

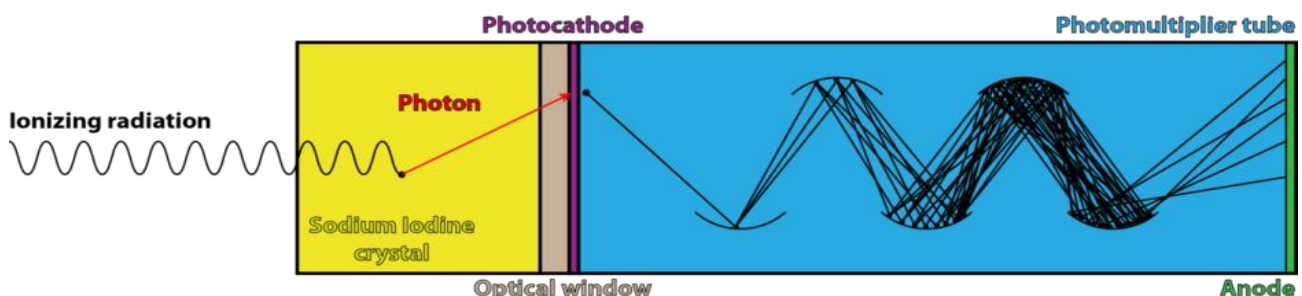
Metody doświadczalne fizyki cząstek elementarnych II

Detektory cząstek elementarnych

- Cząstki naładowane elektrycznie, powodujące wzbudzenie lub jonizację atomów i cząsteczek, podlegają bezpośredniej detekcji. W dalszej części wykładu omówione zostaną detektory, których zasada działania wykorzystuje zjawiska ekscytacji i jonizacji.
- Cząstki neutralne obserwowane są zwykle poprzez naładowane produkty ich oddziaływań z materią lub ich rozpad. Dla przykładu wysokoenergetyczne kwanty gamma rejestrowane są dzięki parom e^+e^- produkowanym w oddziaływaniach kwantów gamma z jądrami atomowymi. Natomiast cząstki Λ łatwo się rejestruje poprzez naładowane produkty rozpadu $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$.

Liczniki

- Najprostszymi detektorami są liczniki, stwierdzające samą obecność cząstek.
- Prostym licznikiem jest licznik scyntylacyjny, w którym wzbudzony przez rejestrowaną cząstkę atom emituje światło. W eksperymentach u samego początku fizyki jądrowej i cząstek elementarnych liczono po prostu obserwowane w ciemności błyski.
- Współczesne liczniki scyntylacyjne wyposażone są zwykle w fotopowielacze – urządzenia zamieniające sygnał świetlny na prąd elektryczny i odpowiednio go wzmacniające. Zasadę działania fotopowielacza ilustruje rysunek.

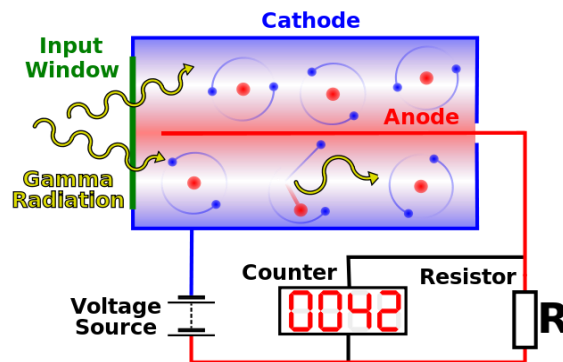


Wyprodukowany pierwotny foton tafia na katodę, wybijając z niej elektron dzięki efektowi fotoelektrycznemu. Elektron przyspieszony polem elektrycznym wybija kolejne elektrony, itd.

Wykład IV cd.

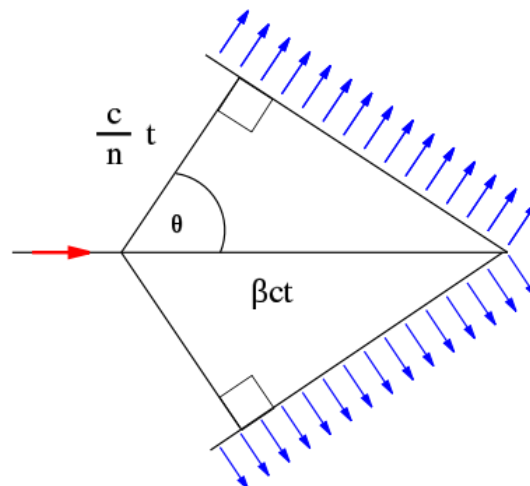
Fizyka cząstek elementarnych

- Cała grupa detektorów wykorzystuje nie światło będące efektem deekscytacji atomu, lecz prąd elektryczny pojawiający się na skutek jonizacji. Bodaj najprostszym tego typu detektorem jest licznik Geigera-Müllera, którego konstrukcję pokazuje rysunek.



Rejestrowana cząstka powoduje jonizację gazu wypełniającego licznik, co prowadzi do wystąpienia impulsu elektrycznego między elektrodami, do których przyłożone jest wysokie napięcie.

- Na podobnej zasadzie jak licznik Geigera-Müllera działają niedużych zwykle rozmiarów liczniki półprzewodnikowe. Rejestrowana cząstka generuje nośniki prądu elektrycznego w materiale półprzewodnikowym np. krzemie, co wywołuje impuls elektryczny między naniesionymi na półprzewodnik elektrodami.
- Licznik Czerenkowa wykorzystuje promieniowanie Czerenkowa do rejestracji naładowanych cząstek. Promieniowanie to występuje wtedy, gdy, jak pokazuje rysunek, prędkość cząstki poruszającej się w przezroczystym ośrodku dielektrycznym i powodującej jego polaryzację jest większa niż prędkość światła w tym ośrodku.



Detektory śladów

- Dotychczas omówione urządzenia – liczniki – stwierdzają jedynie obecność cząstki, co jest nader ubogą informacją. Aby badać naturę cząstek i siły działające między nimi, chcemy znać całe trajektorie, po których cząstki się poruszają, wzajemne usytuowanie torów zderzających się cząstek, itp. Innymi słowy staramy się odtworzyć ślady cząstek. Uzyskaniu takiej informacji służą detektory śladowe.

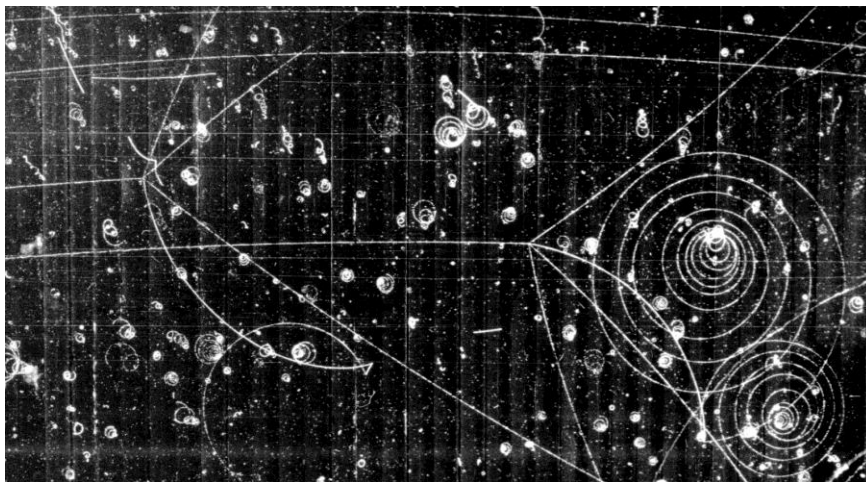
Detektory obrazu

- Prostim detektorem śladowym jest rejestrująca światło emulsja fotograficzna, która odegrała ważną rolę w początkach fizyki cząstek elementarnych. Wynoszono wtedy bloki emulsji balonami stratosferycznymi, bądź umieszczano je wysoko w górach, wystawiając na działanie promieniowania kosmicznego. Następnie bloki krojono na plasterki i poddawano obróbce chemicznej, aby wywołać obrazy śladów cząstek. Dzięki tej metodzie Cecil Powell odkrył pion w 1947 roku.
- Komora mgłowa wypełniona jest parą np. wody lub metanolu w stanie przechłodzenia, co uzyskuje się przez raptowne adiabaticzne rozprężanie. Zjonizowane atomy lub cząsteczki obecne wzdłuż toru obserwowanej cząstki stanowią widoczne centra kondensacji cieczy. W ten sposób ujawniają się ślady cząstek. Dzięki fotografii uzyskuje się pełny obraz oddziaływania, na którym widoczne są zderzające się cząstki i produkty zderzenia. Komora mgłowa, za wynalazek której Charles Thomson Rees Wilson i Arthur Compton otrzymali Nagrodę Nobla w 1927 roku, wystawiona na działanie promieniowania kosmicznego umożliwiła liczne odkrycia. A szczególnie, pozytonu w 1932 roku i mionu w roku 1936, za co Carl Anderson otrzymał Nagrodę Nobla w 1936 roku. W komorach mgłowych zaobserwowano również po raz pierwszy kaony.

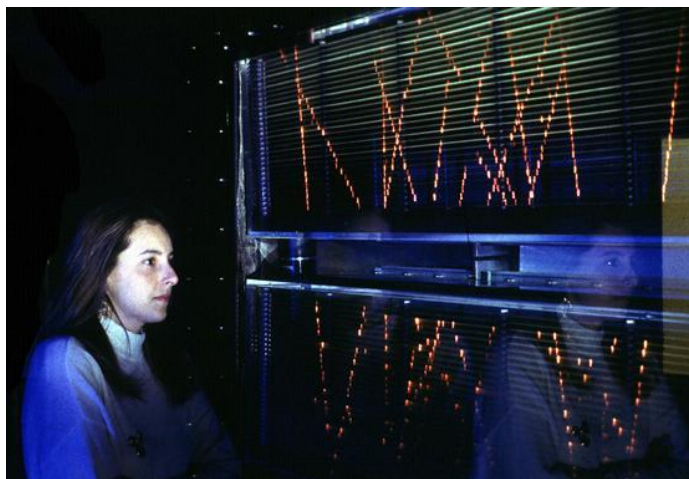
Wykład IV cd.

Fizyka cząstek elementarnych

- Komora pęcherzykowa działa na podobnej zasadzie jak komora mgłowa, lecz zamiast przechłodzonej pary mamy przegrzaną ciecz, najczęściej był to ciekły wodór, uzyskiwaną przez jej nagłe rozprężanie. Zjonizowane atomy lub cząsteczki wygenerowane wzdłuż toru badanej cząstki inicjują powstanie widocznych pęcherzyków pary. Komory pęcherzykowe działające na wiązkach cząstek z akceleratorów, wyposażone w układy fotografujące obraz oddziaływania i umieszczone w polu magnetycznym pozwalającym mierzyć pędy cząstek na podstawie krzywizny toru, były bodaj pierwszymi precyzyjnymi instrumentami fizyki cząstek elementarnych. Wyznaczyły całą epokę tej dziedziny, trwająca trzy dekady od momentu ich wynalezienia w 1952 roku.



- Komorę iskrową stanowi układ umieszczonych w gazie elektrod, np. równoległe rozciągniętych drutów, do których przykłada się wysokie napięcie. Naładowana cząstka przelatując przez komorę jonizuje gaz wzdłuż swego toru. Powoduje to przeskakiwanie iskierek tworzących fotografowany obraz śladu cząstki.



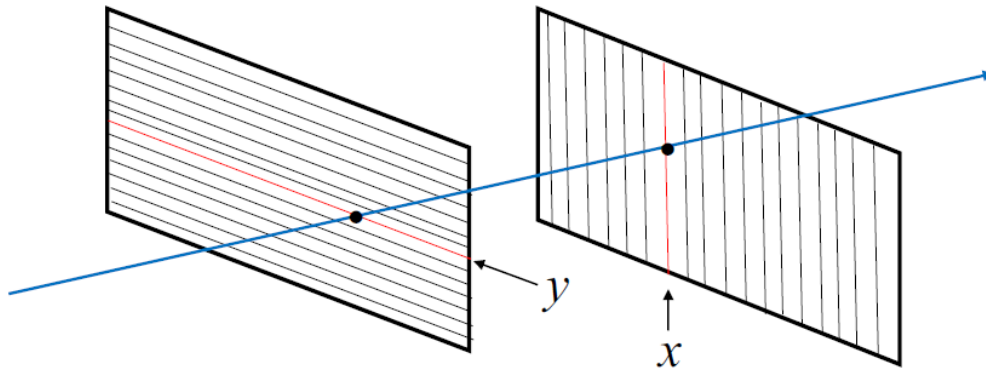
Wykład IV cd.

Fizyka cząstek elementarnych

Elektroniczne detektory śladów

- Omówione dotychczas emulsje fotograficzne, komory mgłowe, pęcherzykowe i iskrowe praktycznie nie są już stosowane we współczesnej fizyce cząstek elementarnych. Ich poważnym ograniczeniem były trudności w zebraniu dużej statystyki badanych zderzeń, która obecnie idzie w miliony. Słabością tych urządzeń była też niemożność wyboru „ciekawych” zderzeń, które rejestrowano. Oba problemy można pokonać przy zastosowaniu detektorów elektronicznych.
- We współczesnych eksperymentach fizyki cząstek elementarnych stosowane są nie pojedyncze detektory, lecz całe układy działających na różnych zasadach detektorów. Celem takich układów detekcyjnych jest zmierzenie ładunków, pędów i mas wszystkich cząstek wyprodukowanych w badanym oddziaływaniu w danym obszarze przestrzeni fazowej. Celowi temu służy precyzyjne określenie punktu, w którym zachodzi badane oddziaływanie, wyznaczenie torów wyprodukowanych cząstek, zmierzenie różnych dodatkowych charakterystyk.
- Tor cząstki jest rekonstruowany na podstawie znajomości kilku punktów tego toru. Tak zatem kluczową sprawą jest określenie owych punktów, co osiąga się wykorzystując różne detektory. Mogą to być warstwowe detektory półprzewodnikowe. Sygnał z określonej warstwy określa dwie współrzędne punktu, przez który przeszła cząstka. Kombinując kilka detektorów możemy wyznaczyć trzy współrzędne kilku punktów na torze.
- Aktywna część detektora półprzewodnikowego bywa dzielona na piksele. Wówczas sygnał pochodzący do danego piksela określa położenie punktu na torze cząstki z dokładnością do rozmiaru piksela.

- Do znalezienia punktów na torze cząstki bywają stosowane komory drutowe, których ideę objaśnia rysunek.



W komorze drutowej mamy cały szereg równoległych drutów anodowych. Jonizacja gazu w pobliżu danego drutu generuje sygnał elektryczny. Znając więc położenie drutu, znamy dwie współrzędne punktu na torze. Stosując dwie komory możemy określić drugą parę współrzędnych.

- Rozdzielczość przestrzenna komory drutowej określona jest przez odległości między drutami. Istotnym ulepszeniem komory drutowej jest komora dryfowa, w której mierzony jest nie tylko sygnał od pojedynczego drutu, ale struktura czasowa sygnałów sąsiadujących drutów. Rzecz w tym, że czas po którym elektrony z punktu jonizacji docierają do drutów anodowych zależy od odległości od tych drutów. Znając więc dokładnie moment przybycia elektronów do sąsiadujących drutów, możemy określić punkt jonizacji, z którego elektrony wystartowały. W komorze dryfowej rozdzielczość przestrzenna jest wyższa niż odległość między drutami anodowymi.
- Kombinacją wielu komór dryfowych są komory projekcji czasowej, umożliwiające pełną rekonstrukcję toru cząstki na podstawie wielu zarejestrowanych punktów. Komory takie stosowane są w większości współczesnych eksperymentów fizyki cząstek elementarnych.
- Kalorymetry są detektorami, w których rejestrowane cząstki w pełni wyhamowują, tracąc całą swoją energię. Sygnał z kalorymetru jest tak wyskalowany, że określa tę energię.

Pomiar parametrów cząstek i ich identyfikacja

- Detektory takie jak komora projekcji czasowej umieszcza się zwykle w polu magnetycznym. Wówczas cząstki naładowane dodatnio są zakręcane przez to pole w przeciwnym kierunku niż cząstki ujemne. Dzięki temu możemy określić znak ładunku cząstki.
- Znając ładunek cząstki q i jej tor w polu magnetycznym B , możemy wyznaczyć pęd cząstki p . W prostym przypadku, gdy pęd jest prostopadły do jednorodnego pola magnetycznego, korzystamy ze wzoru $p = qBR$, gdzie R jest promieniem krzywizny toru
- Mierzając czas przelotu znanej odległości możemy określić prędkość cząstki.
- Znając pęd p i prędkość v cząstki pozwalają określić jej masę ze wzoru
$$m = \frac{p}{\gamma v}.$$
- Jonizacyjne straty energii naładowane cząstki dE/dx zależą od pędu i masy cząstki. Znając więc dE/dx i p również można określić masę cząstki.
- Masę cząstki można też wyznaczyć, gdy znamy np. dzięki kalorymetrowi energię cząstki oraz jej pęd.

System wyzwalania czyli tryger

- Badając zderzenia cząstek jesteśmy zwykle zainteresowani nie wszystkimi możliwymi klasami oddziaływań, lecz pewnym określonym typem, np. zderzeniami, w których powstaje antyproton lub bozon Higgsa. Chcielibyśmy więc zebrać informacje o możliwie dużej liczbie takich zderzeń. Wyborowi danej klasy oddziaływań służy system wyzwalania układu detekcyjnego, zwany z angielska trygerem od *trigger* – spust. Jest to zwykle układ kilku detektorów, który pozwala szybko rozpoznać pewną cechę zderzenia. Jeśli ta cecha występuje, wówczas cała informacja o zderzeniu jest zapisywana, w przeciwnym wypadku informacja jest ignorowana. W ten sposób można zgromadzić informacje o dużej liczbie – idącej nieraz w miliony – wyłącznie nas interesujących zderzeń. Układy trygera są wykorzystywane we wszystkich eksperymentach fizyki cząstek elementarnych.

Wykład IV cd.

Fizyka cząstek elementarnych

Układ detekcyjny NA61 jako przykład współczesnego urządzenia fizyki cząstek elementarnych

