

Metody doświadczalne fizyki cząstek elementarnych I

Źródła cząstek elementarnych

- Elektrony, protony i neutrony tworzą otaczającą nas materię. Aby eksperymentować z elektronami wystarczy zjonizować atomy lub cząsteczki. Protony jako jądra wodoru są również łatwo dostępne. Źródłem neutronów są jądrowe procesy fuzji i rozszczepienia.
- Neutrino i antyneutrino pojawiają się jako produkty rozpadu beta plus i beta minus jąder atomowych zachodzących wg. schematów
$$\beta^- : {}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}X + e^- + \bar{\nu},$$
$$\beta^+ : {}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + e^+ + \nu.$$
- Fotony - kwanty pola elektromagnetycznego łatwo wytworzyć.
- Pozostałe cząstki elementarne obserwowane są jako produkty zderzeń rozpędzonych cząstek i jąder atomowych.

Promieniowanie kosmiczne

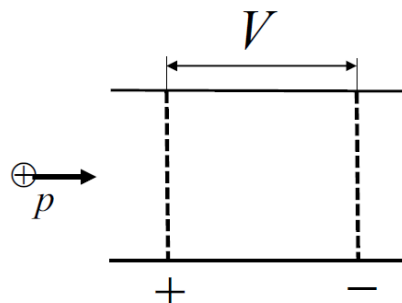
- Ziemia jest bezustannie bombardowana przez docierające z kosmosu promieniowanie tworzone w 90% przez protony, a 9% przez cząstki alfa, osiągające energię aż do 10^{20} eV.
- Odkrycie promieniowania kosmicznego – Victor Hess, 1912 rok. Detektor jonizacyjny wyniesiony balonem na wysokość 5 300 m wskazywał na 4 razy większy sygnał niż na poziomie morza. Robiąc pomiary podczas zaćmienia Słońca, wykluczono słoneczne pochodzenie promieniowania kosmicznego.
- Dokonano odkryć licznych cząstek jako produktów oddziaływania promieni kosmicznych w atmosferze Ziemi, począwszy od pionu przy użyciu emulsji fotograficznej przez Cecila Powella w 1947 roku.

Akceleratory

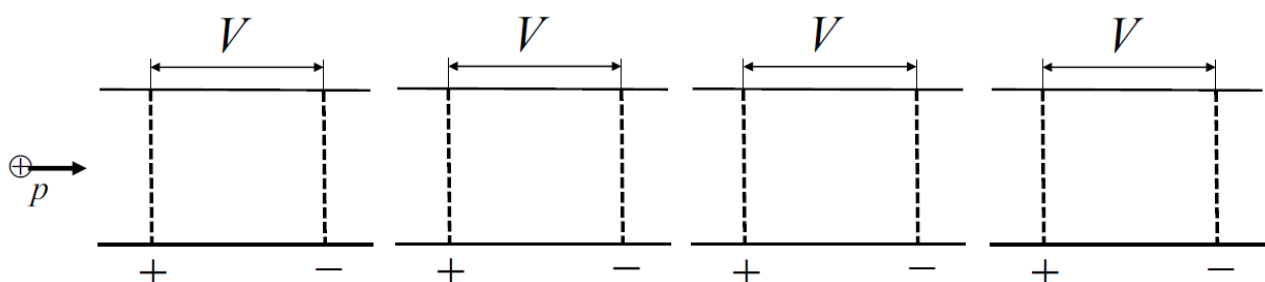
- Akceleratory to urządzenia, w których cząstki naładowane przyspieszane są polem elektrycznym.

Akceleratory liniowe

- Ideę działania akceleratora liniowego przedstawia rysunek.



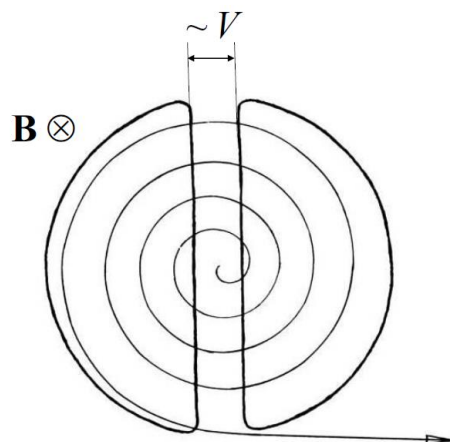
- Po przebyciu odcinak między elektrodami proton zyskuje energię eV .
- Aby zwiększyć energię przyspieszanej cząstki powiększono napięcie, co pozwoliło uzyskać przy zastosowaniu generatorów Van de Graafa protony o energii kinetycznej ok. 10 MeV.
- Dalsze zwiększanie energii można uzyskać dokładając, jak pokazuje rysunek, kolejne moduły.



- Największy akcelerator liniowy w Stanford Linear Accelerator Center w Kalifornii przyspieszający elektrony i pozytony do energii 50 GeV ma przeszło 3 km długości.

Akceleratory cykliczne

- W akceleratorach cyklicznych przyspieszana cząstka jest zawracana polem magnetycznym, tak że wielokrotnie przechodzi przez obszar, w którym występuje różnica potencjałów. Dzięki temu przyspieszenie następuje wielokrotnie.
- Akceleratorem cyklicznym jest cyklotron wynaleziony przez Ernest O. Lawrence'a w 1932 roku w Berkeley. Zasadę działania cyklotron ilustruje rysunek.



- Przyspieszana cząstka o masie m i ładunku q porusza się w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku stałego i jednorodnego pola magnetycznego B . W nieobecności pola elektrycznego trajektorią cząstki jest okrąg, którego promień R znajdujemy z warunku równoważenia się siły Lorentza i siły odśrodkowej bezwładności

$$\frac{mv^2}{R} = qvB,$$

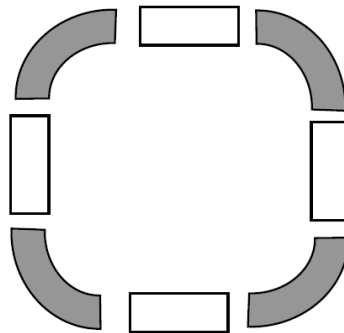
gdzie v jest (nierelatywistyczną) prędkością cząstki. v/R jest częstością (cyklotronową) $\omega_c = qB/m$, której ważną cechą jest niezależność od prędkości.

- Dwukrotnie podczas jednego cyklu cząstka przelatuje przez obszar między elektrodami, które wytwarzają zmienne pole elektryczne. Jeśli orientację pola elektrycznego zmieniamy z dwukrotnie większą częstością niż cyklotronowa i odpowiednio dobierzemy fazę, wówczas cząstka przechodząc między elektrodami doznaje za każdym razem przyspieszenia. Powoduje to zwiększenie promienia trajektorii, więc cząstka porusza się po spirali. Po osiągnięciu maksymalnego promienia, cząstka opuszcza cyklotron.

Wykład III cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Pierwsze cyklotrony miały średnicę kilku centymetrów. Największy obecnie, działający w laboratorium RIKEN w Japonii ma średnicę 19 m, waży 8 300 t i przyspiesza lekkie jony do energii (kinetycznej) 440 MeV/nukleon, a ciężkie do 350 MeV/nukleon.
- Uwzględnienie efektów relatywistycznych sprawia, że częstość cyklotronowa $\omega_c = qB/m\gamma$ zależy od energii przyspieszanej cząstki.
- Wielkość pola magnetycznego i promień ograniczają energię możliwą do uzyskania w cyklotronie.
- Synchrotron jest kolejnym akceleratorem cyklicznym pozwalającym osiągnąć energie dużo wyższe niż w cyklotronie. Zasadę działania synchrotronu ilustruje rysunek.



- Cząstka krąży w zamkniętym próżniowym jonowodzie, przechodząc kolejno przez obszary, w których działa przyspieszające pole elektryczne, oznaczone na rysunku kolorem białym, oraz obszary, w których cząstka jest zakręcana polem magnetycznym, oznaczane na rysunku kolorem szarym. Działanie synchrotronu wymaga precyzyjnej synchronizacji pola elektrycznego i magnetycznego.
- Poważnym problemem jest uzyskanie wiązki przyspieszanych cząstek o odpowiednio małym przekroju poprzecznym, czyli ogniskowanie wiązki. Osiąga się to, stosując odpowiednie układy magnesów.

Wykład III cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Cząstka poruszająca się po kołowej trajektorii jest źródłem promieniowania synchrotronowego. Energia wypromieniowana w jednym cyklu wynosi

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{e^2}{R} v^3 \gamma^4,$$

gdzie e jest ładunkiem cząstki, R promieniem trajektorii, v prędkością cząstki w jednostkach prędkości światła, a γ czynnikiem Lorentza. Jeśli czynnik $v^3 \gamma^4$ wyrazić przez energię E cząstki, jej pęd p i masę m oraz przyjąć, że $E \approx p$, wówczas stratę energii zapisujemy w postaci

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{e^2}{R} \frac{E^4}{m^4}.$$

Widzimy więc, że straty energii przy tych samych wartościach E i R , są $(m_p / m_e)^4 \cong 10^{13}$ razy większe dla elektronu niż protonu.

- Straty energii na promieniowanie synchrotronowe są najważniejszym ograniczeniem na osiągnięcie rekordowych energii elektronów w akceleratorach kołowych.
- **Słynne synchrotrony:**
 - Cosmotron, słabe ogniskowanie, Brookhaven, USA, 1948 rok, protony o energii kinetycznej 3.3 GeV;
 - Bevatron, słabe ogniskowanie, Berkeley, USA, 1954 rok, protony o energii 6.2 GeV, odkrycie antyprotonu - Owen Chamberlain, 1959 rok;
 - Synchrophasotron, słabe ogniskowanie, Dubna, ZSRR, 1957 rok, protony o energii 10 GeV;
 - Proton Synchrotron (PS), silne ogniskowanie, CERN, 1959 rok, protony o energii 28 GeV, średnica 200 m;
 - Alternating Gradient Synchrotron (AGS), silne ogniskowanie, Brookhaven, USA, 1960 rok, protony o energii 33 GeV;
 - Synchrotron U70, silne ogniskowanie, Sierpuchow, ZSRR, 1967 rok, protony o energii 70 GeV, średnica 470 m;
 - Super Proton Synchrotron (SPS), silne ogniskowanie, CERN, 1976 rok, protony o energii 400 GeV, średnica 2,2 km;

Wykład III cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Tevatron, silne ogniskowanie, Fermilab, USA, 1976, protony o energii 500 GeV, średnica 2,2 km.

Wiązki przeciwbieżne - zderzacze

- Eksperymenty fizyki cząstek elementarnych wykonywano początkowo, badając zderzenia cząstek przyspieszonych w akceleratorze ze spoczywającymi cząstkami tarczy. Łatwiej jednak osiągnąć wyższe energie oddziaływań doprowadzając do zderzeń przeciwbieżnych wiązek cząstek. Wymaga to jednak dużej intensywności tych wiązek, co osiąga się w pierścieniach akumulacyjnych.
- Pierwszy zderzacz elektronowo-pozytonowy zbudowano we Frascati we Włoszech w latach 1960-tych. Energia każdej wiązki wynosiła 250 MeV. Podobne urządzenia zbudowano w tym samym mniej więcej czasie w Nowosibirsku w ZSRR.
- Pierwszym hadronowym zderzaczem był ISR (Intersecting Storage Rings) o średnicy 300 m uruchomiony w CERN w 1971 roku, w których zderzano wiązki protonów, każda o energii 31 GeV. Liczba protonów w wiązce wynosiła 10^{14} .
- W synchrotronie SPS w CERN zaczęto w 1981 roku przyspieszać jednocześnie w przeciwne strony protony i antyprotony. W ten sposób powstał zderzacz protonów i antyprotonów. Energia każdej z wiązek wynosiła 400 GeV. Z pomocą $S\bar{p}pS$ odkryto w roku 1981 roku bozony Z^0 , W^\pm .
- Podobny do zderzacza SPS był Tevatron z Fermilabu, który w 1986 roku osiągnął rekordową energię zderzenia protonu z antyprotonem wynoszącą 1,8 TeV.
- W 1989 roku uruchomiono w CERN zderzacz elektronowo-pozytonowy LEP o energii każdej z wiązek równej 45 GeV. Zderzacz zbudowano w podziemnym tunelu o długości 27 km.
- Elektronowo-protonowy zderzacz HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) działał w latach 1990-2007 w laboratorium DESY pod Hamburgiem. Energia wiązki elektronowej wynosiła 27,5 GeV, zaś protonowej 900 GeV.
- W 2000 roku uruchomiono w Brookhaven, USA, Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) umożliwiający badanie zderzeń ciężkich jonów o energii 200 GeV na nukleon każdy. Długość pierścienia wynosi 3,8 km.

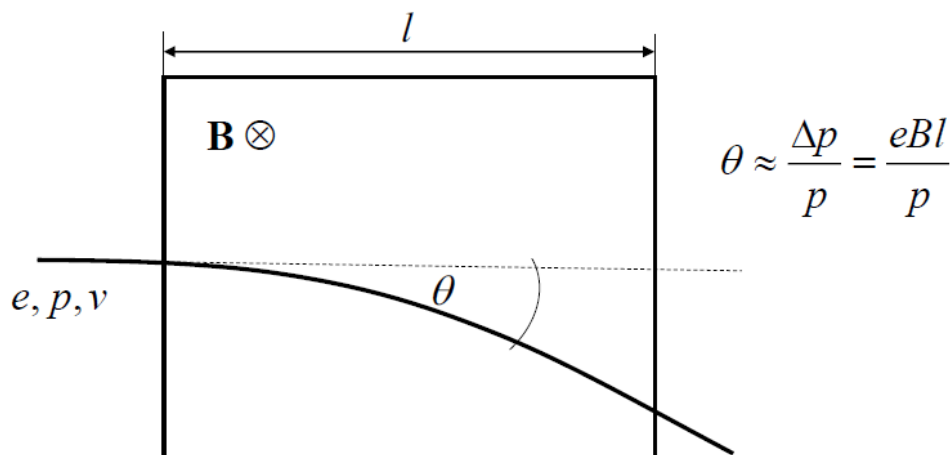
Wykład III cd.

Fizyka cząstek elementarnych

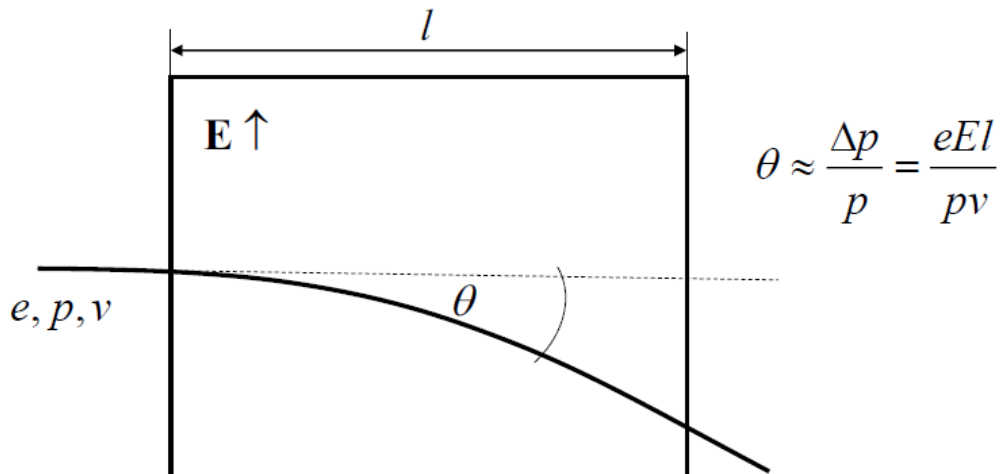
- Największym zderzaczem jest zbudowany w tunelu po LEP-ie Large Hadron Collider (LHC) uruchomiony w 2009 roku. Można w nim badać zderzenia proton-proton i jądro-jądro. Rekordowa dotychczas energia zderzenia protonów wynosi 8 TeV, lecz planuje się osiągnięcie 14 TeV. Przy LHC pracują cztery potężne detektory: ALICE, CMS, ATLAS, LHCb. W 2012 roku zaobserwowano w eksperymentach CMS i ATLAS bozon Higgosa.

Wiązki pierwotne i wtórne

- Przyspieszać można jedynie naładowane cząstki stabilne (żyjące dostatecznie długo). Wiązki cząstek neutralnych lub niestabilnych wytwarza się jako wiązki wtórne, zderzając wiązkę pierwotną z odpowiednio wybraną tarczą. Dla przykładu wiązkę neutronów otrzymuje się przepuszczając pierwotnie przyspieszone deuterony przez cienką tarczę, w której następuje dysocjacja deuteronu na proton i neutron. Wiązka pionów zaś powstaje w oddziaływaniu intensywnej wiązki protonów z tarczą jądrową.
- W odróżnieniu od wiązki pierwotnej, wiązka wtórna zawiera różne cząstki o różnych pędach. Należy więc dokonać separacji ze względu na ładunek, pęd i masę, aby otrzymać, przynajmniej w przybliżeniu, czystą wiązkę wtórną.
- Separację ładunku możemy dokonać poprzecznym w stosunku do wiązki polem magnetycznym lub elektrycznym, w którym cząstki neutralne nie uginają się, zaś cząstki naładowane dodatnio lub ujemnie uginają się w przeciwne strony.
- Separację pędu dokonuje się zwykle przepuszczając wiązkę przez obszar poprzecznego do wiązki pola magnetycznego. Kąt ugięcia zależy od pędu.



- Separację masy możemy osiągnąć przeprowadzając wiązkę o określonym pędzie przez obszar poprzecznego do wiązki pola elektrycznego. Kąt ugięcia zależy wtedy od pędu i prędkości.



Znając pęd i prędkość cząstki, jej masę znajdujemy jako $m = \frac{p}{\gamma v}$.

- Prędkość potrzebną do wyznaczenia masy możemy też wyznaczyć mierząc czas przelotu cząstki na znanej długości.

Wiemy już jak wytworzyć wiązkę cząstek elementarnych, która skierowana na tarczę spowoduje powstanie nowych cząstek. W kolejnym wykładzie omówimy detektory pozwalające rejestrować te cząstki, mierzyć ich ładunki, pędy i masy.