

Introdução histórica

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

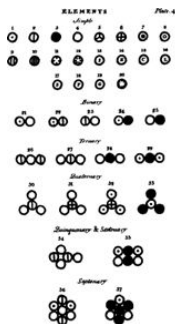
13 de fevereiro de 2025



Universidade Federal do ABC

Século XIX

O modelo atômico de Dalton (1803):



- 1ª hipótese atomística com base científica;
- Lei da composição constante: “dois elementos (A e B) que formam uma série de componentes combinam-se numa razão de pequenos números inteiros”:
 CO_2 , H_2O , CO , H_2O_2 , CH_4 , C_2H_2 , ...;

Século XIX

As leis da eletrólise de Faraday (1833):



Elemento	M(g)	z	ϵ_q (g)	ϵ_e (g/C)
H	1,008	1	1,008	$1,046 \cdot 10^{-5}$
O	16,00	2	8,00	$8,291 \cdot 10^{-5}$
Cl	35,46	1	35,46	$3,675 \cdot 10^{-4}$
Ni	58,69	2	29,35	$3,040 \cdot 10^{-4}$
Cu	63,57	2	31,785	$3,294 \cdot 10^{-4}$
Zn	65,38	2	32,69	$3,385 \cdot 10^{-4}$
Ag	107,88	1	107,88	$1,180 \cdot 10^{-3}$
Pb	207,20	2	103,60	$1,073 \cdot 10^{-3}$

- equivalente químico: $\epsilon_q \equiv M/Z$, equivalente eletroquímico: $\epsilon_e \equiv m/q$;
 $\Rightarrow (q/m)_{H^+} = 9,560 \cdot 10^4 \text{ C/g}$
- $\epsilon_q = F \cdot \epsilon_e$, onde $F = 9,647 \cdot 10^4 \text{ C/mol}$ é a *constante de Faraday*;
 $\Rightarrow M/Z = F(m/q) \Rightarrow N_A \cdot m_{atm}/Z = F(n \cdot m_{atm}/q) \Rightarrow q = n(F \cdot Z/N_A)$,
 que para $Z = 1$: $q = n(F/N_A) \Rightarrow q \equiv n \cdot e$ (*quantização da carga*)

Século XIX

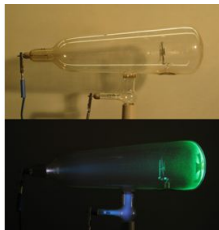
A invenção do elétron (1874):



- Em 1874, George J. Stoney propôs a unidade fundamental da eletricidade (“átomo de eletricidade”), posteriormente, chamando-a de *elétron* (1891).
 - ▶ Stoney estimou a carga do elétron: $e \approx 10^{-20}$ C.

Século XIX

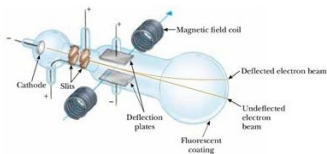
A invenção do tubo de Crookes (1875):



- Em 1875, Sir William Crookes desenvolveu o *tubo de Crookes*, ou *tubo de raios catódicos*;
 - ▶ Raios catódicos: emitidos pelo terminal negativo (cátodo);
 - ▶ Produziam calor e fosforescência;
 - ▶ Propagam-se em linha reta, exceto sob a ação de um campo magnético.

A era clássica (1897-1932)

Descoberta do elétron, J.J. Thomsom (1897):



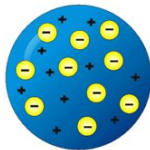
- Em 1897, no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, Thomson estudou os *raios catódicos* sob uma configuração especial de campos elétricos e magnéticos e mediu a razão carga-massa do elétron:

$$(q/m)_{e^-} = 1,759 \cdot 10^8 \text{ C/g.}$$

$$\Rightarrow (q/m)_{e^-} \sim 1840(q/m)_{H^+} \Rightarrow m_{e^-} \sim m_{H^+}/1840$$

- Modelo atômico de Thomsom (“*pudim de ameixas*”):

Átomo ($\sim 10^{-10}$ m): base de cargas positivas cravejada por partículas negativas e muito mais leves.



A era clássica (1897-1932)

O experimento de Geiger e Marsden (1909):

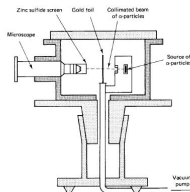
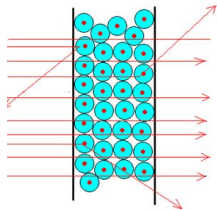


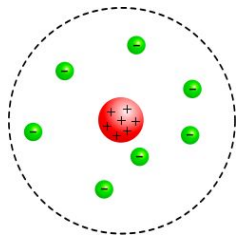
Figure 1.2 Schematic diagram of the apparatus used in the Rutherford scattering experiment. Alpha particles scattered by the gold foil strike a fluorescent screen, giving off a flash of light, which is observed visually through a microscope.



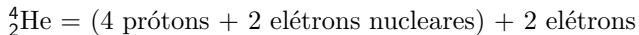
- Seguindo uma sugestão de Rutherford, Geiger e Marsden dispararam partículas α numa fina folha de ouro, contando a quantidade de partículas espalhadas em cada ângulo. Algumas partículas defletiam-se por ângulos muito grandes.

A era clássica (1897-1932)

O modelo atômico de Rutherford (1911):

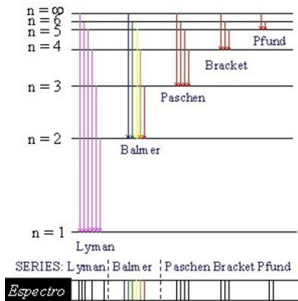
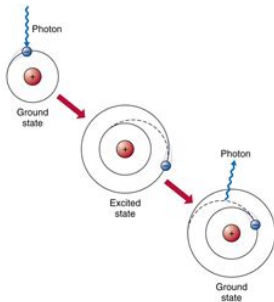


- As cargas positivas e a maior parte da massa dos átomos estão concentradas em *núcleos atômicos*, muito menores (10^{-4}) que os próprios átomos.
- Foi Rutherford quem nomeou o próton (1920) — até então somente 2 partículas elementares eram conhecidas (elétrons e prótons):



A era clássica (1897-1932)

O modelo de Bohr (1914):



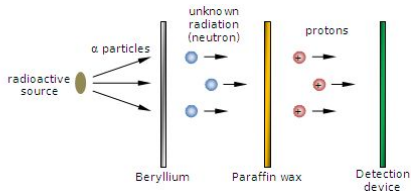
• 3 postulados:

- ▶ Órbitas estacionárias devidas à interação coulombiana (“*modelo planetário*”);
- ▶ $\Delta E = h\nu$, com $\Delta E > 0$ (absorção) e $\Delta E < 0$ (emissão);
- ▶ $L = n\hbar$ (*quantização do momento angular*).

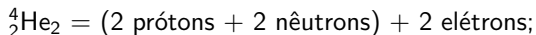
⇒ Calculou os espectros de emissão e absorção do hidrogênio.

A era clássica (1897-1932)

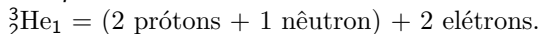
Descoberta do nêutron por J. Chadwick (1932):



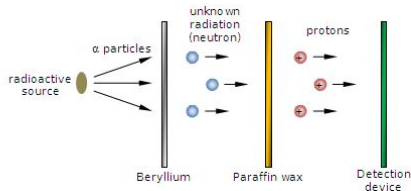
- Em 1932, I. Curie e F. Joliot verificam, após o bombardeamento de partículas α em parafina, uma radiação misteriosa, neutra, capaz de ejetar prótons com alta velocidade;
- Chadwick demonstra que esta radiação penetrante de carga neutra tem quase a mesma massa do próton. Nascia um “irmão gêmeo” do próton, mas de carga neutra:



- *Isótopos:*



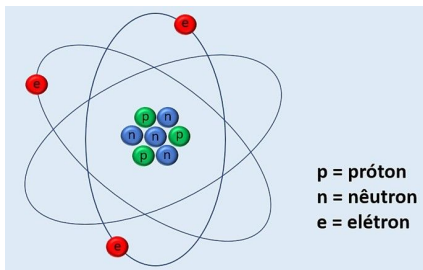
Exercício extra



- 1 (Cahn & Goldhaber) Confirme a afirmação de Chadwick que se os prótons ejetados do hidrogênio fossem devidos a um efeito do tipo Compton, o raio gama incidente deveria ter uma energia próxima de 50 MeV e que tal raio gama produziria um recuo nos núcleos de nitrogênio com energias de até 400 keV. [Dica: suponha uma colisão elástica e frontal.] Qual a energia de recuo do nitrogênio seria esperada com a hipótese do nêutron?

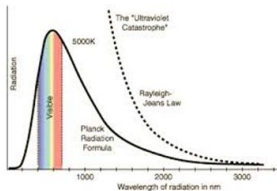
A era clássica (1897-1932)

Em 1932, a matéria era composta de *prótons*, *elétrons* e *nêutrons*:



O fóton (1900-1924)

A radiação de corpo negro por M. Planck (1900):



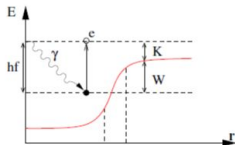
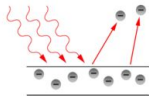
- A hipótese do quantum de radiação eletromagnética: as moléculas vibrantes somente podem ter valores de energia quantizados (discretos):

$$E = h\nu,$$

onde $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$ erg·s é a *constante de Planck*.

O fóton (1900-1924)

O efeito fotoelétrico por A. Einstein (1905):



- Einstein considera que se a radiação eletromagnética é quantizada, a luz deve se comportar como partícula na interação com a matéria, e explica o efeito fotoelétrico:

- ▶ O fóton tem energia $E = h\nu$, onde $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$ erg·s é a *constante de Planck*;
- ▶ Os elétrons gastam parte desta energia para sair da superfície, tal que:

$$E \leq h\nu - w,$$

onde w é a *função trabalho* do material.

⇒ A máxima energia dos elétrons independe da intensidade de luz e depende somente da frequência (cor).

O fóton (1900-1924)

O experimento de A. H. Compton (1923):

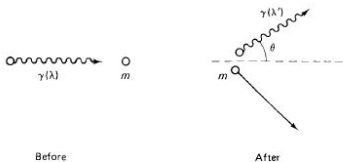


Figure 1.3 Compton scattering. A photon of wavelength λ scatters off a particle, initially at rest, of mass m . The scattered photon carries wavelength λ' given by equation (1.4).

- Compton descobriu que a luz espalhada por uma partícula em repouso sofre um deslocamento de comprimento de onda:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_C(1 - \cos \theta),$$

onde $\lambda_C = h/mc$ é o *comprimento de onda de Compton* da partícula alvo (de massa m).

⇒ Uma evidência incontestável de que a luz se comporta como partícula no nível subatômico.

O fóton (1900-1924)

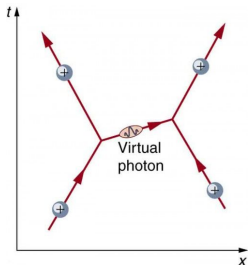
O nome *fóton* foi dado pelo químico Gilbert Lewis (1926):



- ▶ Símbolo γ
- ▶ $m_\gamma = 0$
- ▶ $E_\gamma = c \cdot p_\gamma$

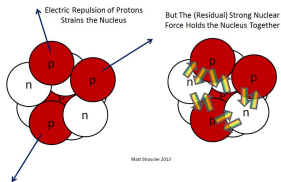
O fóton (1900-1924)

A ideia do fóton ganhou lugar natural na TQC:



- Na eletrodinâmica clássica, atribuímos a repulsão (p.ex.) entre 2 cargas às interações destas com o *campo elétrico* (“*ação à distância*” medida pelo campo).
- Na TQC, o campo elétrico é quantizado na forma de *fótons virtuais*, continuamente sendo emitidos e absorvidos pelas cargas. Quando são trocados entre as partículas com carga, os *quanta de campo* passam a informação sobre a força (mediadores que fazem o papel de “mensageiros”).

Mésons (1934-1947)



- O que mantém o núcleo coeso? *A força forte!*
- E por que não a sentimos? Porque tem muito curto alcance e está confinada dentro dos núcleos atômicos.

Mésons (1934-1947)

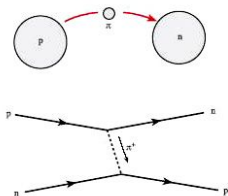


Figure 1. Typical textbook representations of pion exchange.

- Em 1934, H. Yukawa propôs que o próton e o nêutron são atraídos por um outro campo quantizado;
- Mas qual é o *quantum*? Deveria ser pesado, por causa do curto alcance da força forte. Ele calculou: $m \approx 300 m_e \approx m_p/6$;
- Como estava no meio entre um e o outro, Yukawa o chamou de *méson*.

Mésons (1934-1947)



- Em 1937, Neddermeyer e Anderson descobrem nos raios cósmicos uma partícula de massa muito próxima;
- Erroneamente identificada como a partícula de Yukawa, o *méson- μ* foi, posteriormente, rebatizado de *múon*.

Mésons (1934-1947)



- Mas o tempo de vida do méson- μ não era o que tinha sido previsto;
- Sua massa também não batia exatamente com a previsão de Yukawa;
- E, em 1946, Conversi, Piccioni e Pancini realizaram um experimento demonstrando que o méson- μ interagia fracamente com o núcleo, portanto, não poderia ser o méson de Yukawa.

Mésons (1934-1947)

- Em 1947, Lattes, Occhialini e Powell observaram em emulsões nucleares um decaimento entre 2 partículas de massa média: um *píon* decaindo num *múon*:

$$\pi \rightarrow \mu + \dots$$

- O real méson de Yukawa era o π .

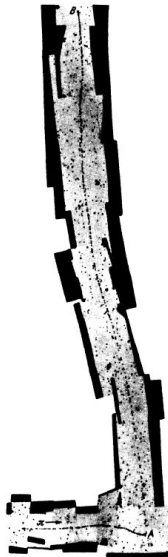


Figure 1.4 One of Powell's earliest pictures showing the track of a pion in a photographic emulsion exposed to cosmic rays at high altitude. The pion (entering from the left) decays into a muon and a neutrino (the latter is electrically neutral, and leaves no track). Reprinted by permission from C. F. Powell, P. H. Fowler, and D. H. Perkins, *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (New York: Pergamon, 1959). First published in *Nature* 159, 694 (1947).

Antipartículas (1930-1956)

A mecânica quântica relativística (1927):



- A mecânica quântica não-relativística foi desenvolvida rapidamente (1923-1926), mas a versão relativística se mostrou mais espinhosa;
- A primeira realização foi de Dirac, em 1927. A partir da equação de Schrödinger, Dirac deduziu a equação da partícula livre fazendo uso da fórmula da energia relativística:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$\Rightarrow E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Antipartículas (1930-1956)

A mecânica quântica relativística (1927-...):



- Dirac postulou que os estados de energia negativa preenchem um *mar de elétrons*. Como há elétrons por todo lado no mar de elétrons a força resultante é nula. Então, um elétron que ganhe energia para escapar do mar de elétrons fica com energia positiva e o buraco deixado para trás é o estado de energia negativa, com carga líquida positiva para os elétrons do mar. Esta foi a interpretação que Dirac deu para as energias negativas.

Antipartículas (1930-1956)

A descoberta do pósitron (1932):



- Em 1932, Carl Anderson descobre o *pósitron* numa câmara de Wilson.

Antipartículas (1930-1956)

A mecânica quântica relativística (1941-1948):



- Na formulação de Stueckelberg e Feynman, os estados de energia negativa são interpretados como estados de energia positiva de uma *partícula diferente*;
⇒ O pósitron é o *antielétron* (ou o *elétron* é o *antipósitron*).
- Característica universal da TQC: para cada *partícula* deve existir uma *antipartícula*, com a mesma massa mas carga elétrica e spin invertidos.

Antipartículas (1930-1956)

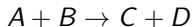
Antipartículas (1950-...):

- O antipróton (\bar{p}) foi descoberto no Bevatron de Berkeley, em 1955, e o antinêutron (\bar{n}), em 1956;
- Notação/convenção:
 - ▶ p para o próton, \bar{p} para o antipróton;
 - ▶ n para o nêutron, \bar{n} para o antinêutron;
 - ou:
 - ▶ e^- para o elétron, e^+ para o pósitron;
 - ▶ μ^- para o múon, μ^+ para o antimúon;
 - nunca mesclar:
 - ▶ ~~\bar{e}^-~~ ou ~~$\bar{\mu}^-$~~ ;
- Algumas partículas são suas próprias antipartículas: $\bar{\gamma} = \gamma$.

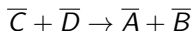
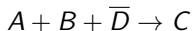
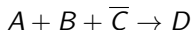
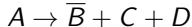
Antipartículas (1930-1956)

A *simetria de cruzamento*:

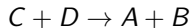
Seja a seguinte reação (possível):



Qualquer partícula pode cruzar os lados da equação, tornando-se sua antipartícula. Então:



são possíveis. E ainda:



também é possível pelo *princípio do balanceamento detalhado*.

Antipartículas (1930-1956)

Mas a conservação de energia pode vetar uma reação. Por exemplo:

- ① Se A pesa menos que a soma de B, C e D , o decaimento:

$$A \rightarrow \bar{B} + C + D$$

não pode ocorrer.

- ② Se A e C são leves e B e D são pesados, a reação:

$$A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$$

não pode ocorrer, a menos que a energia cinética inicial supere um *limiar*.

- Dizemos que a reação é *dinamicamente* permitida, mas pode ser ou não *cinematicamente* permitida.

Antipartículas (1930-1956)

A simetria de cruzamento permite-nos interpretar:

$$\gamma + e^{-} \rightarrow \gamma + e^{-} \quad (\text{espalhamento Compton})$$

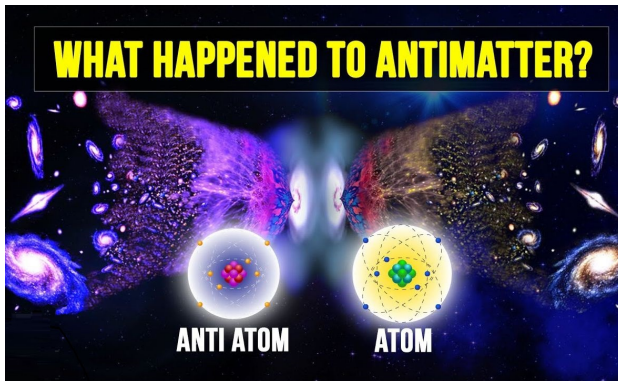
$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma \quad (\text{aniquilação de pares})$$

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^{-} + e^{+} \quad (\text{criação de pares})$$

como um mesmo processo, apesar de serem bem diferentes em laboratório.

Antipartículas (1930-1956)

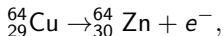
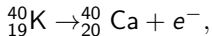
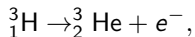
Assimetria matéria-antimatéria:



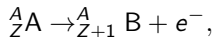
Neutrinos (1930-1962)

O problema do decaimento β (1930-...):

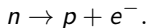
Sejam decaimentos β^- , como:



ou, de uma forma genérica:



ou, ainda, num nível mais fundamental:



Em todos os casos acima, entendemos os processos como problemas de 2 corpos (os produtos), ou seja, a energia disponível vai ser compartilhada entre os produtos do processo.

Neutrinos (1930-1962)

O problema do decaimento β (1930-...):

Entretanto, os espectros de energia das partículas β (elétrons) seguem uma distribuição contínua:

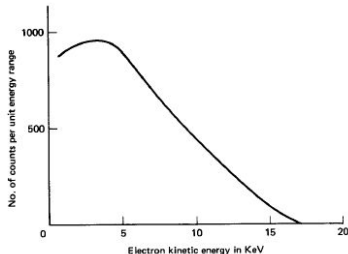


Figure 1.6 The beta decay spectrum of tritium (${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$). (Source: G. M. Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970), p. 30.)

Ao contrário do que exige a conservação de energia e de momento:

$$E = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 + m_e^2}{2m_A} \right) c^2,$$

ou seja, dadas as 3 massas, um valor *fixo* de energia — na verdade, E_{max} .

Neutrinos (1930-1962)

O problema do decaimento β (1930-...):

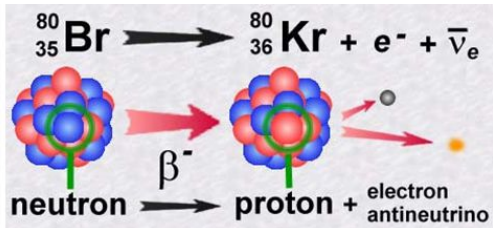
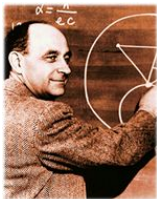
- Bohr (não pela primeira vez) quis abandonar a conservação de energia;

* It is interesting to note that Bohr was an outspoken critic of Einstein's light quantum (prior to 1924), that he discouraged Dirac's work on the relativistic electron theory (telling him, incorrectly, that Klein and Gordon had already succeeded), that he opposed Pauli's introduction of the neutrino, that he ridiculed Yukawa's theory of the meson, and that he disparaged Feynman's approach to quantum electrodynamics.

- Mas Pauli, em 1931, propôs uma nova partícula (leve e neutra) para dar conta da energia perdida;
- Inicialmente, foi chamada de nêutron, mas após a descoberta do nêutron por Chadwick (1932), ela foi rebatizada.

Neutrinos (1930-1962)

O problema do decaimento β (1930-...):



- Em 1934, Enrico Fermi descreve a teoria do decaimento β :

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

isto é, não é um decaimento de 2 corpos, mas de 3 corpos;

- A nova partícula (com $m \sim 0$) foi chamada de *neutrino*.

Neutrinos (1930-1962)

Note agora que:

$$\mu \rightarrow e + 2\nu$$

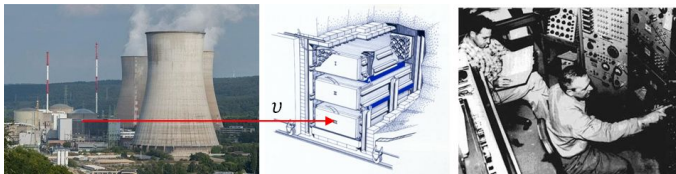


Figure 1.7 Here, a pion decays into a muon (plus a neutrino); the muon subsequently decays into an electron (and two neutrinos). Reprinted by permission from C. F. Powell, P. H. Fowler, and D. H. Perkins, *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (New York: Pergamon, 1959). First published in *Nature* **163**, 82 (1949).

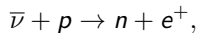
$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

Neutrinos (1930-1962)

A descoberta experimental dos neutrinos (1956):



- Em 1956, F. Reines e C. Cowan detectam experimentalmente neutrinos provenientes do reator nuclear de Savannah River (EUA):



produzindo um fluxo calculado de $5 \cdot 10^{13}$ partículas/s·cm², para eles observarem 2 – 3 eventos/h.

Neutrinos (1930-1962)

Há diferenças entre neutrinos e antineutrinos?

Dos resultados de Reines e Cowan, por simetria de cruzamento, vem que:

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

também ocorre.

No final dos anos 1950, Davies e Harmer procuraram pela reação:

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

que nunca foi observada.

Então, sim, eles são diferentes, mas como?

Neutrinos (1930-1962)

O número leptônico (1953):

- Em 1953, Konopinski e Mahmud introduziram o *número leptônico*:

$L = +1$	e^-, μ^-, ν
$L = -1$	$e^+, \mu^+, \bar{\nu}$
$L = 0$	todas as outras.

Tabela: Número leptônico.

e propuseram a *conservação do número leptônico* nas reações.

Então:

- ▶ a reação de Reines e Cowen é permitida:

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

$$\Sigma L = -1 + 0, \quad \Sigma L = 0 - 1,$$

- ▶ mas a reação de Davies e Harmer é proibida:

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

$$\Sigma L = -1 + 0, \quad \Sigma L = 0 + 1.$$

Neutrinos (1930-1962)

O número leptônico (1953):

- Em 1953, Konopinski e Mahmud introduziram o *número leptônico*:

$L = +1$	e^-, μ^-, ν
$L = -1$	$e^+, \mu^+, \bar{\nu}$
$L = 0$	todas as outras.

Tabela: Número leptônico.

e propuseram a *conservação do número leptônico* nas reações.
Ademais:

- ▶ os decaimentos dos píons carregados são:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

- ▶ e os decaimentos dos múons são:

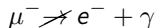
$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

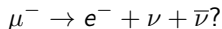
Neutrinos (1930-1962)

O número leptônico eletrônico e o número leptônico muônico (1957-1962):

- Notou-se que o seguinte processo:



nunca fora observado, sugerindo um caráter muônico que deve ser conservado. Mas como explicar:



Simple, basta introduzir um *número leptônico eletrônico* (L_e) e um *número leptônico muônico* (L_μ), separar os neutrinos em 2 tipos (ν_e e ν_μ):

$L_e = +1$	e^-, ν_e
$L_e = -1$	$e^+, \bar{\nu}_e$
$L_\mu = +1$	μ^-, ν_μ
$L_\mu = -1$	$\mu^+, \bar{\nu}_\mu$
$L_e = L_\mu = 0$	todas as outras.

Tabela: Número leptônico eletrônico e muônico.

e escrever 2 leis de conservação separadamente.

Neutrinos (1930-1962)

O número leptônico eletrônico e o número leptônico muônico (1957-1962):

- Assim, ficam o decaimento β^- :

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

os decaimentos dos píons:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

e os decaimentos dos múons:

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

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

- Em 1962, em Brookhaven, Lederman, Schwartz, Steinberg *et al.*, descobriram num feixe de 10^{14} antineutrinos de decaimentos do pión, 29 eventos de:

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

e nenhum de:

$$\bar{\nu}_\mu + p \not\rightarrow e^+ + n.$$

Neutrinos (1930-1962)

O número leptônico eletrônico e o número leptônico muônico (1957-1962):

- E ao final de 1962, tínhamos:

	L	L_e	L_μ
Léptons			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
Antiléptons			
e^+	-1	-1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	-1	0
μ^+	-1	0	-1
$\bar{\nu}_\mu$	-1	0	-1

Tabela: A família dos léptons em 1962.

Partículas estranhas (1947-1960)

- Por um breve período, em 1947, a maioria dos problemas da física de partículas elementares tinham se resolvido.
 - ▶ O méson de Yukawa? $\mu \times \pi$;
 - ▶ O pósitron de Dirac? ok;
 - ▶ O neutrino de Pauli? \pm .



I. Rabi perguntou (sobre o μ): "quem ordenou isto?"

Partículas estranhas (1947-1960)

- Em dezembro de 1947, Rochester e Butler publicaram a fotografia abaixo de uma câmara de nuvens. A figura mostra traços de raios cósmicos vindos de cima que interagem na placa de chumbo, produzindo uma partícula neutra que depois decai em 2 carregadas, formando um “V” invertido.

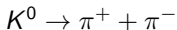
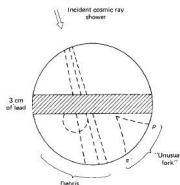
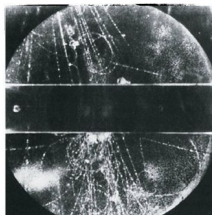


Figure 1.8 The first strange particle. Cosmic rays strike a lead plate, producing a K^0 , which subsequently decays into a pair of charged pions. (Photo courtesy of Prof. G. D. Rochester, Reprinted by permission from *Nature* 160, 855. Copyright © 1947, Macmillan Journals Limited.)

Partículas estranhas (1947-1960)

- Em 1949, Powell publicou a fotografia abaixo do decaimento do káon carregado.

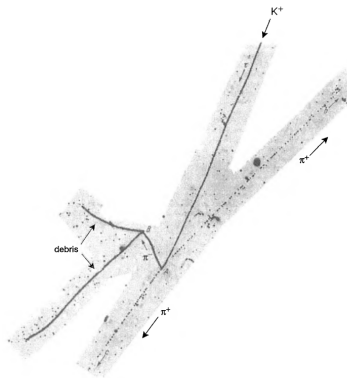
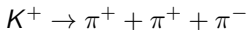


Fig. 1.8 K^+ , entering from above, decays at A: $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$. (The π^- subsequently causes a nuclear disintegration at B.) (Source: Powell, C. F., Fowler, P. H. and Perkins, D. H. (1959) *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method*, Pergamon, New York. First published in *Nature*, 163, 82 (1949).)

Partículas estranhas (1947-1960)

- Em 1950, outra partícula “V” neutra foi descoberta pelo grupo de Anderson, no CalTech:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^{-},$$

mais pesada que o próton e da família dos *bárions*.

- Uma antiga questão (1938-...) era: “Por que o próton é estável?”
Por que não observamos, por exemplo:

$$p \rightarrow e^{+} + \gamma?$$

- Stükelberg propôs, em 1953, a lei de conservação do *número bariônico*:

$A = +1$	p, n
$A = -1$	\bar{p}, \bar{n}
$A = 0$	mésons ou léptons.

Tabela: Números bariônicos.

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$$

$$\Sigma A = 2, \quad \Sigma A = 2$$

Partículas estranhas (1947-1960)

O “zoológico” de partículas:

- Posteriormente, foram descobertos outros

- ▶ mésons: η , ϕ , ω , ρ , ...

- ▶ bárions: Σ , Ξ , Δ , ...,

principalmente, em aceleradores.

- A propósito, não existe uma lei de conservação do número de mésons:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$$

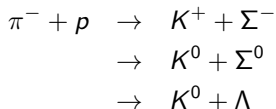
- Palestra do Nobel de W. Lamb (1955):

When the Nobel Prizes were first awarded in 1901, physicists knew something of just two objects which are now called “elementary particles”: the electron and the proton. A deluge of other “elementary” particles appeared after 1930; neutron, neutrino, μ meson, π meson, heavier mesons, and various hyperons. I have heard it said that “the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a \$10,000 fine”. [Source: Les Prix Nobel 1955, The Nobel Foundation, Stockholm.]

Partículas estranhas (1947-1960)

A *estranheza*:

- Observou-se que as partículas “estranhas” eram produzidas copiosamente ($t \sim 10^{-23}$ s) mas decaíam bem mais lentamente ($t \sim 10^{-10}$ s). A. Pais sugeriu processos diferentes e que deveriam ser produzidas em pares:

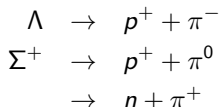


- Gell-Mann e Nishijima introduziram a *estranheza*:

$S = +1$	K^+, K^0, \dots
$S = -1$	$\Sigma^-, \Sigma^0, \dots$
$S = 0$	partículas “ordinárias”.

Tabela: Estranheza.

- Por outro lado, a estranheza não é conservada nos decaimentos:



O caminho octópulo (1961-1964)

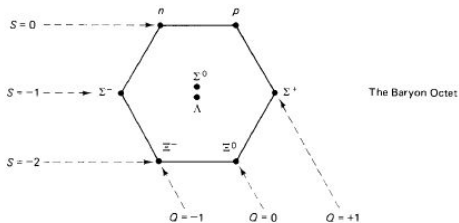
O caminho octópulo (1961):



- Em 1961, Gell-Mann introduziu estranhos padrões geométricos arranjando bárions e mésons de acordo com a carga e a estranheza.

O caminho octópulo (1961-1964)

O octeto de bárions:



- Os 8 bárions mais leves arranjam-se num hexágono com 2 deões no centro:

- As linhas diagonais representam a carga elétrica (em unidades de e):

$$Q = +1, \quad \text{para } p \text{ e } \Sigma^+$$

$$Q = 0, \quad \text{para } n, \Lambda, \Sigma^0 \text{ e } \Xi^0$$

$$Q = -1, \quad \text{para } \Sigma^- \text{ e } \Xi^-$$

- As linhas horizontais representam a estranheza:

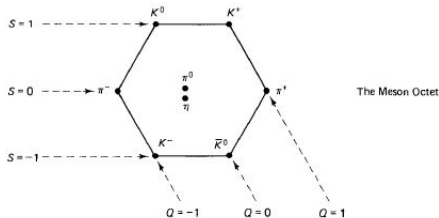
$$S = 0, \quad \text{para } p \text{ e } n$$

$$S = -1, \quad \text{para } \Lambda \text{ e } \Sigma_s$$

$$S = -2, \quad \text{para } \Xi_s$$

O caminho octópulo (1961-1964)

O octeto de mésons:



- Os 8 mésons mais leves arranjam-se num hexágono com 2 deles no centro:

- As linhas diagonais representam a carga elétrica (em unidades de e):

$$Q = +1, \quad \text{para } K^+ \text{ e } \pi^+$$

$$Q = 0, \quad \text{para } K^0, \eta, \pi^0 \text{ e } \bar{K}^0$$

$$Q = -1, \quad \text{para } \pi^- \text{ e } K^-$$

- As linhas horizontais representam a estranheza:

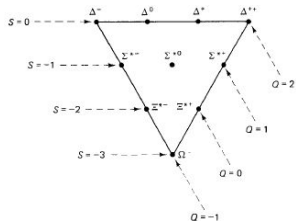
$$S = +1, \quad \text{para } K^0 \text{ e } K^+$$

$$S = 0, \quad \text{para } \eta \text{ e } \pi^0$$

$$S = -1, \quad \text{para } K^- \text{ e } \bar{K}^0$$

O caminho octópulo (1961-1964)

O decuplete de bárions:



The Baryon Decuplet

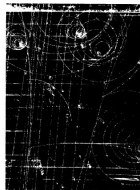
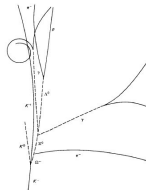


Figure 1.10 The discovery of the Ω^- . The actual bubble chamber photograph is shown on the left; a line diagram of the relevant tracks on the right. (Photo courtesy Brookhaven National Laboratory.)



- 10 bárions mais pesados num arranjo triangular com 1 deles no centro:
 - ▶ Vejamos as linhas horizontais (S):

$$S = 0, \quad \text{para } \Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$$

$$S = -1, \quad \text{para } \Sigma^{*-}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}$$

$$S = -2, \quad \text{para } \Xi^{*-}, \Xi^{*0}$$

$$S = -3, \quad \text{para } \Omega^-$$

A partícula Ω^- ainda não havia sido observada experimentalmente. Gell-Mann calculou sua massa, seu tempo de vida e previu sua existência, dizendo aos experimentalistas como produzi-la. Ela foi descoberta em 1964.

O caminho octópulo (1961-1964)

Supermultiplete/Nonetos de mésons:

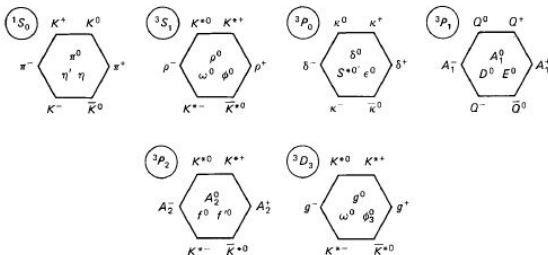


Figure 1.11 Established meson nonets. Obviously, we are running out of letters. It is customary to distinguish different particles represented by the same letter by indicating the mass parenthetically (in MeV/c^2), thus $K^*(892)$, $K^*(1430)$, $K^*(1650)$, and so on. In this figure the supermultiplets are labeled in spectroscopic notation (see Chap. 5). At present, there are no complete baryon supermultiplets beyond the octet and decuplet, although there are many partially filled diagrams.

- Para cada multiplete existe um correspondente de antipartículas: um octeto de antibárions, um octeto de antimésons, etc.; no caso dos mésons, é um diagrama “espelhado”, onde as partículas centrais são suas próprias antipartículas.

O modelo a quarks (1964)

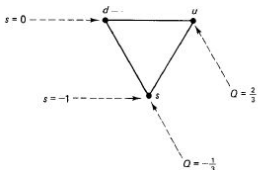
E por qual razão ocorrem os padrões geométricos?



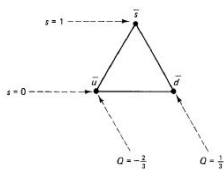
Murray Gell-Mann

George Zweig

- Em 1964, Gell-Mann e Zweig independentemente propuseram que todos os hádrons são compostos por *quarks*, que vêm em 3 tipos (ou *sabores*, denominados u , d e s), possuem cargas fracionárias e formam tripletos:



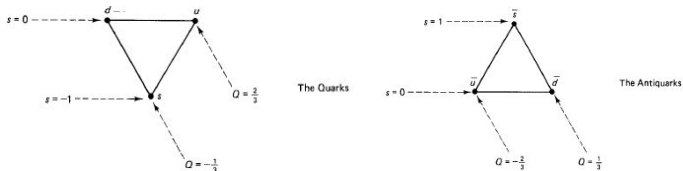
The Quarks



The Antiquarks

O modelo a quarks (1964)

O modelo a quarks (1964):



- ▶ O quark u ("up") tem $Q = 2/3$ e $S = 0$;
- ▶ O quark d ("down") tem $Q = -1/3$ e $S = 0$;
- ▶ O quark s ("strange") tem $Q = -1/3$ e $S = -1$.

- Para cada quark q há um antiquark \bar{q} com Q e S opostas.
- O modelo afirma que:
 - ① Cada bário (antibário) é composto por 3 quarks (antiquarks);
 - ② Cada méson é composto por 1 quark e 1 antiquark.

O modelo a quarks (1964)

O modelo a quarks (1964):

- O decuplete de bárions fica:

THE BARYON DECUPLET

qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^+
udd	0	0	Δ^0
ddd	-1	0	Δ^-
uus	1	-1	Σ^{*+}
uds	0	-1	Σ^{*0}
dds	-1	-1	Σ^{*-}
uss	0	-2	Ξ^{*0}
dss	-1	-2	Ξ^{*-}
sss	-1	-3	Ω^-

- No octeto de bárions, temos: $p = uud$, $n = udd$, etc. Obs.:
 - ▶ A diferença entre p e Δ^+ (ambos uud) está na energia de ligação que se manifesta na massa de repouso ($E = mc^2$) de cada uma;
 - ▶ Não existe uma combinação (exótica) de 3 quarks com $S = 0$ e $Q = -2$.

O modelo a quarks (1964)

O modelo a quarks (1964):

- O noneto de mésons fica:

THE MESON NONET

$q\bar{q}$	Q	S	Meson
$u\bar{u}$	0	0	π^0
$u\bar{d}$	1	0	π^+
$d\bar{u}$	-1	0	π^-
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^+
$d\bar{s}$	0	1	K^0
$s\bar{u}$	-1	-1	K^-
$s\bar{d}$	0	-1	K^0
$s\bar{s}$	0	0	??

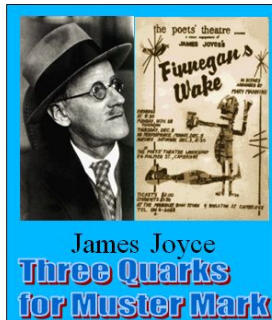
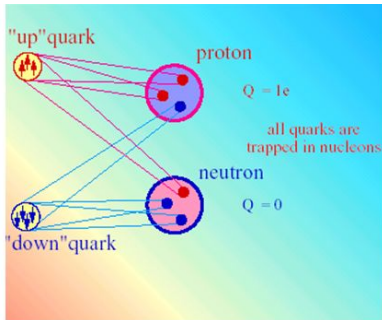
Logo, a partícula que faltava foi encontrada: η' .

Obs.:

- ▶ Não conseguimos distinguir os estados $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ e $s\bar{s}$;
- ▶ Não existe uma combinação (*exótica*) de quark e antiquark com $S = -3$ e $Q = +2$.

O modelo a quarks (1964)

O confinamento dos quarks (1967-1973):



- Mas apesar de todos os esforços ninguém nunca observou um quark isolado. Na tentativa de salvar o modelo, no final dos anos 1960 e início dos anos 1970, foi introduzido o *confinamento dos quarks*.

O modelo a quarks (1964)

O espalhamento inelástico profundo (1968-...):

- SLAC: disparando e de altas energias; CERN: ν , p , μ , etc.; sobre prótons ou nêutrons:

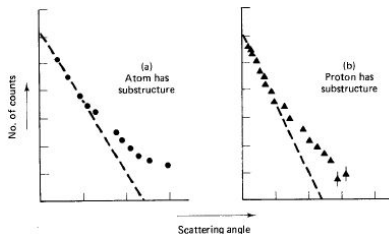
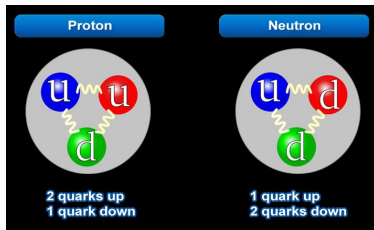


Figure 1.12 (a) In Rutherford scattering the number of particles deflected through large angles indicates that the atom has internal structure (a nucleus). (b) In deep inelastic scattering the number of particles deflected through large angles indicates that the proton has internal structure (quarks). The dashed lines show what you would expect if the positive charge were uniformly distributed over the volume of (a) the atom, (b) the proton. [Source: F. Halzen and A. D. Martin, *Quarks and Leptons* (New York: Wiley, 1984), p. 17. Copyright © John Wiley & Sons, Inc. Reprinted by permission.]

- Evidências apontam a presença de 3 centros espalhadores.

O modelo a quarks (1964)

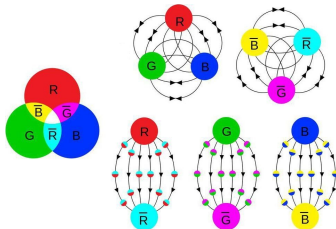
- Outra objeção (teórica) era a existência de partículas como $\Delta^{++} = uuu$, $\Delta^- = ddd$ e $\Omega^- = sss$ que, aparentemente, violam o princípio de exclusão de Pauli (os quarks são férmions de spin 1/2).



- Em 1964, O.W. Greenberg propõe que não apenas os quarks vêm em 3 sabores (u , d e s), mas também, cada um, em 3 cores: **vermelha (V)**, **verde (G)** e **azul (B)**, sendo que ...

O modelo a quarks (1964)

A cromodinâmica quântica (1964):



- Os quarks vêm em 3 cores: **vermelha (R)**, **verde (G)** e **azul (B)**, sendo que:
 - Nos bárions estas 3 cores estão sempre combinadas (qqq);
 - Nos antibárions as 3 anticolors estão sempre combinadas ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$);
 - Nos mésons, uma cor é sempre combinada com uma “anticor”: ($q\bar{q}$).
- ⇒ Todas as partículas que ocorrem naturalmente são incolores.

A revolução de novembro e suas consequências (1974-1983)

A Revolução de Novembro (1974):

- Na década de 1964 a 1974, o modelo a quarks, que parecia muito promissor, permaneceu no limbo. Principalmente pela falta de uma evidência para os quarks livres e pela inconsistência com o princípio de exclusão de Pauli;
- Enjoados do modelo a quarks, os físicos de partículas começaram a chamar as estruturas dentro do próton de *partons*.
- Em 1974, a descoberta do méson ψ salvou o modelo a quarks. A partícula J foi observada inicialmente em Brookhaven pelo grupo do C. C. Ting, no verão de 1974. Ting manteve o resultado em segredo até o fim de semana de 10 e 11 de novembro, quando o grupo do B. Richter descobriu no SLAC o ψ . Os 2 grupos publicaram seus resultados simultaneamente no que ficou conhecido como a *Revolução de Novembro*;
- A J/ψ era um partícula eletricamente neutra, muito pesada ($\sim 3m_p$) e com um tempo de vida de $t \sim 10^{-20}$ s, isto é, 10^3 vezes maior que o usual para os mésons.

A revolução de novembro e suas consequências (1974-1983)

- A explicação mais aceita foi a de que a ψ representava o estado de ligado de um novo quark, o charmoso quark c : $\psi = (c\bar{c})$;
- Um novo número quântico foi introduzido (o *charme*), tal que $c = +1$ e $\bar{c} = -1$ e toda uma nova classe de partículas carregando o quark c seria descoberta:

$$(1975) \Lambda_c^+ = udc, \Sigma_c^{++} = uuc,$$

$$(1976) D^0 = c\bar{u}, D^+ = c\bar{d},$$

$$(1977) F^+ = D_s^+ = c\bar{s};$$

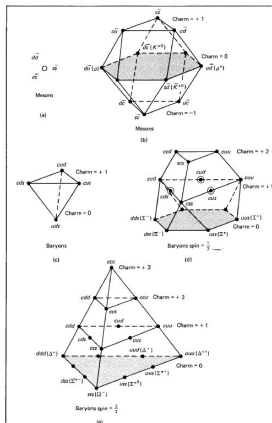
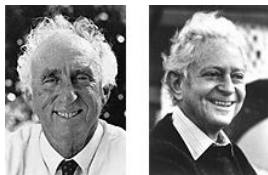


Figure 1.13 Supermultiplets constructed with four quarks. (From "Quarks with Color and Flavor," by S. Glashow. Copyright © Oct. 1975 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

A revolução de novembro e suas consequências (1974-1983)



- Em 1975, M. Perl descobre um novo lépton, o τ , que provavelmente teria o seu neutrino (ν_τ);
- EM 1977, L. Lederman descobre um novo méson pesado que foi identificado como o portador do 5º quark (o belo quark b , de *beleza* ou *bottom*): $\Upsilon = (b\bar{b})$;
- Logo, outros hádrons belos foram descobertos: $\Lambda_b = udb$ (1981?), $B^0 = b\bar{d}$ e $B^- = b\bar{u}$ (1983), ...;
- Até então a simetria de Glashow estava quebrada:
 - ▶ Léptons: $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau$ e ?
 - ▶ Quarks: u, d, s, c, b e ?

O último quark (o da verdade t , de *truth* ou *top*) seria descoberto somente em 1995 e a observação direta do ν_τ ocorreria em 2000.

Bósons vetoriais intermediários (1983)

A teoria eletrofraca de Glashow (1959), Salam (1959,1964) e Weinberg (1967):

- A teoria de Fermi da interação fraca era pontual e funcionava bem para baixas energias, mas em altas energias havia necessidade de partículas mediadoras da interação. Elas ficaram conhecidas como *bósons vetoriais intermediários*;
- Obter suas propriedades e suas produções em laboratório foram muito difíceis: o alcance da força fraca é extremamente curto e não existem estados ligados pela interação fraca;



- Com a teoria eletrofraca de Glashow, Salam e Weinberg foi possível calcular as suas massas: $M_W = 82 \pm 2 \text{ GeV}/c^2$ e $M_Z = 92 \pm 2 \text{ GeV}/c^2$;
- Em 1983, o grupo de C. Rubia no CERN reporta as descobertas com: $M_W = 81 \pm 5 \text{ GeV}/c^2$ e $M_Z = 95 \pm 3 \text{ GeV}/c^2$.

O modelo padrão (1978-2013)

- Na visão atual, a matéria é composta por léptons, quarks e mediadores:

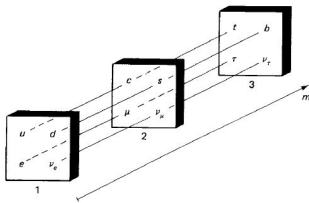
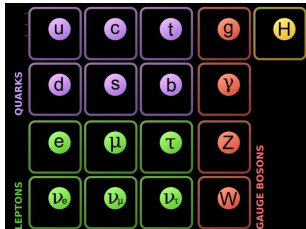
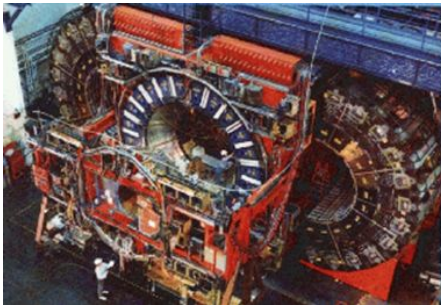


Figure 1.15 The three generations of quarks and leptons, in order of increasing mass.

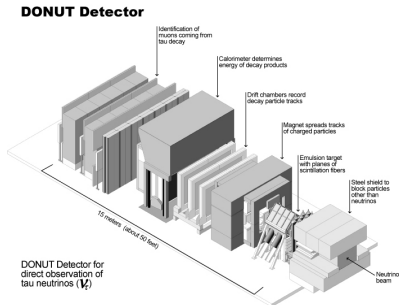
O modelo padrão (1978-2013)

- Em 1995, os experimentos CDF (@CERN) e D0 (@Fermilab) anunciam a descoberta do quark t :



O modelo padrão (1978-2013)

- Em 2000, o experimento DONUT (@Fermilab) anuncia a descoberta do ν_τ :



O modelo padrão (1978-2013)

- O bóson de Higgs, previsto em 1964, foi descoberto no experimento LHC (@CERN), com $M_H = 125,3 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$, em 2013:

