

Detektory w fizyce cząstek

Krzysztof Fiałkowski

Instytut Fizyki UJ

Kiedy czytamy o nowych odkryciach z dziedziny fizyki cząstek, rzadko zastanawiamy się nad szczegółami doświadczeń, które doprowadziły do tych odkryć. Nawet jeśli to robimy, poświęcamy najwięcej uwagi olbrzymim akceleratorom, które przyspieszyły cząstki nadając im wielkie energie niezbędne do przeprowadzenia badanego procesu. Kiedy jednak doszło już do powstania nowych cząstek, zwykle uważamy za oczywiste, że można je było zarejestrować i rozpoznać. A jak właściwie to się dzieje?

Oczywiste jest, że cząstek nie można zobaczyć. Nawet rozmiary jąder atomowych nie przekraczają 10 fm, czyli 10^{-14} m – miliony razy mniej, niż najmniejsza długość fali elektromagnetycznej z zakresu światła widzialnego. Protony i neutrony są jeszcze mniejsze, a dla takich cząstek jak elektron nie można podać żadnych rozmiarów – uważamy je za cząstki punktowe. Rejestracja cząstek nie polega więc na „oświetlaniu” ich promieniowaniem elektromagnetycznym (ani żadnym innym rodzajem promieniowania), ale na wykorzystaniu zmian w materii spowodowanych ich przelotem. Służą do tego **detektory** różnego typu.

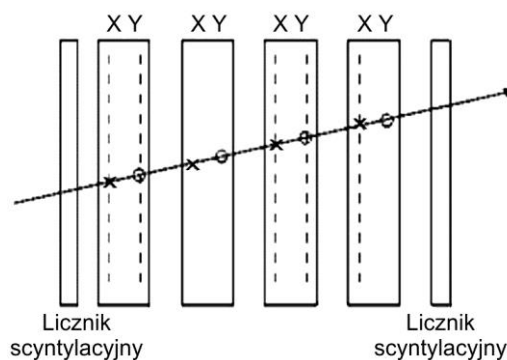
Istnieje wiele odmian detektorów i można je klasyfikować według różnych zasad. Często stosuje się podział na **detektory aktywne**, które wysyłają sygnał informujący o przejściu cząstki, i **pasywne**, w których w wyniku przejścia cząstki zachodzi zmiana, którą możemy później wykryć. Wydaje się, że ważniejszy jest podział na **detektory nieniszczące**, przez które cząstka przelatuje zachowując swój charakter i nie zmieniając energii (albo zmieniając ją w znany sposób) oraz **detektory niszczące** (np. tzw. **kalorymetry**), które pochłaniają cząstkę, wyznaczając przy tym np. jej energię) Rozróżniamy też **detektory śladowe**, w których wyznaczamy tor, po którym poruszała się cząstka, i **detektory pozycyjne**, w których rejestrujemy tylko fakt, że cząstka przeleciała przez detektor. Oczywiście składając wiele małych detektorów pozycyjnych w tzw. **hodoskop** też możemy wyznaczyć tor cząstki. Wreszcie w większości detektorów można zmierzyć energię lub prędkość cząstki, ale są też detektory (zwane zwykle **licznikami**), które rejestrują tylko fakt przelotu każdej kolejnej cząstki.

Powyżej podaliśmy przykłady podziału ze względu na możliwości użytkowe detektorów. Inaczej mówiąc wyliczyliśmy, jak możemy używać detektorów. Wypada teraz wyjaśnić, jak one działają. Przedstawimy więc podział detektorów ze względu na zjawiska fizyczne, wykorzystywane w ich działaniu.

Największą grupę stanowią detektory wykorzystujące jonizację materii, czyli odrywanie elektronów od atomów przy przelocie cząstek naładowanych. Jeśli

sygnał uzyskujemy dzięki przyłożeniu napięcia i przepływowi uwolnionych ładunków po śladzie jonizacji w gazie, taki detektor nazywamy po prostu **detektorem jonizacyjnym**. Istnieje wiele typów takich detektorów, bo zmiana wartości napięcia powoduje zmianę charakteru tego przepływu. Dla niewielkich napięć mamy tzw. **komory dryfowe**, w których swobodne ładunki powstałe w wyniku jonizacji przepływają do elektrod. Mierząc wartość ładunku można wnioskować o rodzaju i energii cząstki, a mierząc czas ich przelotu do elektrod można wyznaczyć tor cząstki w komorze. Wyrafinowaną wersją tego detektora jest tzw. komora projekcji czasowej. Nieco większe napięcia stosujemy w **komorach proporcjonalnych**, w których przyspieszane tym napięciem ładunki z jonizacji jonizują kolejne atomy, ale całkowity wytworzony ładunek jest proporcjonalny do pierwotnego. Jeszcze większe napięcie jest w **komorach iskrowych**, w których po śladzie jonizacji przeskakuje iskra. Ten typ detektora jest często zastępowany przez **komory strumieniowe (strimerowe, streamerowe)**, w których napięcie jest jeszcze wyższe, ale większa odległość między elektrodami powoduje, że wyładowanie „rozmywa” się na większą przestrzeń, a przez to nie niszczy tak szybko elektrod.

W wymienionych wyżej typach detektorów jonizacyjnych elektrody to obecnie zwykle układy cienkich drutów ułożonych w różnych kierunkach w kolejnych płaszczyznach, co pozwala na dość precyzyjne wyznaczenie toru cząstki. Na rys. 1 przedstawiono tzw. teleskop wielodrutowych komór proporcjonalnych, w którym ustawiono szereg komór z dwoma płaszczyznami drutów w każdej. Rolę widocznych na rys. 1 liczników scyntylacyjnych omówimy później. Detektory jonizacyjne można umieszczać w polu magnetycznym, a pomiar zakrzywienia torów w tym polu umożliwia wyznaczenie iloczynu masy i prędkości cząstki, zwanego pędem $p = mv$.



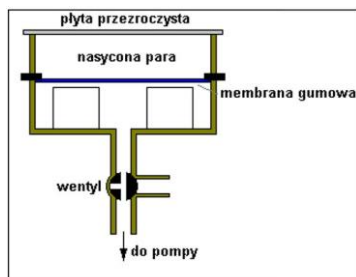
Rys. 1. Teleskop MWPC służący do obserwacji śladów cząstki. Każdy MWPC ma dwie płaszczyzny drutów (X i Y). Jeżeli MWPC są ustawione w szeregu pomiar współrzędnych pozwala na rekonstrukcję toru cząstki

Dawniej używane (i do dziś stosowane w innych działach fizyki) odpowiadające podobnym zakresom napięć **komory jonizacyjne, liczniki proporcjonalne i liczniki Geigera-Müllera** miały tylko dwie elektrody, więc były detektorami pozycyjnymi, a nie śladowymi.

Bardzo ważną rolę w historii fizyki cząstek odegrały detektory, w których ślad jonizacji był utrwalany nie przez przepływ ładunków, ale dzięki innym zjawiskom fizycznym. Do dziś używana jest tzw. **emulsja jądrowa**, czyli bloki emulsji fotograficznej, w których na śladach jonizacji tworzą się ziarna srebra ze zjonizowanych bromków i chlorków tego pierwiastka. Po odpowiedniej obróbce chemicznej można pod mikroskopem odtworzyć bardzo precyzyjnie tory cząstek, ale zajmuje to wiele czasu. Konieczność pomiaru wielkiej liczby śladów doprowadził zresztą do automatycznych metod analizy, które przydały się też bardzo w medycynie do wstępnego przeglądu zdjęć rentgenowskich.

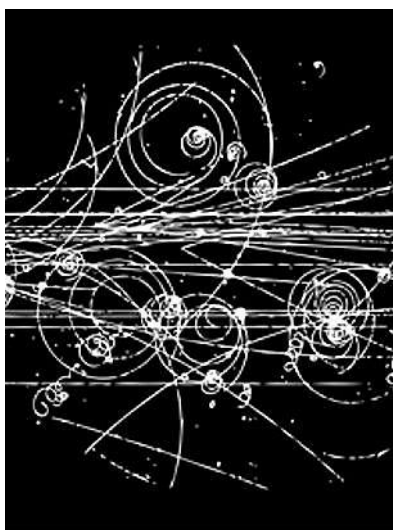
Pozostałe dwa typy detektorów mają dziś już tylko znaczenie historyczne, choć w obu przypadkach ich twórcy zostali wyróżnieni Nagrodą Nobla. **Komora mgłowa** Wilsona wykorzystywała zjawisko skraplania przechłodzonego gazu na śladach jonizacji, a **komora pęcherzykowa** Glasera zjawisko odwrotne – parowanie przegrzanej cieczy. To drugie rozwiązanie było lepsze, bo gęstość cieczy jest znacznie większa od gęstości gazu. Szybciej można więc było zebrać więcej zderzeń. Sam Glaser wykonał kilkucentymetrową komorę wypełnioną eterem, natomiast komory używane do detekcji cząstek były zwykle wypełnione ciekłym wodorem. Jądra jego atomów były więc tarczą, a cały ich zbiór detektorem.

Największe detektory tego typu miały objętość kilku metrów sześciennych i określano je potem mianem „dinozaurów wśród detektorów”. Stan przechłodzenia i przegrzania realizowano odpowiednio przez sprężanie gazu i rozprężanie cieczy. W obu przypadkach ślady fotografowano z wielu kierunków i odtwarzano obraz trójwymiarowy. Niestety wadą tych detektorów był stosunkowo długi cykl sprężania – rozprężania; komora mogła zbierać dane tylko przez niewielki ułamek tego cyklu. Wiele czasu zajmowała też analiza zdjęć, dlatego już w latach 80. XX wieku wyszły one z użycia. Na rys. 2 widać schemat komory Wilsona i jedną z największych zbudowanych w historii komór pęcherzykowych – Gargamelle w ośrodku CERN.



Rys. 2. Po lewej schemat komory Wilsona, po prawej historyczna komora pęcherzykowa

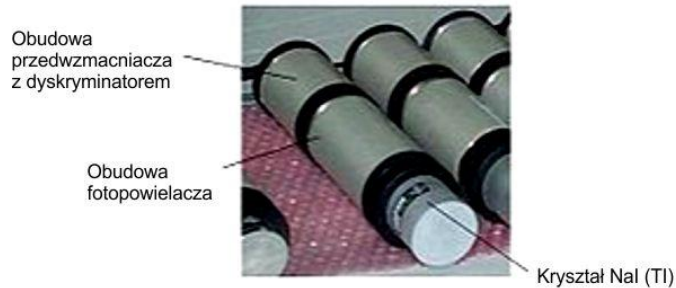
Komorę pęcherzykową (a przedtem mgłową) można było oczywiście także umieścić w polu magnetycznym. Z zakrzywienia torów w tym polu można było wyznaczyć pęd, a grubość śladów (zależna od liczby jonów wytwarzanych na jednostkę długości) była zależna od energii. Komora pęcherzykowa była więc praktycznie ostatnim w historii samodzielnym detektorem uniwersalnym. Odtąd detektory używane w eksperymentach stały się układami detektorów różnych typów.



Rys. 3. Zdjęcie z komory pęcherzykowej. Z lewej strony padają protony o wielkich pędach, a w ich zderzeniach powstają liczne cząstki. „Spiralki” to ślady elektronów szybko tracących w materii energię i pęd

Zjawiskiem podobnym do jonizacji gazu czy cieczy jest tworzenie par elektron-dziura w półprzewodniku. Detektory oparte na tym zjawisku, **detektory półprzewodnikowe**, można łatwo miniaturyzować i układać z nich wiele warstw. Można więc przy ich użyciu bardzo dokładnie i szybko rejestrować cząstki i obserwować nawet bardzo szybkie rozpady. Z takich elementów buduje się dziś „detektory wierzchołka”, centralną część nowoczesnych detektorów, otoczoną przez detektory jonizacyjne.

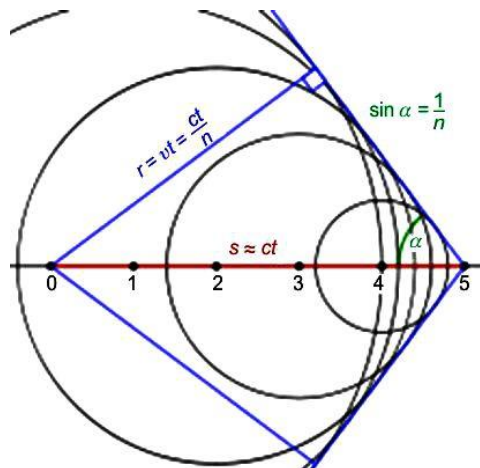
Kolejnym zjawiskiem wykorzystywanym w detektorach jest luminescencja (zwykle fluorescencja, zachodząca znacznie szybciej od fosforescencji). Polega ona na pochłonięciu przez atomy odpowiedniej substancji niewielkiej części energii kinetycznej przelatującej cząstki naładowanej i wypromieniowanie jej w postaci krótkiego błysku światła widzialnego (scyntytacji). Błyski te są z reguły wzmacniane w tzw. fotopowielaczach, a potem zamieniane na impulsy elektryczne. Wbrew wymienionej wyżej nazwie, w **detektorach scyntyacyjnych** nie stosuje się zwykle związków fluoru tylko kryształy NaI (jodku sodu) i NaCs (jodku cezu) aktywowane talem lub kryształy organiczne.



Rys. 4. Przykładowe liczniki scyntylacyjne

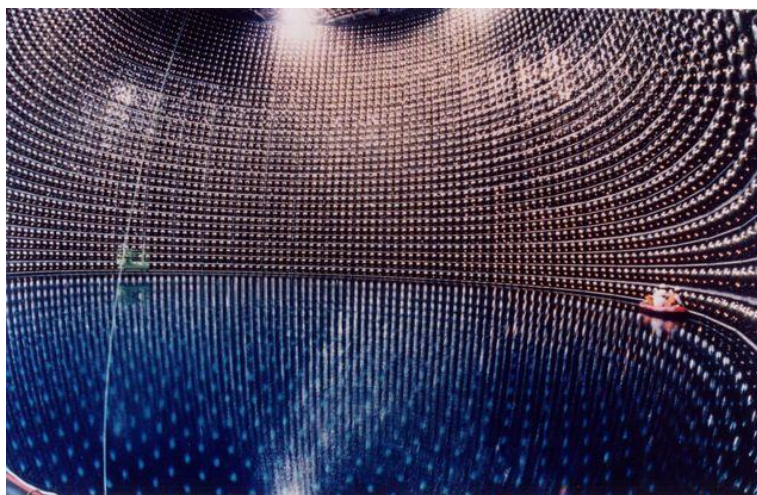
Detektory te są wyjątkowo szybkie i można je użyć do sterowania innych elementów układu. Tak działa układ przedstawiony na rys. 1. Sygnał z pierwszego licznika scyntylacyjnego wywołuje podanie napięcia na druty komór proporcjonalnych, a sygnał z drugiego wyłącza napięcie. Komory nie rejestrują więc przypadkowych impulsów spowodowanych przez cząstki nadlatujące z innych kierunków, np. z promieniowania kosmicznego lub promieniotwórczości naturalnej.

Ostatnim z najważniejszych zjawisk wykorzystywanych w detektorach jest tzw. efekt Czerenkowa, czyli emisja błysków światła widzialnego przez cząstki naładowane poruszające się z szybkością większą od szybkości światła w danym ośrodku c/n . Na przykład w wodzie efekt Czerenkowa występuje już dla cząstek o szybkości ponad $3c/4$, a w powietrzu dopiero dla cząstek, których szybkość różni się od c tylko o małe ułamki promila. Kąt między kierunkiem emisji i kierunkiem lotu cząstki zależy od stosunku szybkości światła i cząstki. Mechanizm powstawania tego promieniowania pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Wysyłane w kolejnych chwilach lotu fale kuliste składają się na stożek czoła fali

Wszystkie omówione zjawiska występują dla cząstek naładowanych. Czy można więc rejestrować cząstki neutralne, jak fotony, neutrony i neutrino? Oczywiście, ale należy wykorzystać procesy, w których „zменяją się” one wcześniej w cząstki naładowane. I tak, neutron oddziałując z jądrem może zmienić się w proton, foton w parę elektron-pozyton, a neutrino w elektron, pozyton albo ich cięższych „kuzynów”: mion lub taon. Zatem detektor powinien zawierać warstwę „konwersyjną”, w której takie procesy zachodzą. Niekiedy może ona służyć równocześnie jako detektor. Na przykład neutrino w wielkim zbiorniku wody najpierw mogą zmienić się (z małym prawdopodobieństwem) w elektrony lub miony, a następnie powstałe tak cząstki wysyłają promieniowanie Czerenkowa. Ich błyski są wzmacniane przez fotopowielacze i zamieniane na impulsy elektryczne.



Rys. 6. Olbrzymi detektor neutrino Super-Kamiokande o pojemności 50 000 m³. Widoczny po prawej ponton służył do sprawdzania fotopowielaczy podczas napełniania wodą

Istnieje jednak kategoria detektorów, które nie rozróżniają cząstek naładowanych i neutralnych. To tzw. **liczniki kalorymetryczne** albo po prostu **kalorymetry**. Są to układy naprzemiennych warstw materiałów „pasywnych”, w których cząstki tracą część energii produkując „strumienie” innych cząstek, oraz „aktywnych” wysyłających sygnały zależne od energii strumienia. Warstw jest zwykle tyle, aby cała energia pierwotnej cząstki została nie tylko wyznaczona, ale i pochłonięta. W **kalorymetrach elektromagnetycznych** dzieje się tak z elektronami i fotonami. Cząstki silnie oddziałujące, czyli hadrony, tracą w nich tylko część energii, a ostatecznie wyhamowane zostają dopiero w bardziej masywnych **kalorymetrach hadronowych**. Tylko miony i neutrino przełatują przez oba typy kalorymetrów.

Jak dotąd mówiliśmy o detektorach, które rejestrują przelot cząstki, a często umożliwiają wyznaczenie jej energii, pędu lub prędkości. Czy to pozwala na „rozpoznanie”, czyli identyfikację cząstki? Oczywiście tak, bo główna cecha każdej cząstki odróżniająca ją od innych, to jej masa m . Jak wiemy, w fizyce Newtona energia kinetyczna i prędkość cząstki związane są wzorem $E_k = mv^2/2$. Wprowadzając wspomnianą już wielkość $p = mv$ zwaną pędem dostajemy podobny wzór: $E_k = p^2/2m$. Zatem mierząc energię i pęd, energię i prędkość albo pęd i prędkość możemy wyznaczyć m i zidentyfikować cząstkę.

Dla prędkości bliskich c te wzory wyglądają całkiem inaczej. W energii całkowitej E swobodnej cząstki należy zawsze uwzględnić jej energię spoczynkową $E_0 = mc^2$; $E = E_0 + E_k$. Związki energii, pędu i prędkości mają teraz postać:

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4, \quad p = mv\gamma, \quad E = mc^2\gamma, \quad \text{gdzie } \gamma^2 = c^2/(c^2 - v^2).$$

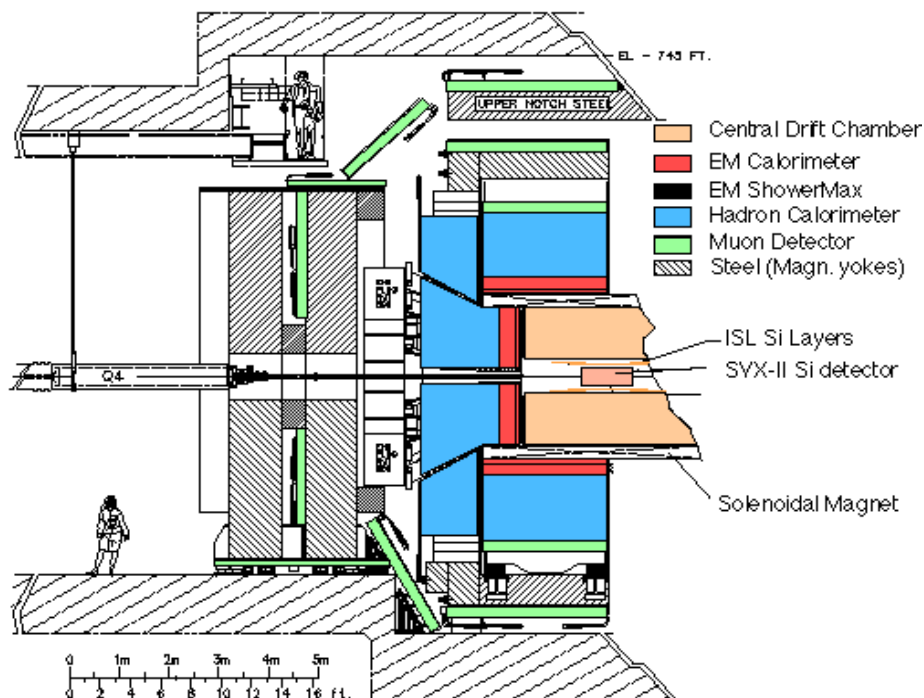
Zatem i w tym przypadku mierząc E i p , E i v , lub p i v można wyznaczyć m . Zauważmy jednak, że dla $v \approx c$ mamy $\gamma \gg 1$, $p \gg mc$ i pierwszy wzór jest mało użyteczny, bo człon m^2c^4 jest małą różnicą dwóch dużych liczb. Zatem jego błąd względny jest duży nawet wtedy, gdy E i p mierzymy bardzo dokładnie. Wynika stąd, że dla dobrej identyfikacji lepiej wyznaczyć p i v , czyli użyć detektorów śladowych w polu magnetycznym i liczników Czerenkowa. Jest to jedną z przyczyn uzasadniających stosowanie detektorów wielowarstwowych.

Jak już wspomniano, współczesne detektory składają się zwykle z wielu warstw detektorów różnego typu. Jest to szczególnie ważne dla eksperymentów ze zderzającymi się wiązkami, gdy zależy nam szczególnie na rejestracji i identyfikacji niemal wszystkich produkowanych cząstek (oprócz tych, które uciekają przez rury akceleratora). Na rys. 7 pokazano schemat takiego detektora użytego w eksperymencie CDF w akceleratorze Tevatron.

Jak widać, w tym urządzeniu wykorzystuje się równocześnie wiele z omówionych wcześniej typów detektorów. Podobnie wielkie i skomplikowane są detektory wszystkich ważniejszych eksperymentów badających wynik zderzenia się wiązek cząstek.

Na koniec omówimy jeszcze ważną sprawę czasu życia cząstek. Aby omówione wyżej detektory zarejestrowały cząstkę i mogły ją zidentyfikować, musi ona żyć dostatecznie długo. Gdyby obowiązywały reguły fizyki Newtona, w czasie t cząstka poruszająca się z szybkością v mogłaby przelecieć odległość $s = vt$, a skoro szybkość nie może przekraczać c , $s < ct$. W szczególnej teorii względności wzór ten ulega modyfikacji: $s = vt\gamma$, gdzie γ , zdefiniowane na poprzedniej stronie, można bezpośrednio wyznaczyć jako E/mc^2 . Dla cząstek wielkich energii ten czynnik może być duży, ale i tak s może być najwyżej o kilka rzędów wielkości większy niż ct . Żaden detektor nie rozróżnia punktów odległych o mniej niż kilka mikronów, więc ślad można zarejestrować tylko

wtedy, gdy w sekundach $t > \frac{1}{3} \cdot 10^{-13} \gamma$. Cząstek, które żyją krócej niż 10^{-16} s, nie można zarejestrować w zwykły sposób. Skąd więc wiemy, że powstały one w zderzeniu?



Rys. 7. Schemat przekroju połowy detektora CDF. Kolejnymi kolorami (widocznymi w internecie) oznaczono centralną komorę dryfową, kalorymetr elektromagnetyczny (dwuczęściowy), kalorymetr hadronowy, detektor mionów, stalowe jarzma magnesu, warstwy detektorów półprzewodnikowych, wewnętrzny detektor półprzewodnikowy i magnes solenoidalny. Po lewej u dołu skala

Na pomoc przychodzi nam podstawowe prawo fizyki: prawo zachowania energii i pędu. Jeśli cząstka rozpada się na dwie, suma energii produktów rozpadu musi być równa energii rozpadającej się cząstki, a wektorowa suma pędów produktów rozpadu – wektorowi pędu tej cząstki. Skoro zaś energia i pęd muszą spełniać relację $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$, taką samą relację muszą spełniać sumy energii i pędów produktów rozpadu

$$(E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2c^2 = m^2c^4.$$

Jeśli więc dla jakiejś pary cząstek wyprodukowanych w zderzeniu zrobimy wykres wartości wielkości zdefiniowanej powyżej i odkryjemy, że dla jakiejś

wartości E_0^2 pojawia się wyraźne maksimum, możemy przypuszczać, że ta para pochodzi z rozpadu cząstki o kwadracie masy $m^2 = E_0^2/c^4$. Zasady mechaniki kwantowej mówią nam, że dla cząstki o czasie życia t masa nie jest ściśle określona, lecz jest rozmyta wokół wartości centralnej z rozkładem o szerokości $\Delta m = h/4\pi t c^2$, gdzie h jest stałą Plancka. Zatem dla cząstek o bardzo krótkim czasie życia maksimum może być słabo widoczne, jeśli masa nie jest bardzo duża.

W praktyce najcięższe znane cząstki mają masy rzędu setek GeV/c^2 , gdzie GeV to gigaelektronowolt – jednostka energii powszechnie używana w fizyce cząstek. Rozmycie masy takiego rzędu odpowiada czasowi życia rzędu 10^{-28} s, zatem istnienie cząstek o czasach życia nawet tak krótkich jak 10^{-26} s można wykryć badając rozkłady energii i pędów produktów ich rozpadu. Tak odkryto bozony W i Z pośredniczące w słabych oddziaływaniach, najcięższy z kwarków t („top”), a w 2012 roku bozon Higgsa H .

Choć więc cząstek nie można zobaczyć, a dla najkrócej żyjących nie można nawet zobaczyć ich śladów, nie mamy żadnych wątpliwości, że istnieją i powstają w zderzeniach przy wielkich energiach!