Elementy fizyki cząstek elementarnych

Plan wykładu:

- Świat cząstek elementarnych
  cząstki, jednostki, kinematyka relatywistyczna
- Akceleratory i Detektory cząstek
- Struktura protonu (2)
  rozpraszanie nieelastyczne, kwarki a partony, funkcje stuktury, QCD
- Oddziaływania elektro-słabe (2)
  unifikacja, Model Standardowy, łamanie symetri, cząstka higgsa
- Neutrina (2)
  neutrina słoneczne i atmosferyczne, oscylacje
- Kosmologia
  model Wielkiego Wybuchu, promieniowanie tła
- Supersymetria
- Dodatkowe wymiary
- Przyszłość fizyki cząstek elementarnych

Świat cząstek elementarnych

Fermiony

12 fundamentalnych "cegiełek" materii

	leptony		kwarki	
Q =	-1	0	$-1/3$	$+2/3$
pokolenie 1	e *elektron*	ν_e	d *down*	u *up*
pokolenie 2	μ *mion*	ν_μ	s *strange*	c *charm*
pokolenie 3	τ *taon*	ν_τ	b *beauty* *(bottom)*	t *top* *(truth)*

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Świat cząstek elementarnych

Bozony

nośniki oddziaływań

oddziaływanie			*moc*
silne	gluony	g	1
EM	foton	γ	10^{-2}
słabe	"bozony pośredniczące"	$W^{\pm}$, Z°	10^{-7}
grawitacyjne	grawiton	G	10^{-39}

"moc" - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów

Jednostki

Długość

Powszechnie używaną jednostką długości jest

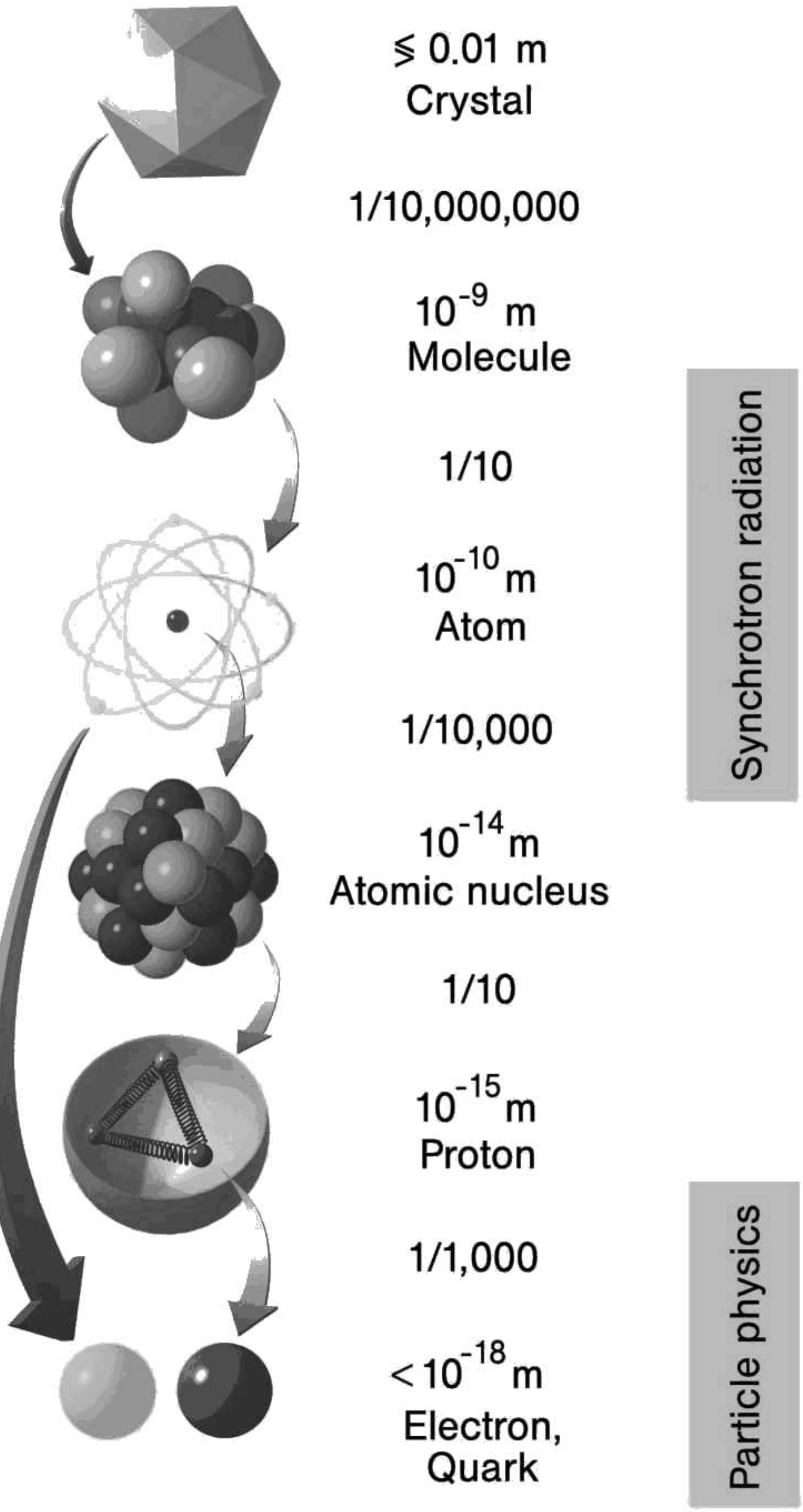
$\boxed{\text{1 fentometr}}$

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

10 fm $\Rightarrow$

1 fm $\Rightarrow$

$<$ 0.001 fm $\Rightarrow$



Jednostki

Czas

Typowe czasy życia cząstek (rząd wielkości):

rozpady słabe	$\Rightarrow$	10^{-10} s
rozpady elektromagnetyczne	$\Rightarrow$	10^{-20} s
rozpady silne	$\Rightarrow$	10^{-23} s

Przykład:

$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ (rozpad słaby) $\tau_{\pi^+} = 2.6 \cdot 10^{-8} s$

"naturalnym" przelicznikiem czasu życia na jednostki długości jest prędkość światła:

$$
\begin{aligned}
c &\equiv 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad \text{(dokladnie!!!)} \\
c &\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}
\end{aligned}
$$

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

$$
\begin{aligned}
1 \text{ s} &\equiv 299\,792\,458 \text{ m} \\
\tau_{\pi^+} \equiv c \cdot \tau_{\pi^+} &= 7.8 \text{ m}
\end{aligned}
$$

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

$\Rightarrow$ czasami wygodne i łatwiejsze do zapamiętania

Jednostki

Czasy życia (przykłady)

Cząstki "quasi-stabilne"		τ	$c\tau$
mion	μ	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	660 m
kaon	K°_L	$5.2 \cdot 10^{-8}$ 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	Λ	$2.6 \cdot 10^{-10}$ s	7.9 cm
kaon	K°_S	$0.9 \cdot 10^{-10}$ 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	τ	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s	87 μm
Cząstki o niemierzalnym zasięgu			
pion	π°	$8 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
barion	Σ°	$7 \cdot 10^{-20}$ s	0.02 nm
mezon	ρ°	$5 \cdot 10^{-24}$ s	1.3 fm

(przykłady $\Rightarrow$ nie trzeba uczyć się wartości liczbowych)

Jednostki

Energia

Naturalna jednostka w fizyce cząstek jest

$$\boxed{\text{1 elektronowolt}}$$

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

$$\begin{aligned} 1\ e &= 1.6 \cdot 10^{-19}\ C \\ \Rightarrow \quad 1\ eV &= 1.6 \cdot 10^{-19}\ J \end{aligned}$$

Jednostki pochodne:

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

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 $\cdot 10^{-31}$ kg)
proton	p	938 MeV	(1.7 $\cdot 10^{-27}$ kg)
mion	μ	106 MeV	
taon	τ	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	174$\pm$5 GeV	
bozon	$W^{\pm}$	80.4 GeV	
	Z°	91.2 GeV	

Wartości liczbowe wystarczy znać z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.

Jednostki

Przekrój czynny

Przekrój czynny ma wymiar powierzchni.

Jednostka używana w fizyce cząstek:

$$\begin{aligned} 1\ \mathrm{barn} \equiv 1\ b &= 10^{-28}\ m^2 \\ mili - \quad 1\ mb &= 10^{-3}\ b \\ mikro - \quad 1\ \mu b &= 10^{-6}\ b \\ nano - \quad 1\ nb &= 10^{-9}\ b \\ piko - \quad 1\ pb &= 10^{-12}\ b \end{aligned}$$

Zasada nieoznaczoności

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot \Delta p &\geq \hbar \equiv h/2\pi \\ \Delta t \cdot \Delta E &\geq \hbar \\ \hbar &= 1.05 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s \\ &= 0.197\ GeV \cdot fm \quad (c \equiv 1) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \hbar &\equiv 1 \\ 1\ fm &\approx 5\ GeV^{-1} \\ 1\ mb &\approx 2.6\ GeV^{-2} \end{aligned}$$

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:

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

α - elektromagnetyczna stała sprzężenia ($\alpha \approx \frac{1}{137}$)
Wynik rachunków QED (w wiodącym rzędzie):

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

Dla $E =$1 GeV $\quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) \approx$ 22 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:

$$\lambda = h/p \;<\; R_{nucl} \sim 1\ fm$$
$$p \;>\; h/R_{nucl} \sim 1 GeV$$

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)

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

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

Wektor cztero-pędu:

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

Długość czterowektora (niezmiennik transformacji Lorentza):

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

W przypadku czteropędu pojedyńczej 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:

$$\begin{aligned} E^B &= \gamma\, E^A + \beta\gamma\, p_3^A \\ p_1^B &= p_1^A \\ p_2^B &= p_2^A \\ p_3^B &= \gamma\, p_3^A + \beta\gamma\, E^A \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} E^A &= m \\ \vec{p}^A &= \vec{0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E^B &= \gamma\, m \\ |\vec{p}^B| &= \beta\gamma\, m = \beta\, E^B \end{aligned}$$

Przydatne są też relacje odwrotne:

$$\begin{aligned} \gamma &= E/m \\ \beta &= |\vec{p}|/E \end{aligned}$$

Kinematyka relatywistyczna

Granica ultra-relatywistyczna

Dla fotonu mamy:

$$\begin{aligned} m_\gamma &\equiv 0 \\ \beta &\equiv 1 \\ E &= p \end{aligned}$$

Elektron o energii 50 GeV:

$$\begin{aligned} \gamma &= E/m \approx 10^5 \\ \beta &= \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.99999999995 \\ E - p &= (1 - \beta)E \approx 2.5\ eV \ll m_e \end{aligned}$$

można traktować jak cząstke bezmasową: $E = p$

Proton o energii 100 GeV:

$$\begin{aligned} \gamma &= E/m \approx 10^2 \\ \beta &= \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \approx 0.99995 \\ E - p &= (1 - \beta)E \approx 5\ MeV \ll m_p \end{aligned}$$

też można stosować przybliżenie $E \approx p$

Kinematyka relatywistyczna

Energia dostępna

Dla układu cząstek kwadrat czteropędu określa energie 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 $E_a, E_b \gg m_a, m_b$:

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

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 GeV, E_p =920 GeV:

$$\begin{aligned} s &\approx 10^5\, GeV^2 \\ E_{cms} &\approx 318\, GeV \end{aligned}$$

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

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

Wymagałoby to zbudowania akceleratora liniowego o długosci ponad 1000 km.

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

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

Kinematyka relatywistyczna

Przykład 2

Zderzenia proton-proton w LHC; E_p =7 TeV:

$$\begin{aligned} s &\approx 200\, TeV^2 \\ E_{cms} &\approx 14\, TeV \end{aligned}$$

W zderzeniach na tarczy potrzebna byłaby wiązka o energii

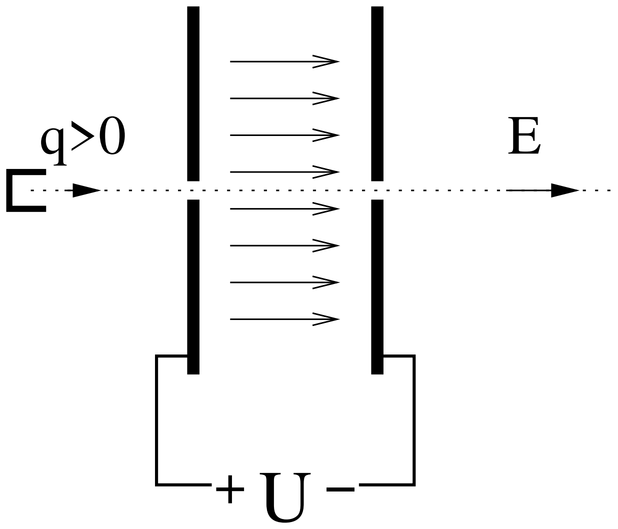
$$E_p = \frac{s}{2m_p} \approx 10^5\, TeV = 10^{17} eV$$

Cząstki o takiej energii spotykamy w promieniowaniu kosmicznym. Nie potrafimy ich jednak wytworzyc...

Akceleratory

Kondensator

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



Uzyskiwana energia:

$$E = E_\circ + U \cdot q$$

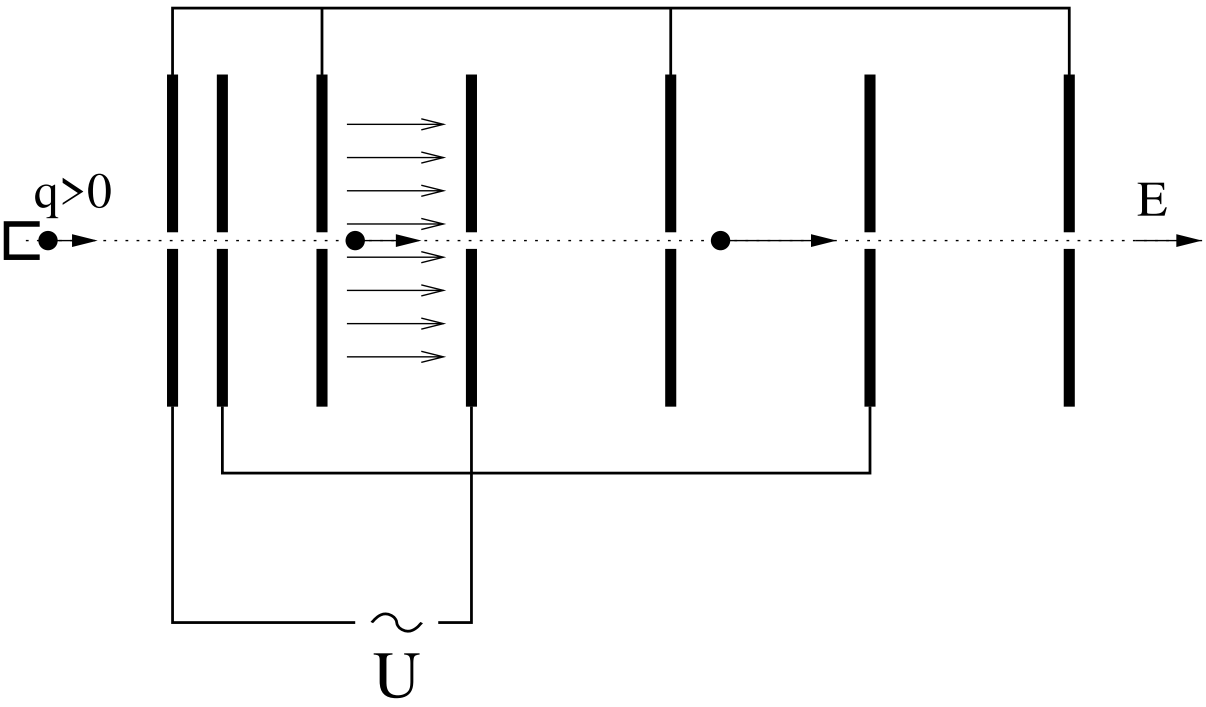
Niestety różnice napięć jakie potrafimy wytwarzać ograniczone są do rzędu 10 MV $\Rightarrow E \sim 10\ MeV$ (generator Cockrofta-Waltona; generator Van de Graaffa).

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

Akceleratory

Akcelerator liniowy

Cząstka przechodzi przez kolejne “kondensatory”



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

$\Rightarrow$ zwielokrotnienie uzyskiwanych energii

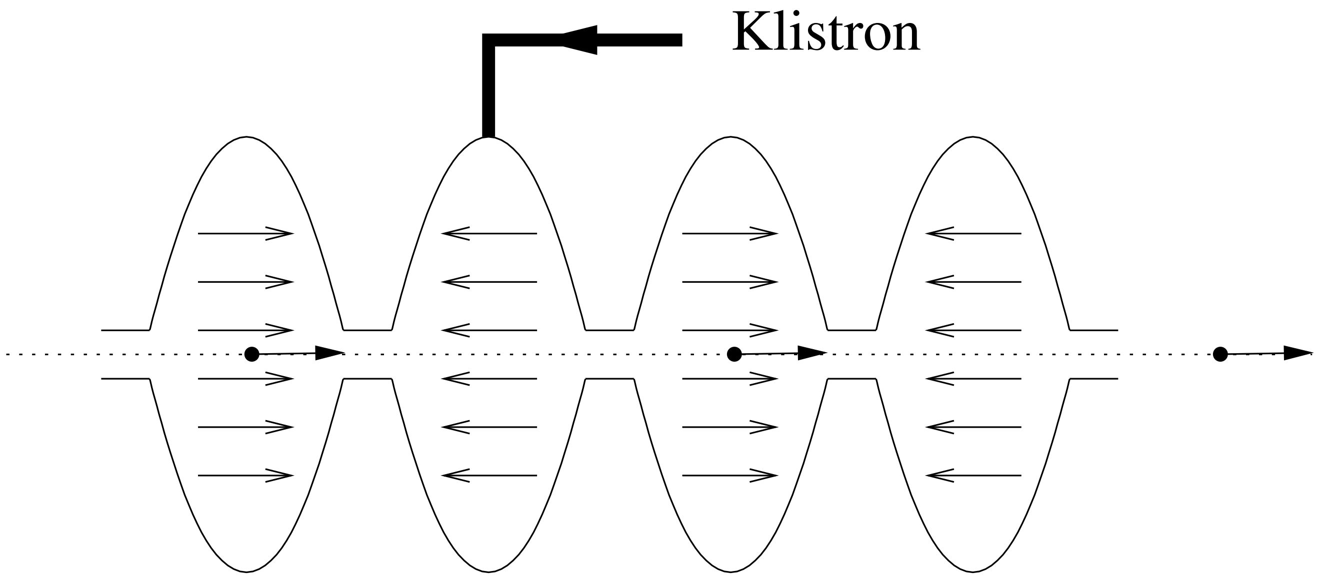
Częstość jest zazwyczaj stała. Długości kolejnych elementów rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki.

Dla $E \gg m$, prędkość $\beta \to 1$: L=const.

Akceleratory

Wnęka rezonansowa

W praktyce do przyspieszania cząstek wykorzystujemy wnęki rezonansowe:



Wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna.

Częstości rzędu 1 GHz - mikrofale.

Wnęki rezonansowe pozwalają uzyskiwać natężenia pola rzędu 10 MV/m (mega-volta na metr)

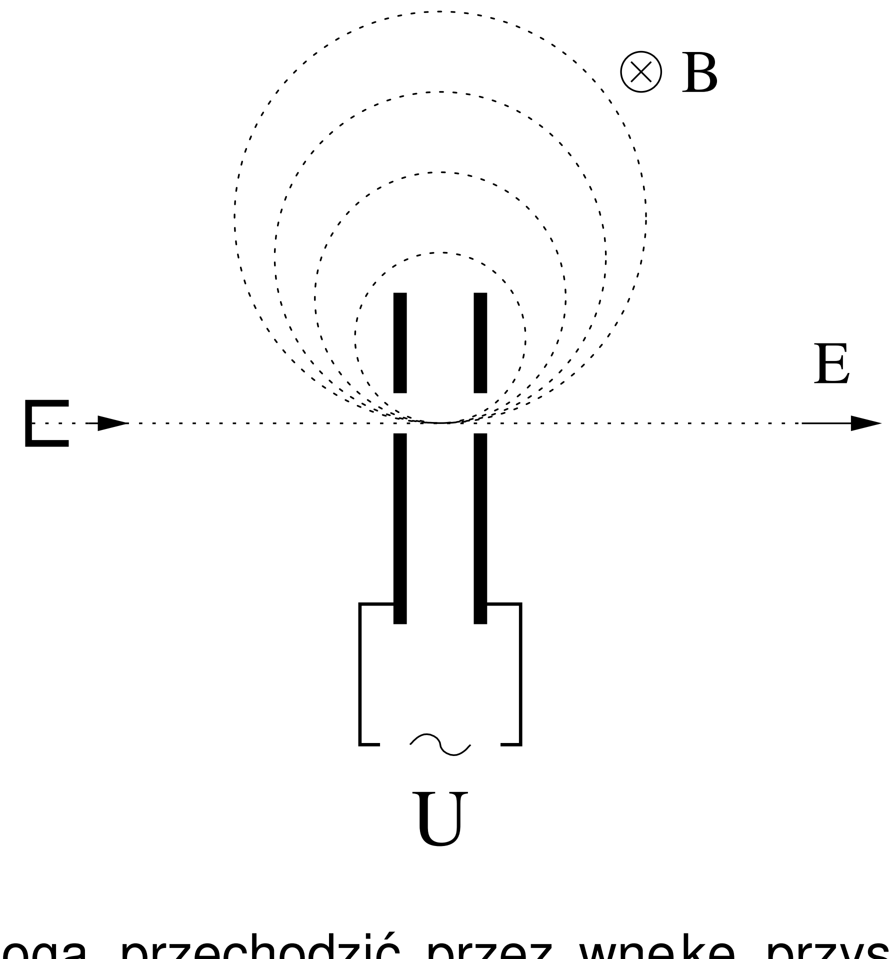
$\Rightarrow$ dla uzyskania energii 1 GeV potrzebny jest akcelerator liniowy o długości $\sim$ 100 m

Akceleratory

Akcelerator kołowy

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

Schemat poglądowy:

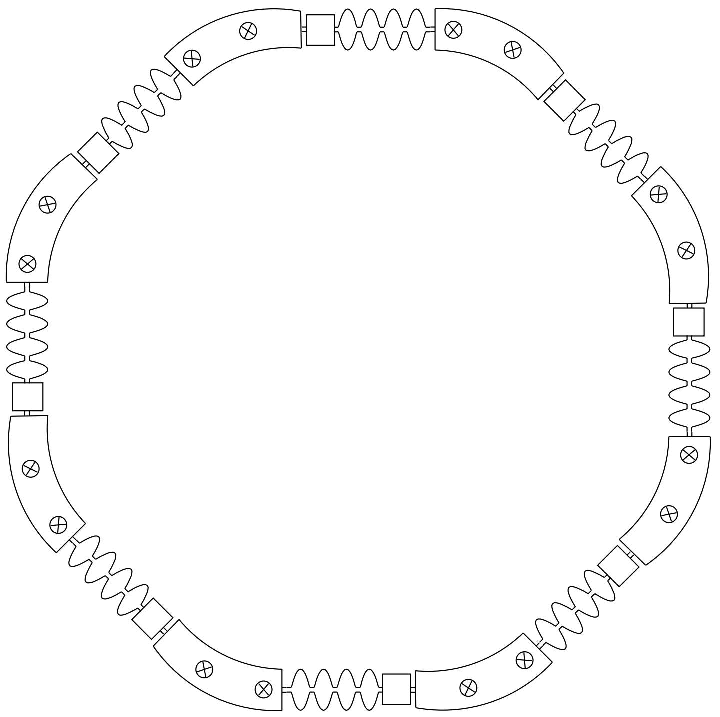


Cząstki mogą przechodzić przez wnękę przyspieszającą wiele razy...

Akceleratory

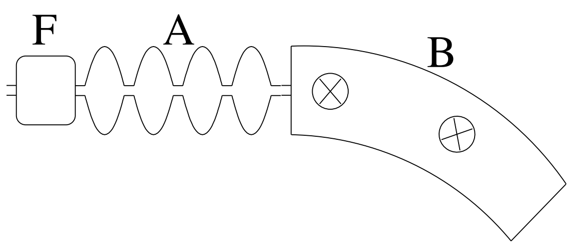
Akcelerator kołowy

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

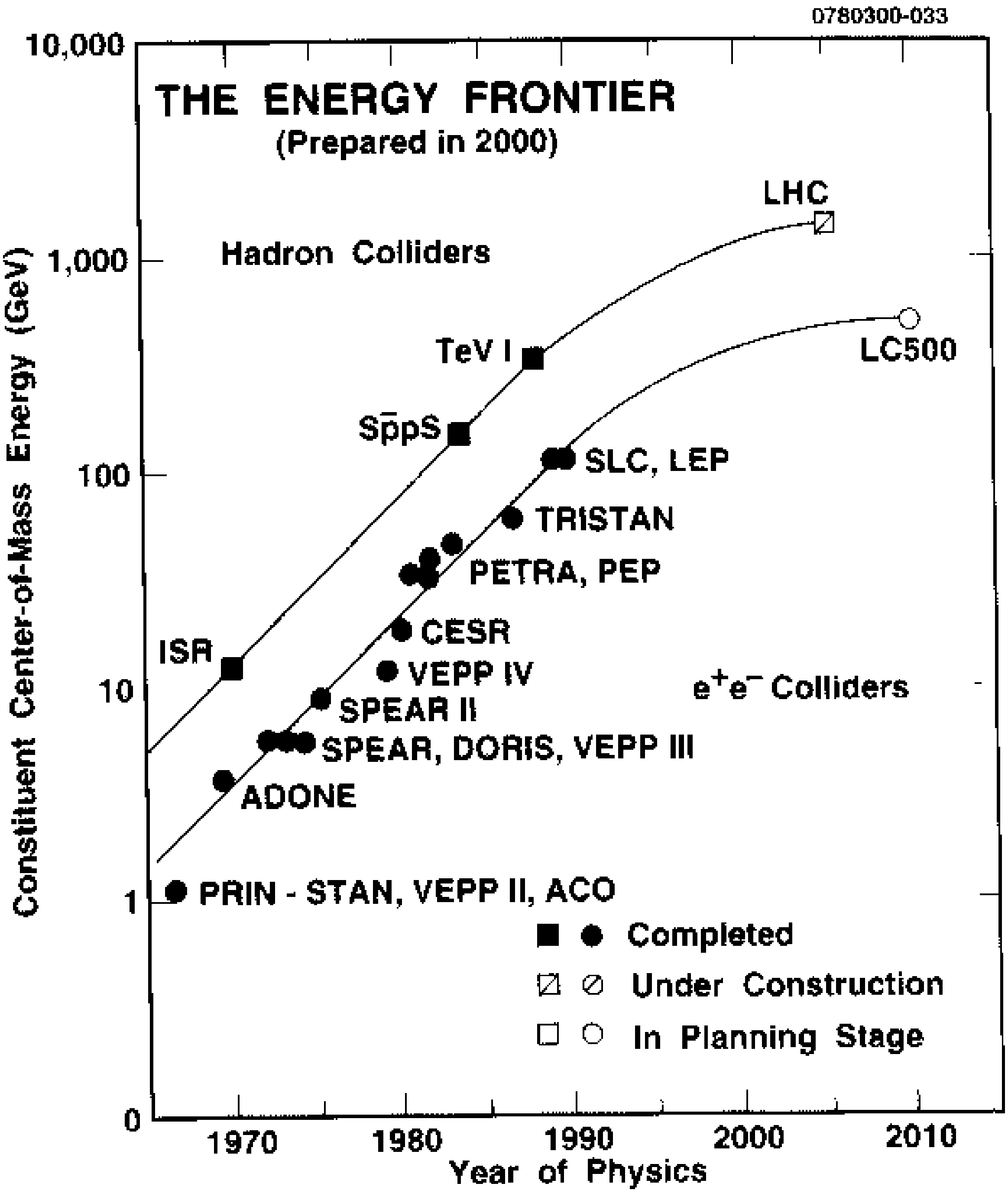


Każdy segment składa się z

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



Akceleratory



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

Akceleratory

Największe akceleratory

Już zbudowane			
LEP	e^+e^-	1989-2000	$\leq$ 105 GeV
SLC	e^+e^-	1989-	50 GeV
HERA	$e^\pm p$	1992 -	27 GeV (e) $\times$ 920 GeV (p)
SPS	($p\bar{p}$)	1981-	-315 GeV
Tevatron	$p\bar{p}$	1987 -	0.9-1 TeV

Budowane i projektowane			
LHC	pp	2006-	7 TeV
TESLA	e^+e^-	2010-	250-400 GeV
THERA	$e^\pm p$	???	500 $\times$ 1000 GeV

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.