




CZĄSTKI ELEMENTARNE I ODDZIAŁYWANIA

IV ODDZIAŁYWANIA ELEKTROMAGNETYCZNE

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

<http://home.agh.edu.pl/~amucha/>
Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek
D11 p. 111



Jakimi równaniami opisujemy stan i ewolucję czasową cząstki?

- Stan cząstki – funkcja falowa: $\Psi(\vec{x}, t) = Ne^{i(\vec{p}\cdot\vec{x}-Et)}$.

- Kinematyka:

Równanie Schrödingera: $i \frac{\partial \Psi(\vec{x}, t)}{\partial t} = -\frac{1}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(\vec{x}, t)}{\partial x^2} + \hat{V}(\vec{x}, t)$
opisuje cząstki nierelatywistyczne

Równanie Kleina-Gordana: $-\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi + \nabla^2 \Psi = m^2 \Psi$ lub: $(-\partial^\mu \partial_\mu - m^2) \Psi = 0$
opisuje relatywistyczne bozony

Równanie Diraca: $(i\gamma^0 \frac{\partial}{\partial t} + i\vec{\gamma} \cdot \nabla - m) \Psi = 0$ lub $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \Psi = 0$
opisuje relatywistyczne fermiony

- Relatywistyczne fermiony występują jako rozwiązania Diraca w wersji „cząstki” i „antycząstki”

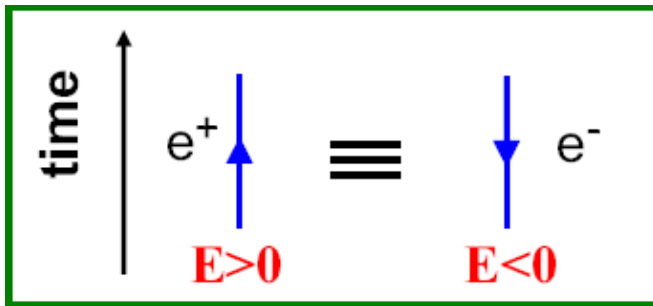
$$\psi = u_{1,2}(p^\mu) e^{-i(Et - \vec{p}\cdot\vec{x})}$$

$$\psi = u_{3,4}(p^\mu) e^{-i(Et - \vec{p}\cdot\vec{x})}$$

Interpretacja Feynmana

Rozwiązania r. Diraca:

są cząstkami o ujemnej energii poruszającymi się wstecz w czasie

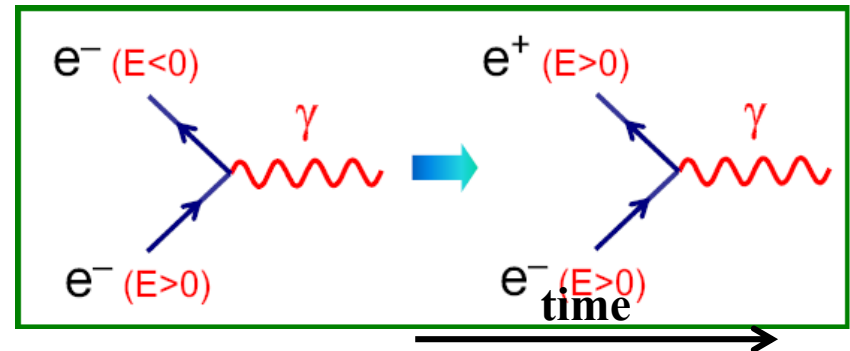


Uwaga: $\exp(-iEt) = \exp\{-i(-E)(-t)\}$

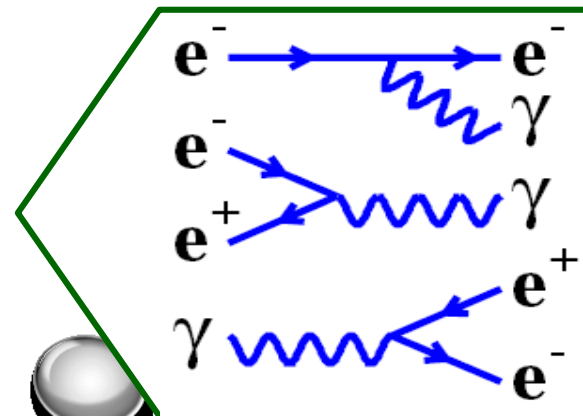
Feynman wprowadził graficzną interpretację elementarnych procesów zachodzących pomiędzy elektronami:

Podstawowe procesy:
(każdy zabroniony przez zas.zach.en i pędu)

LUB antycząstkami o dodatniej energii propagującymi się w czasie „do przodu”.



Kierunek strzałki dla antycząstki - „do tyłu” w czasie



Diagramy Feynmana – konstrukcja

Oddziaływanie zachodzi, gdy następuje:

wymiana energii i pędu między cząstkami,
kreacja lub anihilacja cząstek.

Oddziaływanie zachodzi poprzez wymianę wirtualnych cząstek

Każde rzeczywiste oddziaływanie (np. **rozpraszanie** elektron-proton) składa się

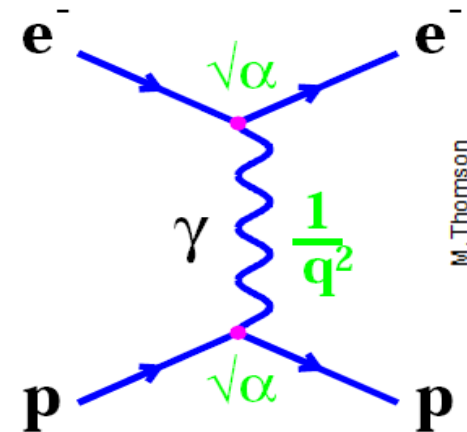
dwóch linii zewnętrznych reprezentujących funkcje falowe cząstek,
dwóch wierzchołków, każdy proporcjonalny do siły oddziaływania,
linii wewnętrznej opisującej wirtualną wymienianą cząstkę.

Werteksy i strzałki są tylko **symbolami**, nie reprezentują śladów cząstek w przestrzeni.

Diagramy czytamy **od lewej do prawej** strony (strzałka czasu) – z lewej strony mamy cząstki przed oddziaływaniem, z prawej – po nim (czasem konwencja biegu czasu góra-dół).

Z lewej strony wierzchołka - strzałka skierowana do wierzchołka oznacza **cząstkę wchodzącą** do oddziaływania, strzałka od wierzchołka reprezentuje **antycząstkę wchodzącą** do oddziaływania.

Z prawej strony (czyli po oddziaływaniu) – odpowiednio odwrotnie.



A teraz popatrzmy na niezwykle cechy diagramów Feynmana!

Diagramy Feynmana – obracamy!

Oddziaływanie zachodzi, gdy następuje:

wymiana energii i pędu między cząstkami,
kreacja lub anihilacja cząstek.

Oddziaływanie zachodzi poprzez wymianę cząstki (np. foton, cząstka)

Każde rzeczywiste oddziaływanie (np. rozpraszanie elektron-proton) składa się

dwóch linii zewnętrznych (przechodzących przez funkcje falowe cząstek,
dwóch wierzchołków (wierzchołki są proporcjonalny do siły oddziaływania,
linii wewnętrznych (linia wewnętrzna reprezentuje wirtualną wymienianą cząstkę.

Werteksy i strzałki (wartości i symbole), nie reprezentują śladów cząstek w przestrzeni.

Diagramy czytamy od lewej do prawej strony (strzałka czasu) – z lewej strony mamy cząstki przed oddziaływaniem, z prawej – po nim (czasem konwencja biegu czasu góra-dół).

Z lewej strony wierzchołka - strzałka skierowana do wierzchołka oznacza cząstkę wchodzącą do oddziaływania, strzałka od wierzchołka reprezentuje antycząstkę wchodzącą do oddziaływania.

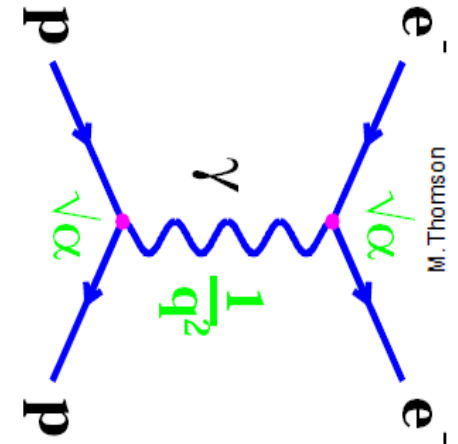
Z prawej strony (czyli po oddziaływaniu) – odpowiednio odwrotnie.

Linie na diagramach Feynmana nie są śladami cząstek!

Używamy tu konwencji, że czas biegnie poziomo.

Pojedynczy wierzchołek nie reprezentuje rzeczywistego procesu fizycznego

A teraz popatrzmy na niezwykle cechy diagramów Feynmana:



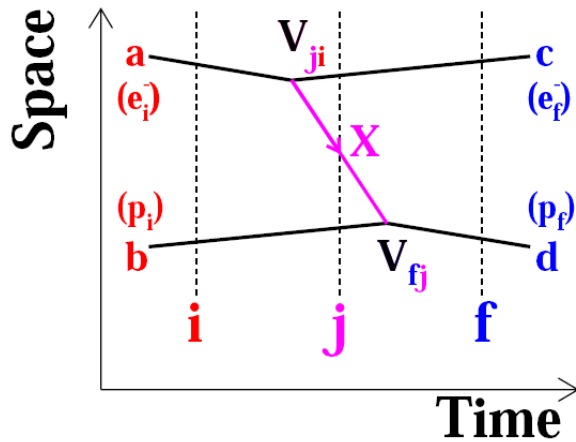
M. Thomson

Diagramy Feynmana

W każdym wierzchołku oddziaływania jest zachowane pęd i wszystkie l.kw.

Diagramy Feynmana są graficznym przedstawieniem oddziaływań między cząstkami, zachodzących poprzez wymianę odpowiednich kwantów pól. Diagramy reprezentują amplitudy przejścia.

Rozpatrzmy jeden z procesów w czasoprzestrzeni:

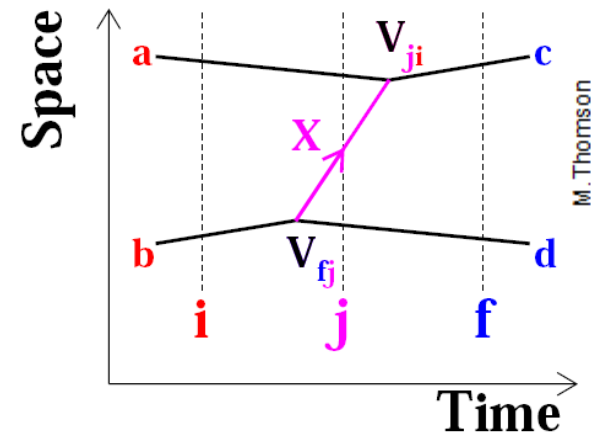


Cząstka a emituje X , a cząstka b go pochłania.



Cząstka b emituje X , a cząstka a go pochłania.

oraz zupełnie inny proces:



Procesy te zależą od wyboru układu, a więc nie są niezmiennicze.

Skoro prowadzą do tego samego stanu końcowego – w mech. kwantowej trzeba je wysumować.

Rozpraszanie

Mamy proces 2-ciałowy, np. rozpraszanie elektron – proton.

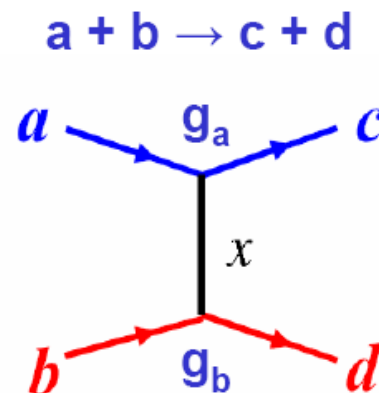
Prawdopodobieństwo zajścia procesu (Złota Reguła Fermiego)

$$\Gamma_{fi} = 2\pi |T_{fi}|^2 \rho(E_f)$$

$$T_{fi} = \langle f | \widehat{H}' | i \rangle + \sum_{i \neq j} \frac{\langle f | \widehat{H}' | j \rangle \langle j | \widehat{H}' | i \rangle}{E_i - E_j} + \dots$$

Rozpraszanie na potencjale

Rozpraszanie poprzez stan pośredni j



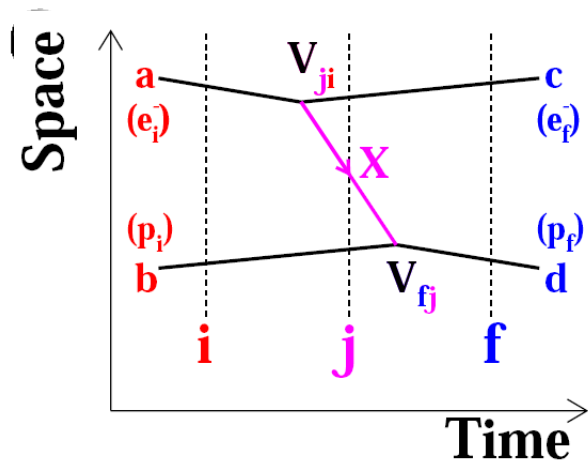
$$q^2 = (p_a - p_c)^2 = (E_a - E_c)^2 - (\vec{p}_a - \vec{p}_c)^2 \equiv t \leq 0$$

Rozpraszanie na potencjale:

przekaz pędu bez żadnego „medium”,

niezgodne z T.W – ruch źródła musi spowodować natychmiastową zmianę potencjału wszędzie dookoła

Rozpraszanie – cząstka pośrednicząca



Stan początkowy – cząstka **a** i **b**,
a emituje **X**
w późniejszej chwili **X** jest pochłonięty
przez **b**

Stan pośredni – **b**, **c** i wymieniany **X**

Stan końcowy **c** i **d**

$$|i\rangle \rightarrow a + b$$

$$|j\rangle \rightarrow c + b + X \quad \text{stan pośredni } E_i \neq E_j$$

$$|f\rangle \rightarrow c + d$$

lub inna
kolejność w
czasie

stan pośredniczący
„pożycza” energię
na czas dozwolony
przez $\Delta E \Delta t < 1$

$$T_{fi}^{ab} = \frac{\langle f|V|j\rangle\langle j|V|i\rangle}{E_i - E_j} = \frac{\langle d|V|b + X\rangle\langle c + X|V|a\rangle}{(E_a + E_b) - (E_c + E_X + E_b)}$$

oddziaływanie w wierzchołku **ji** opisane jest elementem macierzowym:

$$V_{ji} = \langle c + X|V|a\rangle = \frac{M_{a \rightarrow c+X}}{(2E_a \cdot 2E_c \cdot 2E_X)^{1/2}}$$

Pierwszy diagram

$$V_{ji} = \langle c + X | V | a \rangle = \frac{M_{a \rightarrow c+X}}{(2E_a \cdot 2E_c \cdot 2E_X)^{1/2}}$$

Przejście ze stanu a do $c + X$ zachodzi poprzez niezmienniczy element macierzowy $M_{a \rightarrow c+X}$.

$M_{a \rightarrow c+X}$ opisuje podstawowe oddziaływanie, które zaszło w tym wierzchołku (elm, silne, słabe, etc).

$M_{a \rightarrow c+X}$ w najprostszej postaci może być skalarem (liczbą), który odzwierciedla siłę oddziaływania w tym wierzchołku, np. $M_{a \rightarrow c+X} = g_a$.

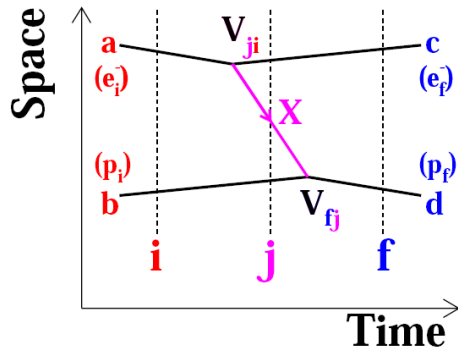
W ten sam sposób mamy: $M_{b+X \rightarrow d} = g_b$

Np. w rozpraszaniu elektronów (oddz. elektromagnetyczne), wynosi ona:

$$g = e = \sqrt{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{137}}$$

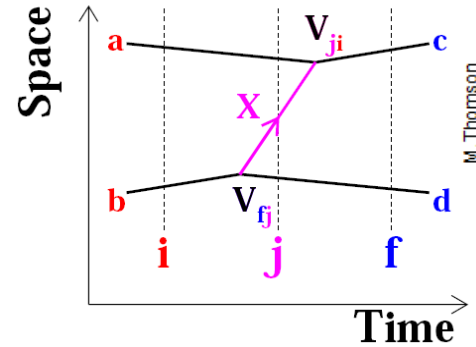
W MK całkowita amplituda to suma wszystkich możliwych przejść pomiędzy stanami...

Suma dwóch diagramów



$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{(E_a - E_c)^2 - E_x^2}$$

+



$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{(E_b - E_d)^2 - E_x^2}$$

W wierzchołkach zachowany jest pęd, ale nie jest zachowana energia: $E_i \neq E_j$.

W każdym diagramie wymieniana jest cząstka o masie m_x , która spełnia: $E_x^2 = p_x^2 + m_x^2$.

Skoro: $\vec{p}_X = \vec{p}_a - \vec{p}_c$ oraz $\vec{p}_X = \vec{p}_d - \vec{p}_b$, mamy:

$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{(E_a - E_c)^2 - (\vec{p}_a - \vec{p}_c)^2 - m_x^2}$$

+

$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{(E_b - E_d)^2 - (\vec{p}_b - \vec{p}_d)^2 - m_x^2}$$

Propagator

Dla wszystkich diagramów, w różnej kolejności czasowej, element w postaci niezmienniczej:

$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{(E_a - E_c)^2 - (\vec{p}_a - \vec{p}_c)^2 - m_X^2} = \frac{g_a g_b}{(P_a - P_c)^2 - m_X^2}$$

gdy zapiszemy: $\mathbf{P}_a - \mathbf{P}_c = \mathbf{q}$

czteropędy cząstki początkowej i końcowej

to \mathbf{q} rozumiane jest jako czteropęd wymienianej cząstki, co daje:

$$M_{fi} = \frac{g_a g_b}{q^2 - m_X^2}$$

Masa wymienianej cząstki X zależy od energii i pędu rozpraszanych cząstek.

czynnik $\frac{1}{q^2 - m_X^2}$ nazywamy **PROPAGATOREM**

Co to oznacza?

element macierzowy oddziaływania z dwoma wierzchołkami zależy od:

- kwadratu przekazanego czteropędu,
- masy wymienianej cząstki,
- siły oddziaływania w każdym wierzchołku

W procesie emisji i absorpcji energia nie jest zachowana (gdy wymieniana cz. rzeczywista).

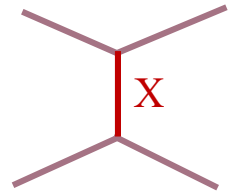
Propagator wymienianej cząstki (wirtualnej)

Masa wymienianej cząstki X zależy od energii i pędu rozpraszanych cząstek. **Może być DOWOLNA.**
Rozumiemy dlaczego?

Bo kwadrat czteropędu to kwadrat masy niezmienniczej, a tutaj mamy: $q^2 = (p_a - p_c)^2$

Co to oznacza?

Wymieniana cząstka nie jest rzeczywista, tylko wirtualna (p. 1. wykład).



Co zyskałimy?

Wprowadzając cząstkę wirtualną, jako przenoszącą oddziaływanie, ratujemy zas. zach. energii w każdym wierzchołku diagramu. Po prostu masa wymienianej cząstki jest taka, jaka jest potrzebna do zachowania energii i pędu.

Propagator i q^2 zależą od czteropędów rozpraszanych cząstek,

q^2 nie jest masą rzeczywistej cząstki X: $q^2 \neq m_X^2$, ale można go policzyć:

dla rozproszenia:

$$q^2 = (p_a - p_c)^2 = (E_a - E_c)^2 - (\vec{p}_a - \vec{p}_c)^2 \equiv t \leq 0$$

gdy $m_X^2 = 0$, to propagator $\frac{1}{q^2 - m_X^2} \rightarrow \frac{1}{q^2}$ opisuje oddziaływanie poprzez wymianę fotonu (wirtualnego), czyli oddziaływanie elektromagnetyczne.

Wymieniane cząstki nie są rejestrowane bezpośrednio, a widać jedynie SKUTEK ich działalności (wymianę pędu i energii)

Wirtualność

CZĄSTKA RZECZYWISTA

swobodna,
o masie spoczynkowej M ,
energia całkowita w układzie
środka masy $E_{CMS} = M$

po transformacji do innego układu:

$$E^2 = p^2 + m^2$$

Gdy taka jest zależność pomiędzy masą a energią-
cząstka na powłoce masy (on-mass shell)



CZĄSTKA WIRTUALNA

istnieje jako oddziaływanie,
jedynie przez czas dany zasadą Heisenberga,

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar$$

a zasięg odwrotnie proporcjonalny do masy:

$$R = c\Delta t = c\hbar/m$$

energia nie jest ściśle określona

Kwadrat czteropędu jest różny od kwadratu masy spoczynkowej (off-mass shell)

$$E^2 \neq p^2 + m^2$$

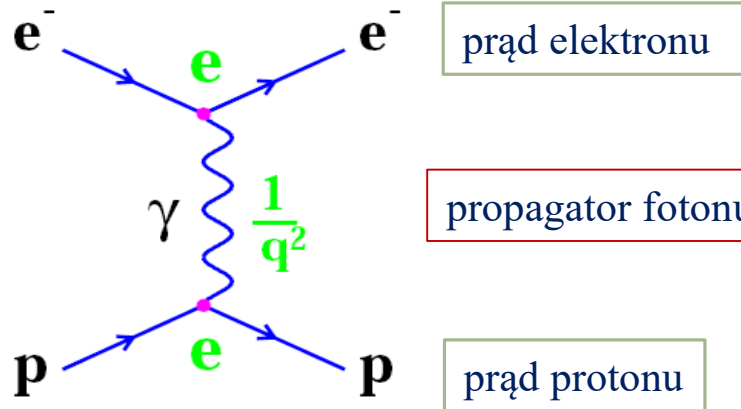
Ma masę zależną od czteropędów oddziałujących cząstek,

Cząstką wirtualną może być dowolny stan (foton, elektron, neutrino, bozony W i Z, również kwarki i **nowe nieodkryte stany**)

Wymiana wirtualnego fotonu

- Element macierzowy M_{fi} faktoryzuje się na trzy czynniki, np. w:

ROZPRASZANIU

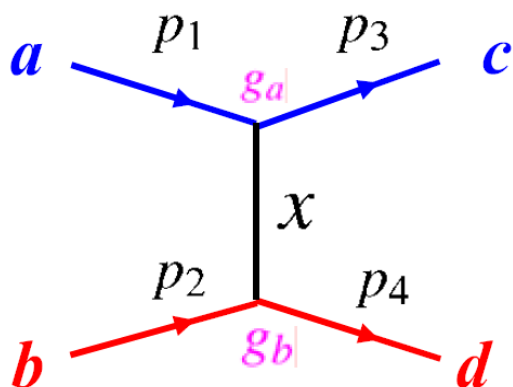


$$M \propto \alpha (p_1 + p_2) \frac{1}{q^2} (p_3 + p_4)$$

- Każdy wierzchołek opisuje prawdopodobieństwo emisji fotonu. Jest ono proporcjonalne do propagatora fotonu.
- Propagator określa, jak bardzo cząstka jest wirtualna (poza powłoką). Im większa wirtualność, tym mniejsza szansa produkcji takiej cząstki.
- Jednocześnie najbardziej prawdopodobna jest emisja fotonu mało wirtualnego ($q^2 = 0$ – fotony prawie-rzeczywiste)

Rozpraszanie

Czteropęd q , niesiony przez wirtualną cząstkę, obliczony z zas. zach en. i pędu w wierzchołkach, może być zarówno dodatni, jak i ujemny:



ROZPRASZANIE

przekaz czteropędu:

$$q = p_3 - p_1 = p_4 - p_2$$

$$q^2 = (E_3 - E_1)^2 - (\vec{p}_3 - \vec{p}_1)^2 \equiv t \leq 0$$

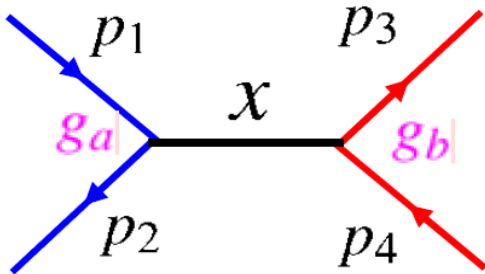
(t-channel)

$$p_1 = (E_1, \vec{p}_1); \quad p_3 = (E_3, \vec{p}_3)$$

$$q^2 < 0$$

„przestrzenny” (space-like) procesy emisji i absorpcji zachodzą w tym samym czasie

Anihilacja



energia w ukł. śr. masy

$$q = p_1 + p_2 = p_3 - p_4 \equiv s \quad (\text{s-channel})$$

$$q^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \approx 4E^2$$

„czasowy” (time-like) składowa „czasowa” jest większa niż przestrzenna

procesy anihilacji i kreacji zachodzą w tym samym miejscu

- \sqrt{t} i \sqrt{s} reprezentują masy cząstek wirtualnych.
- W kanale „t” masa cząstki wirtualnej jest urojona, w „s” rzeczywista.
- W kanale „s” - gdy masa wymienianej cząstki jest (prawie) równa masie spoczynkowej rzeczywistej cząstki (np. J/ψ), prawdopodobieństwo zajścia takiego procesu rośnie rezonansowo....

JEST TO FIZYCZNA PODSTAWA EKSPERYMENTÓW ZE ZDERZENIAMI

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym oddziałują elektromagnetycznie:

1. siły wiążące elektrony z jądrem atomowym (atomy),
2. siły międzycząsteczkowe w cieczech i ciałach stałych.

Klasycznie oddziaływania są skutkiem działania sił, które pochodzą z pól: elektrycznego i magnetycznego. Cząstki są również źródłami tych pól – $V(r)$

ELEKTRODYNAMIKA KWANTOWA:

Kwantowa teoria pola opisująca procesy elektromagnetyczne, która umożliwia obliczenie z bardzo dużą precyzją przekrojów czynnych na w/w procesy.

QED - siły są skutkiem wymiany wirtualnej cząstki – kwantów pola.

Pole jest układem kwantowym złożonym z fotonów, które oddziałują z ładunkiem elektrycznym.

Krótką historią:

1900 – pierwsze kwantowanie Planca (emisja kwantów i ciało doskonale czarne)

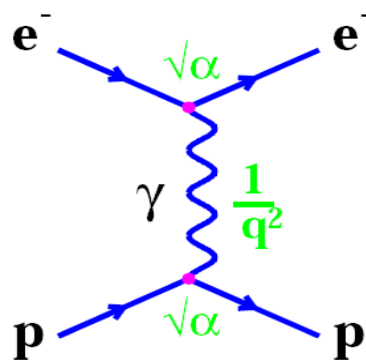
1905 – efekt fotoelektryczny wg Einsteina

1922 – efekt Comptona

~1930 – Heisenberg, Pauli - kwantowa teoria pola

1940-50 – R. Feynman, J. Schwinger, S. Tomonaga (Nobel 1965r) – formalizm QED

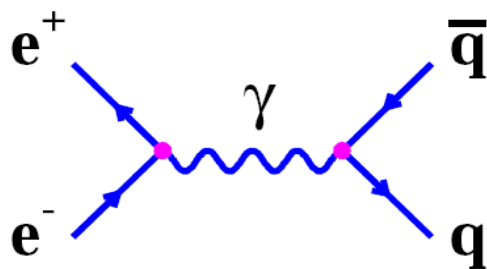
Podstawowe procesy



$$M_{ep} = \langle \psi_c | V | \psi_a \rangle \overbrace{\frac{1}{q^2 - m_X^2}}^{\text{propagator}} \langle \psi_d | V | \psi_b \rangle$$

siła oddziaływania w wierzchołkach $\propto e = \sqrt{\alpha}$

Anihilacja elektron-pozyton

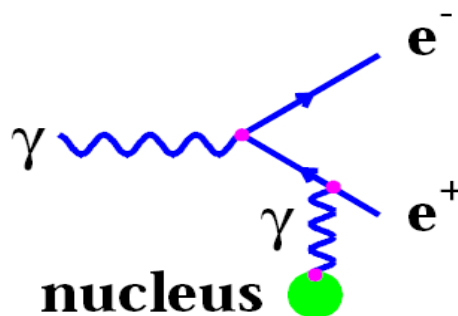


$$M_{ee} \propto e Q_q e$$

$$|M_{ee}|^2 \propto Q_q^2 e^4$$

$$\sigma \propto Q_q^2 \alpha^2$$

Kreacja par elektron-pozyton



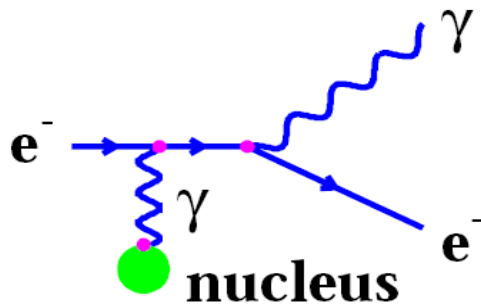
$$M \propto ee Ze$$

$$|M|^2 \propto Z^2 e^6$$

$$\sigma \propto Z^2 \alpha^3$$

To również procesy elektromagnetyczne

Promieniowanie hamowania

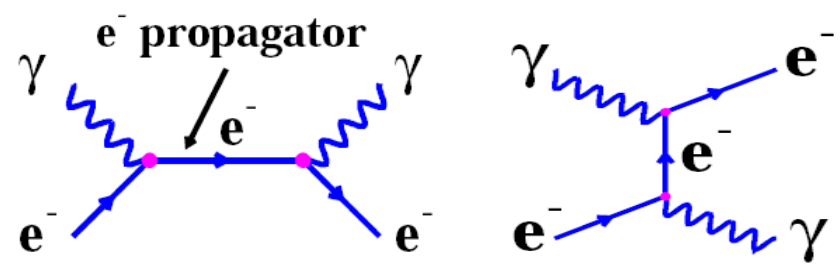


$$M \sim Z e \cdot e \cdot e$$

$$|M|^2 \sim Z^2 e^6$$

$$\sigma \sim (4\pi)^3 Z^2 \alpha^6$$

Efekt Comptona



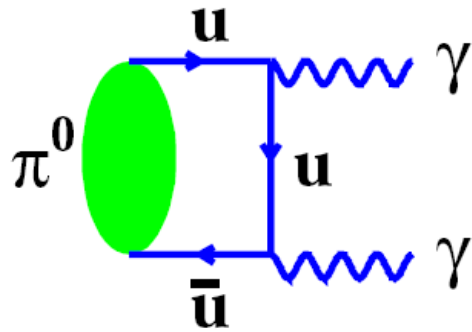
$$M \sim e \cdot e$$

$$|M|^2 \sim e^4$$

$$\sigma \sim (4\pi)^2 \alpha^2$$

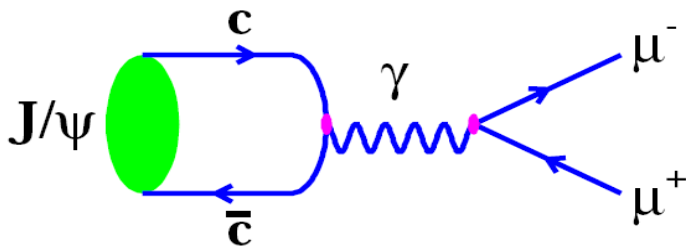
I te również...

Rozpad $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$



$$M \sim Q_u e \cdot Q_u e$$
$$|M|^2 \sim Q_u^4 e^4$$
$$\sigma \sim (4\pi)^2 Q_u^4 \alpha^2$$

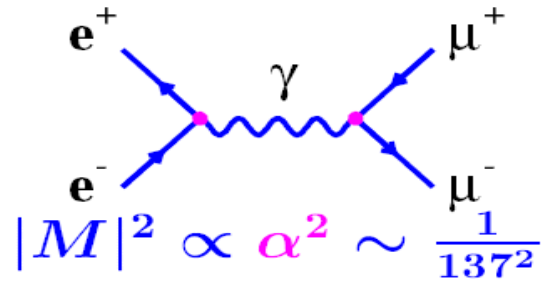
M.Thomson



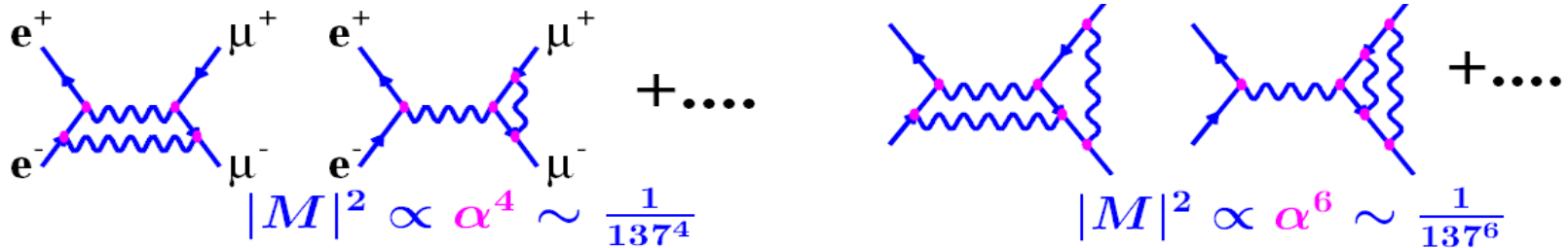
$$\sigma_{elm} \sim 10^{-2} \text{ mb}$$
$$\tau_{elm} \sim 10^{-25} \text{ s}$$

Każdy ładunek może emitować foton!

Na razie patrzyliśmy tylko na najniższy rząd w rachunkach – procesy z dwoma wierzchołkami:

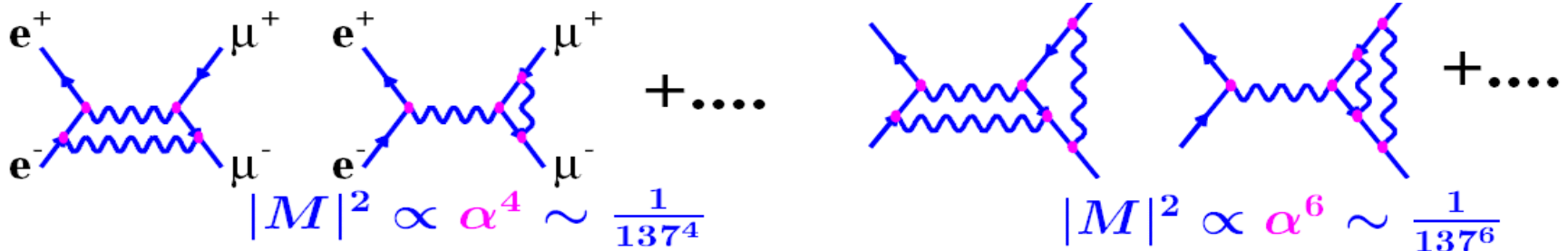


ale są też procesy wyższych rzędów:



M.Thomson

Radiacja, radiacja....



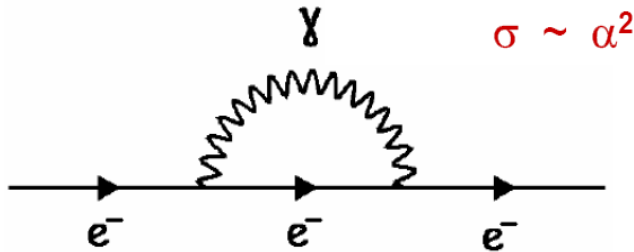
M.Thomson

RACHUNEK ZABURZEŃ

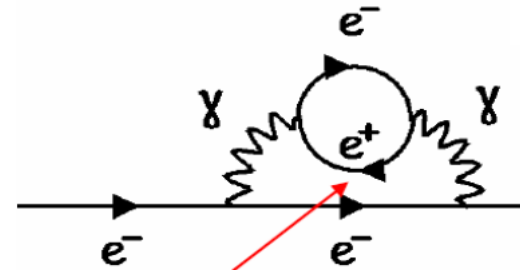
1. Dla danego procesu rysujemy wszystkie możliwe diagramy:
2. Liczymy amplitudę na każdy namalowany proces (nieskończenie dużo amplitud?)
3. Całkowita amplituda jest sumą amplitud dla poszczególnych diagramów. Trzeba uważać na efekty pochodzące z interferencji pomiędzy amplitudami.
4. Przekrój czynny zależy od kwadratu amplitudy (i od przestrzeni fazowej), problem interferencji.
5. Zakładając, że α jest mała, dominujący wkład do szeregu perturbacyjnego ma najniższy („leading order”) diagram.

Diagramy „energii własnej”

Problem pojawia się, gdy zauważymy, że elektron może nieustająco emitować i pochłaniać foton. A foton może fluktuować na parę elektron-pozyton. Wszystko wirtualnie.



$$\sigma \sim \alpha^2$$

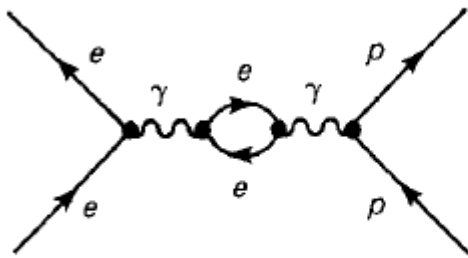


elektron emituje i pochłania wirtualną parę elektron-pozyton

KWANTOWE FLUKTUACJE prowadzą do efektów tzw. **polaryzacji próżni**”.

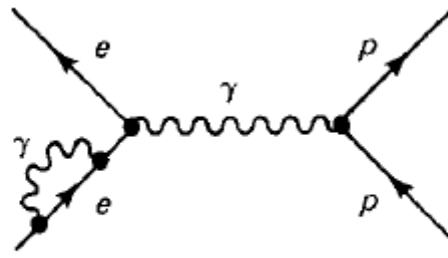
Poprawki wyższych rzędów

Wyjaśnione zostało przesunięcie Lamba (1947) – przesunięcie poziomów elektronu w atomie wodoru spowodowane oddziaływaniem elektronu z polem wytworzonym przez ten sam elektron.



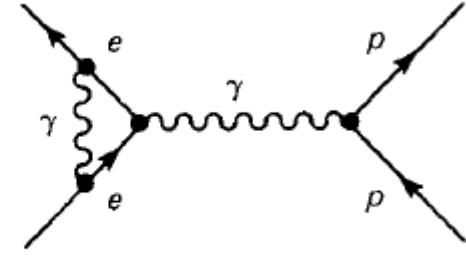
Vacuum polarization

Produkcja par elektron-pozyton prowadząca do ekranowania ładunku.



Electron mass renormalization

Emisja fotonu powoduje, że energia elektronu fluktuuje.



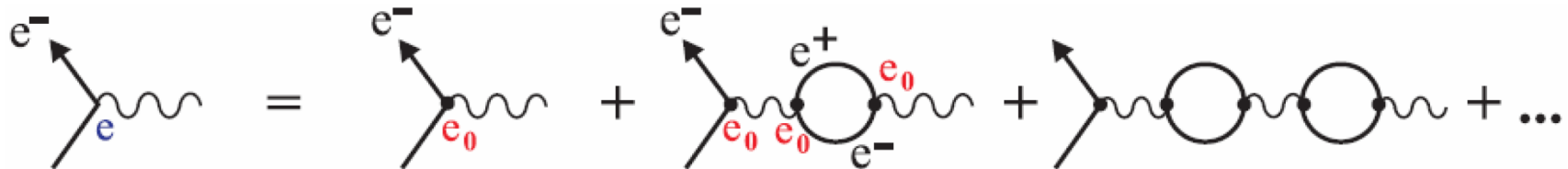
Anomalous magnetic moment

Zmiana ładunku elektronu wpływa na moment magnetyczny.

Efekty te są bardzo niewielkie, ale mierzalne!

Diagramy „energii własnej”

- Na diagramach linie elektronowe odpowiadają „gołym” elektronom – ładunek, który jest wierzchołku elektron – foton nazywany „gołym” e_0 ,
- Natomiast w każdym oddziaływaniu mamy cząstki ubrane w chmurę cząstek wirtualnych e_{exp} – diagramy „energii własnej”, czyli „samooddziaływania”, a ładunek ma charakter „efektywny”.



M. Thomson

- Element macierzowy opisujący jedną pętlę ma postać:

$$\mathcal{M} = i \left(\frac{g}{2\pi} \right)^4 \frac{1}{[(p_1 - p_3)^2 - m_C^2 c^2]^2} \int \frac{1}{[(p_1 - p_3 - q)^2 - m_A^2 c^2](q^2 - m_B^2 c^2)} d^4 q$$

- Całkowanie go jest dosyć niewdzięczne:

$$\int^{\infty} \frac{1}{q^4} q^3 dq = \ln q|_{\infty} = \infty$$

ponieważ prowadzi do logarytmicznych rozbieżności dla bardzo dużych q^2 .

Renormalizacja

- Z powodu wirtualnych pętli masa i ładunek elektronu stają się nieskończone – zgodnie z zas. nieoznaczoności, na krótką chwilę, pęd wirtualnych cząstek może być nieskończony.

$$\int \frac{dq}{q} \sim \ln q$$

- 20 lat trwało rozwiązanie tego problemu.
- Polega ono na zastosowaniu najpierw procedury regularyzacji zastosowanej przy obliczeniu powyższej całki, tzn. wprowadza się dodatkowy czynnik zawierający (bardzo dużą) masę, który powoduje, że całka dąży do 1.
- Dzięki temu całka separuje się na dwie części: w jednej są zbieżne czynniki zależne od M , w drugiej pozostaje problem – nieskończone rozbieżności w granicy $M \rightarrow \infty$.
- Okazuje się jednak, że w czynniku rozbieżnym pojawiają się dodatkowe zależności masy i sił sprężenia:

$$M_{exp} = m_0 + \delta_M$$

$$e_{exp} = e_0 + \delta_e$$

- Sychologia problemu? nooooo, trochę, bo teraz δ_M i δ_e są nieskończone.
- Kolejny krok, to już tylko zrozumienie, że jesteśmy w stanie zmierzyć M_{exp} i e_{exp} w funkcji q^2 .
- Nieskończone poprawki albo obliczmy, albo.... ignorujemy.

*D. J. Griffiths „Introduction to elementary particles”, 1987 John Wiley & Sons

Renormalizacja

- W ten sposób przedefiniowaliśmy masę i ładunek elektronu, poprzez przemnożenie ich przez bezwymiarowy czynnik zawierający rozbieżną całkę, policzoną dla znanej wartości ładunku :

$$e_{exp}(q^2) = I(q^2) \cdot e_0$$

zamiast „gołej” masy (i ładunku) w obliczeniach pojawiają się wartości zmierzone.

Procedura ta nazywa się: **renormalizacja**.

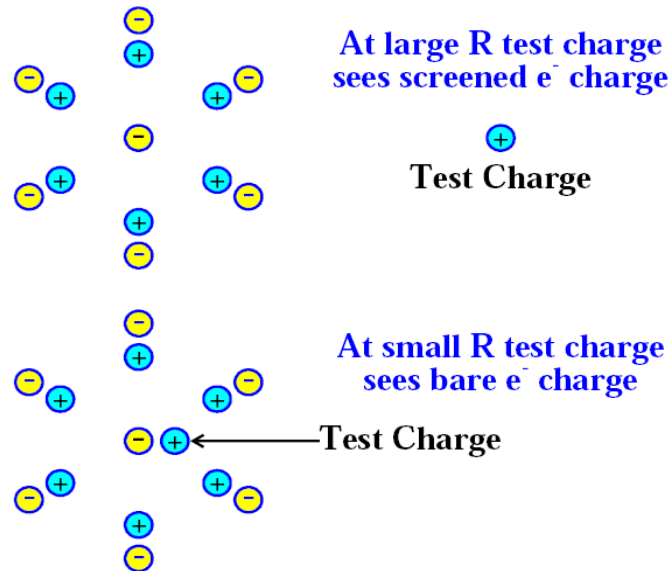
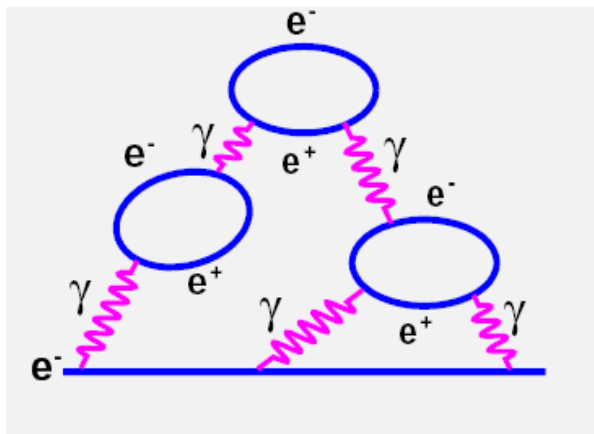
- Inaczej można powiedzieć, że renormalizacja jest procedurą matematyczną pozwalającą na odjęcie od nieskończonego ładunku gołego elektronu nieskończonego ładunku otaczającej go próżni, tak aby w wyniku otrzymać obserwowaną w doświadczeniach wartość skończoną.
- Teoria jest renormalizowalna wtedy, gdy nieskończoności w diagramach dowolnego rzędu (dowolnie skomplikowanych) można usunąć za pomocą skończonej liczby parametrów doświadczalnych.
- Wyjaśnione zostało przesunięcie Lamba (1947) – przesunięcie poziomów elektronu w atomie wodoru spowodowane oddziaływaniem elektronu z polem wytworzonym przez ten sam elektron.

Ceną za renormalizację jest uzależnienie pomiaru ładunki i masy od przekazu czteropędu q^2 .
Czyli „efektywny” ładunek zależy od rodzaju eksperymentu????

Polaryzacja próżni

Stała sprzężenia $\alpha = \frac{e^2}{2\pi}$ określa siłę oddziaływania, ale z powodu samooddziaływania α nie jest stałą!

Rozważmy elektron – fluktuacje kwantowe prowadzą do powstania chmury wirtualnych par elektron-pozyton



- próżnia zachowuje się jak dielektryk, pary są spolaryzowane,
- przy dużych odległościach - „goły” ładunek jest ekranowany,
- pojawia się problem pomiaru ładunku

Biegająca stała sprzężenia

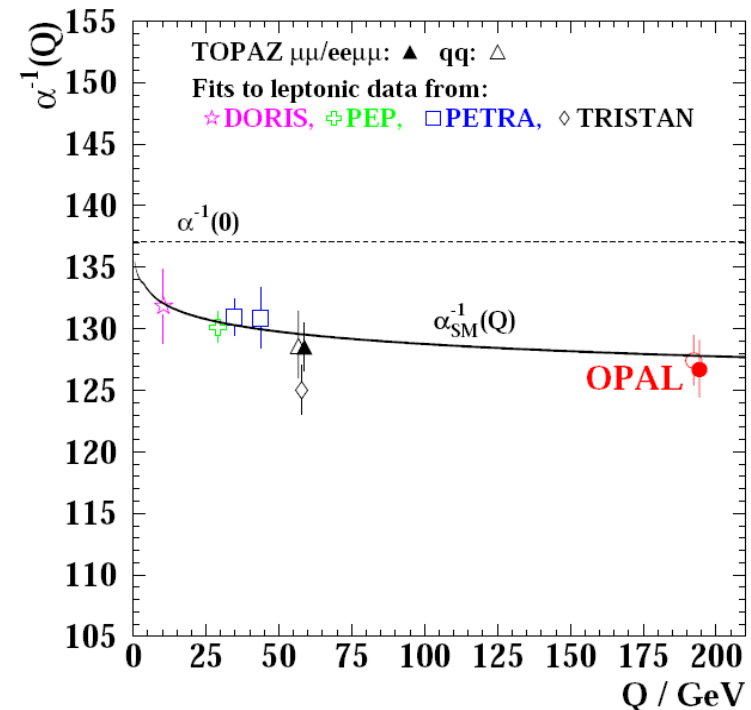
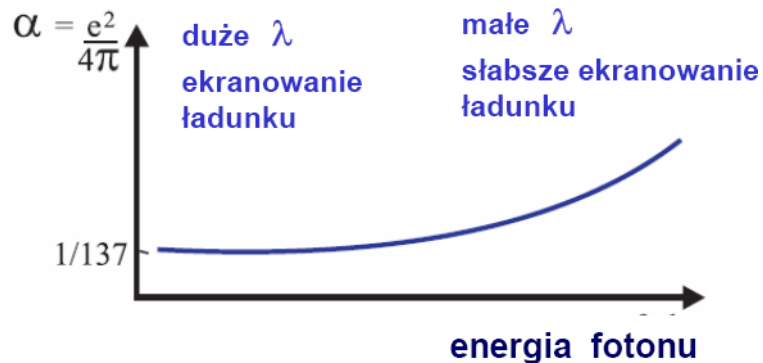
- Stałą sprzężenia α wyznacza się eksperymentalnie w zależności od q^2 .
- Duże q^2 oznacza wysoką energię próbkującego fotonu i jego krótszą długość fali.

Daje to próbkowanie z mniejszej odległości – foton widzi większy ładunek elektronu (wkład od polaryzacji próżni jest mniejszy)

α rośnie (b. powoli) w miarę zbliżania się do gołego ładunku (i wzrostu q^2)

gdy $q^2 \rightarrow 0$ (duże odległości) - $\alpha = 1/137$,

przy $q^2 = (100 \text{ GeV})^2 = m^2(Z^0)$ $\alpha(m_{Z^0}) = 1/128$



Moment magnetyczny

Moment magnetyczny cząstki zależy od jej ładunku:

A dla punkowego ładunku o spinie 1/2: $g=2$ (Dirac)

Skoro ładunek zależy od biegnącej stałej – moment również.

Ale moment magnetyczny można bardzo dokładnie zmierzyć – badając jego oddziaływanie z polem magnetycznym.

Jednocześnie teoretycy z wysoką precyzją liczą poprawki wyższych rzędów w QED, łącznie z wymianą ciężkich cząstek, itp.

Otrzymany wynik:

$$g = 2 + \frac{\alpha}{\pi} - 0.32848 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + \dots$$

$$\frac{g - 2}{2} = (1159652307 \pm 110) \times 10^{-12}$$

wynik teoretyczny

$$(1159652193 \pm 10) \times 10^{-12}$$

wartość doświadczalna

Podsumowanie I:

zadaniem teoretyka jest opisanie cząstek i oddziaływań.

I. Do opisu mikroświata stosujemy zasady **mechaniki kwantowej**.

II. W mechanice kwantowej cząstka opisywana jest jako fala, a jej ewolucja czasowa poprzez **równanie Schrödingera**.

III. Przeważnie jednak cząstki są relatywistyczne i takie podejście nie wystarcza.

Równanie Kleina-Gordona jako relatywistyczna wersja r. Schrödingera:

- opisuje cząstki **relatywistyczne**,
- nadaje się tylko do **bozonów**,
- nie interpretuje stanów z ujemnymi energiami,
- ale za to wnioski płynące z tego równania pozwalają na utożsamienie bozonów (np. fotonu, czy cząstki masywnej) z potencjałem wytworzonym przez cząstki (i to zarówno kulombowskim, jak i Yukawy).

Równanie Diraca:

- wyprowadzone zostało jako „matematycznie bardziej poprawne” równanie Schrödingera:
- jest lorentzowsko **niezmiennicze**,
- opisuje cząstki relatywistyczne,
- w rozwiązaniach widać stany o **niezerowych spinach** i ich różne ustawienia.
- teoretycznie przewidziane zostały **antycząstki**,

Rola Feynmana:

- interpretacja stanów z **ujemną energią** w r. Diraca,
- wprowadzenie **graficznej reprezentacji procesów** (najpierw elektromagnetycznych),
- był jednym z twórców **Elektrodynamiki Kwantowej** (QFT).

WNIOSEK I: Właściwa teoria:

opisuje dotychczasowe wyniki doświadczalne,
pozwała przewidywać nowe efekty, które są jej weryfikacją.

Elektrodynamika kwantowa:

- I. Jest to kwantowa teoria oddziaływań elektromagnetycznych.
- II. Opisuje oddziaływanie jako wymianę wirtualnych bozonów pośredniczących.
- III. Oparta o perturbacyjny rachunek zaburzeń, którego coraz wyższe rzędy znajdują potwierdzenie w coraz bardziej precyzyjnych wynikach doświadczalnych.
- IV. Przewidziane przez QED efekty kwantowej polaryzacji próżni zostały zmierzone w doświadczeniu:
biegnąca stała sprzężenia,
moment magnetyczny elektronu.
- V. Nie ma żadnych wyników niezgodnych z QED.
- VI. Struktura QED posłużyła jako wzór dla kwantowej teorii oddziaływań silnych oraz słabych.
- VII. Próbuje się stworzyć również kwantową teorię oddziaływań grawitacyjnych.