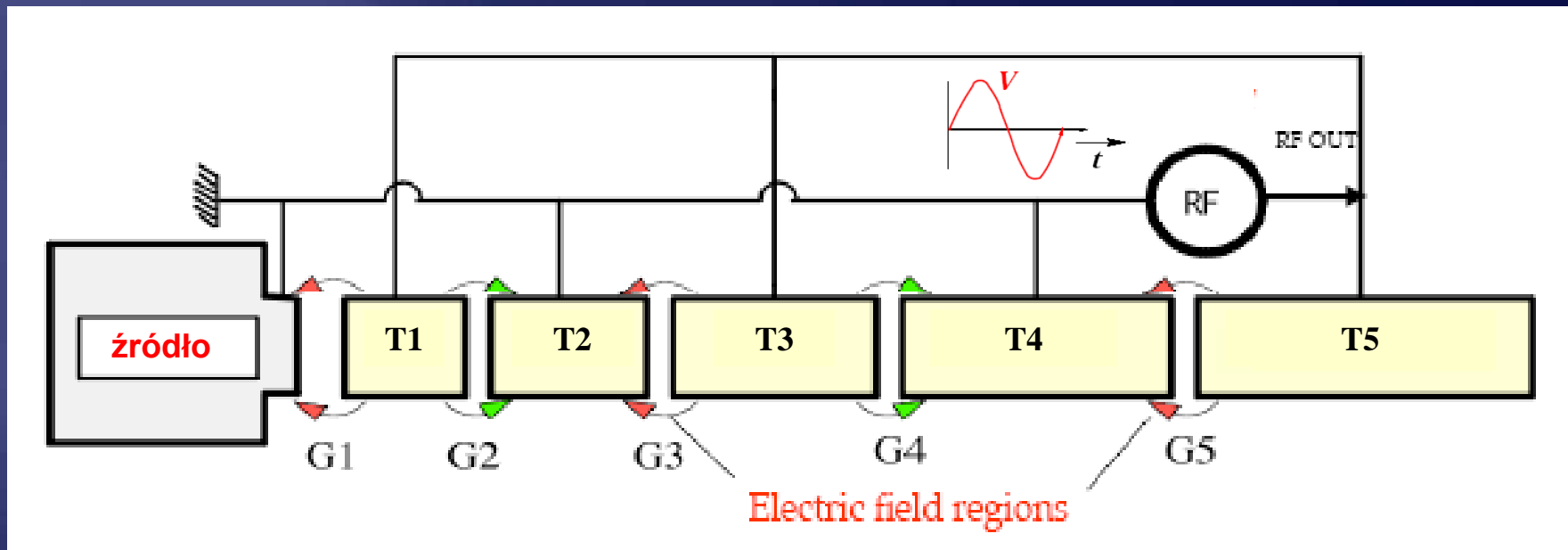
+ + + + +  
+ + + + +  
Pickoff pulleys

charging  
current



# Akceleratorzy liniowe wcz

# Metoda Wideröe

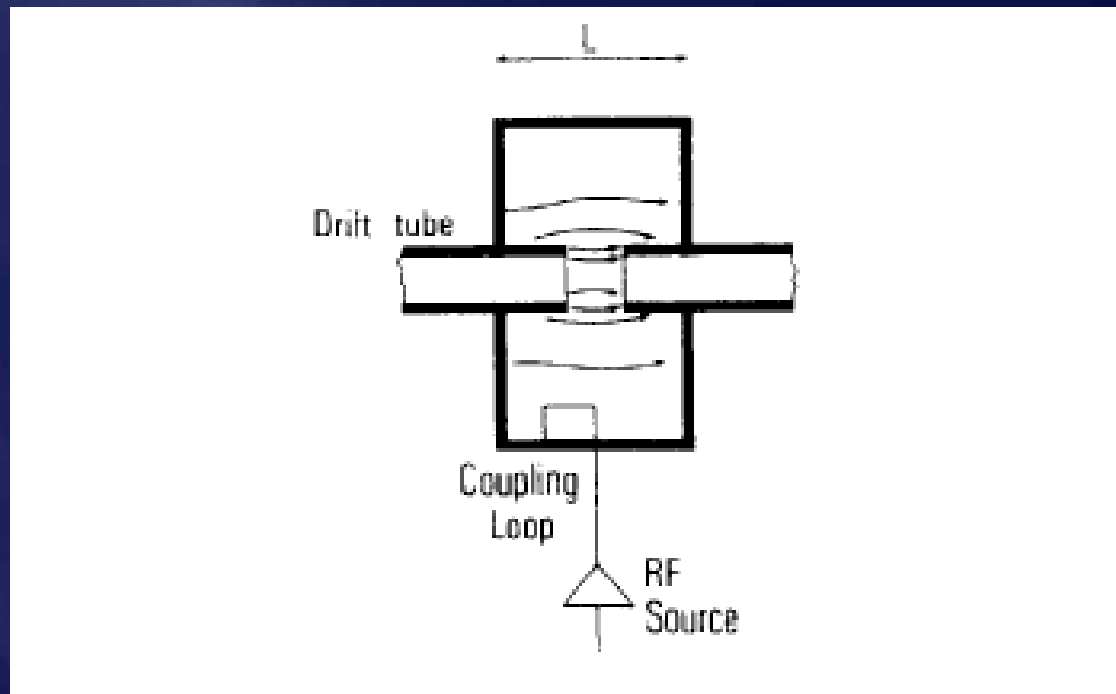


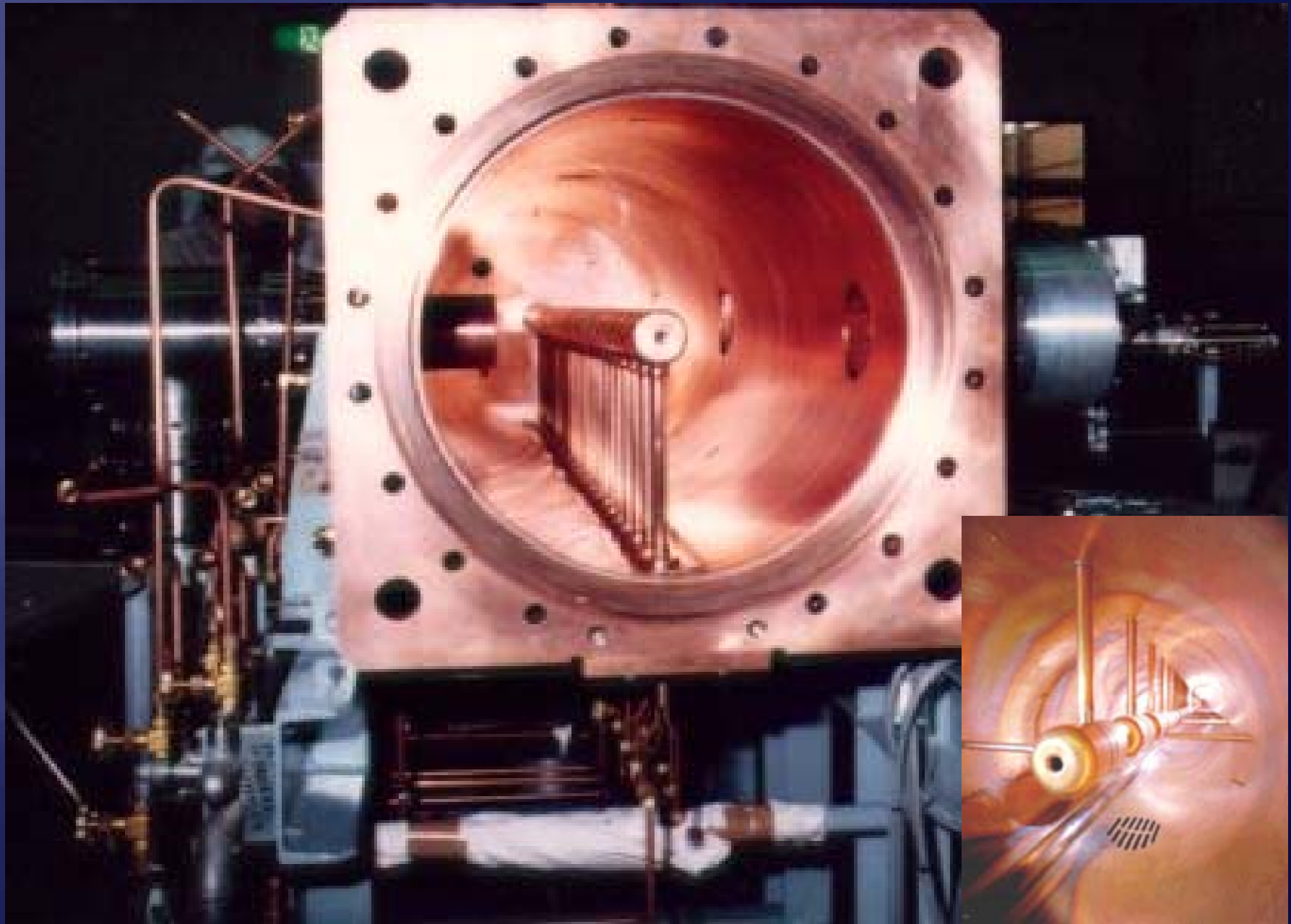
- Cząstki przyspieszane pomiędzy komorami dryfowymi
- Konieczność coraz dłuższych komór
- Ograniczenia: **rozmiary** (dla 7MHz, proton 1MeV pokonuje 2m/cykl), straty radiacyjne dla wyższych częstotliwości



# Metoda Alvareza

- ▣ Zamykamy przestrzeń przyspieszania we wnęce o dobranej częstotliwości rezonansowej



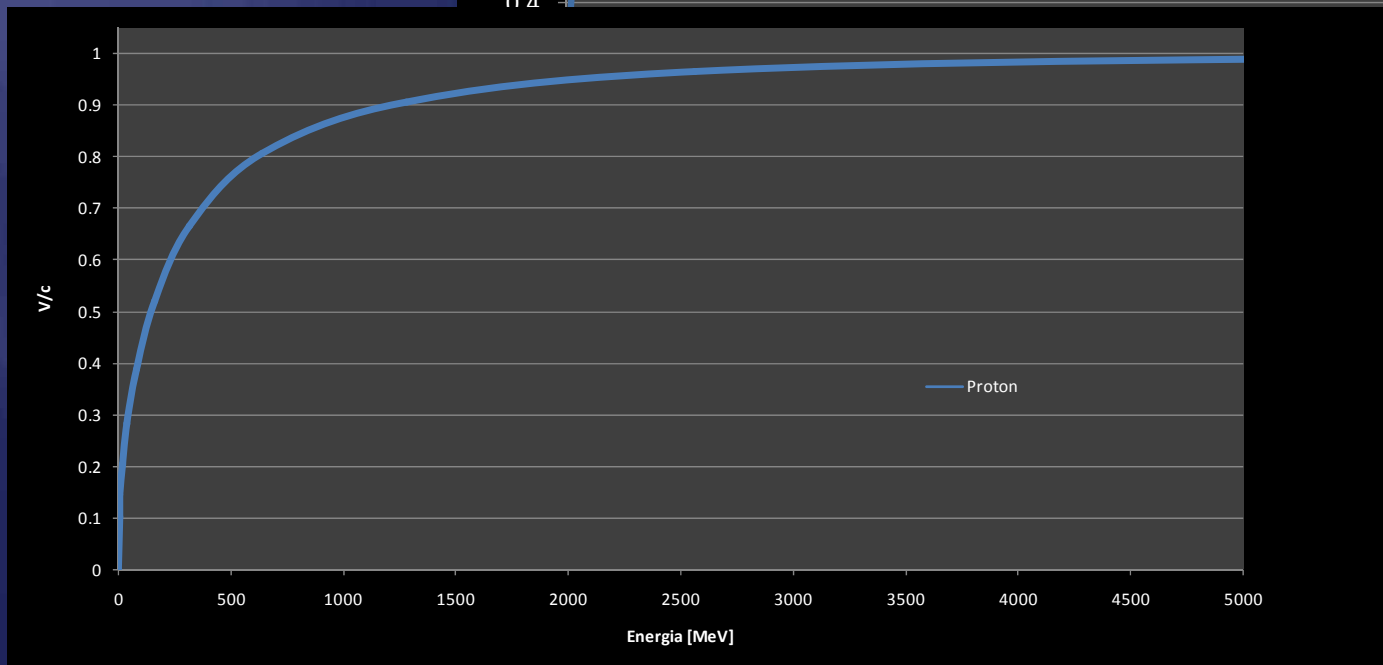
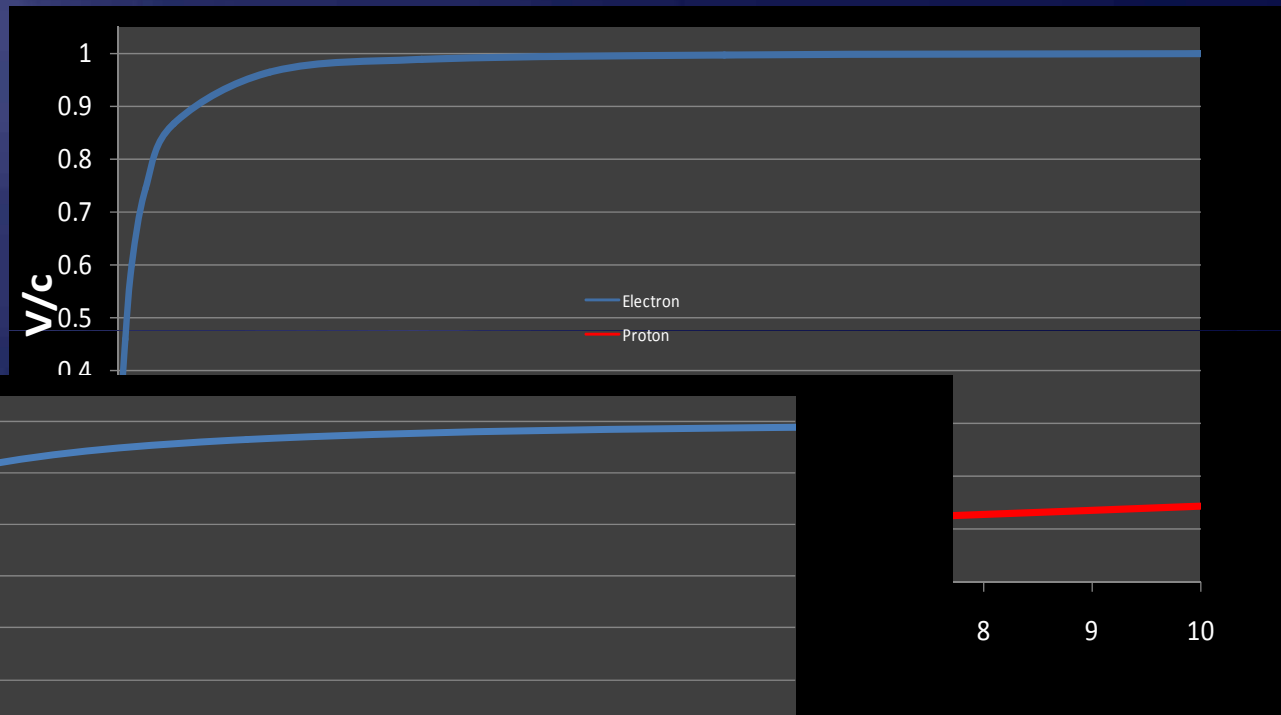


2009-04-01

dr Sławomir Wronka, IPJ

# Przyspieszanie cząstek relatywistycznych, czyli elektronów

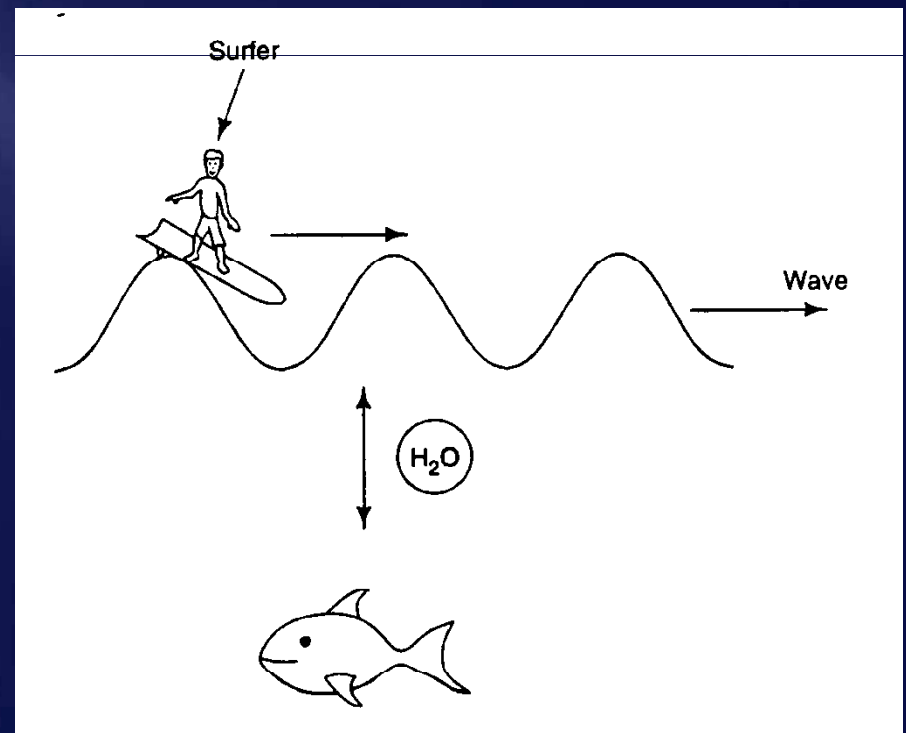
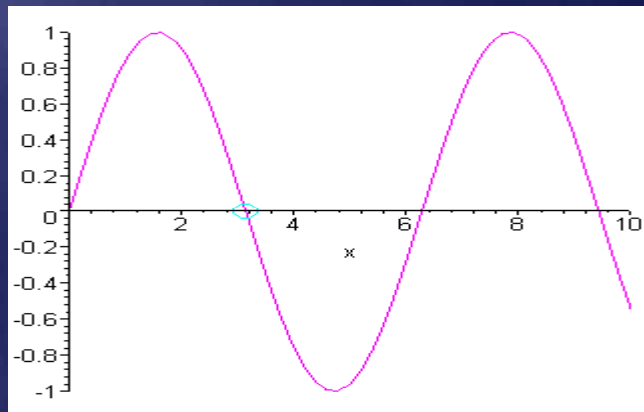
□  $v/c$



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

# Przyspieszanie elektronów

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



# 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

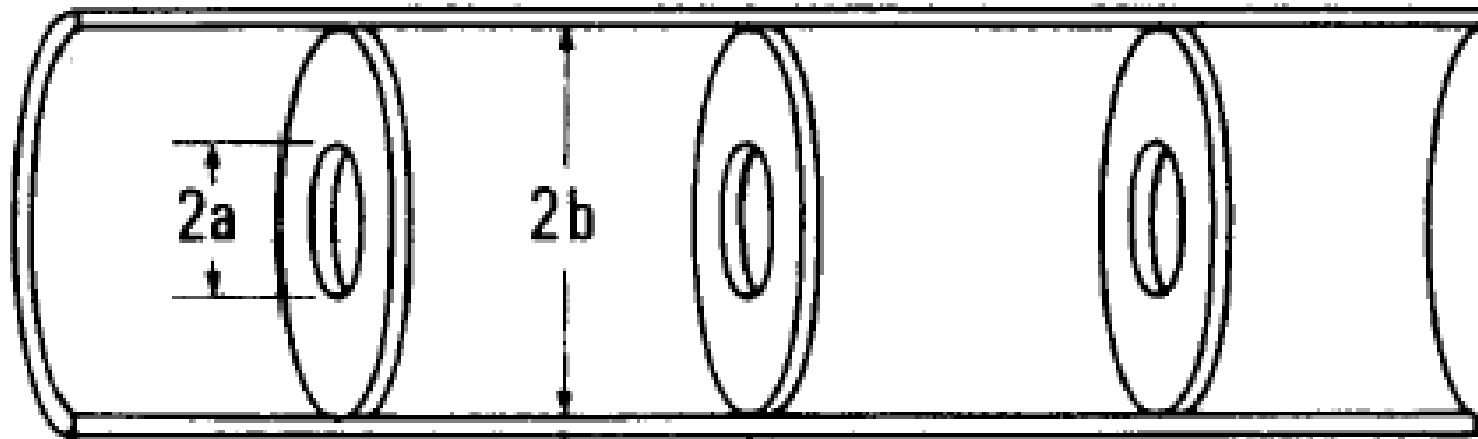
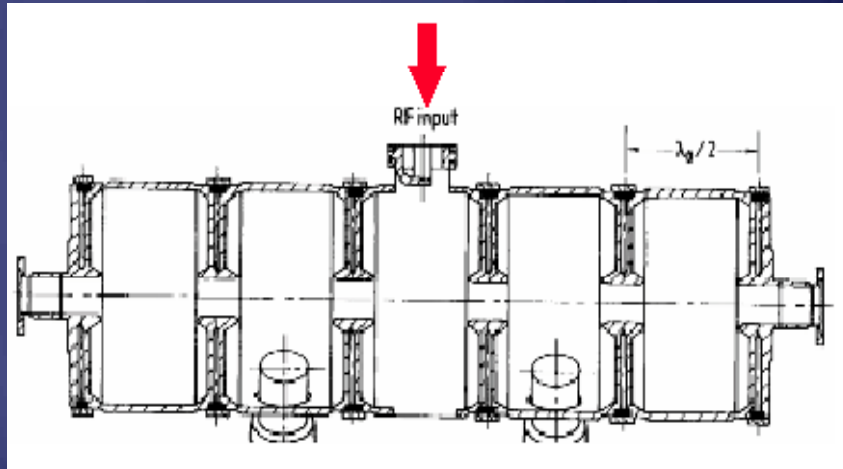


Fig. 6 Disk-loaded structure

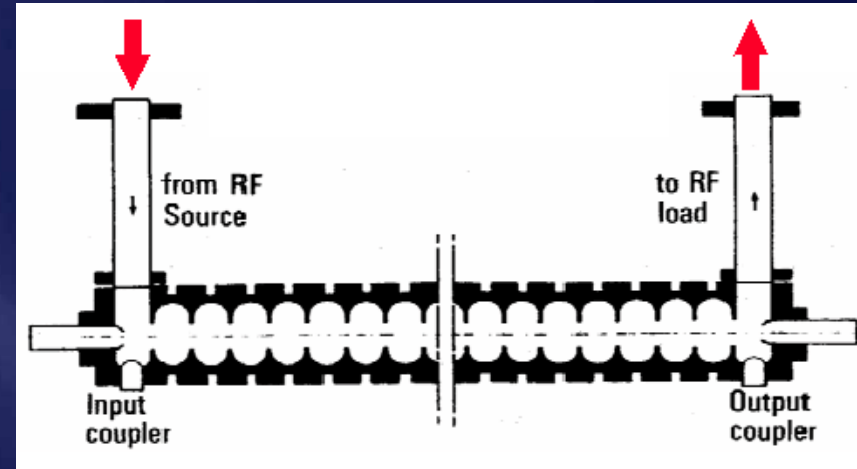
Dyski o odpowiedniej średnicy zapewniają „zwolnienie” rozprzestrzeniania się fali tak, aby zapewnić prędkość porównywalną z prędkością cząstek ( $v \sim c$ )



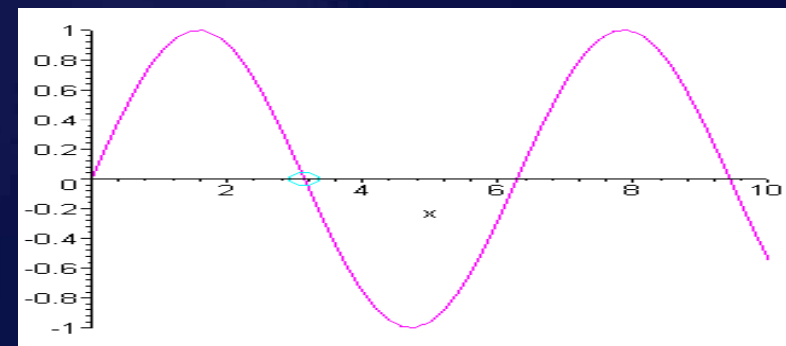
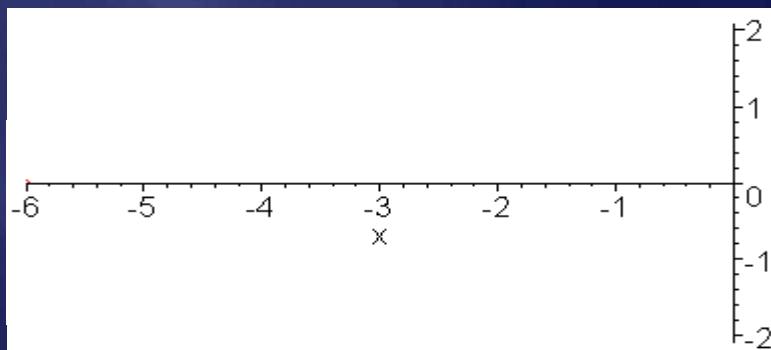
# Przyspieszanie elektronów



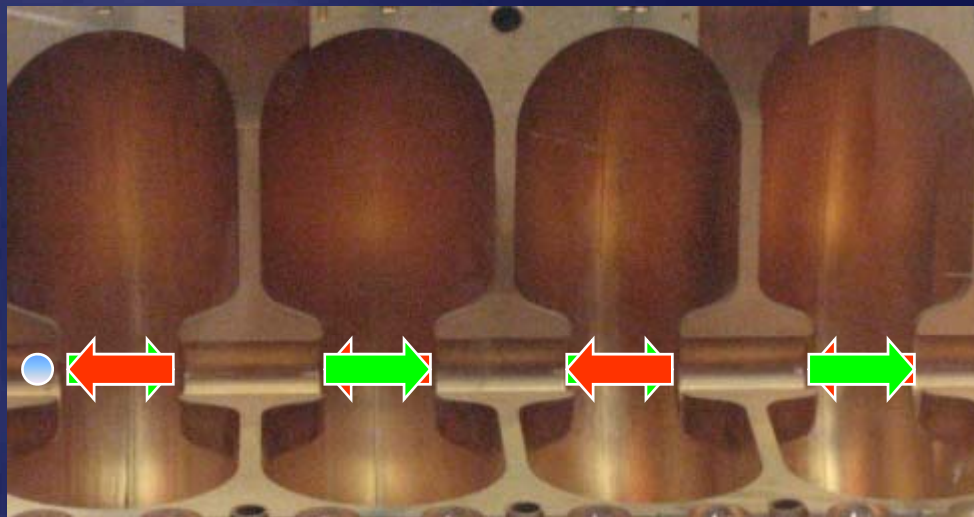
**Standing wave**



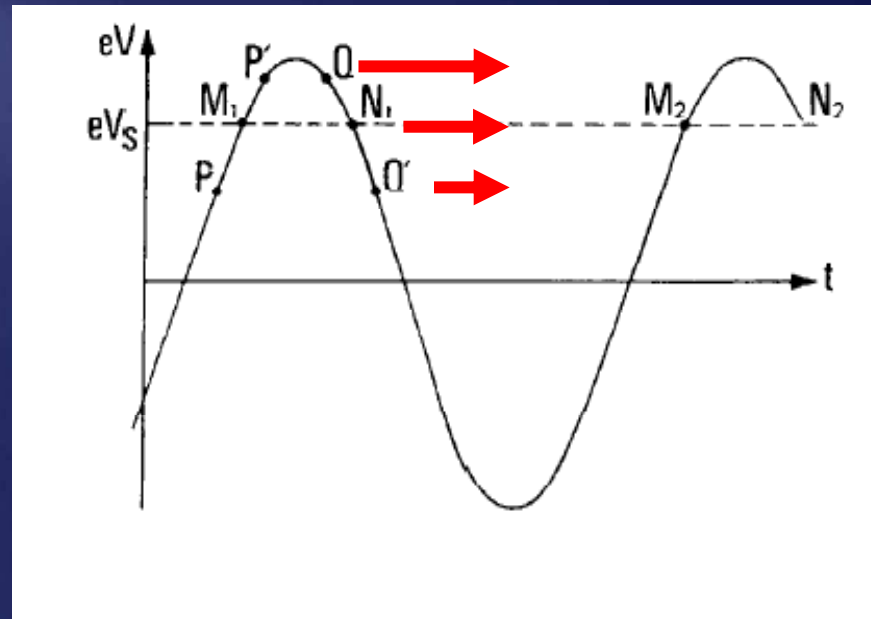
**Moving wave**



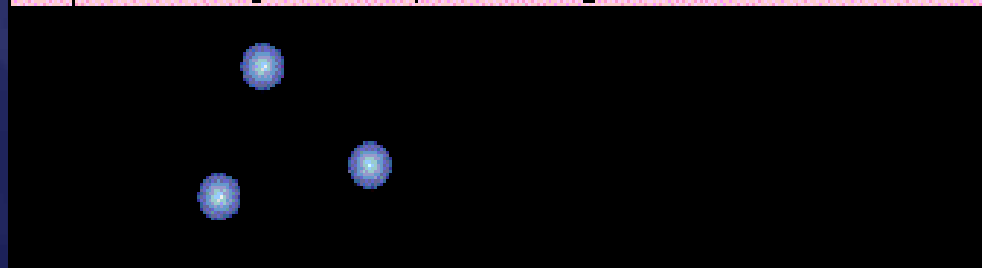
# Przyspieszanie jeszcze raz 😊



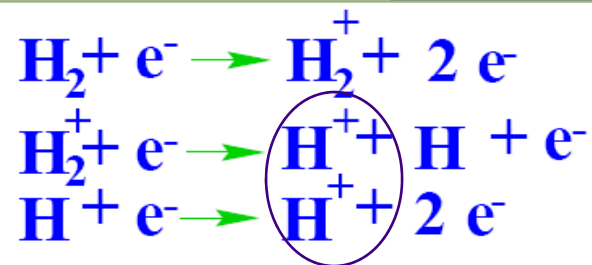
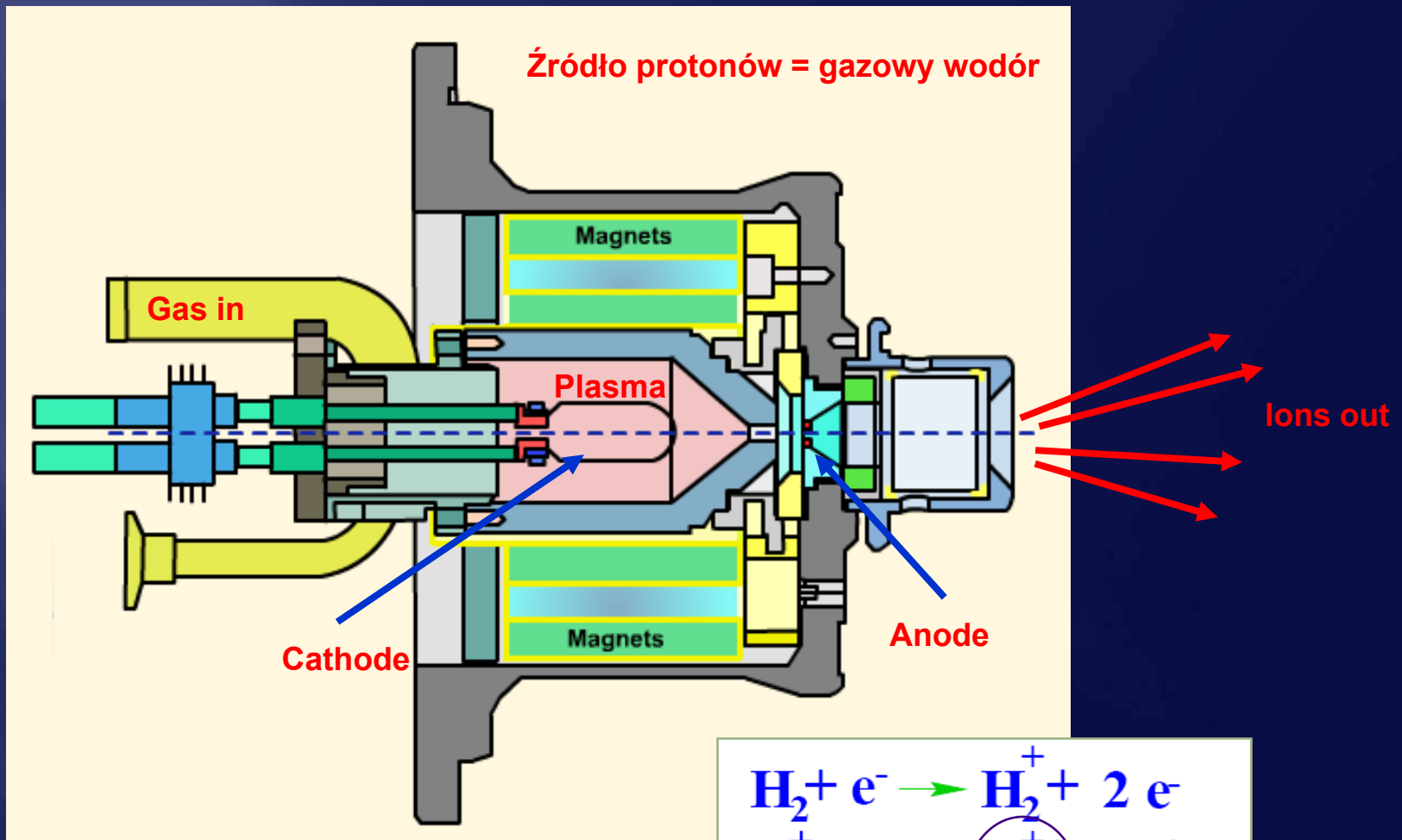
# Przyspieszanie cząstek



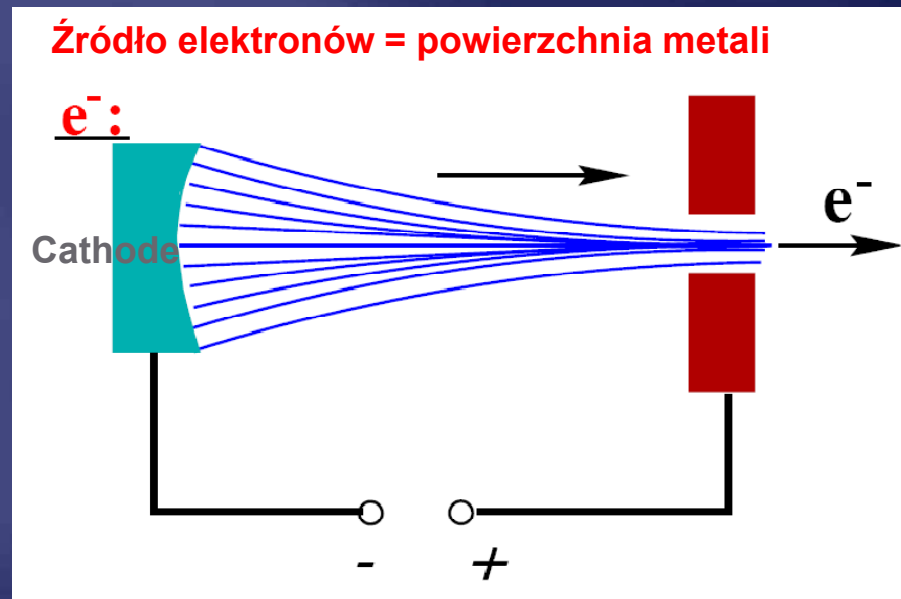
1 | Positive particles just sitting there



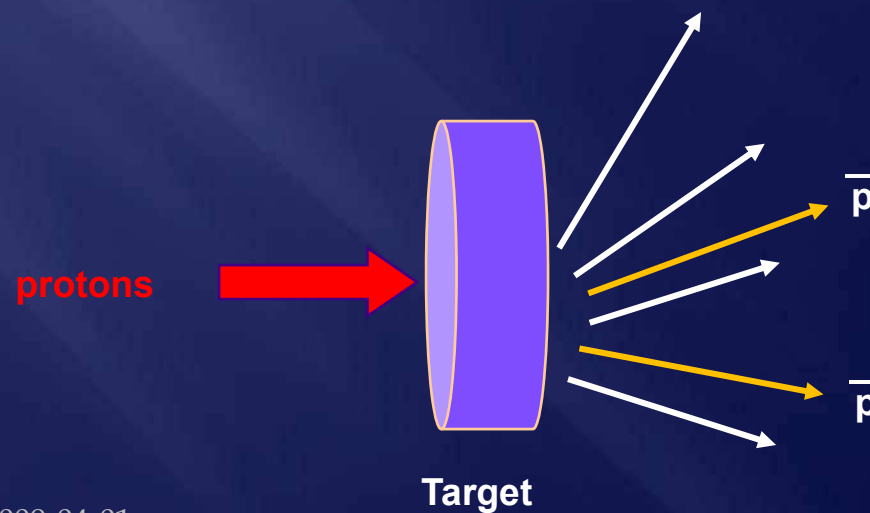
# A tak przy okazji – skąd wziąć protony ?



# Skąd wziąć inne cząstki ?



Electron beam

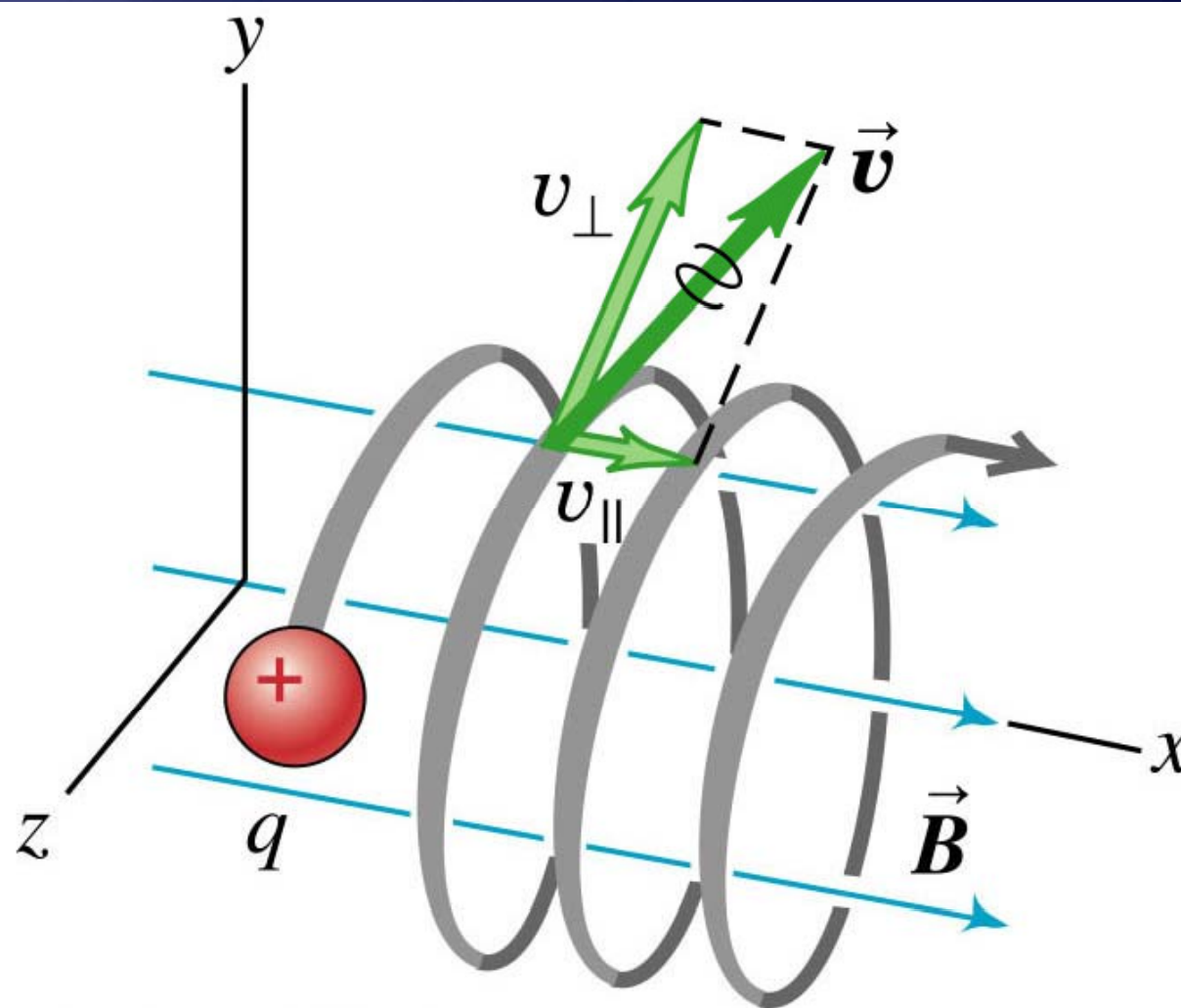


Collection of antiprotons

# 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

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



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

# Ruch cząstki w polu magnetycznym

**Okres ruchu:**

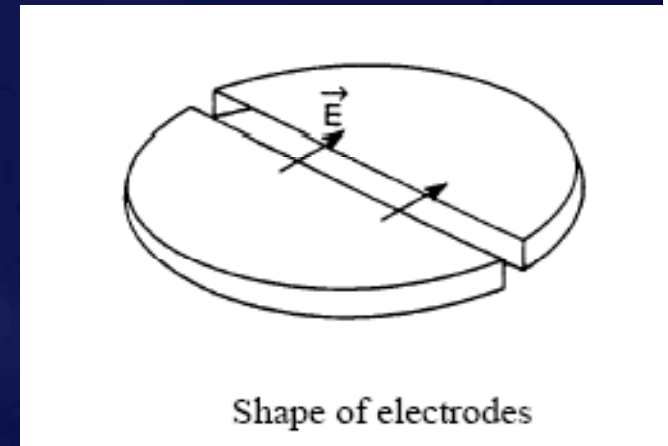
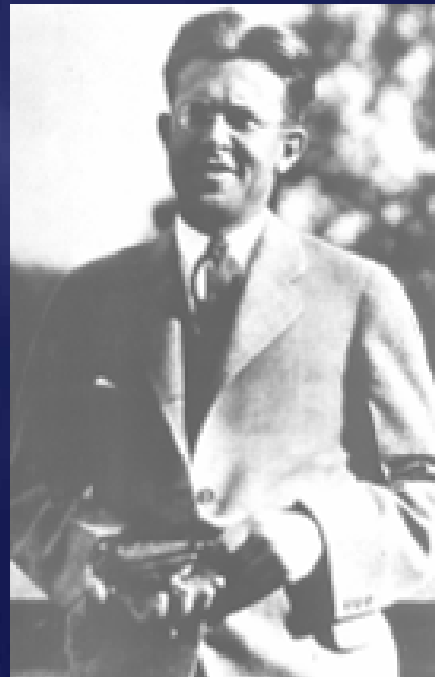
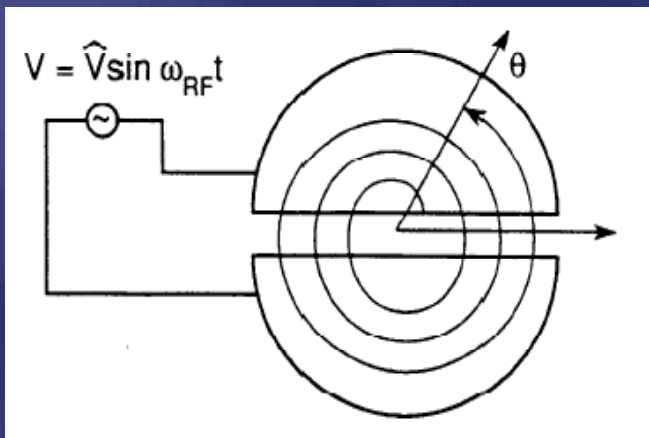
$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B \cdot v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

**Częstość kołowa:**

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

**Częstość cyklotronowa  
niezależna od prędkości**

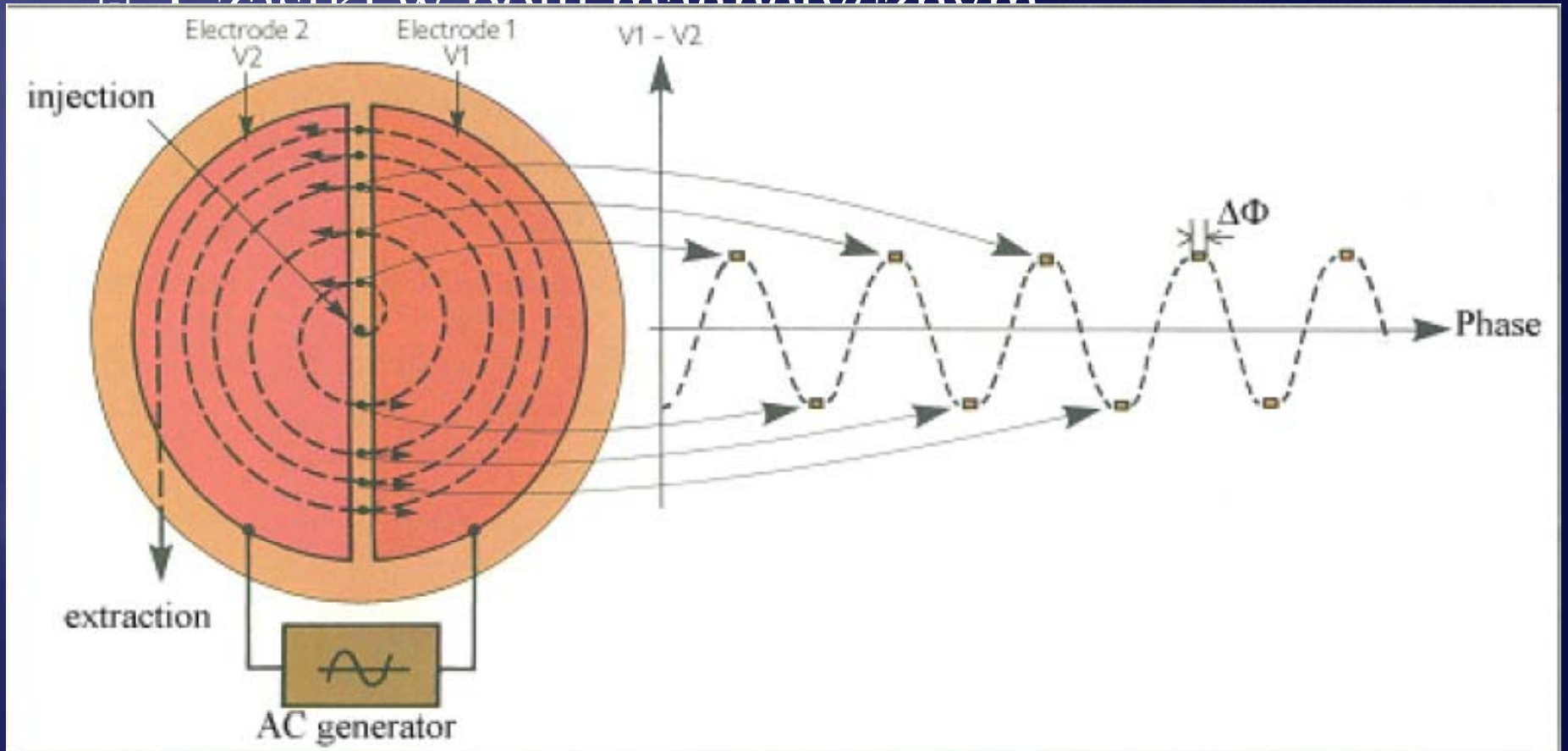
# Cyklotron /Lawrence, 1930'/



**Nagroda Nobla 1939**

# Cyklotron

□ Cząstki w polu magnetycznym



$T$   $m$

# Cyklotron

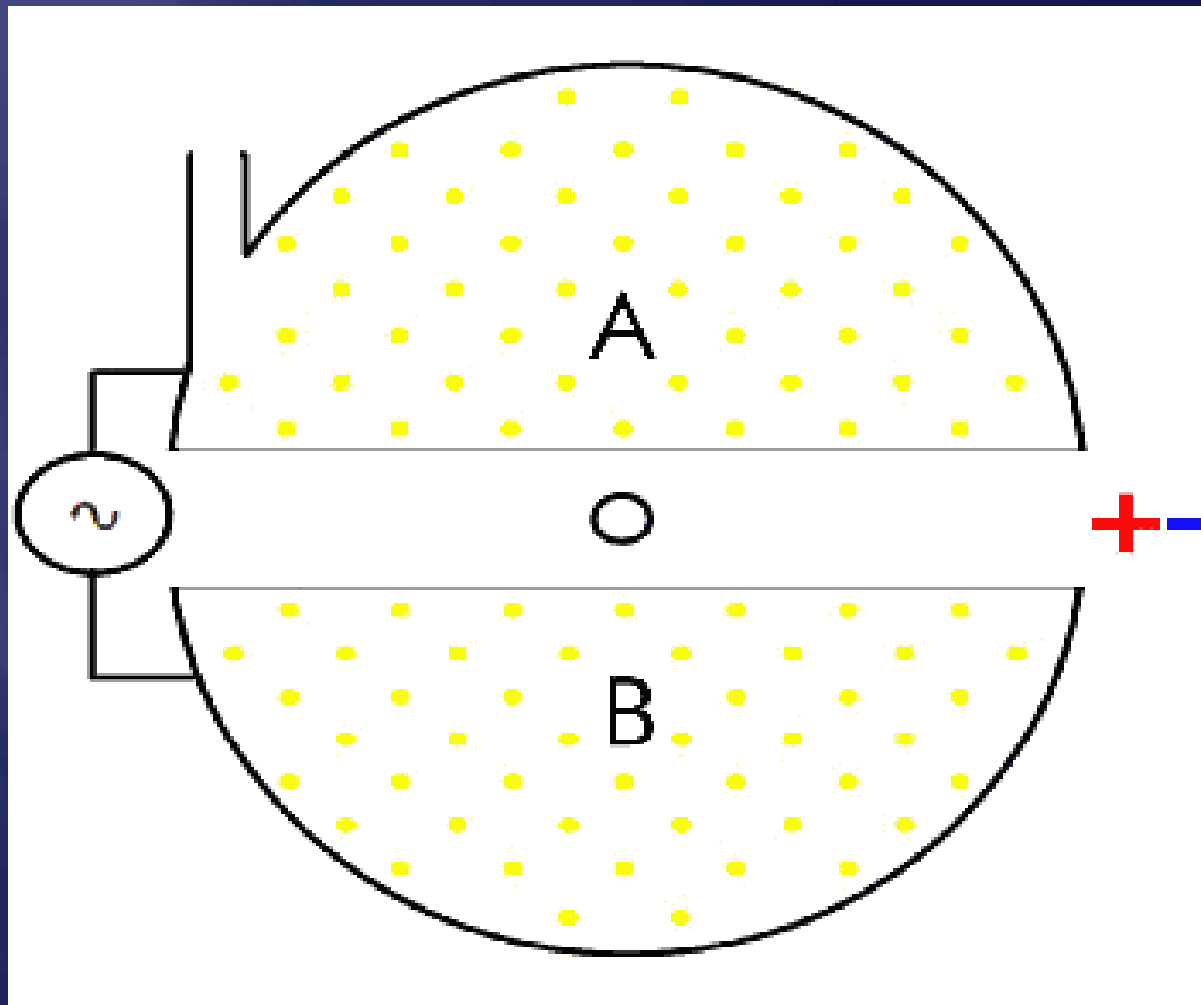
▣ Np. Protony – do 10MeV

▣ **NIE DO ELEKTRONÓW**

	v/c	m/m <sub>0</sub>
1 MeV	0,941	2,96



# Cyklotron



# Cyklotron izochroniczny

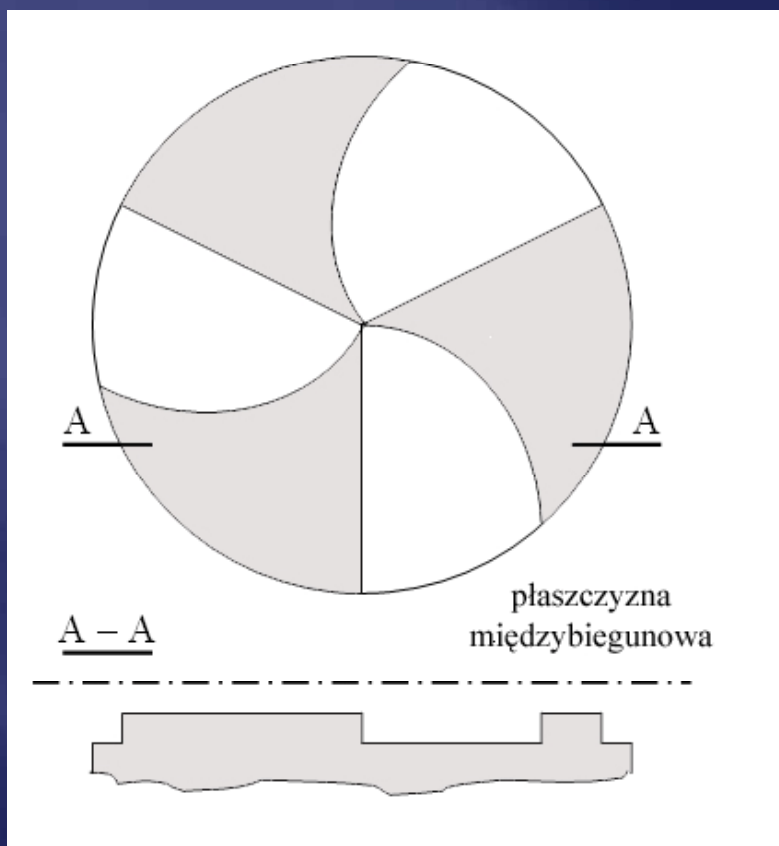
- ▣ **Cyklotron izochroniczny** - akcelerator z azymutalną modulacją pola.

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

# Cyklotron izochroniczny

- ▣ **Jak ?** Poprzez odpowiednie ukształtowanie pola magnetycznego zakrzywiającego tor ruchu cząstek. Wzrost pola magnetycznego na zewnątrz uzyskuje się poprzez wykonanie odpowiednich nacięć w rdzeniu elektromagnesu. Częstotliwość pozostaje stała.

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



# Synchrocyklotron /fazotron/

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

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

- ▣ Np. CERN, 600MeV, 30.6MHz – 16.6MHz, 30000 obiegów protonów, przyrost energii 20keV/obieg.

# Fixed Field Alternating Gradient Circular Machines (FFAG)

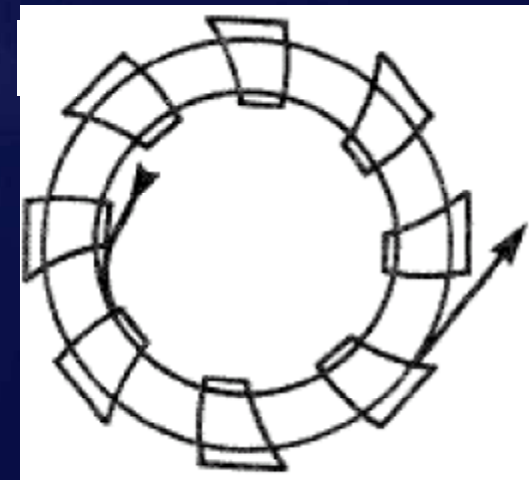
<b>Pole magnetyczne</b>	<b>Częstotliwość RF stała</b>	<b>Częstotliwość RF zmienna</b>
<b>Stale</b>	<b>Cyklotron klasyczny</b>	<b>Synchrocyklotron</b>
<b>Zmienne</b>	<b>Izochroniczny</b>	<b>FFAG</b>



Klasyczny,  
synchrocyklotron

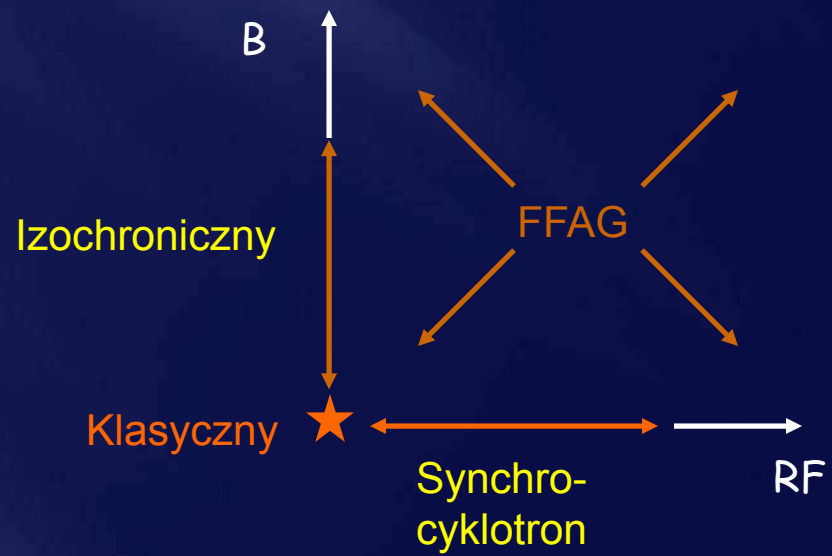
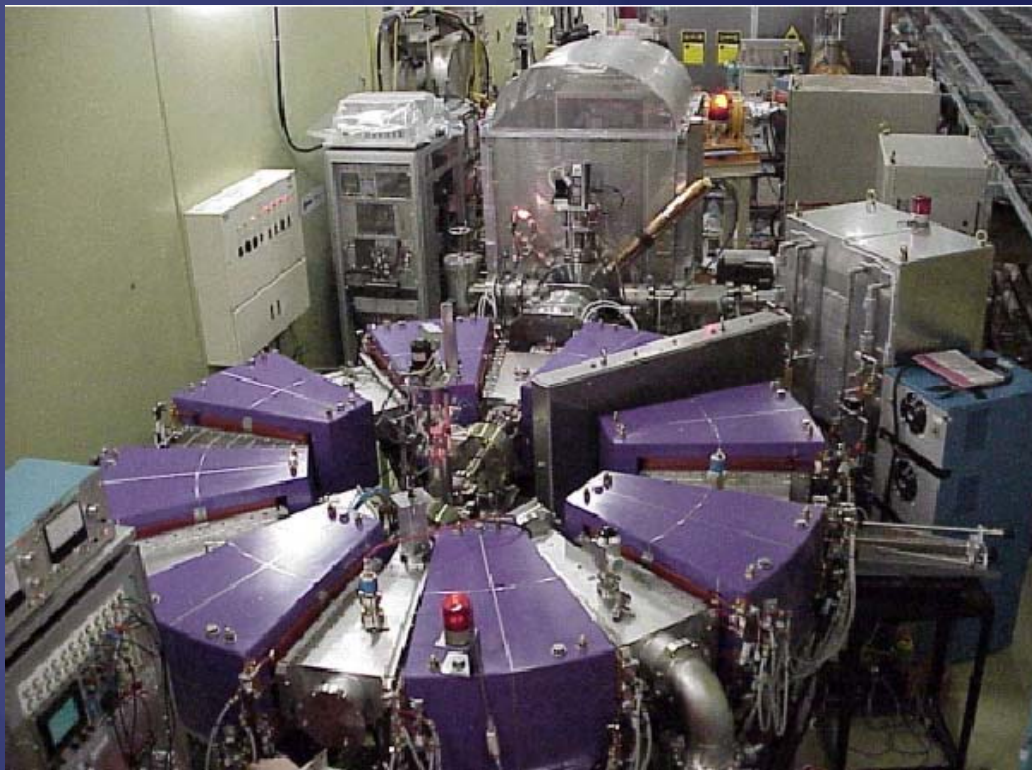


izochroniczny

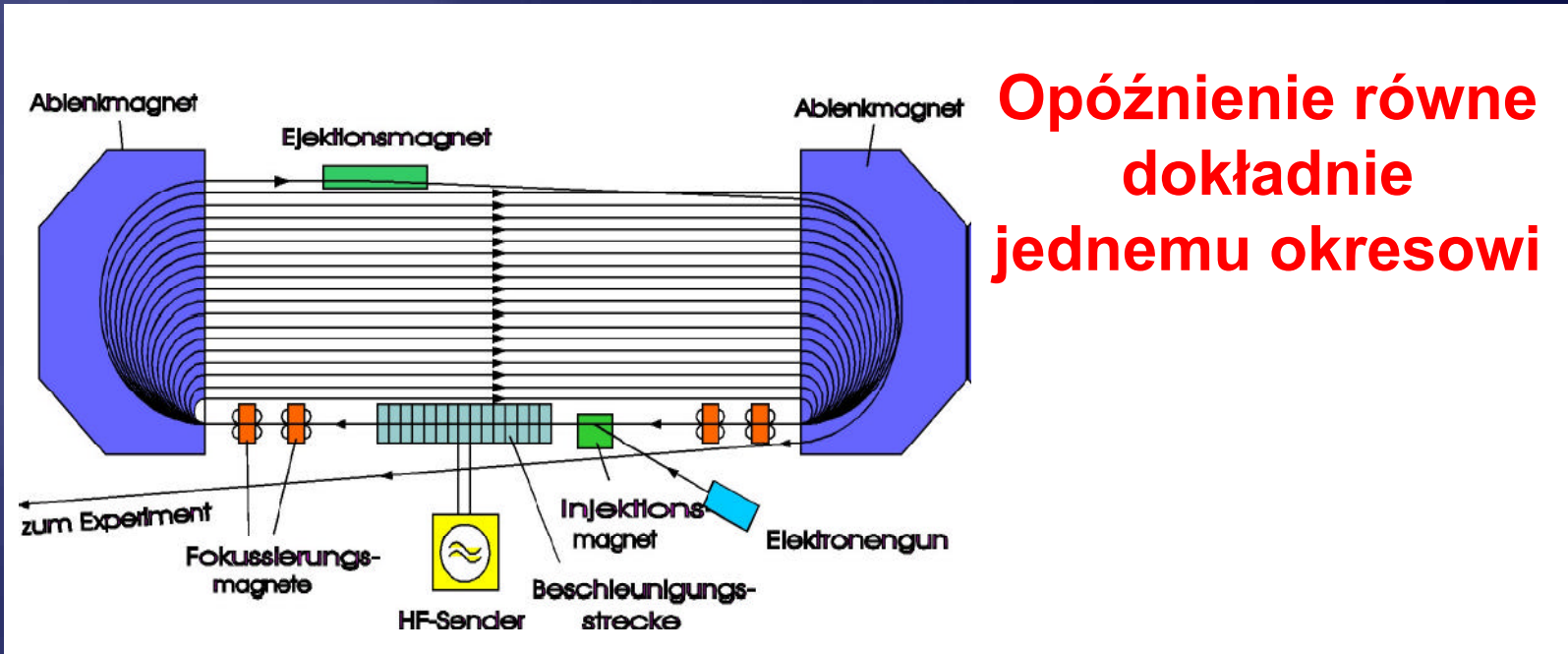


FFAG





# Mikrotron – dedykowany do $e^-$



# Synchrotron

**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/**

<b>Machine</b>	<b>RF frequency <math>f</math></b>	<b>Magnetic Field <math>B</math></b>	<b>Orbit Radius <math>\rho</math></b>	<b>Comment</b>
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 <sup>st</sup> century designs

# Synchrotron

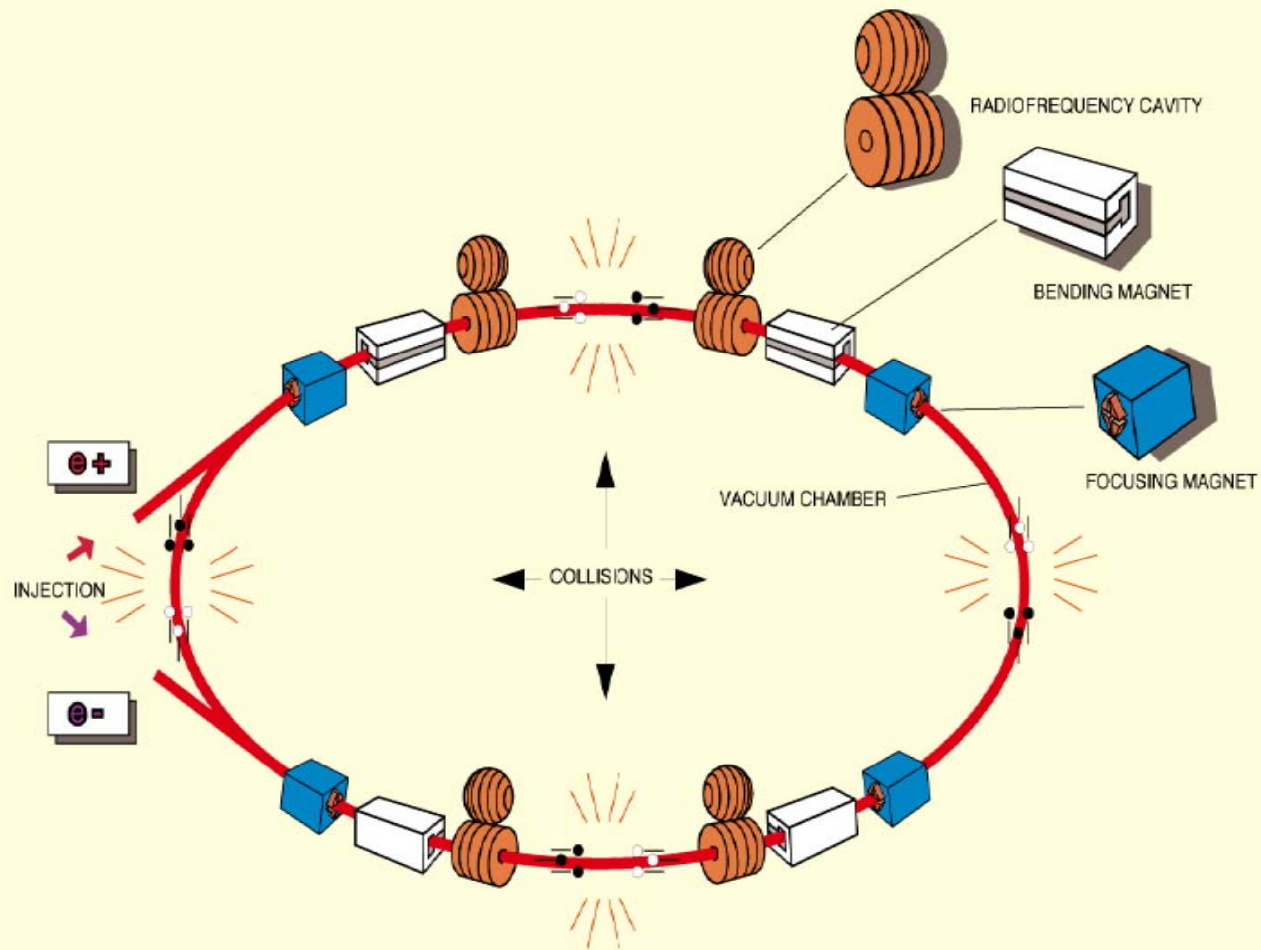
Na obwodzie umieszczamy:

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



# Synchrotron

## THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



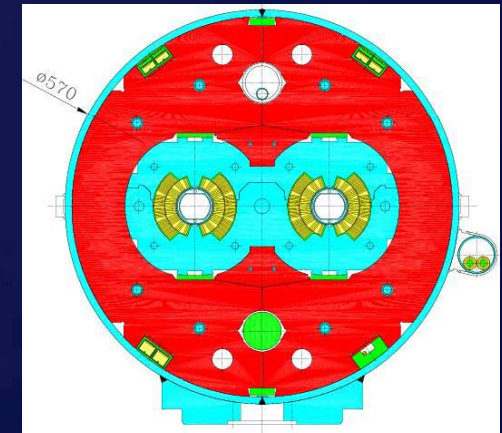
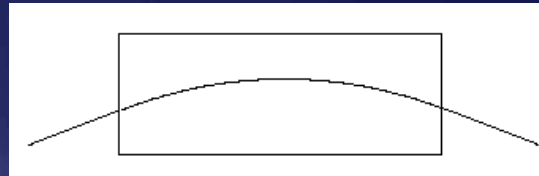
CERN AC - E509



# Magnesy

- ▣ Utrzymywanie wiązki na stałej orbicie

→ Dipole



**LEP**

**P = 100 GeV/c**

**$\rho = 27$  Km**

**B = 0.0775 Tesla**

**LHC**

**P = 7000 GeV/c**

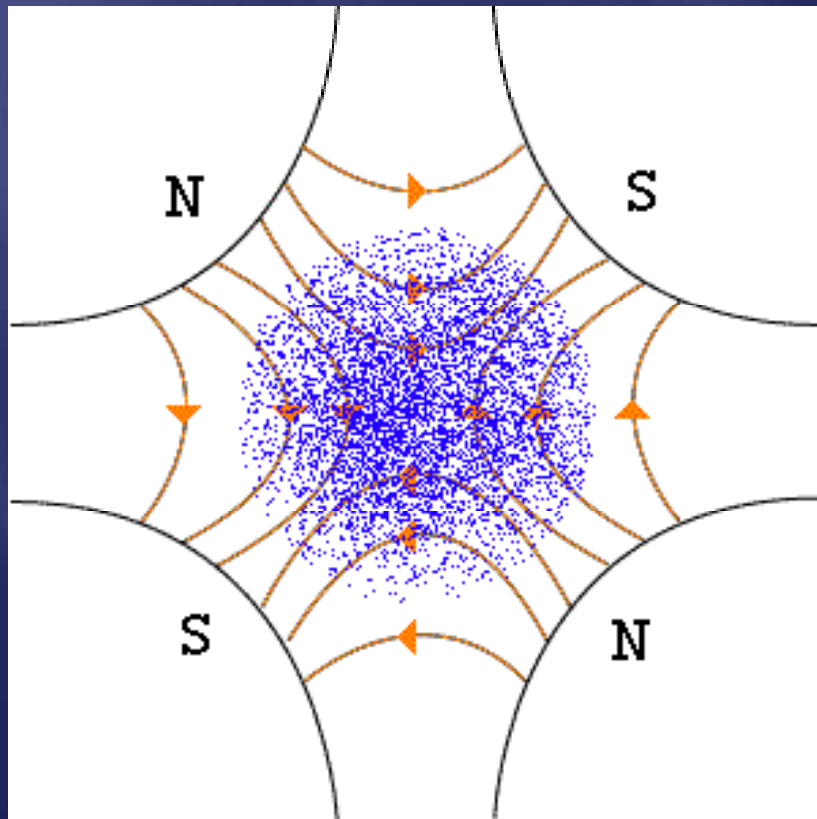
**$\rho = 27$  Km**

**B = 8.33 Tesla**





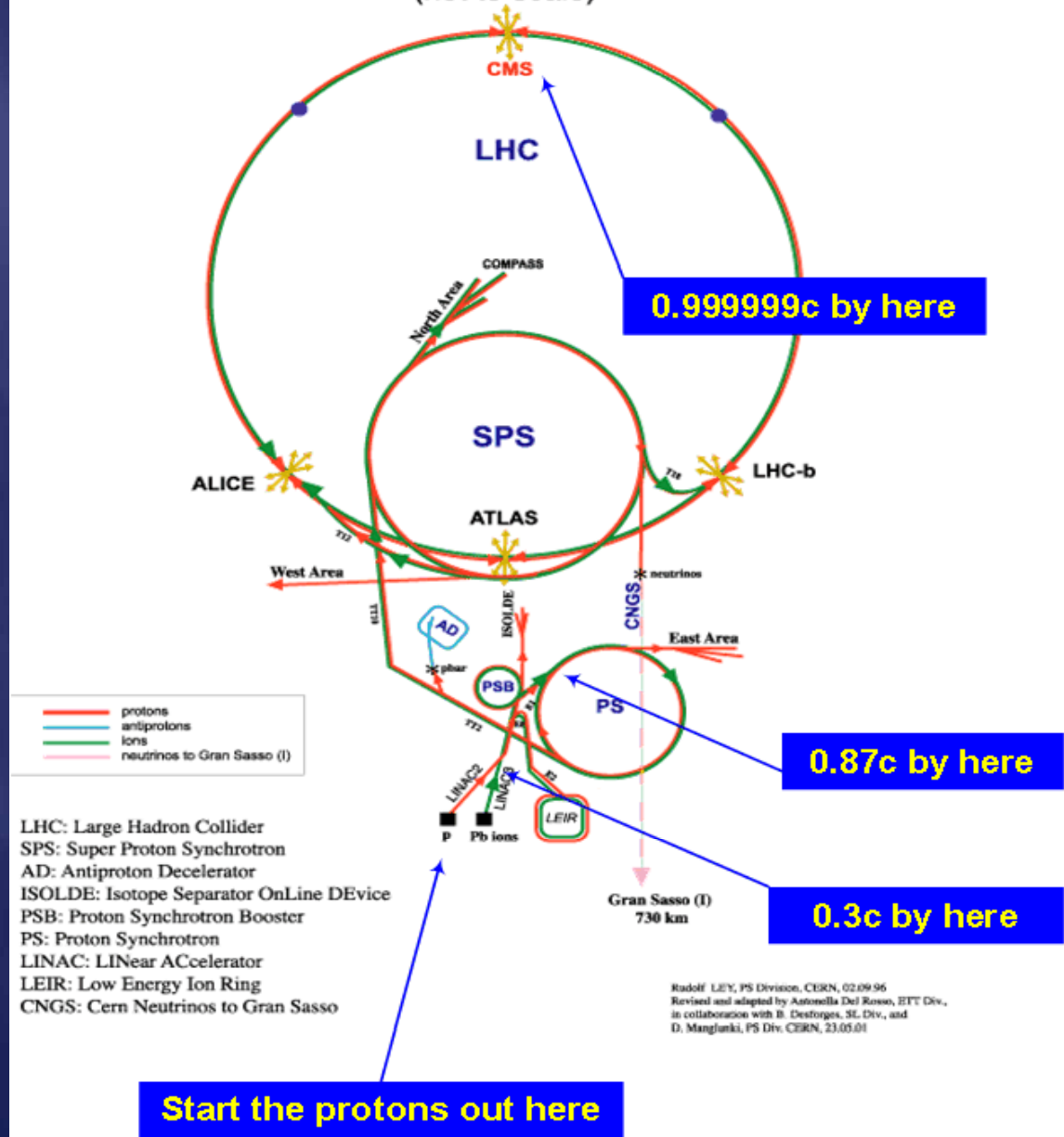
# Magnesy kwadrupolowe

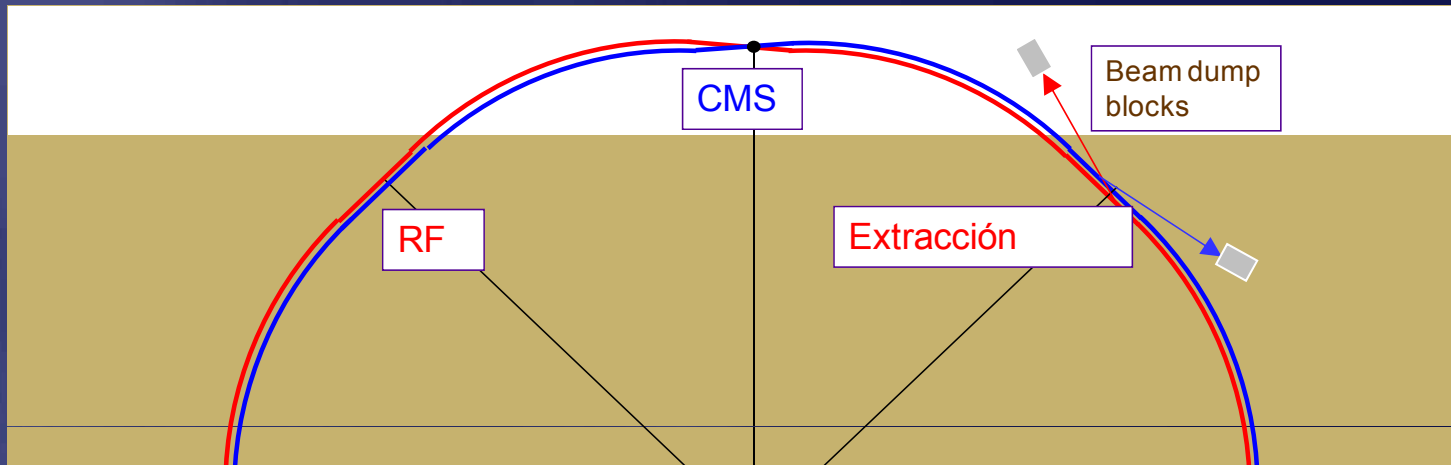


I inne...



# CERN Accelerators (not to scale)





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  $\approx 115$  GeV

# LHC – parametry

- Synchrotron –  $R = \text{const}$

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

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

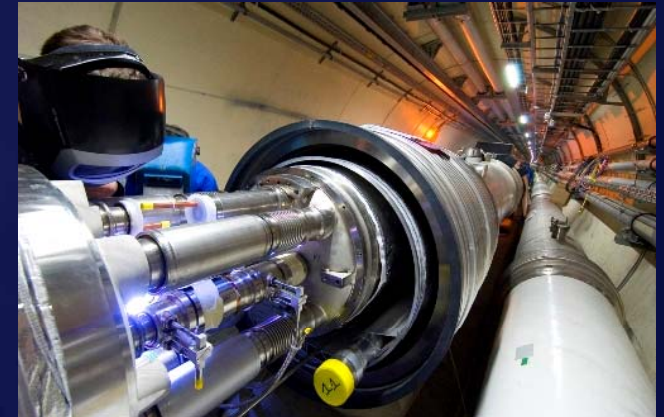
■ *LEP tunel:*  $L = 27000 \text{ meter}$

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

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

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

$$\rightarrow \quad B_{\text{max}} = 8.38 \text{ T} \quad \rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{iron saturation: } 2 \text{ Tesla} \\ \text{earth: } 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ Tesla} \end{array}$$



**LEP**

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

**$\rho = 27 \text{ Km}$**

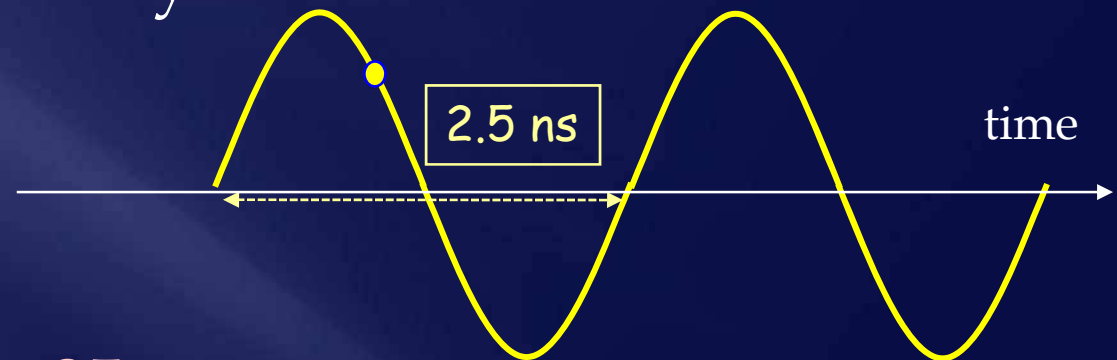
**$B = 0.0775 \text{ Tesla}$**

Elena Wildner

# RF + wiązka w LHC



- ▣ 16 wnęk rezonansowych w 4 modułach  
400 MHz



- ▣ Kolejne paczki co 25ns  
→ 7.5m
- ▣ Częstotliwość obiegu:  
 $f = v / 2\pi R =$   
 $= (3 \times 10^8 \text{ m/s}) / 27\text{km} =$   
 $= \sim \mathbf{11000 \text{ Hz}}$

Przyrost energii:  
~0.5 MeV na obrót.  
Przyspieszanie od  
450 GeV do 7 TeV  
zajmie ~ 20 minut.

# LHC – fakty c.d.

- ▣  $10^{11}$  protonów w paczce
- ▣ Paczka ma długość 7.5cm
- ▣ 2808 paczek /pełna świetlność/
- ▣ Energia zgromadzona w wiązce: 300MJ  
= 150 lasek dynamitu...
- ▣ Konsumpcja mocy – 120MW

# LHC: Od pomysłu do realizacji

1982 : First studies for the LHC project

1994 : Approval of the LHC by the CERN Council

1996 : Final decision to start the LHC construction

2000 : End of LEP operation

2003 : Start of the LHC installation

2008 : **Go !**



# 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  
 $(m_e/m_p)^4 \sim 10^{-13}$

# Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

- W przypadku kołowych akceleratorów protonów: pole magnetyczne
  - Pole magnetyczne musi rosnać wraz ze wzrostem energii wiązki. W praktyce nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż 9-10 T.
  - Ogranicza to dostępne energie...
- 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<sup>+-</sup> : 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  $\epsilon$   $\Delta E \sim 2\pi R \langle \epsilon \rangle$
- LEP (obwód 27 km) był (prawdopodobnie) ostatnim akceleratorem kołowym e<sup>+-</sup>.
- Dalej bardziej opłacalne są akceleratory liniowe:  
 $E_{\max} \sim L \langle \epsilon \rangle$

# Konceptcja „Luminosity” = „Świetlność”

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

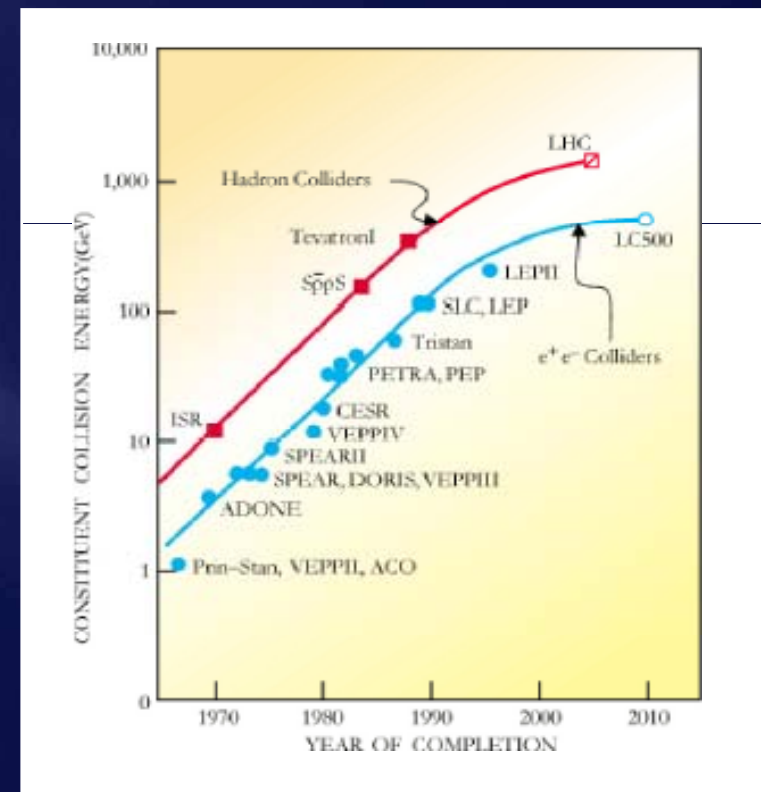
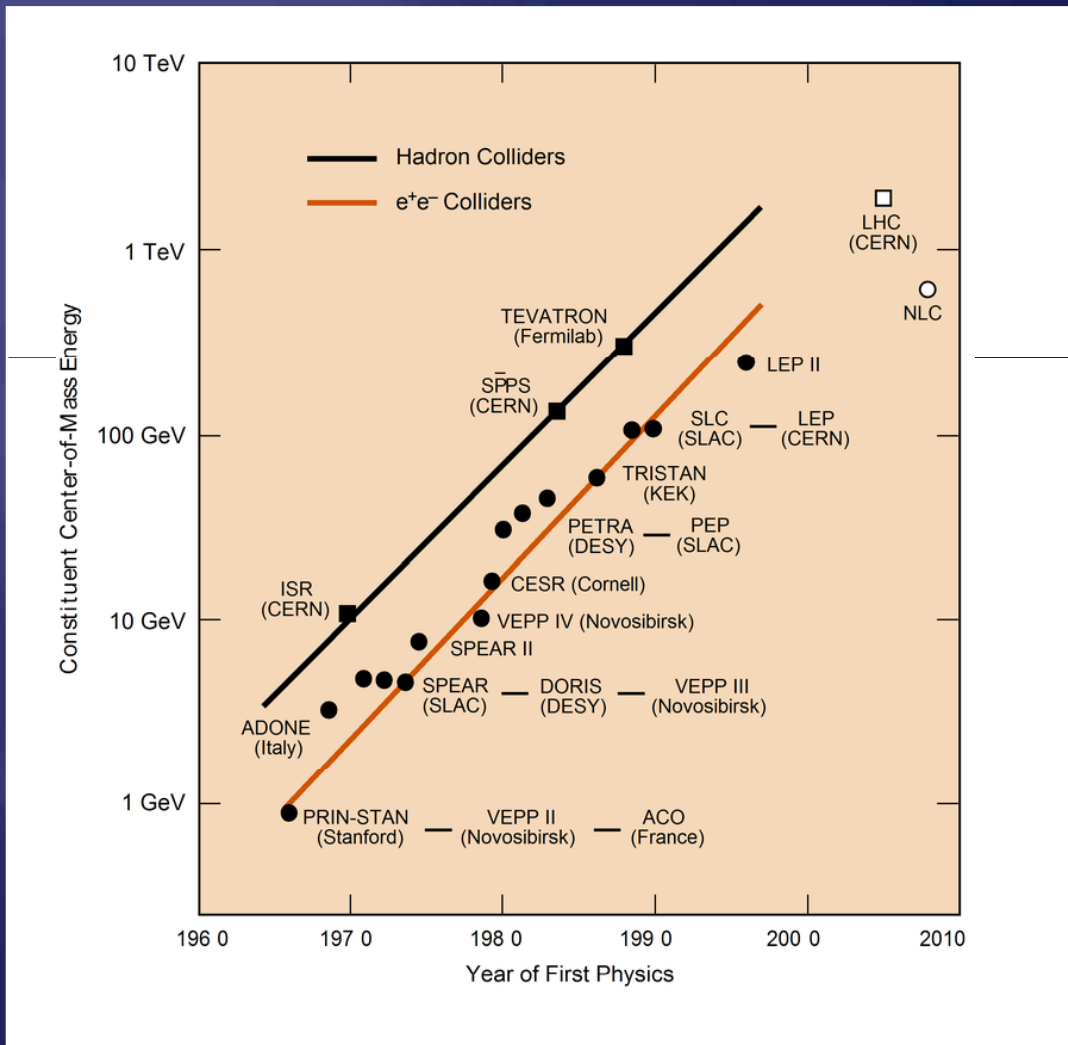
↑  
MAX

↖ MIN

$$\frac{N}{\Delta T} = L[\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot \sigma[\text{cm}^2]$$

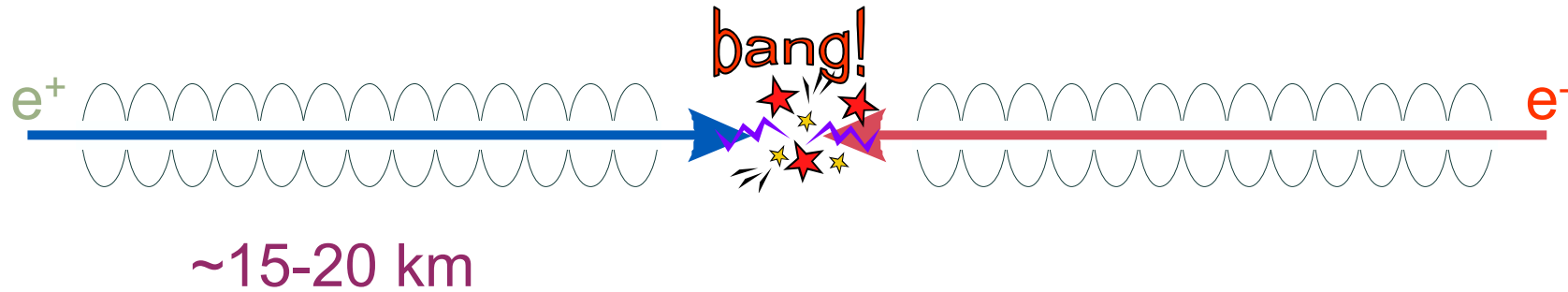
	Energy (GeV)	$\mathcal{L}_{max}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	rate $\text{s}^{-1}$	$\sigma_x/\sigma_y$ $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Particles per bunch
SPS ( $p\bar{p}$ )	315x315	$6 \cdot 10^{30}$	$4 \cdot 10^5$	60/30	$\approx 10 \cdot 10^{10}$
Tevatron ( $p\bar{p}$ )	1000x1000	$100 \cdot 10^{30}$	$7 \cdot 10^6$	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	$100 \cdot 10^{30}$	$\leq 1$	200/2	$\approx 50 \cdot 10^{10}$

# Co nas czeka w przyszłości ?



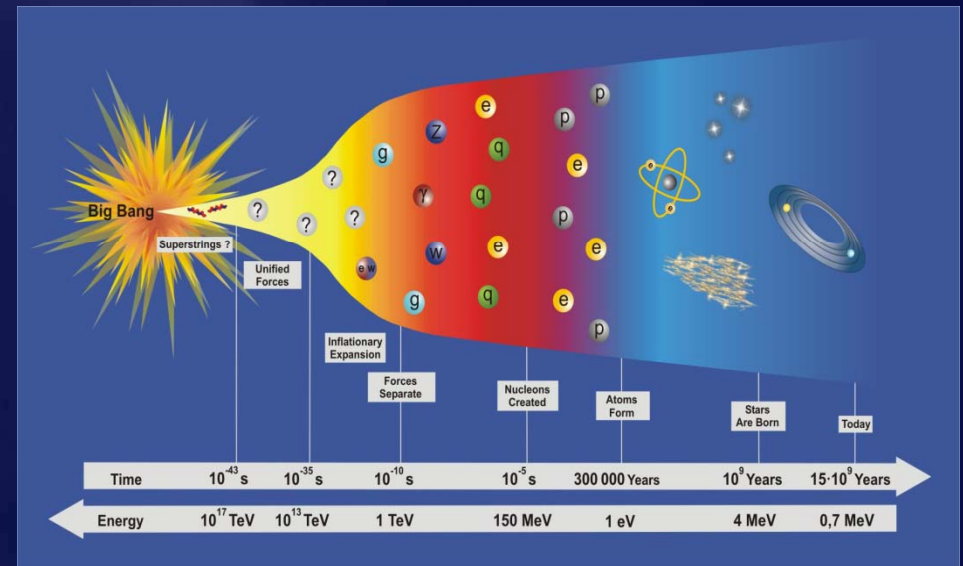
# Co dalej ?

## Akcelerator liniowy $e^+e^-$



VLHC ?

40 -200 TeV, 233km



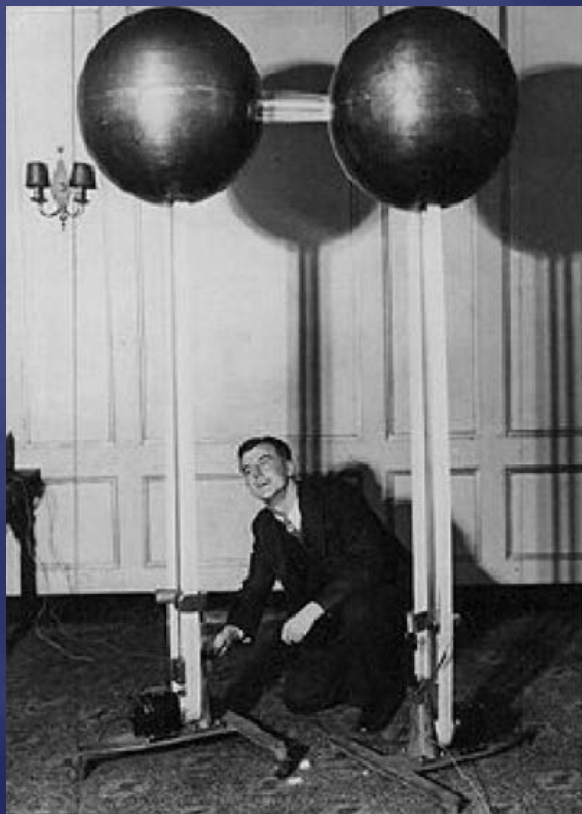
# Podsumowanie

- ▣ 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



# Akceleratorzy

Wczoraj



Dziś



2009-04-01

dr Sławomir Wronka, IPJ

## 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<sub>max</sub> = 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



Tato, gdzie mój  
proton...?

