- fizyka cząstek elementarnych fizyka wysokich energii
- ruch cząstki w polu magnetycznym i elektrycznym
- akceleratory elektrostatyczne
- akcelaratory liniowe
- akcelaratory kołowe (cykliczne):
 - cyklotron
 - synchrotron
- świetlność akceleratora
- zderzacze
- promieniowanie synchrotronowe
- wiązki wtórne
- zderzacze e*e⁻ i proton-(anty)proton
- największe akceleratory
- kierunki rozwoju

Lidia.Goerlich@ifj.edu.pl

Instytut Fizyki Jądrowej PAN

• Fizyka cząstek elementarnych :

badania fundamentalnych / elementarnych składników materii i ich oddziaływań

• Metoda doświadczalna :

- zderzenia cząstek o dużej energii, przyspieszanych w akceleratorach,
- badania cząstek promieniowania kosmicznego

Do początku lat 50-tych ubiegłego wieku promienie kosmiczne stanowiły jedyne źródło cząstek wysokich energii, odkryto w nim wiele nowych cząstek niewystępujących w otaczajacej nas materii

Eksperyment fizyki cząstek obejmuje kilka ważnych etapów :

- przyspieszanie cząstek elementarnych / formowanie wiązek cząstek
- detekcja cząstek produkowanych w zderzeniach

 analiza danych doświadczalnych pozwala na pomiar wielu obserwabli (wielkości fizycznie mierzalnych) i ich charakterystyk podstawowe obserwable to : przekroje czynne dla badanych procesów średnie czasy życia dla rozpadów cząstek porównanie wyników doświadczalnych z przewidywaniami teoretycznymi • Fizyka cząstek elementarnych – fizyka wysokich energii

wysokie energie
 zderzających się cząstek
 wysokie energie
 zderzających się cząstek
 → badanie struktury materii na coraz mniejszych odległościach

Procesy rozproszeniowe (np. rozpraszanie elektronów na protonach) są tradycyjną metodą badania struktury materii

cząstkom o dużej energii odpowiadają małe długości fal de Broglie'a $\lambda = h / p$ długość fali stowarzyszonej z cząstką – sondą (elektronem) mała w porównaniu z promieniem cząstki złożonej (protonem, r_p ~10⁻¹⁵ m)

wysoka przestrzenna zdolność rozdzielcza

(h – stała Plancka, p – pęd cząstki , dla cząstki o pędzie (p•c) = 1 GeV, λ ~ 1 fm = 10⁻¹⁵ m)

Przestrzenna zdolność rozdzielcza Δr cząstki elementarnej rozpraszanej na złożonym obiekcie

 \hbar ≡ h / 2π – zredukowana stała Plancka (ħc = 0.197GeV • fm, c - prędkość światła) q – przekaz (cztero)pędu pomiędzy cząstką – sondą i badanym obiektem

- Akceleratory są urządzeniami służącymi do przyspieszania stabilnych cząstek naładowanych do wysokich energii
- Dotychczas przyspieszane cząstki : elektron, pozyton, proton, antyproton, ciężkie jądra trwałych atomów (najcięższe jony przyspieszane do energii relatywistycznych to jony ołowiu)
- Fizyka akceleratorów bazuje na
 - dynamice cząstek relatywistycznych
 - klasycznej teorii elektromagnetyzmu (równaniach Maxwella)

Kinematyka relatywistyczna

Energia relatywistyczna

Pęd relatywistyczny

$$E = mc^{2} = m_{0}\gamma c^{2}$$

$$p = mv = m_{0}\gamma\beta c$$

$$\beta = \frac{v}{c} \qquad \gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{v^{2}}{c^{2}}} = 1 / \sqrt{1 - \beta^{2}}$$

Związek m-dzy energią i pędem

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Energia kinetyczna

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

 m_o – masa spoczynkowa cząstki, c – prędkość światła

użyteczne relacje $\gamma = E / m_0, \beta = p / E; c \equiv 1$

- Naturalną jednostką energii w fizyce cząstek jest 1 elektronowolt 1 eV – energia uzyskiwana przez cząstkę o ładunku elementarnym 1 e (ładunek elektronu) przy przejściu różnicy potencjałów 1 V 1 eV = 1.6 · 10 ⁻¹⁹ J
- Skala energii :

 $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV} = 10^6 \text{ MeV} = 10^9 \text{ keV} = 10^{12} \text{ eV}$

tera giga mega kilo

• Za jednostkę masy przyjmujemy jednostkę energii (E = mc², c ≡ 1)

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

Ruch cząstki w polu magnetycznym i elektrycznym

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

Na cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym q poruszającą się w polu elektromagnetycznym działa siła Lorentza F

- E natężenie pola elektrycznego
- B indukcja magnetyczna
- v prędkość cząstki

$$E^{2} = \vec{p}^{2}c^{2} + m_{0}^{2}c^{4}$$
$$\Rightarrow E\frac{dE}{dt} = c^{2}\vec{p}\frac{d\vec{p}}{dt} = qc^{2}\vec{p}\left(\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B}\right) = qc^{2}\vec{p}\vec{E}$$

- pole magnetyczne nie zmienia energii cząstki
- energia cząstki ulega zmianie pod wpływem pola elektrycznego
- problem techniczny : jak uzyskać silne pole elektryczne

Najprostszy akcelerator : układ dwóch elektrod, pomiędzy którymi istnieje stała różnica potencjałów U



źródło stałego wysokiego napięcia

• Problem techniczny : jak uzyskać odpowiednio dużą różnicę potencjałów

Akceleratory elektrostatyczne

z generatorem Cockrofta - Waltona

1932 (700kV) – rozszczepienie jąder Li przy użyciu wiązki protonów o energii 400 keV

Obecnie wytwarzane różnice napięć

~ 10MV

z generatorem Van de Graaffa 1931 (1.5MV) – protony i deuterony przyspieszane do energii 0.6 MeV

Obecnie wytwarzane różnice napięć 20-30 MV



obecnie maksymalne energie cząstek do 20 - 30 MeV

zbyt małe energie dla badań fizyki cząstek



Współczesne urządzenie do wstępnego przyspieszania protonów

Generator Van de Graaffa (1931) Zdjęcie z Muzeum Nauki MIT

9

Akceleratory elektrostatyczne : zastosowanie w fizyce jądrowej, w fizyce cząstek używane jako pierwszy stopień przyspieszający

Akceleratory liniowe i kołowe

Uzyskanie wiązek cząstek o większych energiach wymaga :

- zastosowania źródeł zmiennego napięcia o wysokiej częstotliwości
- synchronizacji ruchu paczek/pęczków cząstek ze zmianami napięcia



Elementy przyspieszające z oscylującym polem elektrycznym ustawione są jeden za drugim Cząstki wielokrotnie przebiegają przez przez ten sam obszar z polem elektrycznym oscylującym z częstością radiową

Pierwsze akceleratory liniowe :

Rolf Wideroe 1927

Ernest Lawrence 1931

Pierwszy akcelerator kołowy - cyklotron

Ernest Lawrence 1931 – Nagroda Nobla 1939



- Kolejne elementy rur dryfowych są podłączone do przeciwnych biegunów zmiennego napięcia
- Protony są przyspieszane w obszarze pola elektrycznego m-dzy rurami dryfowymi
- Gdy różnica napięć zmienia znak protony znajdują się wewnątrz rury dryfowej, w obszarze wolnym od pola elektrycznego
- Długości kolejnych rur dryfowych rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki, aby zapewnić stały czas przelotu cząstek przez rury (w procesie przyspieszania prędkość protonów rośnie)

Idea akceleratora liniowego :

cząstka jest poddana kilkukrotnie działaniu względnie małego napięcia przyspieszającego

Protony doznają działania pola elektrycznego skierowanego wzdłuż kierunku ich lotu



- Konieczna zmiana znaku zasilającego napięcia, aby po wyjściu z rury dryfowej cząstka podlegała działaniu odpowiednio skierowanego pola elektrycznego, powodującego jej przyspieszenie
- Mechanizm samoogniskowania się cząstek (troche za wolne cząstki trafiaja na obszar pola o większym natężeniu i nadrabiają stratę prędkosci, zbyt szybkie cząstki trafiają na słabsze pole i zwalniają)
- Typowe wartosci pól to kilka MV / m
- Liniowe akceleratory protonów o długościach ~10-70 m dostarczają cząstek o energiach kinetycznych 30-200 MeV
- Stosowane są jako układy wprowadzające dla akceleratorów cyklicznych

Akcelerator liniowy : końcowa energia wiązki zależy od różnicy napięć m-dzy rurami dryfowymi i całkowitej długości układu przyspieszającego

Liniowy akcelerator protonów (LINAC III) w ośrodku DESY / Hamburg

$$E_{total} = 988 MeV$$

$$E_{kin} = E_{total} - m_0 c^2$$

$$E_{kin} = 50 MeV$$

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$$

$$p = 310 MeV / c$$



<u>Cząstki relatywistyczne</u> : E >> m, β = v / c \rightarrow 1

- Przyspieszanie cząstki o prędkości v bliskiej prędkości światła c powoduje nieograniczony wzrost jej energii kinetycznej
- Elektrony o energiach powyżej kilku MeV poruszają się z prędkościami
 b. bliskimi prędkości światła; oprócz krótkiej fazy początkowej przyspieszanie elektronów praktycznie nie zmienia ich prędkości jedynie prowadzi do wzrostu energii cząstek
 - \rightarrow rury dryfowe w elektronowych akceleratorach liniowych mają stałą długość
 - → stała prędkość przesuwania się fali pola przyspieszającego



Liniowy akcelerator protonów w laboratorium Fermilab (USA) przyspiesza protony do energii kinetycznej 116 MeV



- W praktyce do przyspieszania e[±] stosuje się częstości z zakresu mikrofalowego (rzędu 1GHz)
- Rury sa wnękami rezonansowymi zasilanymi przez ciąg klistronów, wewnątrz wnęki wytwarzana jest stojąca fala elektromagnetyczna





Elektrony są unoszone na grzbiecie fali elektromagnetycznej

Stanford Linear Accelerator Centre

największy akcelerator liniowy elektronów o długości 3 km przyspiesza e[±] do energii 50 GeV

zderzacz e⁺ e⁻ e⁻

działa od połowy lat 60-tych

częstość źródła dużej mocy v = 2.8 GHz,

gradient napięcia na metr długości akceleratora 35 MV / m

> Następna generacja akceleratorów : energie ~ kilkaset GeV



Ruch naładowanej cząstki w stałym polu magnetycznym (B = const, E = 0)

- Siła F działająca na cząstkę jest prostopadła do jej prędkości v i pola magnetycznego B
- Energia cząstki pozostaje stała
- W jednorodnym polu magnetycznym cząstka porusza się po trajektorii spiralnej

Cząstka o masie m i ładunku q, prędkość v prostopadła do pola magnetycznego B :

siła Lorentza = siła dośrodkowa

q v B = m v² / r q B = p / r

p = 0.3 B r

pęd p [GeV / c], indukcja magnetyczna B [T], promień r [m]



Zdjęcie z komory pęcherzykowej



- Cząstki wielokrotnie przechodzą przez te same wnęki przyspieszające i każdorazowo uzyskują dodatkowa energię
- Pod wpływem pola magnetycznego poruszają się po torach zbliżonych do okręgu
- Ograniczenia : natężenie pola magnetycznego w magnesach zakrzywiających energia tracona na skutek promieniowania synchrotronowego (e[±])







Konstrukcja pierwszego cyklotronu stanowiła przełom w technice akceleracji cząstek.

Pierwsze cyklotrony – badania sztucznej promieniotwórczości

Cyklotron



- Umieszczone w próżni półkoliste wnęki (duanty) znajdują się w jednorodnym polu magnetycznym. Duanty sa połączone ze źródłem zmiennego napięcia o stałej częstości.
- Jony dodatnie wytwarzane wewnątrz urzadzenia są wielokrotnie przyspieszane m-dzy duantami.
- Cząstki zataczają coraz większe tory kołowe prostopadle do kierunku pola (Br = p / q)
- Czas jednego pełnego obiegu

 $T = 2\pi \cdot r / v = 2\pi \cdot m / qB$

Cyklotron

- Dla cząstek nierelatywistycznych (m = const) częstość obiegu po orbicie jest stała częstość cyklotronowa ω = 2π 1 / T = B q / m = const
 - → stała częstość zmian napięcia przyspieszającego cząstki przechodzace przez szczelinę m-dzy duantami doznają zawsze działania przyspieszającego pola elektrycznego

• Ograniczenia :

```
duże pędy \rightarrow duże pola magnetyczne (Br = p / q)
relatywistyczny wzrost masy cząstki \rightarrow wzrost okresu T jej obiegu po orbicie,
powodujący że cząstka docierająca do przerwy m-dzy elektrodami nie jest w fazie
z polem elektrycznym
```

Cyklotron B= const, stała częstość napięcia przyspieszającego, energie protonów do 30 MeV

Synchrotron

~1950 Renesans badań w fizyce cząstek elementarnych

Odkrycie w promieniowaniu kosmicznym nowych cząstek elementarnych obdarzonych dziwnością wpłynęło na budowę akceleratorów wysokich energii opartych na zasadzie synchrotronu

1952 Zasada silnego ogniskowania

Pierwsze synchrotrony protonowe w USA :

1952 E_p = **3 GeV** Cosmotron w Brookhaven w Brookhaven National Laboratory

1954 E_p = 6 GeV Bevatron w Lawrence Berkley Laboratory

Synchrotron :

Rosnące pole magnetyczne utrzymuje cząstki na stałej orbicie

Silne ogniskowanie wiązek cząstek





- Przyspieszane cząstki krążą po stałych orbitach możliwość przyspieszania do naprawdę wysokich energii (aspekty techniczne i finansowe)
- Procesowi przyspieszania towarzyszy zarówno zmiana natężenia pola magnetycznego, jak i częstości przyspieszającego pola elektrycznego
- Zasada silnego ogniskowania wiązka cząstek przechodzi przez układ magnesów, które ją na przemian skupiają i rozpraszają
 - → otrzymujemy wiązkę bardzo małych rozmiarów : wpływ na rozmiary rury próżniowej - przekroje poprzeczne rzędu kilku cm², rozmiary magnesów, redukcja kosztów



Analogia optyczna ilustrująca zasadę silnego ogniskowania

Wiązka optyczna przechodzaca przez układ złożony z soczewek skupiających i rozpraszających podlega ostatecznie skupieniu. Podobnie jest z wiązką cząstek przechodzacych kolejno przez magnesy skupiające i rozpraszające.



- Każdy segmnet składa się z :
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)





Magnesy kadrupolowe i wyżej polowe służą do skupiania wiązek w akceleratorach

- Synchrotrony protonowe maksymalna energia ograniczona przez wielkość pola magnetycznego B i promień akceleratora
- Synchrotrony elektronowe straty energii związane z promieniowaniem synchrotronowym

- Oprócz energii ważnym parametrem określającym własności akceleratora
- jest <u>świetlność L.</u>
- Świetlność określa liczbę reakcji zachodzących w jednostce czasu.
- Parametr ten jest szczególnie ważny dla zderzaczy, dla których częstość zderzeń w obszarze przecięcia się wiązek jest mała.

Dla procesu o przekroju czynnym σ świetlność wyraża się wzorem :

 $dN / dt = L \cdot \sigma$

 $L [cm^{-2} \cdot s^{-1}]$

Im wyższa świetlność akceleratora tym rzadsze procesy możemy zmierzyć

nie poświęcając na zbieranie danych zbyt wiele lat (10 lat – typowa skala czasowa eksperymentów z fizyki cząstek)

Precyzja pomiarów zależy również od statystyki zebranej próbki danych.

Świetlność dla dwóch przeciwbieżnych wiązek relatywistycznych

 $\mathbf{L} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{N_1} \cdot \mathbf{N_2} / (\sigma_{\mathbf{x}} \sigma_{\mathbf{y}})$

- n liczba krążących pęczków w każdej z wiązek
- N₁, N₂ liczby cząstek w każdym pęczku wiązki (~10¹⁰)
 - częstość przecięć wiązek (45 kHz 40 MHz)

 $\sigma_x, \sigma_v - poprzeczne rozmiary wiązek$

f

- Licznik wzoru całkowita liczba przyspieszanych cząstek na jednostkę czasu, im wiecej cząstek tym większa świetlność
- Mianownik wzoru stopień skupienia wiązek w miejscu zderzenia , im bardziej skolimowane wiązki tym większa świetlność
- Zwiększanie liczby przyspieszanych cząstek kosztowny sposób zwiekszania L, konieczne jest uzyskanie b. małych rozmiarów poprzecznych wiązek

zderzacz e⁺e⁻	σ <mark>,</mark> ~ 300 μm	$L \sim 6 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
LEP	σ _y ~ 8 μm	
Projekt przyszłego	σ _x ~ 0.5 μm	L ~ 3 · 10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹
liniowego zderzacza e⁺e⁻	σ _y ~ 5 nm (!!)	
ILC ($E_{CM} = 500 \text{ GeV}$)		

Energia układzie środka masy (Centre of Mass Energy, E_{CM})

Układ środka masy
$$\sumec{p}=0$$

Pojedyncza cząstka o masie spoczynkowej m_o : $E_{CM}^2 = P^2 = m_0^2$, P – czteropęd cząstki

Kwadrat czteropędu P² jest niezmiennikiem transformacji Lorentza : P_{LAB}² = P_{CM}²

)

LAB : cząstka A o masie spoczynkowej m_A, energii E_A i pędzie p_A zderza się z cząstką tarczy o masie m_B (w układzie LAB $E_B = m_B$, p_B = 0)

$$E_{CM}^2 = P^2 = m_A^2 + m_B^2 + 2 E_A m_B$$

Jeśli cząstka A jest wysoce relatywistyczna E_A >> m_A, m_B

$$E_{\rm CM} = \sqrt{2m_{\rm B}E_{\rm A}}$$

Dla akceleratora z tarczą stacjonarną E_{CM}, energia dostępna do produkcji nowych cząstek, rośnie jak pierwiastek z energii cząstek padających



W zderzeniu protonu o energii 450 GeV ze spoczywajacym protonem (m_p = 0.938 GeV / c^2) E_{CM} = 29 GeV.

Tylko mała część energii wiązki jest dostępna dla produkcji nowych cząstek, pozostała energia jest zamieniana na energię kinetyczną cząstek wtórnych. Energia układzie środka masy (Centre of Mass Energy, E_{CM})

Zderzenie 2 relatywistycznych cząstek o takiej samej energii poruszajacych się w przeciwnych kierunkach (układ LAB ≡ układ CM):

 $\mathsf{E}_{\mathsf{CM}} = \mathbf{2}\mathsf{E}_{\mathsf{A}} = \mathsf{E}_{\mathsf{A}} + \mathsf{E}_{\mathsf{B}}$

Zderzenie 2 protonów o energii 450 GeV

Е_{см} = 900 GeV



Praktycznie cała energia dostępna dla produkcji nowych cząstek.

Akcelaratory wiązek przeciwbieżnych (zderzacze):

- dwie wiązki cząstek biegnące w przeciwnych kierunkach zderzaja się w pierscieniu w kilku obszarach skrzyżowania wiązek, w których zainstalowano eksperymenty
- Duża energia w układzie CM dostępna dla produkcji nowych cząstek
- Dla zderzaczy e⁺e⁻ i proton-antyproton wystarczyłby tylko jeden pierścień, ponieważ cząstki o takiej samej masie i przeciwnych ładunkach mogą być przyspieszane w przeciwnych kierunkach przy użyciu tych samych magnesów.
 Dla zderzaczy pp i e[±] konieczne są dwie rury próżniowe z różnymi magnesami.

 Świetlności zderzaczy są mniejsze niż akceleratorów ze stacjonarną tarczą – "tarcza" jest o wiele mniejsza • naładowana cząstka poruszająca się po orbicie kołowej traci energię na promieniowanie hamowania

energia wypromieniowana przez cząstkę na jedno okrążenie wynosi :

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2 \beta^2 \gamma^4}{3R} \quad \beta = v/c \text{ and } \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} = E/m$$

- Straty radiacyjne rosną z malejącą masą cząstki i rosnącą energią jak czwarta potęga problem przy przyspieszaniu elektronów i pozytonów.
- Zwiększanie promienia akceleratora niewiele daje straty radiacyjne maleją liniowo z R



 $\frac{\Delta E_{\text{electron}}}{\Delta E_{\text{proton}}} = \left(\frac{m_{\text{p}}}{m_{\text{c}}}\right)^4 \simeq 10^{13}$ Porównanie strat radiacyjnych dla relatywistycznych elektronów i protonów o takim samym pędzie

Zderzacz LEP (obwód 27 km) przyspieszający wiązki e[±] - straty radiacyjne na pojedynczą cząstkę przyspieszoną do energii 45 (100) GeV wynosiły 0.084 (2.058) GeV na jeden obieg.

LEP był prawdopodobnie ostatnim akceleratorem kołowym e⁺e⁻. Następny zderzacz e⁺e⁻ będzie akceleratorem liniowym.

Badania oddziaływań cząstek nietrwałych lub neutralnych prowadzi się w oparciu o wiązki wtórne, formowane po wyprowadzeniu z akceleratora wiązki protonów



Cząstki we wiązkach wtórnych :

Zderzacze e⁺e⁻ i proton-proton



Zderzacze elektron - pozyton

- zderzenia fundamentalnych cząstek
- \rightarrow czysty proces
- energia zderzenia dobrze znana
- niższe energie (LEP, E_{CM} ~200 GeV) (promieniowanie synchrotronowe)

PRECYZYJNE POMIARY

Zderzacze proton- (anty)proton



kwark

- zderzenia złożonych cząstek
- zderzenia kwark-(anty) kwark
 - → resztki hadronów "zaciemniają" pomiar i interpretację wyników
- energia układu kwark-(anty)kwark nie jest dobrze znana
- wyższe energie (LHC, E_{CM} ~3.5 TeV)

ODKRYCIA NOWYCH CZĄSTEK

W praktyce nie można zbudować akceleratora kołowego przyspieszającego cząstki od "zera" do najwyższych energii. Cząstki muszą być przyspieszane etapami.

Zespół akceleratorów służących do przyspieszania protonów w LHC



Duże ośrodki naukowe posiadające akceleratory

- CERN na granicy francusko szwajcarskiej pod Genewą :
 - zderzacz elektron pozyton LEP
 - supersynchrotron protonowy SPS
 - wielki zderzacz hadronów LHC
- **DESY** w Hamburgu : zderzacz elektron proton HERA
- Fermilab pod Chicago : zderzacz proton antyproton Tevatron
- SLAC w Stanford (Kalifornia / USA): liniowy zderzacz elektron pozyton SLC
- KEK w pobliżu Tsukuby / Japonia : zderzacz elektron pozyton KEKB

Największe akceleratory

nazwa	cząstki	energie	lokalizacja	status	
SLC	e⁺e⁻	50 + 50 GeV	Stanford USA		
LEP	e⁺e⁻	100 + 100 GeV	CERN Genewa Zakończone		
HERA	e±p	30 + 820 GeV	DESY Hamburg	danych	
PEP II	e⁺e⁻	9 + 3.1 GeV	Stanford USA		
KEKB	e⁺e⁻	8 + 3.5 GeV	Tsukuba Japonia	Modernizacja (2010-2014)	
Tevatron	pp	1 + 1 TeV	Fermilab USA	Zbiera dane	
LHC	рр	3.5 + 3.5 TeV	CERN Genewa	start	

LHC – planowana energia 7 + 7 TeV

Kierunki rozwoju akceleratorów

- <u>Coraz większe energie</u> w celu poszukiwania i badania nowych ciężkich cząstek : LHC – docelowo 2*7 TeV w zderzeniach pp prace nad przyszłym liniowym zderzaczem e+e⁻ (E_{CM} ok. 500 GeV)
- <u>Coraz wyższe świetlności</u> umożliwiające pomiary bardzo rzadkich procesów np. fabryki B (SuperKEKB) i fabryki K
- Pierwszy zderzacz ciężkich jonów w 2000 rozpoczął pracę w laboratorium Brookhaven (BNL), planowane są zderzenia ciężkich jonów w LHC
- Prowadzone sa prace nad nowymi typami akceleratorów jak fabryki neutrin, zderzacze mionów czy przyspieszanie radioaktywnych jąder do wysokich energii

Large Hadron Collider LHC, Europejski Ośrodek Badań Jądrowych, CERN Genewa

Zderzacz proton-proton w tunelu zderzacza e⁺e⁻ LEP o długości L = 27 km

Pole magnetyczne w pierścieniu LEP / LHC o indukcji B = 8.4 T

1600 nadprzewodzacych magnesów dipolowych, każdy o wadze 27 ton

Planowana energia

E_{CM} = **7** + **7** = **14** TeV,

obecnie (2010) osiagnięto

3.5 + 3.5 = 7 TeV



Zderzacz SPS w CERN



Zderzacz elektronów i protonów HERA w DESY



Tevatron w ośrodku Fermilab (USA)



Linowy zderzacz elektron-pozyton SLAC w Stanford / USA



Akcelerator KEKB w Tsukubie / Japonia

