

# Elementy fizyki cząstek elementarnych

dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

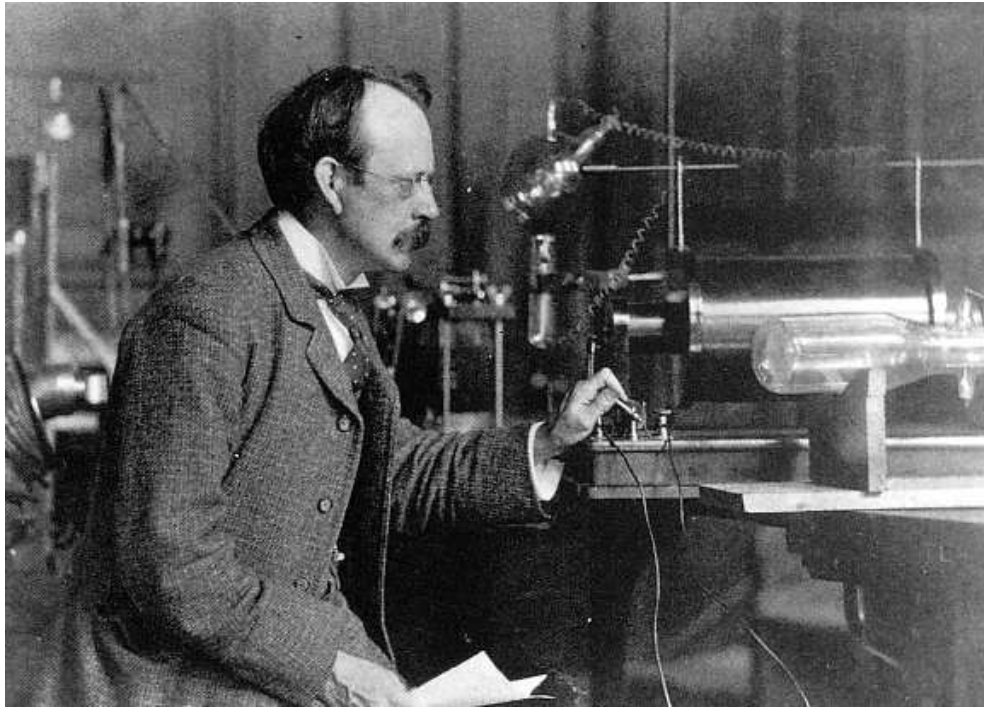
## Plan wykładu:

- Świat cząstek elementarnych  
*cząstki, jednostki, kinematyka relatywistyczna*
- Akceleratory i Detektory cząstek
- Struktura protonu  
*rozpraszanie nieelastyczne, kwarki a partony, funkcje struktury, QCD*
- Oddziaływania elektro-słabe  
*unifikacja, Model Standardowy, łamanie symetri, cząstka higgsa*
- Neutrino  
*neutrino słoneczne i atmosferyczne, oscylacje*
- Kosmologia  
*model Wielkiego Wybuchu, promieniowanie tła*
- Wielka unifikacja
- Supersymetria
- Dodatkowe wymiary
- Przyszłość fizyki cząstek

# Wprowadzenie

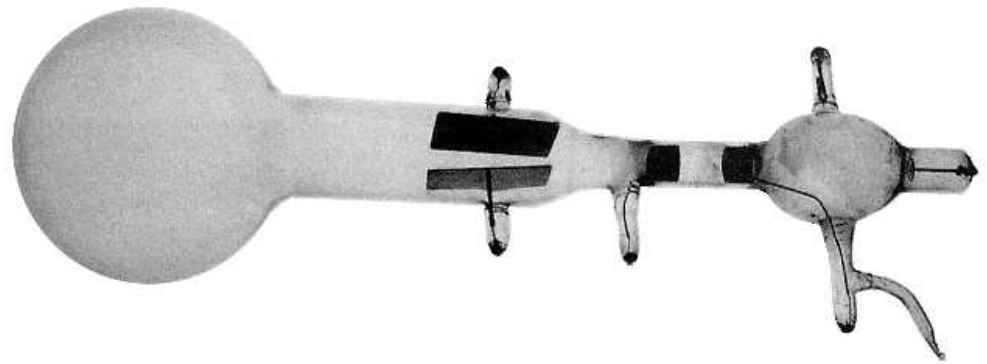
## Początki fizyki cząstek

Joseph Thomson



odkrywając elektron w 1897 roku  
zapoczątkował nową erę w fizyce

Thomson badał tzw. promienie katodowe



pokazał, że promienie te odchylają się w  
polu elektrycznym  $\Rightarrow$  niosą ładunek

# Wprowadzenie

## Kolejne odkrycia...

- 1905 – Albert Einstein zaproponował kwant światła, czyli foton
- 1911 – Ernest Rutherford wysuwa hipotezę jądra atomowego
- 1919 – Ernest Rutherford dostarcza pierwszych dowodów istnienia protonu
- 1929 – akcelerator Van der Graaffa
- 1930 – Wolfgang Pauli wysuwa hipotezę neutrino
- 1931 – Ernest Lawrence buduje pierwszy cyklotron
- 1931 – James Chadwick odkrywa neutron
- 1932 – Carl Anderson odkrywa pozytron
- 1937 – odkrycie mionu  $\mu^\pm$

po wojnie nastąpił lawinowy rozwój...

# Świat cząstek elementarnych

## Fermiony

świat “codzienny” zbudowany jest z 3 “cegielek” (elektron oraz kwarki  $u$  i  $d$ )

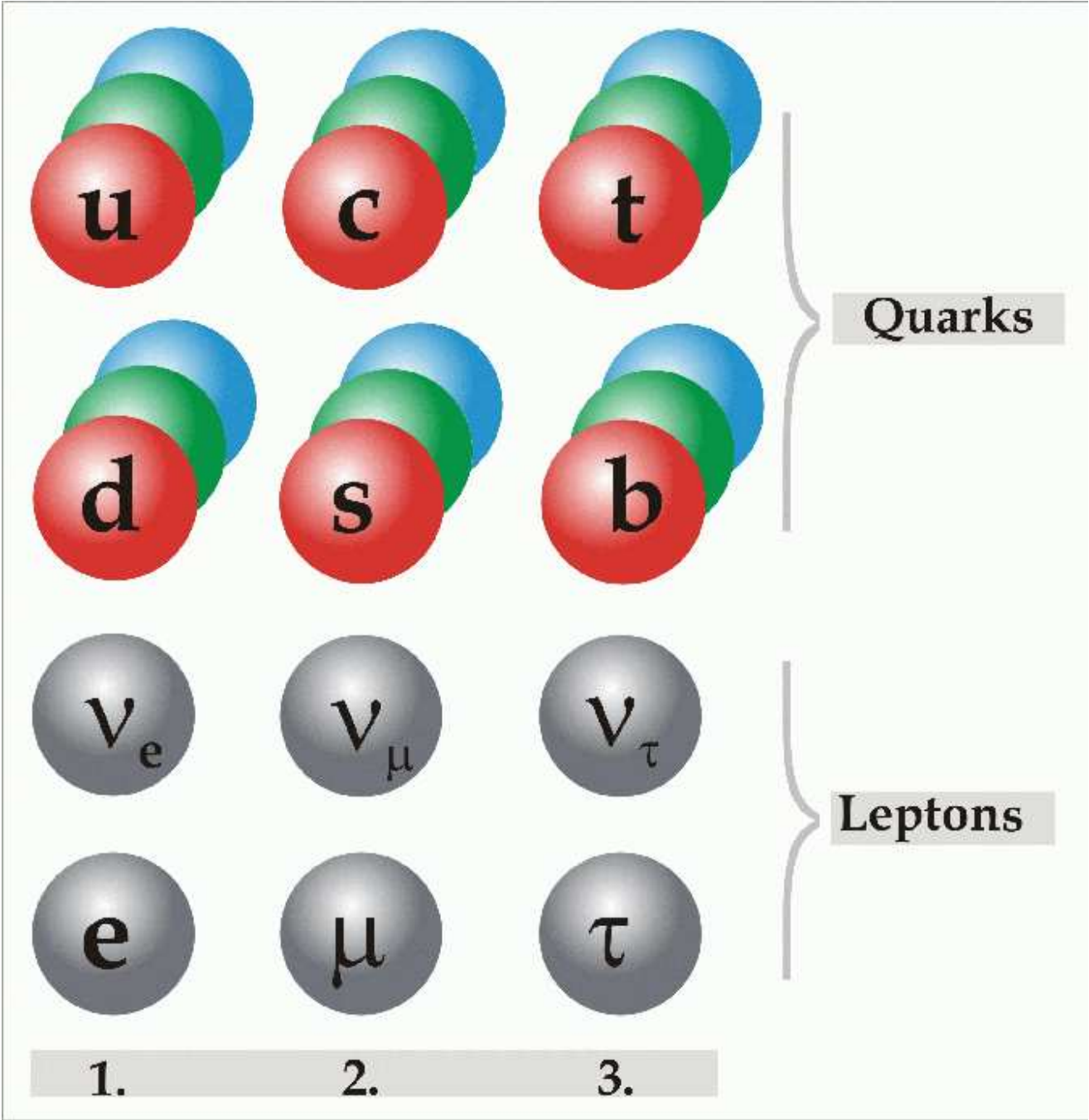
Fizyka cząstek znalazła już jednak 12 fundamentalnych “cegielek” materii, **fermionów** (cząstek o spinie  $1/2$ )

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <i>neutrino taonowe</i>	$b$ <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	$t$ <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ **anty-fermiony** (kolejnych 12)

# Budowa materii

Trzy "pokolenia" fermionów



# Świat cząstek elementarnych

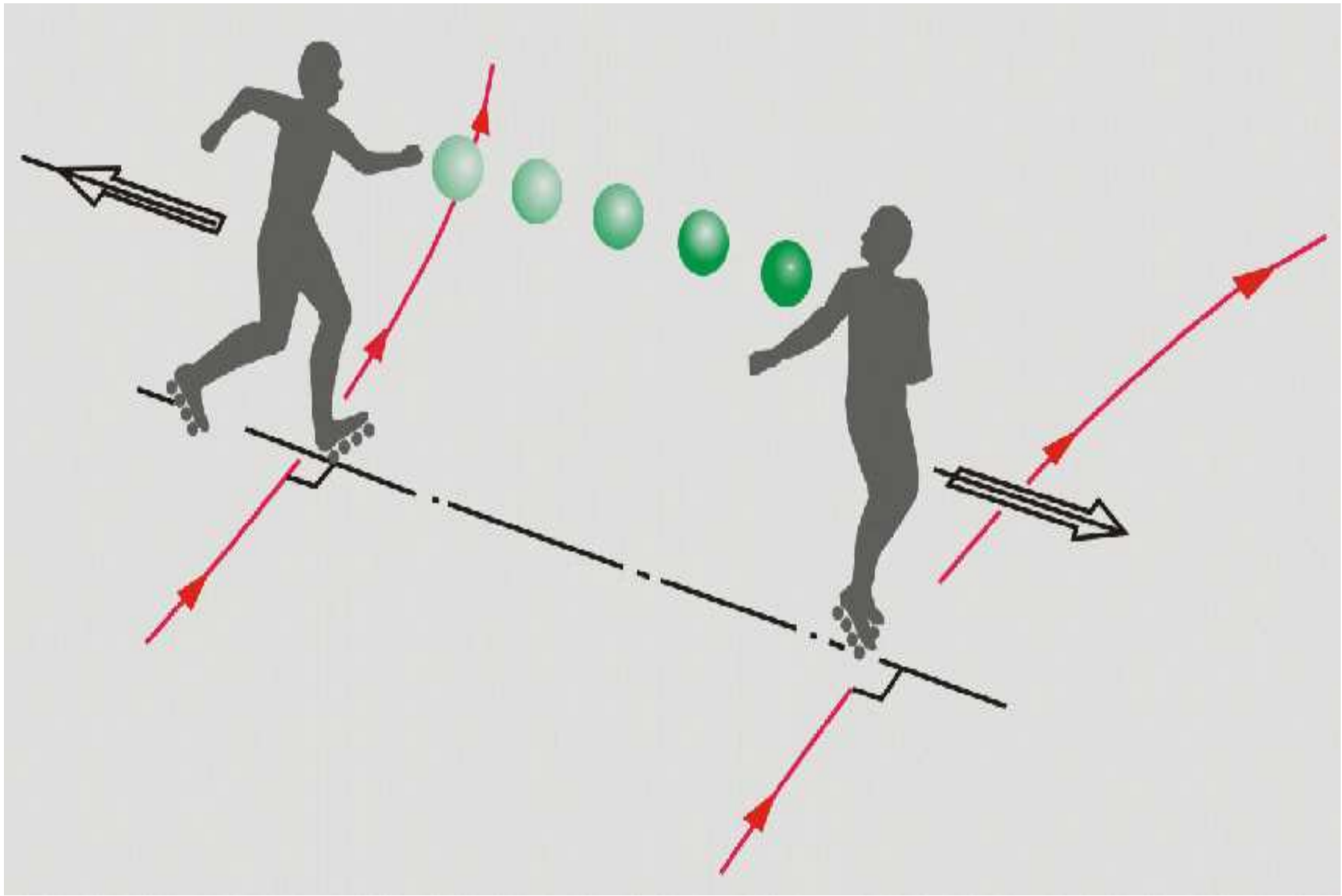
## Bozony

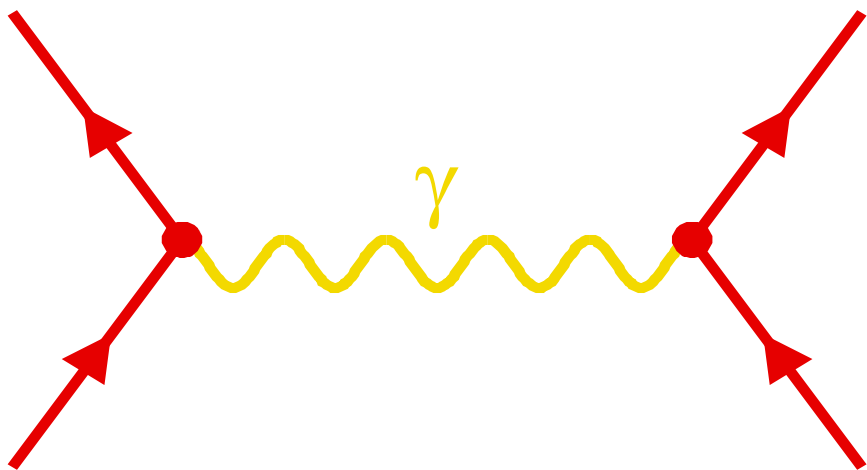
“Cegielki” materii oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

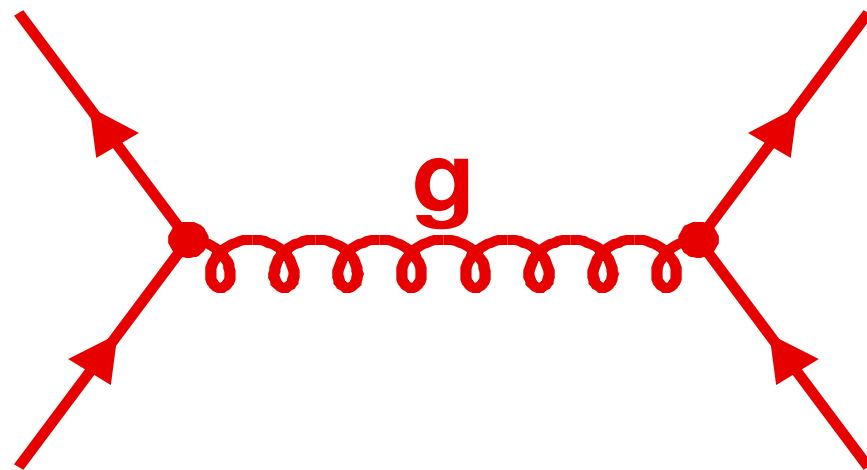
<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>		<i>moc</i>
grawitacyjne	masa	grawiton	G	$10^{-39}$
elektromagnetyczne	ładunek	foton	$\gamma$	$10^{-2}$
silne	“kolor”	gluony	$g$	1
słabe	“ładunek słaby”	“bozony pośredniczące”	$W^{\pm}, Z^0$	$10^{-7}$

“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów

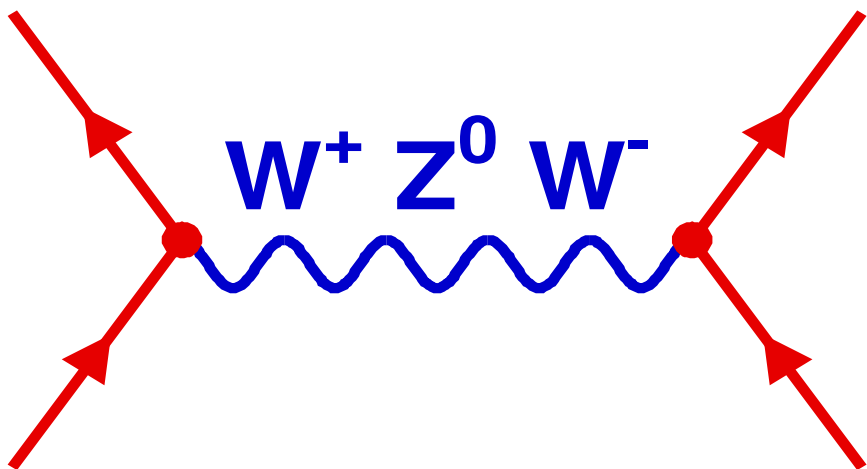




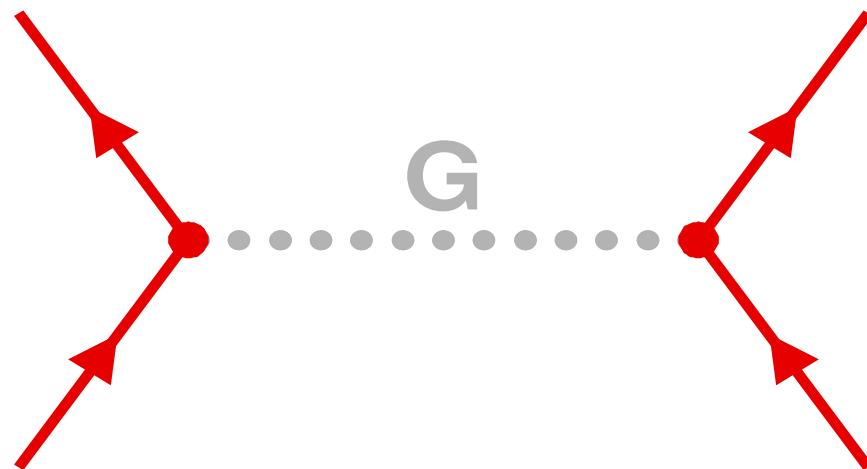
**elektromagnetyczne**



**silne**



**slabe**



**grawitacyjne**



Model  
Standardowy

# The Standard Model

Generation I    Generation II    Generation III

Leptons

$\nu_e$	$e$
---------	-----

$\nu_\mu$	$\mu$
-----------	-------

$\nu_\tau$	$\tau$
------------	--------

Quarks

$u$	$u$	$u$
$d$	$d$	$d$

$c$	$c$	$c$
$s$	$s$	$s$

$t$	$t$	$t$
$b$	$b$	$b$

Gauge  
Bosons

$Z^0$	$W^+$	$\gamma$
	$W^-$	

	$g$	

Higgs

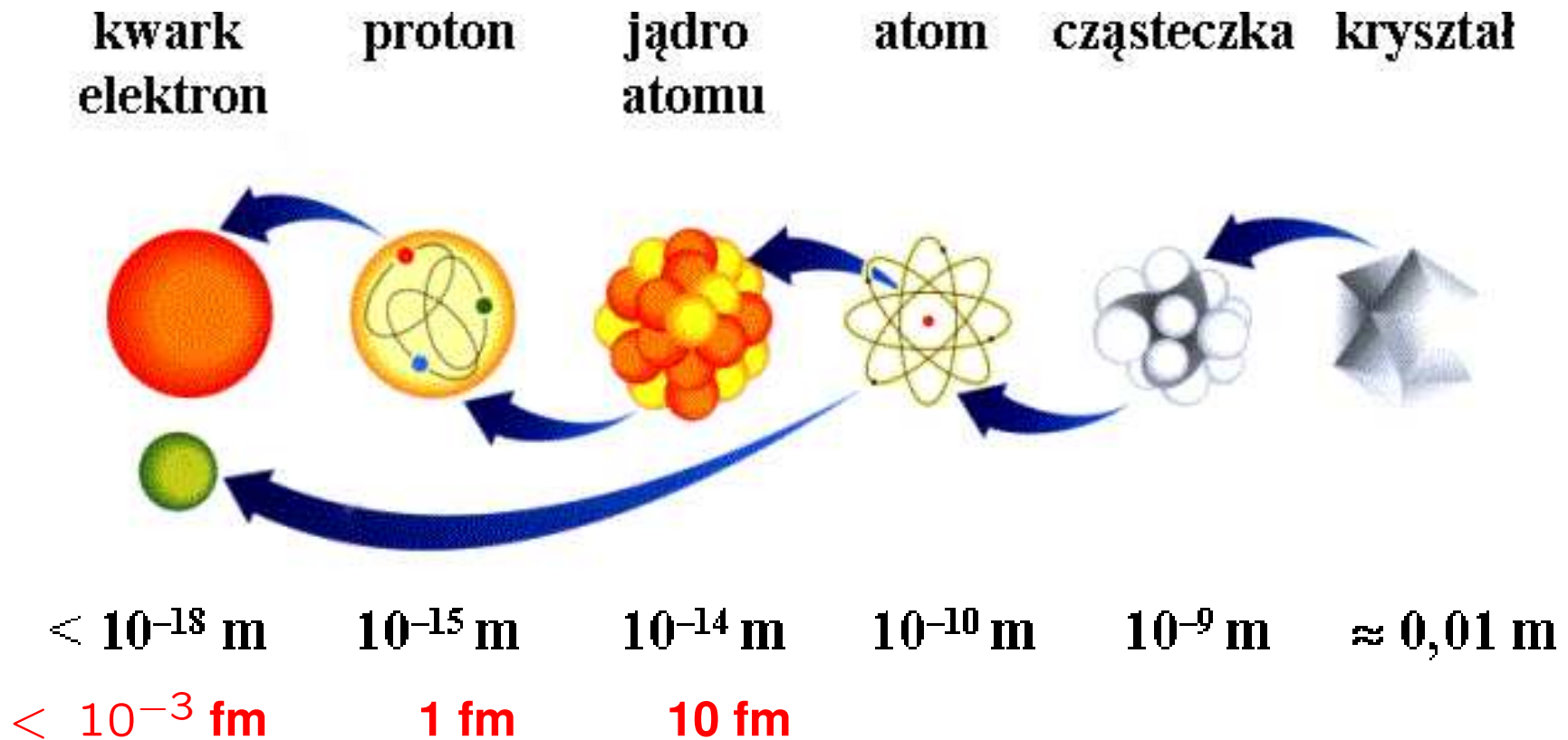
Graviton

# Jednostki

## Długość

Powszechnie używaną jednostką długości jest **1 fentometr**

$$1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$$



# Jednostki

## Czas

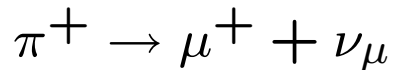
Typowe czasy życia cząstek  
(rzęd wielkości):

$$\text{rozpady słabe} \Rightarrow 10^{-10} \text{ s}$$

$$\text{rozpady EM} \Rightarrow 10^{-20} \text{ s}$$

$$\text{rozpady silne} \Rightarrow 10^{-23} \text{ s}$$

Przykład:



rozpad słaby

$$\Rightarrow \tau_{\pi^+} = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

“naturalnym” przelicznikiem czasu życia na jednostki  
długości jest prędkość światła:

$$c \equiv 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (\text{dokładnie!!!})$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

W fizyce cząstek powszechnie przyjmujemy  $c \equiv 1$  czyli:

$$1 \text{ s} \equiv 299\,792\,458 \text{ m}$$

$$\tau_{\pi^+} \equiv c \cdot \tau_{\pi^+} = 7.8 \text{ m}$$

$c\tau$  określa orientacyjny zasięg cząstki  
(zaniedbujemy prędkość cząstki i dylatację czasu)

$\Rightarrow$  czasami wygodne i łatwiejsze do zapamiętania

# Jednostki

## Czasy życia

przykłady  $\Rightarrow$  nie trzeba uczyć się wartości liczbowych

### Cząstki “quasi-stabilne”

		$\tau$	$c\tau$
mion	$\mu$	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	660 m
kaon	$K_L^0$	$5.2 \cdot 10^{-8}$ s	15.5 m
pion	$\pi^\pm$	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	7.8 m
kaon	$K^\pm$	$1.2 \cdot 10^{-8}$ s	3.7 m

### Cząstki o mierzalnym zasięgu

lambda	$\Lambda$	$2.6 \cdot 10^{-10}$ s	7.9 cm
kaon	$K_S^0$	$0.9 \cdot 10^{-10}$ s	2.7 cm
mezon	$B^\pm$	$1.7 \cdot 10^{-12}$ s	0.5 mm
mezon	$D^\pm$	$1.1 \cdot 10^{-12}$ s	0.3 mm
taon	$\tau$	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s	87 $\mu$ m

### Cząstki o niemierzalnym zasięgu

pion	$\pi^0$	$8 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
barion	$\Sigma^0$	$7 \cdot 10^{-20}$ s	0.02 nm
mezon	$\rho^0$	$5 \cdot 10^{-24}$ s	1.3 fm

# Jednostki

## Energia

Naturalna jednostka w fizyce cząstek jest **1 elektronowolt**

**1 eV** - energia jaka zyskuje cząstka o ładunku **1 e** (ładunek elementarny) przy przejściu różnicy potencjału **1 V**.

$$1 e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$
$$\Rightarrow 1 eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

Jednostki pochodne:

$$\begin{aligned} \text{kilo} - 1 \text{ keV} &= 10^3 eV \\ \text{mega} - 1 \text{ MeV} &= 10^6 eV \\ \text{giga} - 1 \text{ GeV} &= 10^9 eV \\ \text{tera} - 1 \text{ TeV} &= 10^{12} eV \end{aligned}$$

## Masa

jednostkę energii możemy też przyjąć za jednostkę masy ( $E = mc^2$ ;  $c \equiv 1$ )

$$1 eV/c^2 \equiv 1 eV = 1.8 \cdot 10^{-36} kg$$

## Jednostki

### Masy cząstek

elektron	e	511 keV	$(9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$
proton	p	938 MeV	$(1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$
mion	$\mu$	106 MeV	
taon	$\tau$	1.78 GeV	
kwark	u	1-5 MeV	
	d	3-9 MeV	
	s	75-170 MeV	
	c	1.15-1.35 GeV	
	b	4.0-4.4 GeV	
	t	$178 \pm 4 \text{ GeV}$	
bozon	$W^{\pm}$	80.4 GeV	
	$Z^0$	91.2 GeV	

Wartości liczbowe wystarczy znać z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.

# Jednostki

## Przekrój czynny

Przekrój czynny ma wymiar powierzchni.

Klasycznie:

pole powierzchni poprzecznej obiektu

Jednostka używana w fizyce cząstek:

$$1 \text{ barn} \equiv 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$\text{mili} - 1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ b}$$

$$\text{mikro} - 1 \mu\text{b} = 10^{-6} \text{ b}$$

$$\text{nano} - 1 \text{ nb} = 10^{-9} \text{ b}$$

$$\text{piko} - 1 \text{ pb} = 10^{-12} \text{ b}$$

## Zasada nieoznaczoności

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar \equiv h/2\pi$$

$$\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$= 0.197 \text{ GeV} \cdot \text{fm} \quad (c \equiv 1)$$

Zasada nieoznaczoności wprowadza relacje między jednostkami energii i długości. Bez straty ogólności możemy przyjąć:

$$\hbar \equiv 1$$

$$1 \text{ fm} \approx 5 \text{ GeV}^{-1}$$

$$1 \text{ mb} \approx 2.6 \text{ GeV}^{-2}$$

Przekrój czynny ma wymiar  $E^{-2}$ ...

# Jednostki

## Przykład 1

Całkowity przekrój czynny na proces

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$

W granicy dużych energii wiązek  $e^\pm$ :  $E \gg m_e, m_\mu$   
**analiza wymiarowa** daje:

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} \sim \frac{\alpha^2}{E^2}$$

$\alpha$  - elektromagnetyczna stała sprzężenia ( $\alpha \approx \frac{1}{137}$ )  
Wynik rachunków QED (w tzw. “wiodącym rzędzie”)

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\alpha^2}{E^2}$$

Dla  $E = 1 \text{ GeV}$   $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \approx 22 \text{ nb}$ .

## Przykład 2

Jaką energię powinna mieć  
“sonda” (elektron, foton)  
aby “zobaczyć” wewnętrzną  
strukturę nukleonu ?

$\Rightarrow$  długość fali de Broglie’a  
mniejsza niż promień nukleonu:

$$\begin{aligned} \lambda = h/p &< R_{nucl} \sim 1 \text{ fm} \\ p &> h/R_{nucl} \sim 1 \text{ GeV} \end{aligned}$$



# Kinematyka relatywistyczna

## Czterowektory

Ogólna postać:

$$a^\mu = (a_0, a_1, a_2, a_3) = (a_0, \vec{a})$$

gdzie:  $a_0$  - składowa czasowa  
 $a_i$  - składowe przestrzenne ( $i=1,2,3$ )

Długość czterowektora

(niezmiennik transformacji Lorentza):

$$a^2 = a_0^2 - |\vec{a}|^2$$

Wektor cztero-położenia ( $c \equiv 1$ ):

$$x^\mu = (t, x_1, x_2, x_3) = (t, \vec{x})$$

Wektor cztero-pędu:

$$p^\mu = (E, p_1, p_2, p_3) = (E, \vec{p})$$

W przypadku czteropędu  
pojedynczej cząstki:

$$p^2 = E^2 - |\vec{p}|^2 = m^2$$

# Kinematyka relatywistyczna

## Transformacja Lorentza

Przyjmijmy, że początek układu **A** porusza się z prędkością  $\vec{v} = (0, 0, \beta c)$  w układzie **B**.

Transformacja Lorentza dla czteropędu:

$$E^B = \gamma E^A + \beta\gamma p_3^A$$

$$p_1^B = p_1^A$$

$$p_2^B = p_2^A$$

$$p_3^B = \gamma p_3^A + \beta\gamma E^A$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Jeśli układ **A** jest układem własnym cząstki o masie  $m$ :

$$E^A = m$$

$$\vec{p}^A = \vec{0}$$

$$E^B = \gamma m$$

$$|\vec{p}^B| = \beta\gamma m = \beta E^B$$

Przydatne są też relacje odwrotne:

$$\gamma = E/m$$

$$\beta = |\vec{p}|/E$$

# Kinematyka relatywistyczna

## Granica ultra-relatywistyczna

Dla fotonu mamy:

$$m_\gamma \equiv 0$$

$$\beta \equiv 1$$

$$E = p$$

Elektron o energii 50 GeV:

$$\gamma = E/m \approx 10^5$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.999999999999995$$

$$E - p = (1 - \beta)E \approx 2.5 \text{ eV} \ll m_e$$

Proton o energii 100 GeV:

$$\gamma = E/m \approx 10^2$$

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.99995$$

$$E - p = (1 - \beta)E \approx 5 \text{ MeV} \ll m_p$$

też można stosować przybliżenie  $E \approx p$

można traktować jak cząstkę bezmasową:  $E = p$

# Kinematyka relatywistyczna

## Energia dostępna

Dla układu cząstek kwadrat czteropędu określa energię dostępną w układzie środka masy:

$$p^2 = E_{cms}^2 \equiv s$$

Układ dwóch cząstek **a** i **b**:

$$\begin{aligned} p &= p_a + p_b = (E_a + E_b, \vec{p}_a + \vec{p}_b) \\ s &= (E_a + E_b)^2 - |\vec{p}_a + \vec{p}_b|^2 \end{aligned}$$

Zderzenia wiązek przeciwbieżnych

$$E_a, E_b \gg m_a, m_b:$$

$$\begin{aligned} s &\approx 4 \cdot E_a \cdot E_b \\ E_{cms} &\approx \sqrt{4 \cdot E_a \cdot E_b} \\ E_a = E_b = E &\Rightarrow E_{cms} \approx 2E \end{aligned}$$

Zderzenia wiązki **a** z tarczą **b**;

$$E_a \gg m_a, m_b$$

$$\begin{aligned} s &\approx 2 \cdot E_a \cdot m_b \\ E_{cms} &\approx \sqrt{2 \cdot E_a \cdot m_b} \end{aligned}$$

# Kinematyka relatywistyczna

## Przykład 1

Zderzenia elektron-proton w akceleratorze HERA

$E_e = 27.5 \text{ GeV}$ ,  $E_p = 920 \text{ GeV}$ :

$$s \approx 10^5 \text{ GeV}^2$$
$$E_{cms} \approx 318 \text{ GeV}$$

Aby uzyskać taką samą  $E_{cms}$  w zderzeniach wiązki elektronów na tarczy potrzebna jest energia wiązki

$$E_e = \frac{s}{2m_p} \approx 54 \text{ TeV}$$

Wymagałoby to zbudowania akceleratora liniowego o długości ponad 1000 km.

Akcelerator kołowy nie zmieściłby się między Ziemią a Księżycem...

Akcelerator HERA ma średnicę ok. 2 km (obwód 6.3 km).

# DESY, Hamburg



# Kinematyka relatywistyczna

## Przykład 2

Zderzenia proton-proton w **LHC**;  $E_p = 7 \text{ TeV}$ :

$$s \approx 200 \text{ TeV}^2$$
$$E_{cms} \approx 14 \text{ TeV}$$

W zderzeniach na tarczy potrzebna byłaby wiązka o energii

$$E_p = \frac{s}{2m_p} \approx 10^5 \text{ TeV} = 10^{17} \text{ eV}$$

Cząstki o takiej energii spotykamy w promieniowaniu kosmicznym.

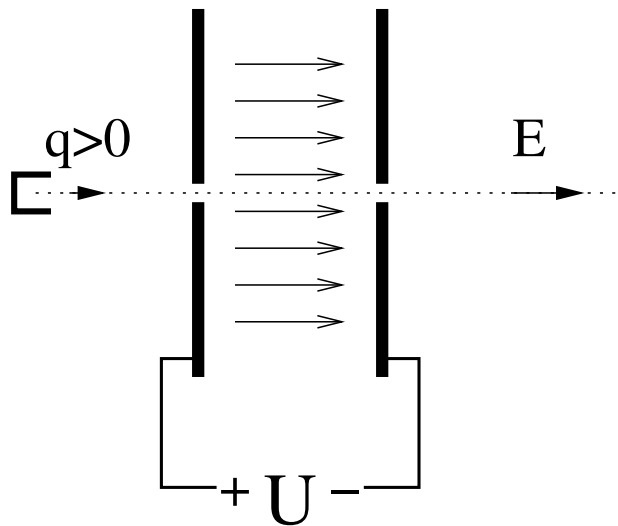
**Nie potrafimy ich jednak wytworzyć...**

Budowany obecnie akcelerator LHC ma obwód 27 km

# Akceleratory

## Kondensator

Najprostrzym 'akceleratorem' cząstek jest kondensator  
(w ogólności dowolne pole elektrostatyczne):



Niestety różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 10 MV  $\Rightarrow E \sim 10 \text{ MeV}$   
(generator Cockrofta-Waltona;  
generator Van de Graaffa).

$\Rightarrow$  **zbyt mało dla fizyki cząstek...**

Uzyskiwana energia:

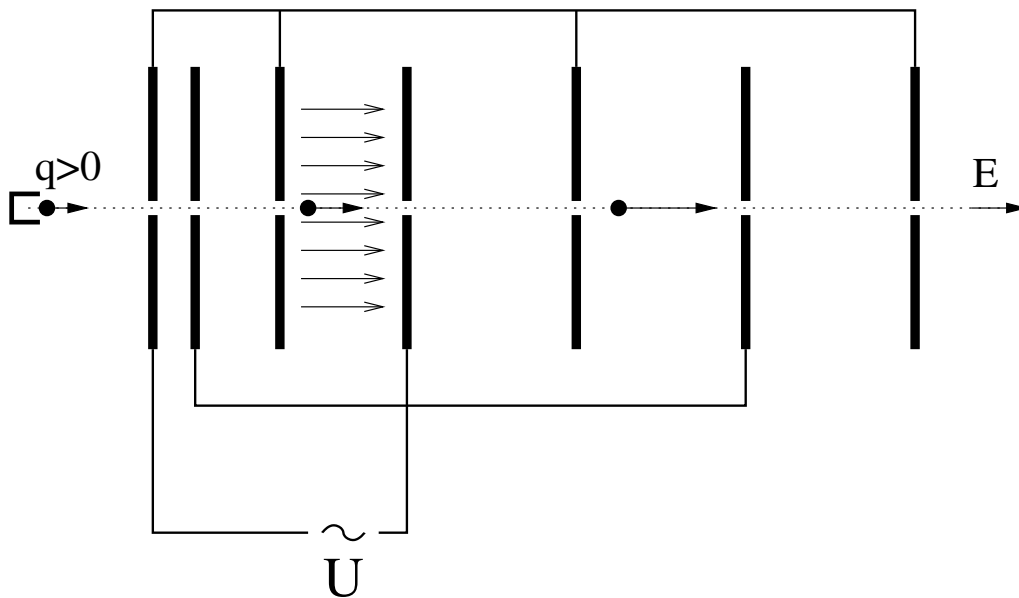
$$E = E_0 + U \cdot q$$



# Akceleratory

## Akcelerator liniowy

Cząstka przechodzi przez kolejne “kondensatory”



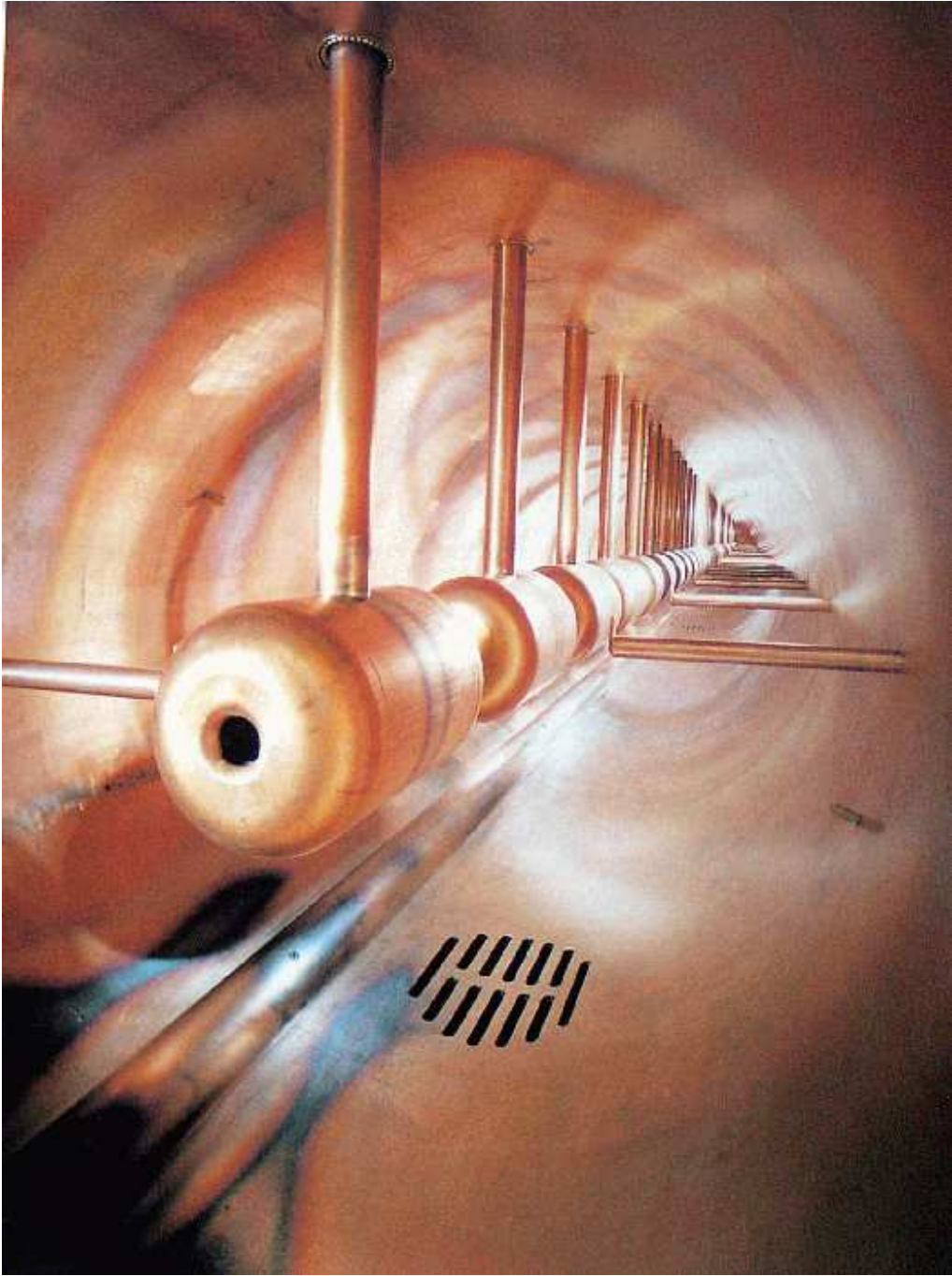
Przy odpowiednim dobraniu długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

Częstość jest zazwyczaj stała. Długości kolejnych elementów rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki.

Dla  $E \gg m$ , prędkość  $\beta \rightarrow 1$ :  $L = \text{const.}$

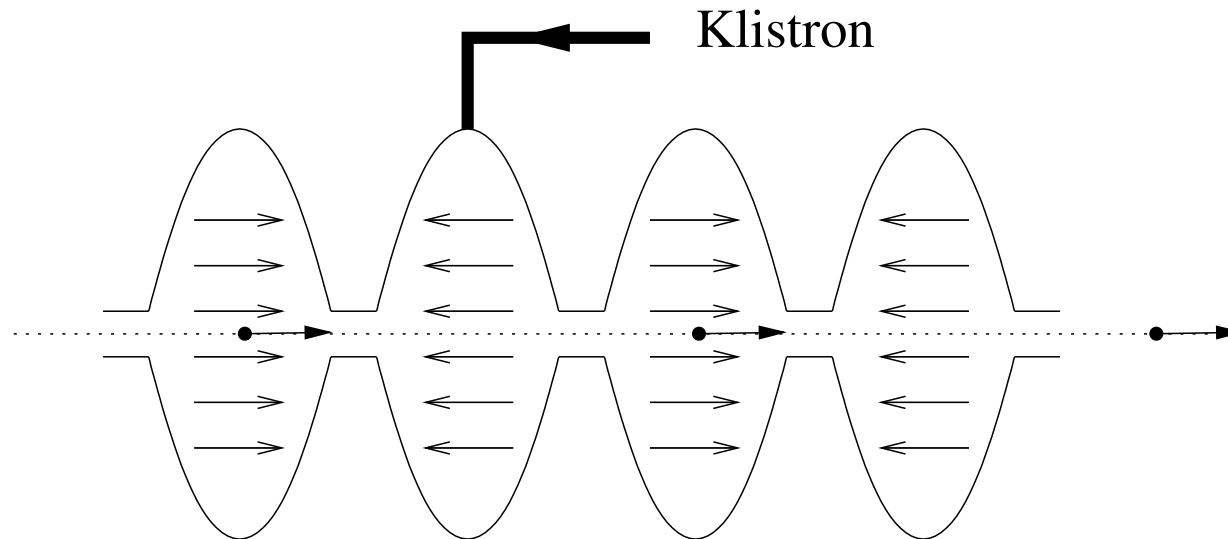
Liniowy akcelerator protonów  
w ośrodku Fermilab (USA)



# Akceleratory

## Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy wnęki rezonansowe:



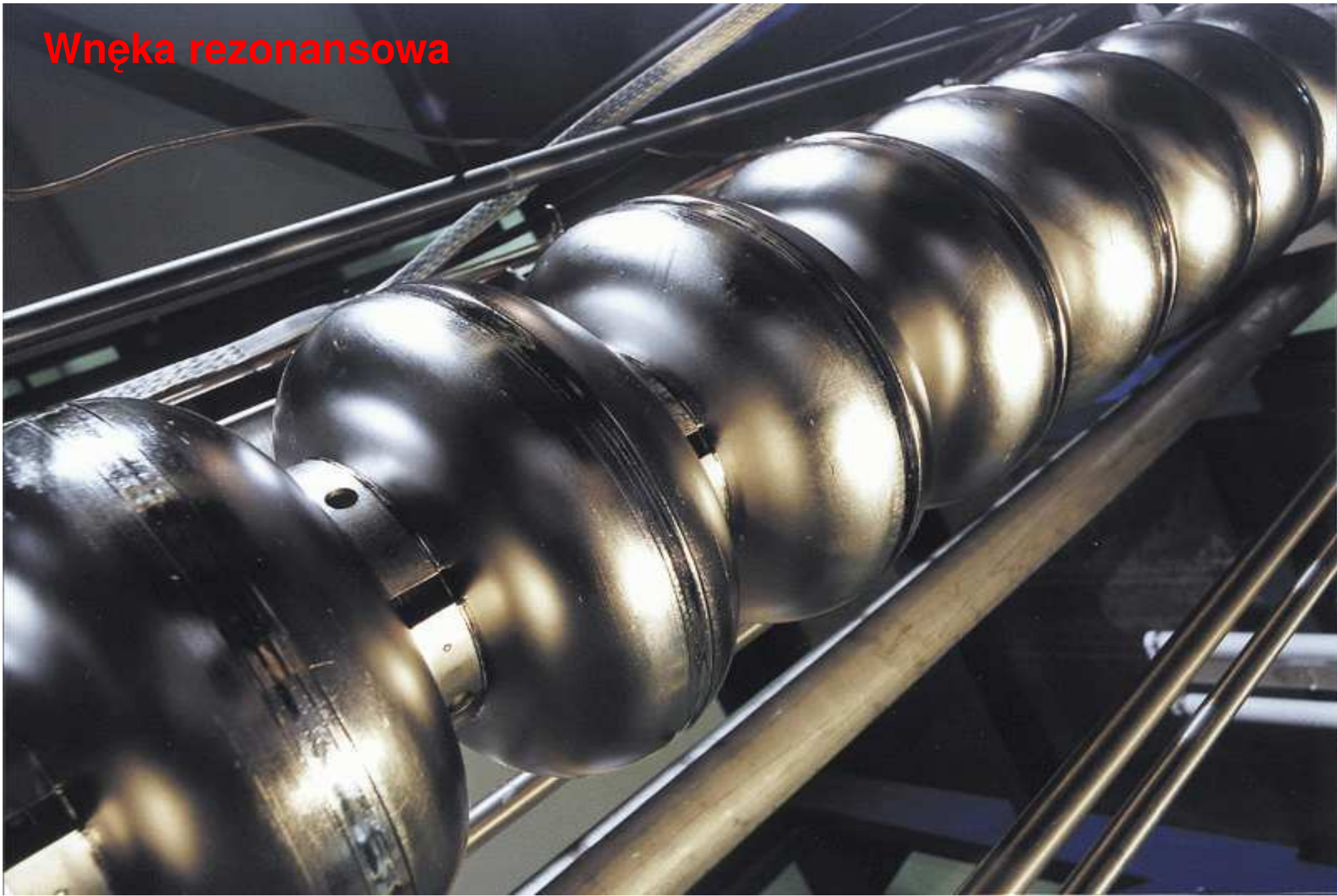
Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

Częstości rzędu 1 GHz - mikrofałe.

Wnęki rezonansowe pozwalają uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV/m

⇒ dla uzyskania energii 1 GeV potrzebny jest akcelerator liniowy o długości  $\sim 100$  m

## Wnęka rezonansowa



# Akceleratory

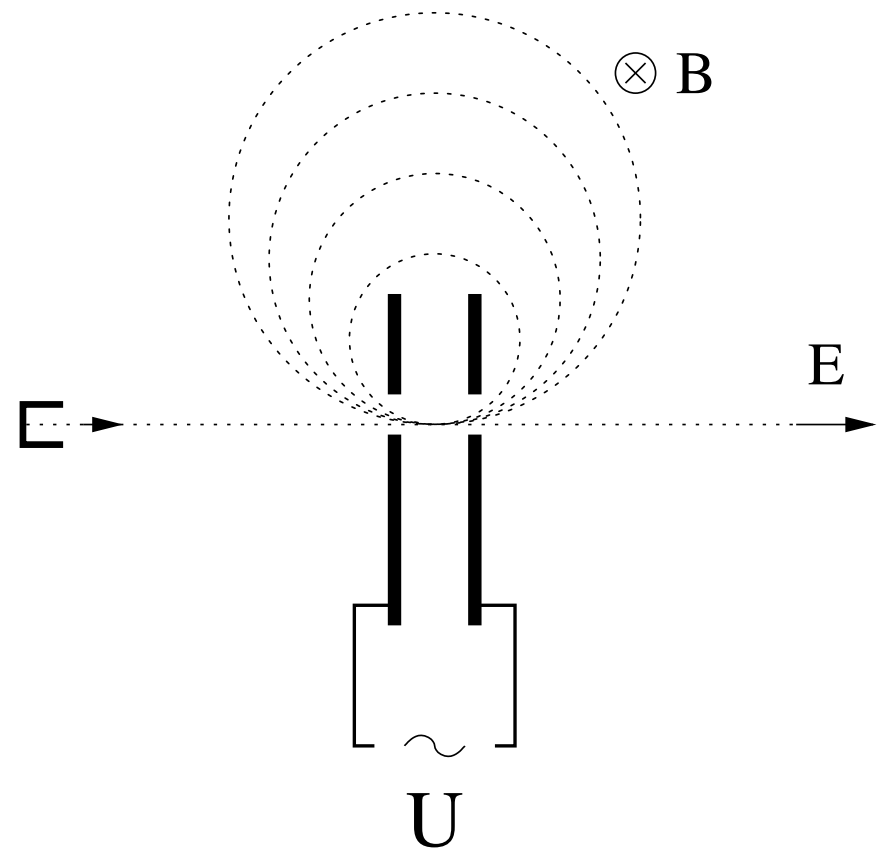
## Akcelerator kołowy

Zamiast używać wielu wnęk możemy wykorzystać pole magnetyczne do “zapętlenia” cząstki.

Cząstki mogą przechodzić przez wnękę przyspieszającą wiele razy...

Pierwszy tego typu akcelerator (**cyklotron**) zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence

Schemat poglądowy:



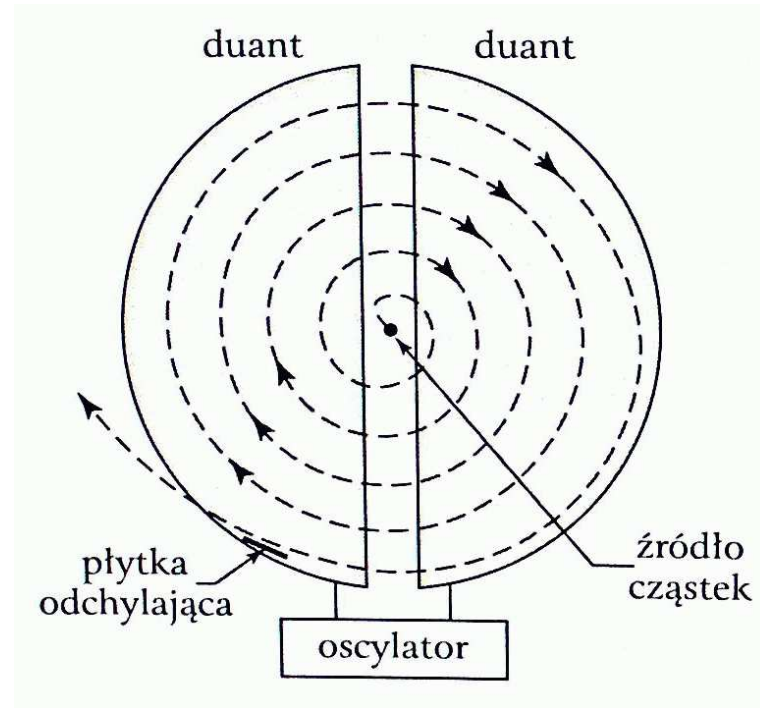
# Akceleratorzy

## Cyklotron

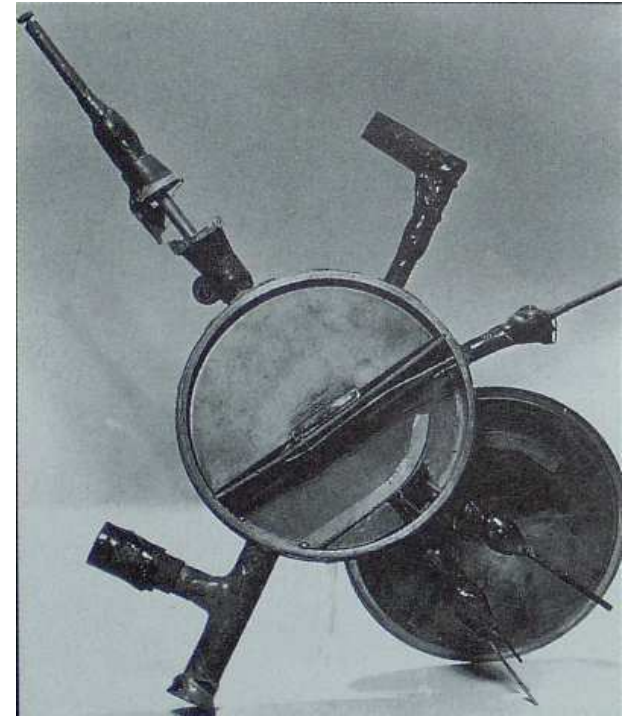
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



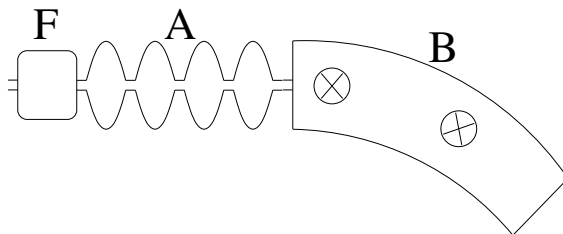
# Akcelerator

## Akcelerator kołowy

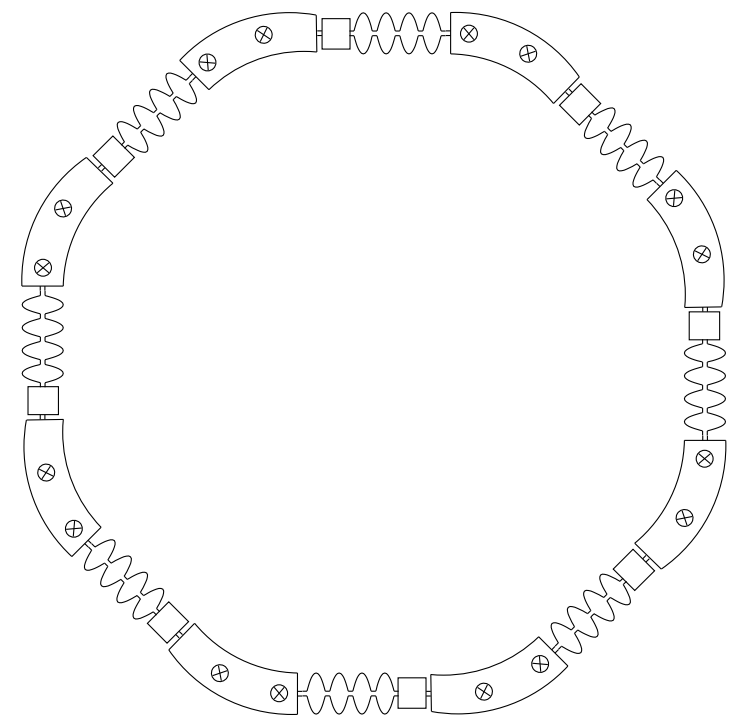
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

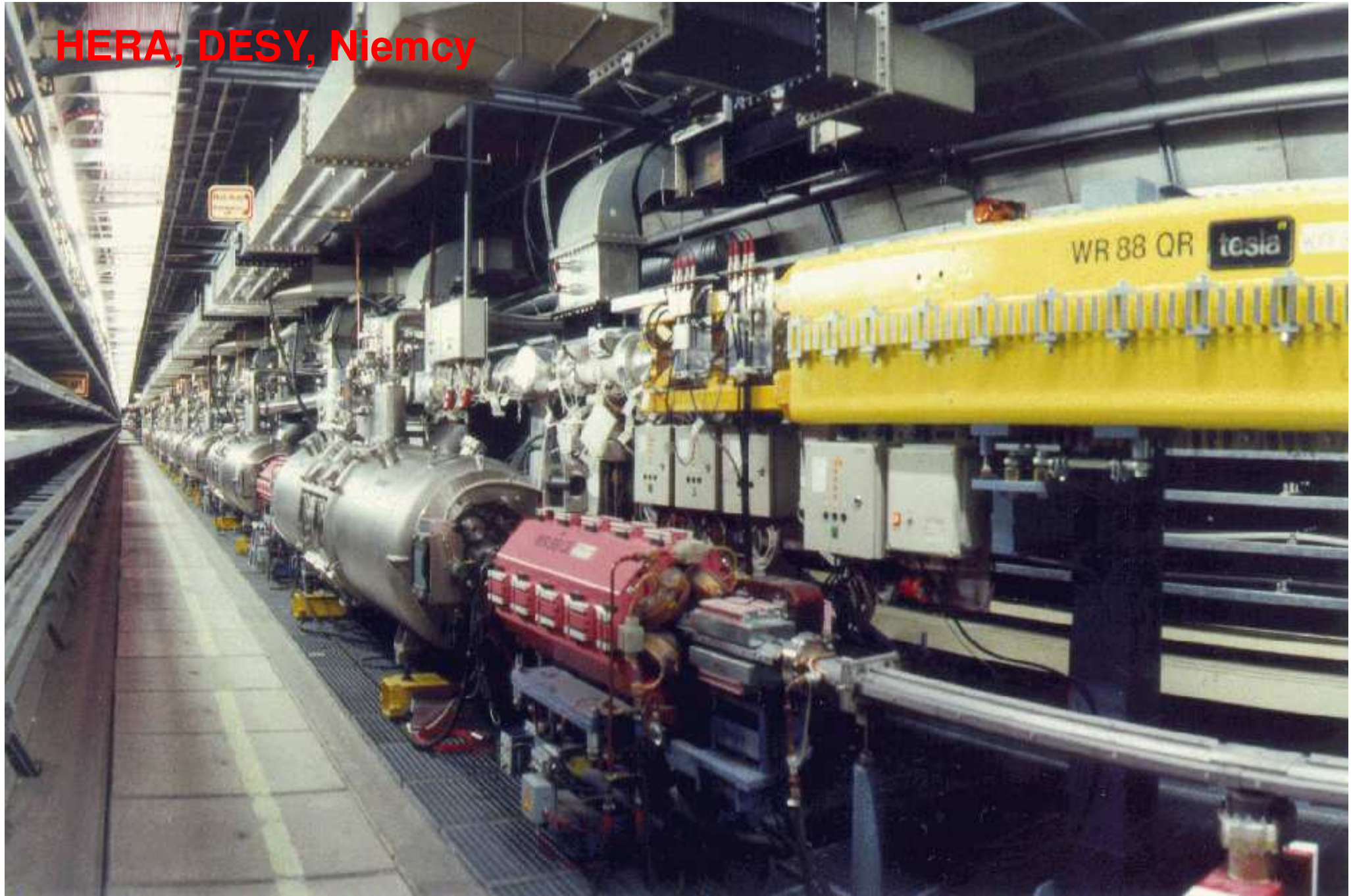
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



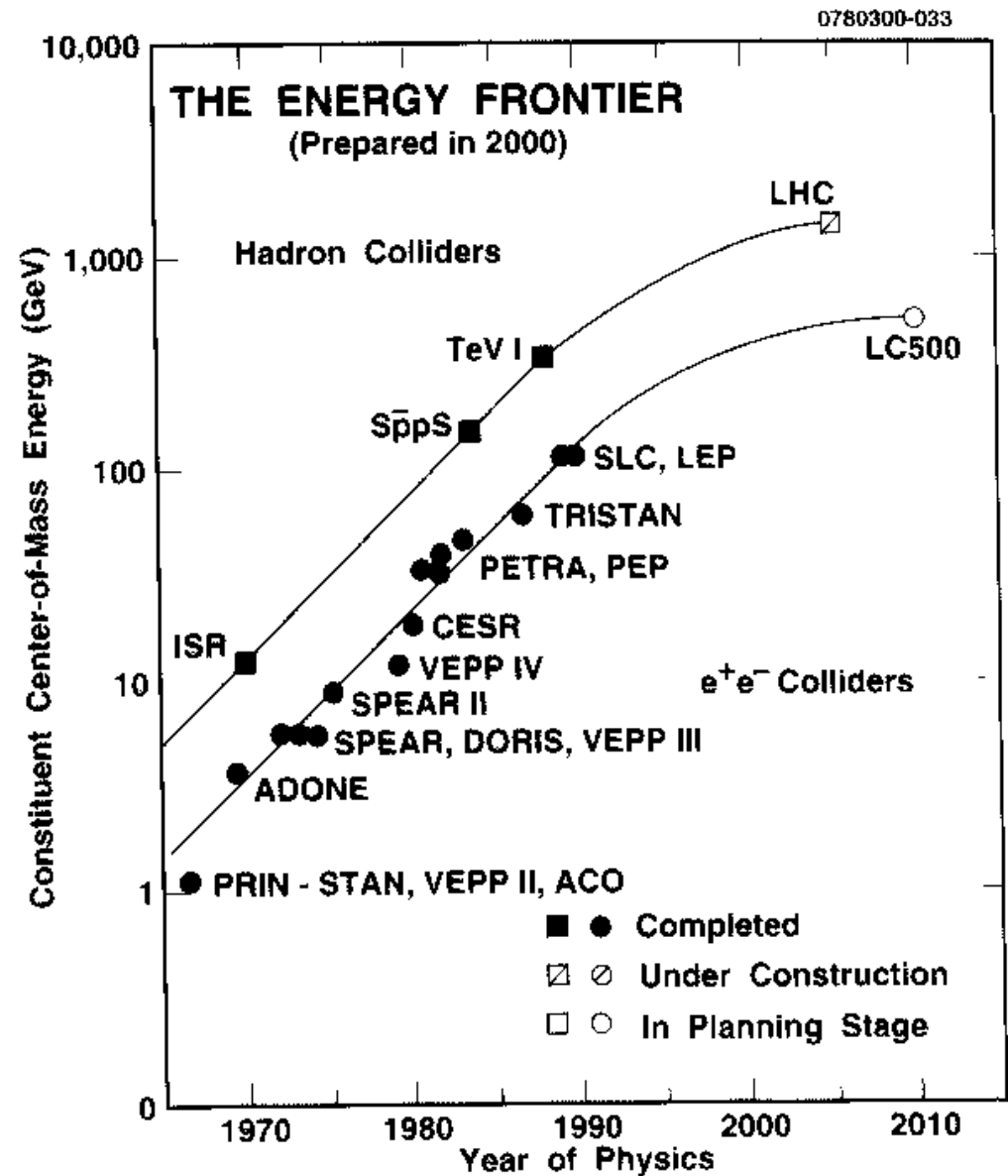
HERA, DESY, Niemcy





# Akceleratory

Kolejne etapy w rozwoju fizyki cząstek są nierozdzielnie związane z budową nowych akceleratorów.



# Akceleratory

## Największe akceleratory

### Już zbudowane

LEP	$e^+e^-$	1989-2000	$\leq 105$ GeV	
SLC	$e^+e^-$	1989-1998	50 GeV	
HERA	$e^\pm p$	1992/2001 –	27 GeV (e) $\times$ 920 GeV (p)	(modernizacja)
SPS	$(p\bar{p})$	1981-1990	-315 GeV	
Tevatron	$p\bar{p}$	1987/2000 –	0.9-1 TeV	
RHIC	$Au Au$	2000 –	100 GeV/u	

### Budowane i projektowane

LHC	$pp$	2007 –	7 TeV	
TESLA/ILC	$e^+e^-$	2015(?) –	250-400 GeV	
THERA	$e^\pm p$	???	500 $\times$ 1000 GeV	

# Akceleratory

## Największe akceleratory

Badania fizyki cząstek koncentrują się dużych ośrodkach:

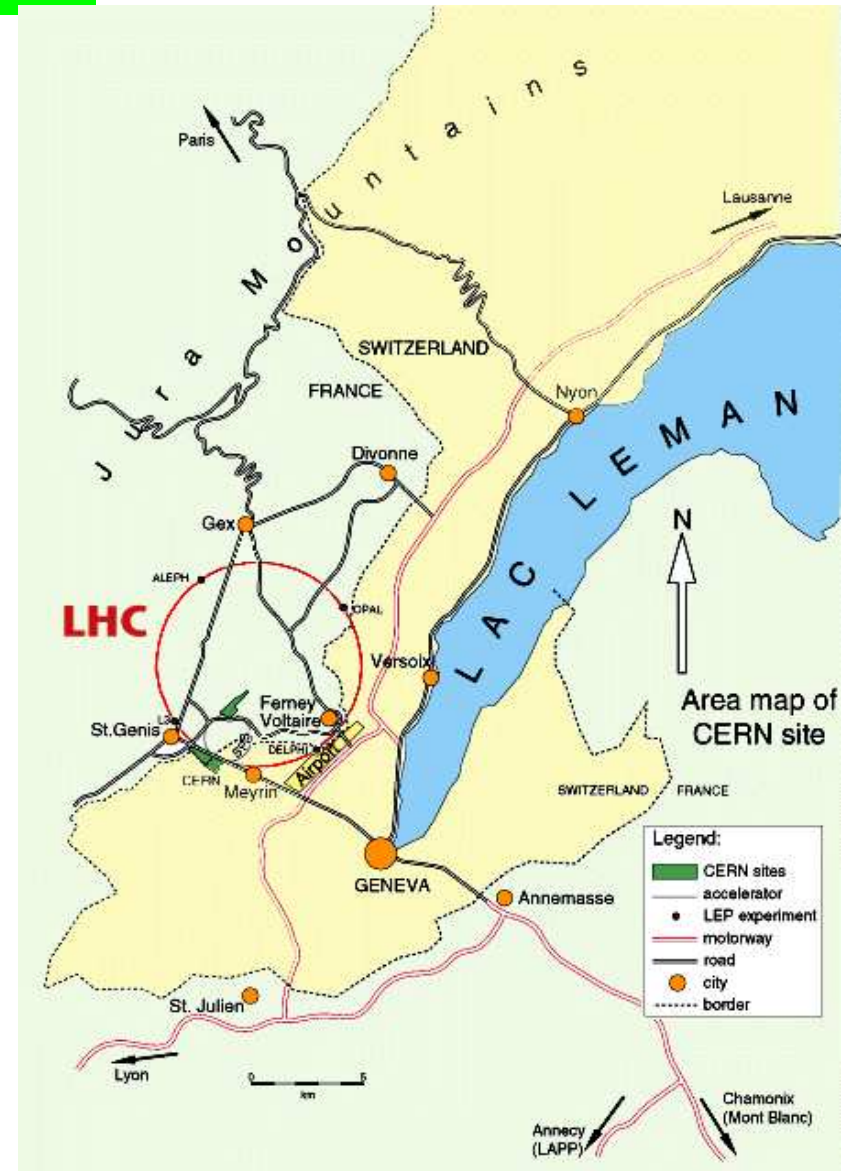
- CERN w Genewie (LEP, SPS, LHC)
- DESY w Hamburgu (HERA, TESLA, THERA)
- Fermilab pod Chicago (Tevatron)
- SLAC w Stanford, Kalifornia (SLC)
- KEK w Japoni

# Akceleratory

## LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był LEP. Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator LHC.



# LHC, CERN, Genewa



# Tevatron, Fermilab, USA



# SLAC Stanford, USA



# KEK Japonia

