

Rysunek 75. Eksperymenty laboratoryjne stały się tak dokładne, że muszą zostać obliczone kolejne możliwości obejmujące cztery dodatkowe sprzężenia (wśród wszystkich możliwych, pośrednich punktów w czasoprzestrzeni), przy czym tu pokazano niektóre z nich. Przypadek po prawej obejmuje foton rozpadający się w parę pozyton–elektron (jak opisano na rysunku 64), która anihiluje, tworząc nowy foton, który ostatecznie zostaje pochłonięty przez elektron

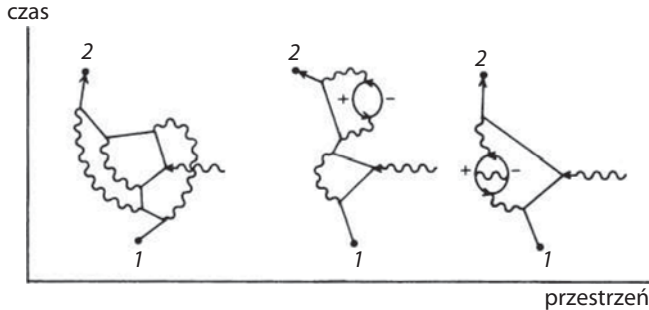
Obliczenie następnego członu zabrało dwóm „niezależnym” grupom fizyków dwa lata, a kolejny rok poświęcili na stwierdzenie, że był tam błąd – eksperymentatorzy zmierzili wartość i wyszła im nieco inna, i przez chwilę wyglądało, że teoria po raz pierwszy nie jest zgodna z eksperymentem. Był to jednak błąd arytmetyczny. Jak to się stało, że dwie grupy zrobiły ten sam błąd? Okazuje się, że pod koniec obliczeń fizycy z obu grup porównali swoje notatki i wyeliminowali różnice między swoimi obliczeniami, więc nie były one całkiem niezależne.

Człon zawierający sześć dodatkowych czynników j obejmuje nawet więcej możliwych sposobów, w jaki może zajść zdarzenie. Narysuję kilka z nich (patrz rysunek 76). Dwadzieścia lat zajęło otrzymanie tej dodatkowej dokładności wprowadzonej do teoretycznej wartości momentu magnetycznego elektronu. W międzyczasie eksperymentatorzy wykonali jeszcze bardziej szczegółowe doświadczenia i dodali do liczby kilka kolejnych cyfr – a teoria nadal była z tym zgodna.

Aby wykonać nasze obliczenia, tworzymy więcej wykresów, zapisujemy, czemu odpowiadają matematycznie, i dodajemy amplitudy – to prosty proces, jak „przepis z książki kucharskiej”. Dlatego mogą to zrobić maszyny. Dzięki temu, że mamy teraz fantastyczne komputery, zaczęliśmy obliczać składnik z ośmioma dodatkowymi czynnikami j . Obecnie teoretyczna wartość wynosi 1,00115965246, a eksperymentalnie to 1,00115965221 plus minus 4 na ostatnim miejscu dziesiętnym. Część niepewności w wartości teoretycznej (około 4 na ostatnim miejscu dziesiętnym) wynika z zaokrąglania liczb przez komputer, a większość (około 20) wynika z faktu, że wartość j nie jest dokładnie znana. Określenie dodatkowych ośmiu czynników j

obejmuje coś około dziewięćset wykresów z setkami tysięcy składników każdy – fantastyczne obliczenia – i są one teraz wykonywane*.

Jestem pewien, że już za kilka lat wielkości teoretyczna i praktyczna momentu magnetycznego elektronu zostaną wyznaczone dla kolejnych pozycji dziesiętnych. Oczywiście nie jestem pewien, czy te wartości będą zgodne. Tego nigdy nie można powiedzieć przed wykonaniem obliczeń i przeprowadzeniem eksperymentów.



Rysunek 76. Obecnie prowadzone są obliczenia mające na celu uzyskanie wartości teoretycznej z większą dokładnością. Kolejny wkład w amplitudę, która reprezentuje wszystkie możliwości za pomocą sześciu dodatkowych sprzężeń, obejmuje około 70 wykresów, z których trzy są widoczne na tym rysunku. W roku 1983 teoretyczna wartość wynosiła 1,001159652246 z niepewnością około 20 na ostatnich dwóch cyfrach. Wartość eksperymentalna wynosiła 1,00115965221 z niepewnością około 4 na ostatnich dwóch cyfrach. Dokładność ta jest równoważna zmierzeniu odległości z Los Angeles do Nowego Jorku wynoszącej około 3000 mil z dokładnością do grubości ludzkiego włosa

I w ten sposób wróciliśmy do wartości, którą wybrałem na początku tych wykładów, aby was „onieśmielić”. Mam nadzieję, że rozumiecie teraz o wiele lepiej znaczenie tej liczby: reprezentuje ona niezwykle stopień dokładności, z jakim stale sprawdzaliśmy tę dziwną teorię, jaką jest elektrodynamika kwantowa.

W czasie tych wykładów z przyjemnością pokazywałem, że ceną uzyskania takiej dokładnej teorii była erozja naszego zdrowego rozsądku. Musimy zaakceptować pewne bardzo dziwaczne zachowanie: wzmocnienie i tłumienie prawdopodobieństwa, światło odbijające się od wszystkich części lustra, światło wędrujące ścieżkami innymi niż linie proste, fotony biegnące szybciej lub wolniej od konwencjonalnej

* Ten akapit ma wartość wyłącznie historyczną. Obecnie liczba ta jest uzyskiwana na podstawie obliczeń z dziesięcioma czynnikami j i wynosi 1,001159652181643 z niepewnością na trzech ostatnich cyfrach znaczących, a wartość zmierzona to 1,00115965218073 z niepewnością na dwóch ostatnich cyfrach znaczących. Logika przedstawiona przez Feynmana uległa całkowitemu odwróceniu – dziś używa się fantastycznie dokładnego pomiaru tej liczby do wyznaczenia dokładnej wartości j – *przyp. kons. nauk.*

prędkości światła, elektrony cofające się w czasie, protony nagle rozpadające się na parę pozytron–elektron i tak dalej. Musimy to zrobić, aby docenić to, co natura naprawdę robi pod powierzchnią wszystkich zjawisk, które widzimy na świecie.

Z wyjątkiem technicznych szczegółów polaryzacji, opisałem schemat, dzięki któremu rozumiemy wszystkie te zjawiska. Rysujemy *amplitudy* dla każdego sposobu, w jaki zdarzenie może zajść, i dodajemy je, gdy w zwykłych okolicznościach oczekiwalibyśmy dodawania prawdopodobieństw, oraz mnożymy amplitudy, gdy oczekiwalibyśmy mnożenia prawdopodobieństw. Myślenie o wszystkim w kategoriach amplitud może z początku sprawiać trudności ze względu na ich abstrakcyjność, ale po pewnym czasie przyzwyczajamy się do tego dziwnego języka. Pod powierzchnią tak wielu zjawisk, które codziennie widzimy, są tylko te trzy podstawowe działania: jedno jest opisane prostą wartością sprzężenia j , a pozostałe dwa dwiema funkcjami – $P(A \text{ do } B)$ i $E(A \text{ do } B)$ – które są ze sobą ściśle związane. To wszystko, co trzeba zrobić, i z tego wynikają wszystkie prawa fizyki.

Jednak zanim skończę ten wykład, chciałbym dodać kilka uwag. Można zrozumieć ducha i charakter elektrodynamiki kwantowej bez dołączania tych technicznych szczegółów polaryzacji. Jednak jestem pewien, że wszyscy poczuliście się niezręcznie, gdybym nie powiedział czegoś o tym, co pomijałem. Okazuje się, że fotony występują w czterech różnych odmianach, nazywanych polaryzacjami, które są związane geometrycznie z przestrzenią i czasem. Tak więc fotony są spolaryzowane w kierunkach x , y , z i t . (Zapewne słyszeliście gdzieś, że światło ma tylko dwa stany polaryzacji – na przykład foton biegnący w kierunku z może być spolaryzowany pod kątami prostymi zarówno w kierunku x , jak i y . Cóż, zgadliście: w sytuacjach, gdy foton wędruje na dużą odległość i wydaje się biec z prędkością światła, amplitudy składowych z i t dokładnie się znoszą. Ale dla wirtualnych fotonów biegnących między protonem a elektronem w atomie najważniejsza jest właśnie składowa t).

W podobny sposób elektron może być w czterech stanach związanych z geometrią, ale w nieco bardziej subtelny sposób. Możemy nazwać te stany 1 , 2 , 3 i 4 . Obliczanie amplitudy elektronu biegnącego w czasoprzestrzeni z punktu A do punktu B staje się nieco bardziej skomplikowane, ponieważ możemy teraz zadać takie pytania jak: „Jaka jest amplituda, że elektron uwolniony w stanie 2 w punkcie A , dotrze do punktu B w stanie 3 ?”. Szesnaście możliwych kombinacji – pochodzących z czterech różnych stanów elektronu na starcie z punktu A i czterech różnych stanów elektronu, w jakich może się znaleźć w punkcie B – jest związanych w prosty matematyczny sposób ze wzorem na $E(A \text{ do } B)$, o którym wam opowiadałem.

Dla fotonu nie jest potrzebna taka modyfikacja. Tak więc foton spolaryzowany w kierunku x w A będzie nadal spolaryzowany w kierunku x w B , przybywając tam z amplitudą $P(A \text{ do } B)$.

Polaryzacja tworzy dużą liczbę różnych możliwych sprzężeń. Można się na przykład zapytać: „Jaka jest amplituda, że elektron w stanie 2 zaabsorbuje foton spolaryzowany w kierunku x i w związku z tym zmieni się w elektron w stanie 3 ?”. Nie

wszystkie możliwe kombinacje spolaryzowanych elektronów i fotonów łączą się, ale te, które to robią, robią to z taką samą amplitudą j , choć czasami z dodatkowym obrotem strzałki o jakąś wielokrotność 90° .

Te wszystkie możliwości różnych rodzajów polaryzacji i naturę sprzężeń można wydedukować w bardzo elegancki i piękny sposób z zasad elektrodynamiki kwantowej i dwóch dodatkowych założeń: (1) wyniki eksperymentu się nie zmieniają, jeśli przyrząd, za pomocą którego przeprowadzamy eksperyment, jest obrócony w innym kierunku, oraz (2) nie ma także znaczenia umieszczenie przyrządu na statku kosmicznym poruszającym się z dowolną, ustaloną prędkością. (Jest to zasada względności).

Ta elegancka i ogólna analiza pokazuje, że każda cząstka musi należeć do tej czy innej klasy możliwych polaryzacji, które nazywamy spinem 0, spinem $\frac{1}{2}$, spinem 1, spinem $\frac{3}{2}$, spinem 2 i tak dalej. Różne klasy zachowują się w różny sposób. Cząstka o spinie 0 jest najprostsza – ma tylko jedną składową i nie jest wcale spolaryzowana. (Fałszywe elektrony i fotony, które rozpatrywaliśmy na tym wykładzie, to cząstki o spinie 0. Jak dotąd nie znaleziono żadnych elementarnych cząstek o spinie 0*). Przykładowo, prawdziwy elektron jest przykładem cząstki o spinie $\frac{1}{2}$, a prawdziwy foton to przykład cząstki o spinie 1. Cząstki o spinach $\frac{1}{2}$ i 1 mają cztery składowe. Inne typy mogą mieć ich więcej, jak na przykład cząstka o spinie 2, która ma dziesięć składowych**.

Powiedziałem, że połączenie między względnością a polaryzacją jest proste i eleganckie, ale nie jestem pewien, czy potrafię to prosto i elegancko wyjaśnić! (Musiałbym zrobić dodatkowy wykład na ten temat). Wprawdzie szczegóły polaryzacji nie są kluczowe dla zrozumienia ducha i charakteru elektrodynamiki kwantowej, lecz są oczywiście kluczowe dla poprawnego obliczania każdego rzeczywistego procesu i często mają duże znaczenie.

Na tych wykładach koncentrowałem się na względnie prostych oddziaływaniach między elektronami a fotonami na bardzo małych odległościach, w których bierze udział tylko kilka cząstek. Chciałbym jednak dodać jedną czy dwie uwagi na temat tego, jak te oddziaływania wyglądają w większym świecie, gdzie wymieniane są bardzo, bardzo duże liczby fotonów. W takiej dużej skali obliczanie strzałek staje się bardzo skomplikowane.

Są jednak sytuacje, które nie są tak trudne do analizy. Istnieją okoliczności, gdy na przykład amplituda emisji fotonu przez źródło jest niezależna od tego, czy emitowany jest inny foton. Może się to zdarzyć, gdy źródło jest bardzo ciężkie (jądro atomu) lub gdy bardzo duża liczba elektronów porusza się tą samą trajektorią, na przykład wzdłuż

* Odkryty w 2012 r. bozon Higgsa jest jedyną oprócz mezonów cząstką elementarną modelu standardowego o spinie zero – *przyt. kons. nauk.*

** Ogólna masywna cząstka o spinie dwa rzeczywiście ma dziesięć składowych, ale najczęściej rozważaną w fizyce hipotetyczną cząstką o spinie dwa jest bezmasowy grawiton, który ze względu na dodatkowe ograniczenia, jakim podlega teoria grawitacji, ma tylko dwie niezależne składowe – *przyt. kons. nauk.*