

Dinâmica de partículas elementares

Física de Partículas Elementares

Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira

Centro de Ciências Naturais e Humanas
Universidade Federal do ABC
Av. dos Estados, 5001
09210-580 Santo André-SP

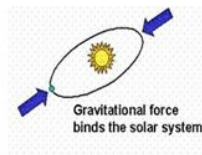
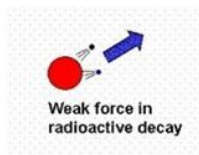
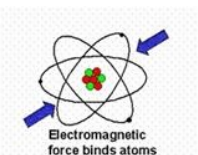
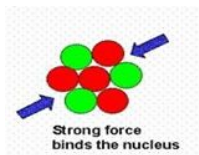
18 de fevereiro de 2025



Universidade Federal do ABC

As quatro forças

Força	Intensidade	Teoria	Mediador
Forte	10	Cromodinâmica	Glúon
Eletromagnética	10^{-2}	Eletrodinâmica	Fóton
Fraca	10^{-13}	Saipodinâmica	W e Z
Gravitacional	10^{-42}	Geometrodinâmica	Gráviton

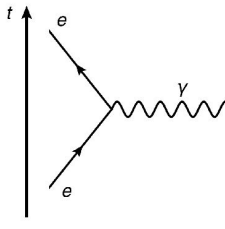


- Gravitacional: Newton (1687) → Einstein (1916) → ?;
- Eletromagnética: Maxwell (1864) → Tomonaga, Feynman, Schwinger (1940s);
- Fermi (1933) → Lee, Yang, Feynman, Gell-Mann, ... (1950s) → Glashow, Weinberg, Salam (1960s);
- Yukawa (1934) → Gell-Mann, Zweig, Greenberg (1964) → Rev. Novembro (1970s)

...

Eletrodinâmica quântica (QED)

- A QED é a teoria quântica mais antiga e bem sucedida;
- Todos os fenômenos eletromagnéticos podem ultimamente ser reduzidos ao seguinte processo elementar (ou *vértice primitivo*):

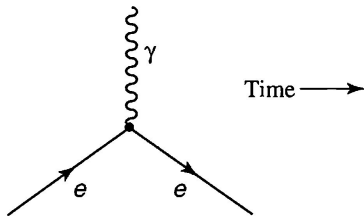


onde uma partícula carregada e entra, emite ou absorve um fóton γ e sai;

- Adotaremos (como no livro, 1ªEd.), o tempo passando para cima.

Eletrodinâmica quântica (QED)

- A QED é a teoria quântica mais antiga e bem sucedida;
- Todos os fenômenos eletromagnéticos podem ultimamente ser reduzidos ao seguinte processo elementar (ou *vértice primitivo*):

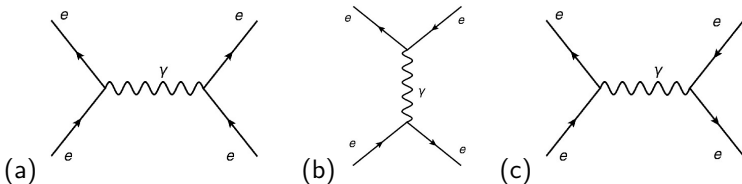


onde uma partícula carregada e entra, emite ou absorve um fóton γ e sai;

- No livro (2ªEd.), o tempo passa para a direita.

Eletrodinâmica quântica (QED)

- O vértice primitivo é a peça do quebra-cabeças. Ele não representa um processo físico, mas qualquer processo físico é montado a partir dele:



- ▶ Em (a), 2 elétrons entram no processo, trocam um fóton e saem (não precisamos dizer quem emitiu ou absorveu o fóton). Este processo é conhecido como *espalhamento Møller*: $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$;
 - ▶ Em (b), um elétron e um pósitron (seta apontando para baixo) aniquilam-se, formando um fóton que depois produz um novo par elétron-pósitron. Este processo é conhecido como *espalhamento Bhabha*: $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$;
 - ▶ Em (c), outro diagrama que contribui no espalhamento Bhabha: um par elétron-pósitron aniquila-se, troca um fóton e depois forma-se novamente.
- (Note a simetria de cruzamento, girando-se e torcendo-se os vértices primitivos dos diagramas.)

Eletrodinâmica quântica (QED)

- Usando-se 2 vértices, monta-se também, respectivamente, a aniquilação de pares:

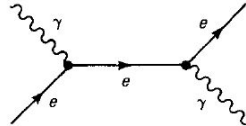
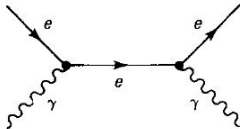
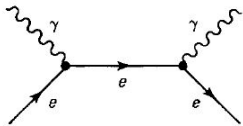
$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

a produção de pares:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$$

e o espalhamento Compton:

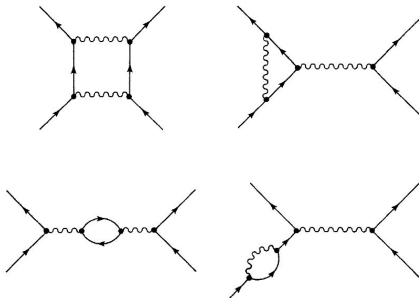
$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$$



(Note a simetria de cruzamento, girando-se e torcendo-se os vértices primitivos dos diagramas.)

Eletrodinâmica quântica (QED)

- Usando-se 4 vértices:



Em cada figura aqui, temos o espalhamento Møller:

$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-,$$

onde as linhas internas não podem ser observadas diretamente e são constituídas por *partículas virtuais*. Somente as linhas externas são *partículas reais* (observáveis). As linhas internas descrevem o *mecanismo* envolvido. Os diagramas de Feynman são simbólicos e não representam posições no espaço.

Eletrodinâmica quântica (QED)

- Para calcular um processo, desenhe todos os diagramas com as linhas externas que o represente e some suas contribuições de acordo com as regras de Feynman.

Por exemplo, para o *espalhamento Møller*:

$$(e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-)$$



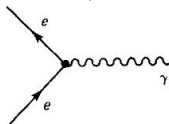
$$\Rightarrow \mathcal{M} = o(\alpha^2) + o(\alpha^4) + o(\alpha^4) + o(\alpha^4) + o(\alpha^4) + \dots,$$

onde $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$.

Eletrodinâmica quântica (QED)

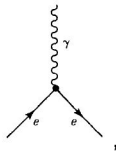
- Vimos que um vértice sozinho não representa um processo físico, pois viola a conservação de energia/momento.

Por exemplo, o processo $e^- \rightarrow e^- + \gamma$:



no centro de massa: $m_e c^2 = m_e c^2 + \cancel{p_\gamma c}$.

Analogamente, o processo $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$:

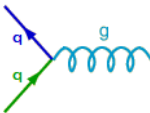


no centro de massa: $p_e - p_e = 0 \neq p_\gamma$.

- ▶ Partículas virtuais não têm a mesma massa que as reais (estão fora da *camada de massa*).

Cromodinâmica quântica (QCD)

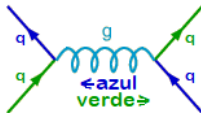
- Na cromodinâmica quântica, a cor faz o papel da carga e o vértice primário é:



- Analogamente, o vértice primário é a peça básica do quebra-cabeças; um processo físico básico é montado a partir de pelo menos 2 vértices:

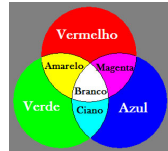
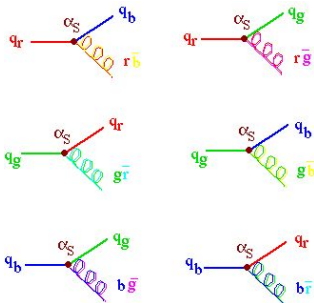


onde o mediador (glúon) carrega as cores de um quark para outro:

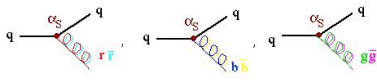


Cromodinâmica quântica (QCD)

- Há 3 cargas de cor: (qqq)
- Portanto, existem 6 glúons coloridos:



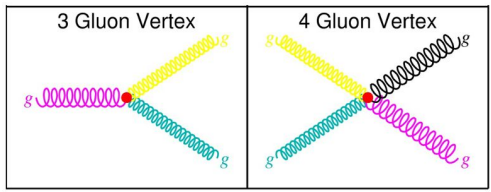
e 3 incolores:



mas por razões técnicas (veremos), eles combinam-se, formando somente 2, p.ex.: $(r\bar{r}+b\bar{b}-2g\bar{g})/\sqrt{6}$ e $(r\bar{r}-g\bar{g})/\sqrt{2}$. \Rightarrow há 8 glúons.

Cromodinâmica quântica (QCD)

- Como os glúons carregam cor, eles acoplam-se com outros glúons (sem similar na QED):



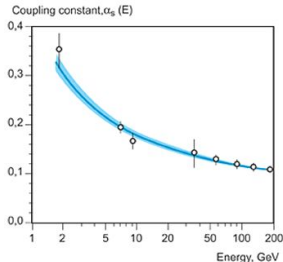
tornando a QCD mais complicada, mas criando novas possibilidades, como as *glueballs*, i.e., estados ligados de glúons.

Cromodinâmica quântica (QCD)

- Outra importante diferença (QED x QCD) é o tamanho da constante de acoplamento:

- ▶ QED: $\alpha = 1/137 \approx 0,0073$;
- ▶ QCD: $\alpha_S = 0,1 - 1,0$,

onde $\alpha_S \sim 1$ é muito ruim para a teoria de perturbação, pois diagramas de Feynman mais complicados (com mais vértices) contribuem mais e mais no cálculo. Felizmente, — devido justamente às interações glúon-glúon — este é o caso somente para as baixas energias:



- ▶ *Liberdade assintótica:*

$\alpha_S \rightarrow 1,0$ para $\Delta x \sim$ núcleo e $\alpha_S \rightarrow 0,1$ para $\Delta x \sim$ próton.
(Confirmado pelo espalhamento inelástico profundo.)

(Eletrodinâmica quântica (QED)...

- De certa forma, isto também ocorre na QED:

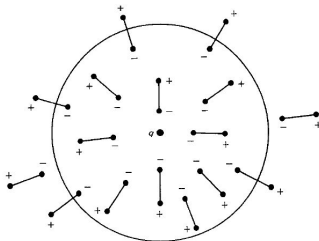


Figure 2.1 Screening of a charge q by a dielectric medium.

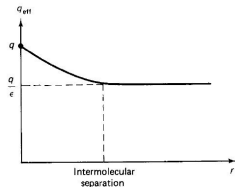


Figure 2.2 Effective charge as a function of distance.

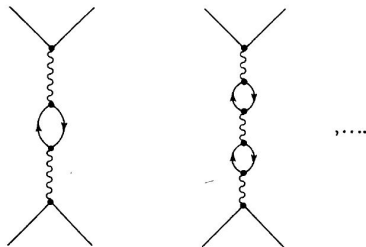
- Na presença de um material dielétrico, uma carga q adquire uma blindagem de cargas opostas e é reduzida à *carga efetiva*:

$$q_{ef} = q/\epsilon,$$

onde ϵ é a *constante dielétrica* do material.

...Eletrodinâmica quântica (QED)

- Entretanto, na QED, ocorre que o próprio vácuo comporta-se como um dielétrico, devido à formação de pares $e^- e^+$ (*polarização do vácuo*):

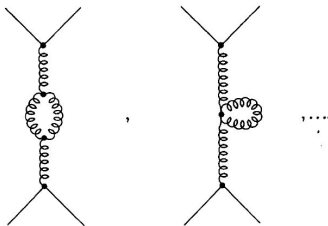


- A distância típica para “vermos” a carga “nua” é o comprimento de onda de Compton:

$$\Delta x \leq \lambda_e = h/mc = 2,43 \times 10^{-10} \text{ cm.}$$

Cromodinâmica quântica (QCD)

- Isto também ocorre na QCD, mas com uma importante diferença: além dos vértices quark-quark-glúon, há também os vértices glúon-glúon, como estes:



- Competição entre os laços:

polarização com quarks × polarização com glúons

 aumentam α_s × diminuem α_s

n° de quarks da teoria × n° de glúons da teoria

n° de sabores, f × n° de cores, n

parâmetro crítico: $\Rightarrow a \equiv 2f - 11n$,

onde no MP: $f = 6$, $n = 3 \Rightarrow a = -21$ e α_s diminui a pequenas distâncias.

Cromodinâmica quântica (QCD)

- Finalmente, outra importante diferença da QCD está no fato de que a carga de cor não pode ser observada experimentalmente (todas as partículas naturais são incolores).

P.ex., a força forte entre 2 prótons envolve (entre outros) o diagrama:

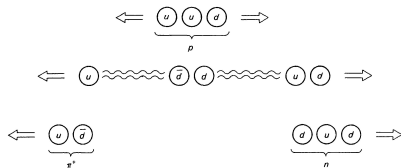


Fig. 2.3 A possible scenario for quark confinement: as we pull a u quark out of the proton, a pair of quarks is created, and instead of a free quark, we are left with a pion and a neutron.

Força nuclear — Força forte
 Força de van der Waals — Força eletromagnética

Cromodinâmica quântica (QCD)

- A prova de que os quarks estão confinados passa pela demonstração de que a energia potencial da interação aumenta com a distância:

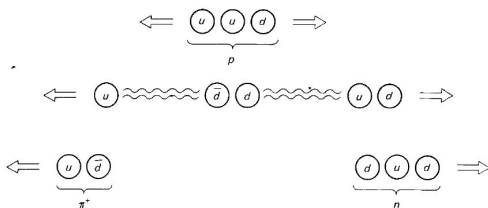


Figure 2.3 A possible scenario for quark confinement: As we pull a u quark out of the proton a pair of quarks is created, and instead of a free quark, we are left with a pion and a neutron.

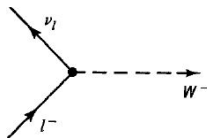
Então, acima de uma distância crítica, há energia suficiente para criar novos quarks.

Interações fracas

- Não existe a “carga fraca”, isto é, uma propriedade que carregue a força fraca. Todas as partículas estão sujeitas às interações fracas (quarks ou léptons), então não pode ser cor, sabor ou carga elétrica;
- Há 2 tipos de interação fraca: *carregadas* (mediadas pelos W s) e *neutras* (mediadas pelo Z).

1 Léptons

O vértice carregado fundamental é:

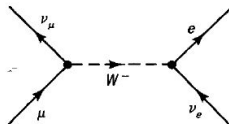


$$l^- \rightarrow \nu_l + W^-,$$

ou, também: $l^+ \rightarrow \bar{\nu}_l + W^+$.

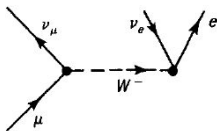
Interações fracas

- Como sempre, vértices primitivos são combinados para representar processos físicos:



$$\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$$

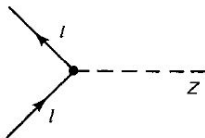
Torcendo-se este diagrama, vem o decaimento do múon:



$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Interações fracas

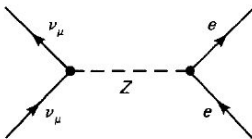
O vértice neutro fundamental é:



$$l \rightarrow l + Z,$$

onde l pode ser qualquer lépton.

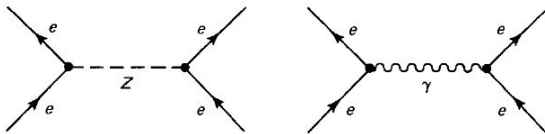
Assim, temos o espalhamento neutrino-elétron:



$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$

Interações fracas

Os processos de interação fraca neutros foram formulados em 1958, mas só foram descobertos em 1973 (CERN), pois a interação eletromagnética os mascara:

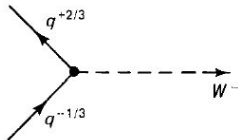


Contribuições foram encontradas na reação $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$ (DESY), mas interações fracas neutras *puras* só são possíveis em espalhamentos de neutrinos.

Interações fracas

2 Quarks

- O vértice de corrente carregada conecta partículas da mesma família:

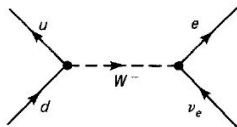


isto é, um quark de carga $-1/3$ (d , s ou b) emite um W^{-} (ou absorve um W^{+}) e é convertido num quark de carga $+2/3$ (u , c ou t , respectivamente);

- O quark da saída tem a mesma cor do quark da entrada, mas muda de sabor:
 \Rightarrow o sabor não é conservado nas interações fracas (saipodinâmica).

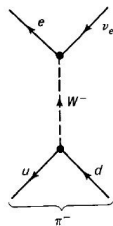
Interações fracas

- Na outra ponta o W^- pode acoplar-se a léptons (processo *semileptônico*):



$$d + \nu_e \rightarrow u + e,$$

que é extremamente raro. Mas, girando-se o diagrama, vem:

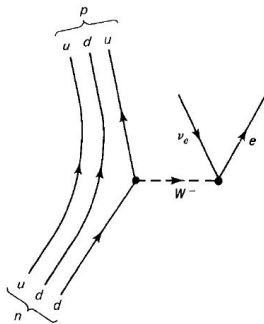


$$\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e,$$

que o decaimento do pión.

Interações fracas

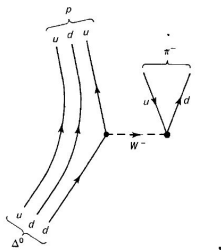
- Ademais, o mesmo diagrama fornece-nos o decaimento β^- :



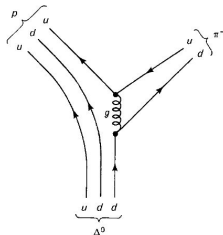
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Interações fracas

- Trocando-se o vértice leptônico por outro quarkônico, temos o decaimento $\Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$:

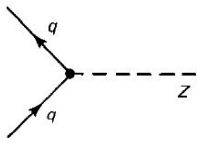


que também pode ser descrito via força forte:

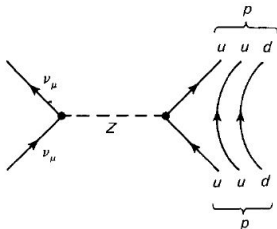


Interações fracas

- Já com o vértice neutro, o conteúdo quarkônico permanece o mesmo:



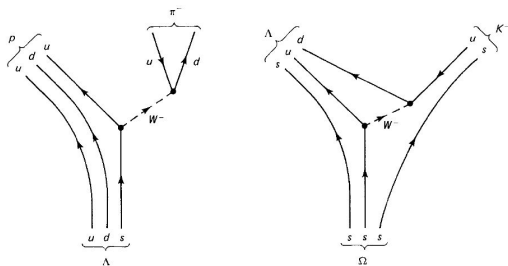
que leva-nos ao espalhamento de neutrinos com o próton:



$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$$

Interações fracas

- Agora, temos um problema: vimos que o vértice carregado (com W^\pm) conecta quarks da mesma geração. Então, como se calculam os decaimentos com alteração de estranheza, como $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ou $\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^-$?



Interações fracas

- A solução, proposta por Cabibbo em 1963, foi aplicada aos processos neutros por Glashow, Iliopoulos e Maiani em 1970 e estendida às 3 gerações por Kobayashi e Maskawa em 1973:
 - ▶ Nas interações fracas, os quarks são, na verdade, misturas entre as gerações:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

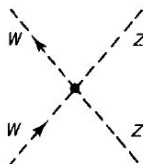
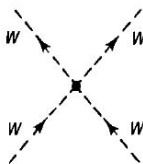
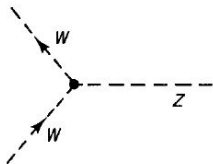
Experimentalmente, temos¹:

$$M_{CKM} = \begin{pmatrix} 0,974 & 0,227 & 0,004 \\ 0,227 & 0,973 & 0,042 \\ 0,008 & 0,042 & 0,999 \end{pmatrix}$$

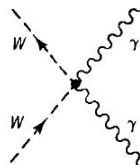
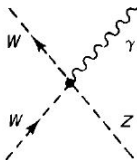
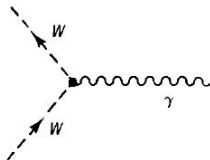
¹2ªEd., Particle Booklet (2006).

Interações fracas

- 3 Acoplamentos fraco e eletromagnético do W^\pm e do Z
- Na teoria de GWS, há também os acoplamentos fracos:



e os eletromagnéticos:



que são muito pequenos para efeitos práticos, mas importantes para a consistência interna da teoria.

Decaimentos e leis de conservação

- Todas as partículas elementares decaem em partículas mais leves, a menos que uma lei de conservação as proíba disso.

Assim, são estáveis:

- ▶ γ s ($m_\gamma = 0$) e ν s ($m_\nu \sim 0$), pois são as partículas mais leves ($\sum E = \text{const.}$);
- ▶ e , pois é a partícula carregada mais leve ($\sum q = \text{const.}$);
- ▶ p , pois é o bárion mais leve ($\sum A = \text{const.}$);
- ▶ todas as suas antipartículas.

⇒ O mundo é populado por p , n , e , γ e ν .

As partículas instáveis são produzidas, nas colisões, momentaneamente, ou seja, decaem após um tempo de vida médio (τ):

$$\tau_\mu = 2,2 \times 10^{-6} \text{ s}, \tau_{\pi^+} = 2,6 \times 10^{-8} \text{ s}, \tau_{\pi^0} = 8,3 \times 10^{-17} \text{ s}, \dots$$

E muitas apresentam diferentes *modos de decaimento*:

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu && (64\%), \\ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 && (21\%), \\ &\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- && (5\%), \end{aligned}$$

onde a porcentagem representa a probabilidade (*razão de ramificação*).

Decaimentos e leis de conservação

- Um decaimento é governado por uma das 3 forças:

- ▶ $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ (força eletromagnética);
- ▶ $\Delta^{++} \rightarrow p^+ + \pi^+$ (força forte);
- ▶ $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ (força fraca).

E como sabemos?

- ▶ Se sair um γ é eletromagnético;
- ▶ Se sair um ν é força fraca;
- ▶ Se não tiver nenhum dos dois é difícil de dizer:
 $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ é fraco;
 $\Delta^- \rightarrow n + \pi^-$ é forte.

Uma diferença experimental dramática é o tempo de decaimento (τ):

- ▶ $\tau \sim 10^{-16}$ s, para a força eletromagnética;
- ▶ $\tau \sim 10^{-23}$ s, para a força forte;
- ▶ 10^{-13} s $\leq \tau \leq 15$ min, para a força fraca.

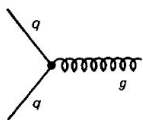
Em geral, quanto maior a diferença de massas, mais rápido é o decaimento (p.ex.: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, com $\tau \sim 15$ min), mas há exceções.

Decaimentos e leis de conservação

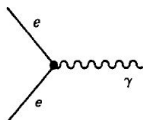
- Leis de conservação:

- ▶ Conservação de energia/momento e de momento angular (puramente *cinemáticas*, derivadas da relatividade especial) aplicam-se a todas as interações: eletromagnéticas, fortes, fracas, ...;
- ▶ Vejamos agora as conservações *dinâmicas*, que foram inicialmente obtidas empiricamente, mas agora podemos trabalhá-las a partir dos modelos.

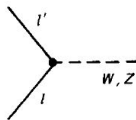
Sejam os vértices fundamentais:



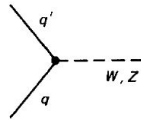
Strong



Electromagnetic



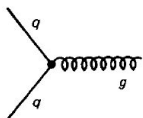
Weak



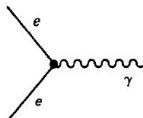
Como os processos físicos são combinações destes vértices, qualquer lei de conservação que se dê em cada vértice, também ocorrerá no processo como um todo.

Decaimentos e leis de conservação

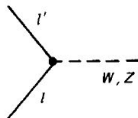
- Leis de conservação:



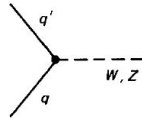
Strong



Electromagnetic



Weak



Temos em cada vértice:

- Conservação de carga:

$$\sum q = \text{const.} \Leftrightarrow \sum q_{in} = \sum q_{out}$$

- Conservação de cor:

$$\sum c = 0 = \text{const.} \Leftrightarrow \sum c_{in} = \sum c_{out} = 0$$

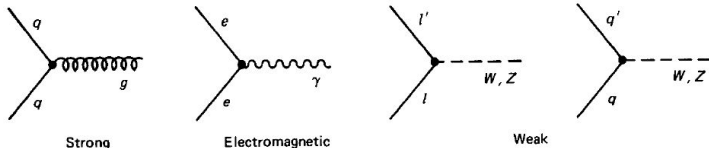
- Conservação do número bariônico:

$$\sum A = n(q) - n(\bar{q}) = \text{const.}$$

p.ex.: $q + \bar{q} \rightarrow g$.

Decaimentos e leis de conservação

- Leis de conservação:

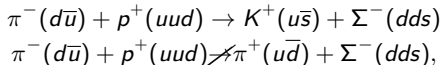


Temos em cada vértice:

- 4 Conservação do número leptônico:

$$\sum L_e = const., \quad \sum L_\mu = const., \quad \sum L_\tau = const.;$$

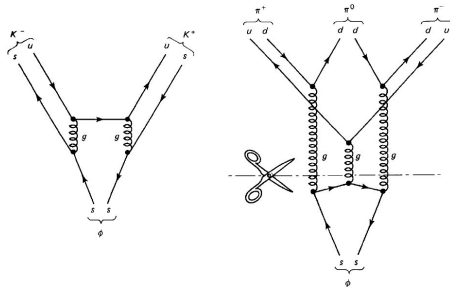
- 5 Conservação (aproximada) de sabor: o sabor é conservado nas interações eletromagnética e forte, mas não na interação fraca. Pelo fato da interação fraca ser *tão* fraca, dizemos que o sabor é *aproximadamente* conservado, p.ex.:



pela interação forte, pois viola a conservação da estranheza, mas em princípio pode ocorrer via interação fraca, só que muito suprimida.

Decaimentos e leis de conservação

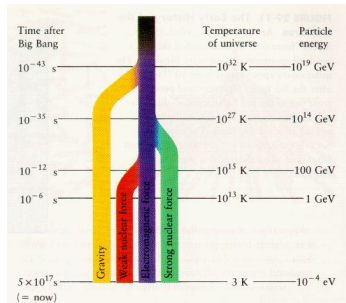
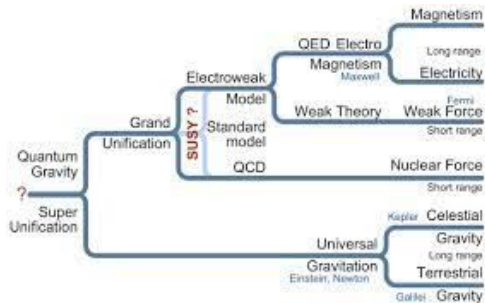
- Leis de conservação:



- 6 A regra de OZI (Okubo, Zweig e Iizuka):

- lembrando-se do decaimento do ψ , o méson charmoso $\psi = (c\bar{c})$, que tem um tempo de vida anormalmente muito grande ($\sim 10^{-20}$ s). Além disso, o ψ tem o modo de decaimento em 3 π s muito suprimido, em favor de decaimentos nos mésons charmosos D , apesar destes serem cinematicamente proibidos! Por que?
- Analogamente, o méson $\phi = (s\bar{s})$ também decai muito mais em 2 K s do que em 3 π s, apesar deste último modo ser muito mais energeticamente favorável;
- Pela regra de OZI, se o diagrama puder ser cortado puramente ao longo de linhas de glúons, este processo é *suprimido*;
- Liberdade assintótica: estes glúons são *duros* (de alta energia, α_s pequeno), pois precisam criar a massa dos hádrons.

Esquemas de unificação



Esquemas de unificação

- Sonho de Einstein: combinação da gravidade e eletromagnetismo em uma única *teoria de campo unificada*;
- Inspirou Glashow, Weinberg e Salam: *teoria eletrofraca*. Teoria inicia com 4 bósons sem massa (γ , W^\pm , Z), 3 deles adquirem massa após uma *quebra espontânea de simetria* pelo *mecanismo de Higgs*. A baixa intensidade da força fraca está relacionada à grande massa dos bósons vetoriais intermediários;
- Nos anos 1970 ..., vários esquemas de *grande unificação*.
 - ▶ α_s e α_w decrescem com a energia, α_e aumenta com a energia;
 - ▶ *Teoria de grande unificação* (GUT): α_s , α_w e α_e convergem para um único valor em $E \sim 10^{15}$ GeV;
 - ▶ Nas GUTs, o próton poderia decair ($\tau \sim 10^{20}$ idade do universo):

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0,$$

com violação do número bariônico e leptônico.

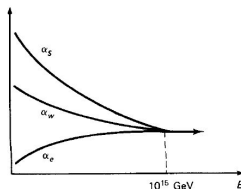


Figure 2.5 Evolution of the three fundamental coupling constants.