Microcosmo: o Surpreendente Mundo das Partículas Elementares

Aula 1

Do átomo de Rutherford aos quarks e leptons

Alberto Reis



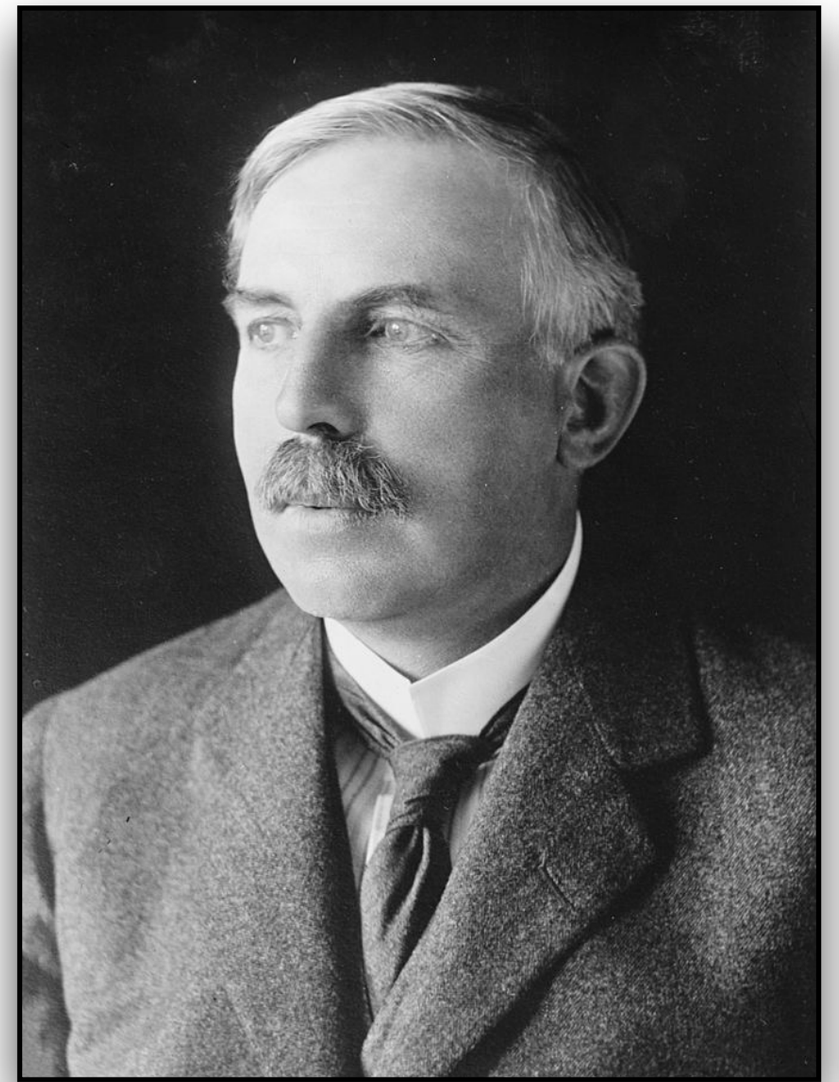
O modelo atômico da matéria é uma das maiores conquistas da Ciência:

- toda matéria **visível** do Universo é feita de átomos;
- os átomos contém um núcleo, com carga elétrica positiva, envolto por uma nuvem de elétrons;
- os núcleos concentram 99.99% da massa do átomo. Suas dimensões são ~10.000 vezes inferiores às dos átomos;
- os átomos são eletricamente neutros, possuindo a mesma carga elétrica positiva e negativa;
- um núcleo com número de massa **A** possui **Z** prótons e **A-Z** nêutrons;
- as propriedades químicas dos átomos são determinadas pelo número de elétrons (**Z**).

Tempos heróicos

Nos anos 1910, os experimentos de Rutherford, Geiger e Marsden desvendaram a estrutura interna dos átomos. A técnica foi o protótipo dos experimentos modernos.

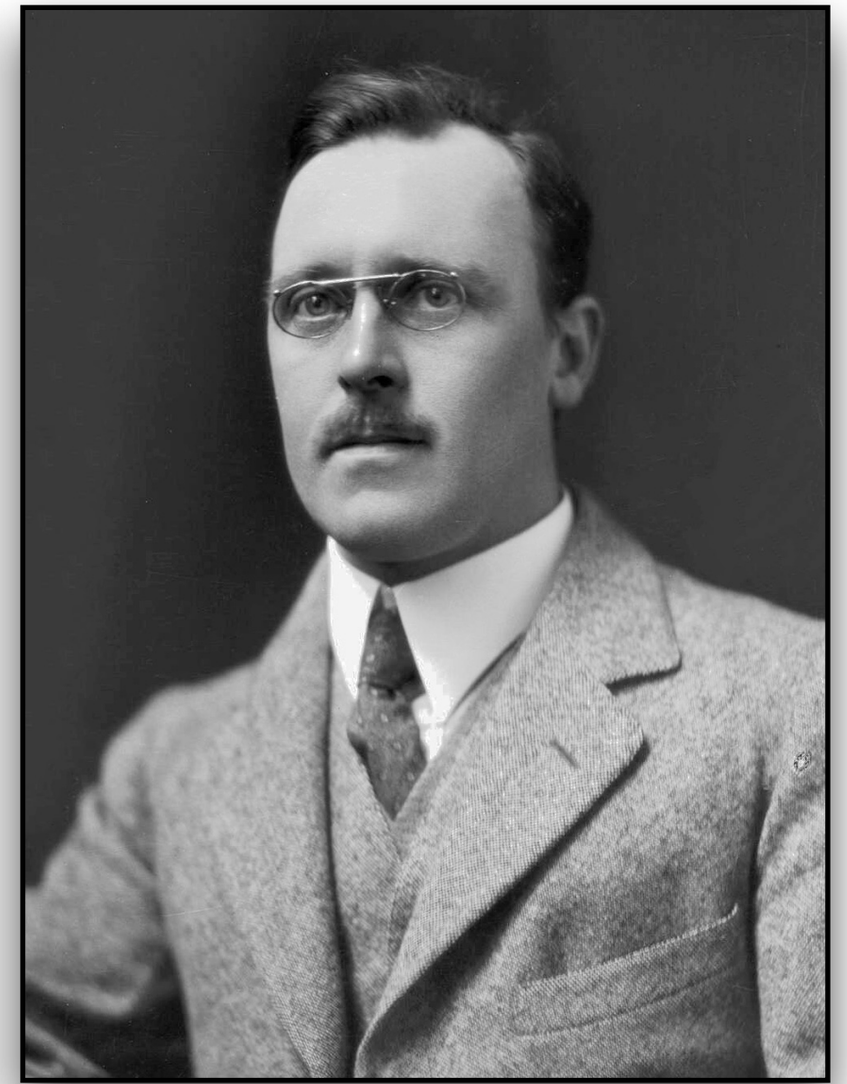
Ernest Rutherford



Hans Geiger



Ernest Marsden

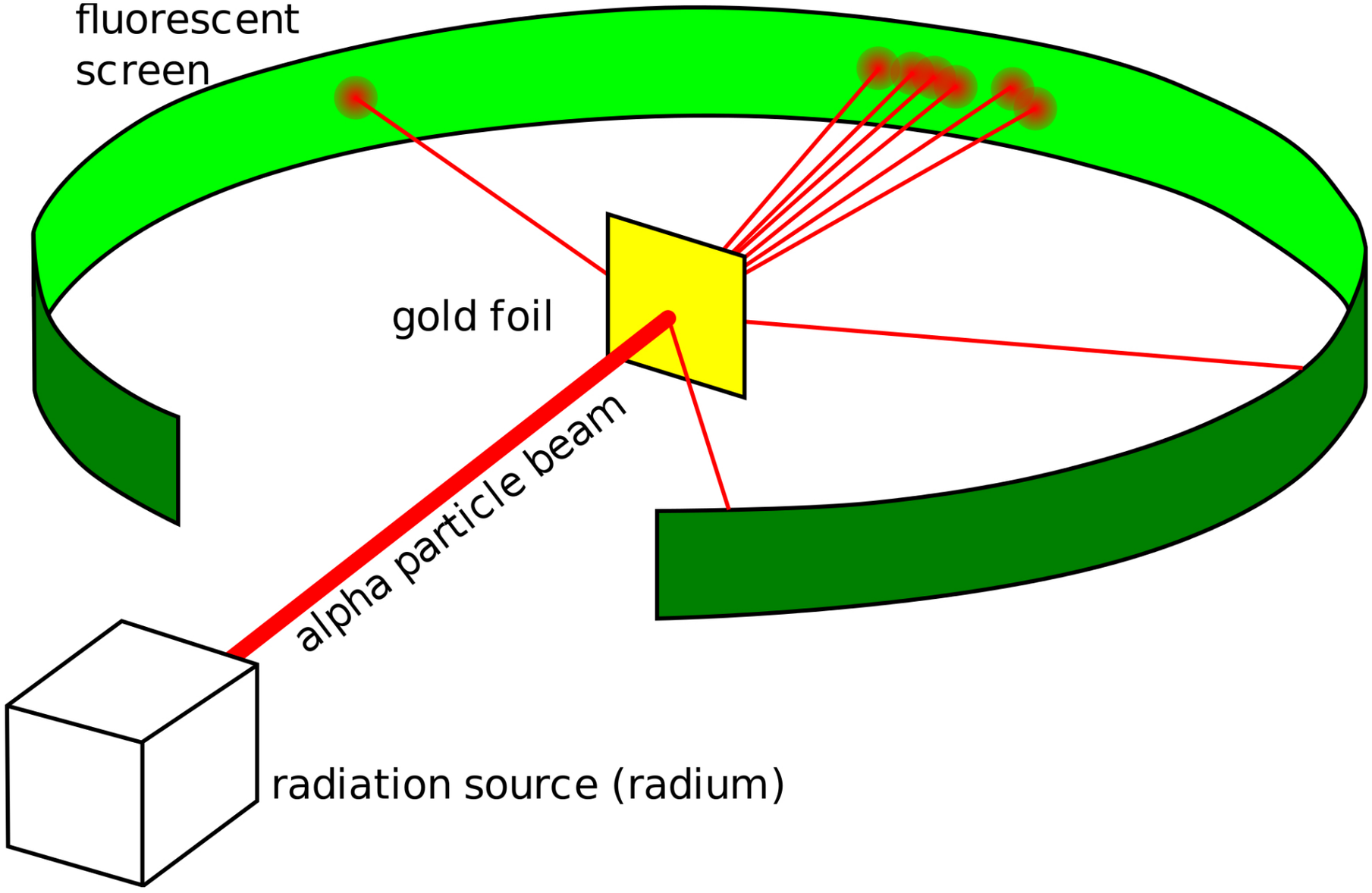


Rutherford recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1908 por seus trabalhos sobre a desintegração radiativa dos elementos — radiações alfa, beta e gamma.

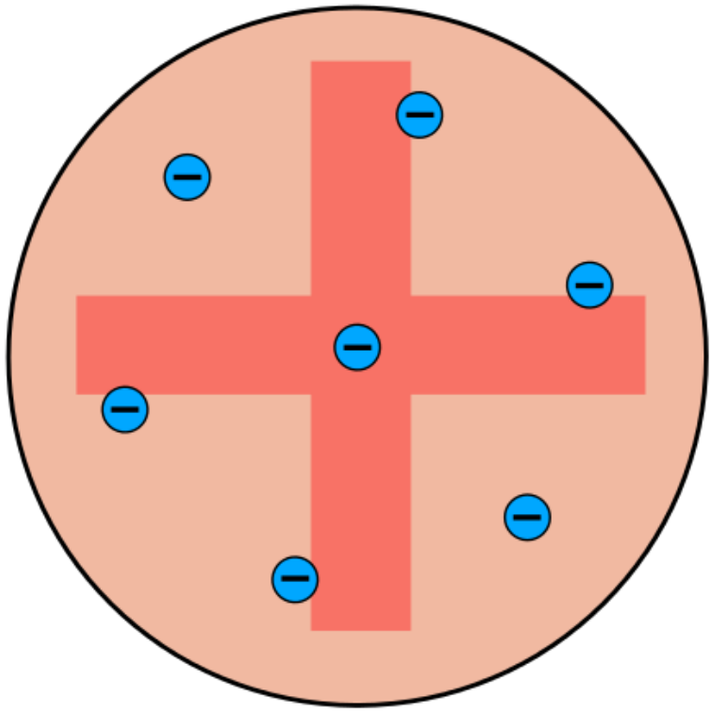
Dos seus orientados, nove foram laureados com o Prêmio Nobel!

Orientador(es)	J. J. Thomson
Orientado(s)	Nazir Ahmed, Edward Andrade, Edward Victor Appleton, Patrick Blackett, Niels Bohr, Bertram Boltwood, Robert William Boyle, Teddy Bullard, James Chadwick, Rafi Muhammad Chaudhry, John Cockcroft, Charles Galton Darwin, Charles Drummond Ellis, Kasimir Fajans, Hans Geiger, Douglas Hartree, Pyotr Kapitsa, Juliĭ Borisovich Khariton, Ernest Marsden, Alexander McAulay, Marcus Oliphant, Cecil Frank Powell, Henry DeWolf Smyth, Frederick Soddy, Ernest Thomas Sinton Walton, Charles Eryl Wynn-Williams

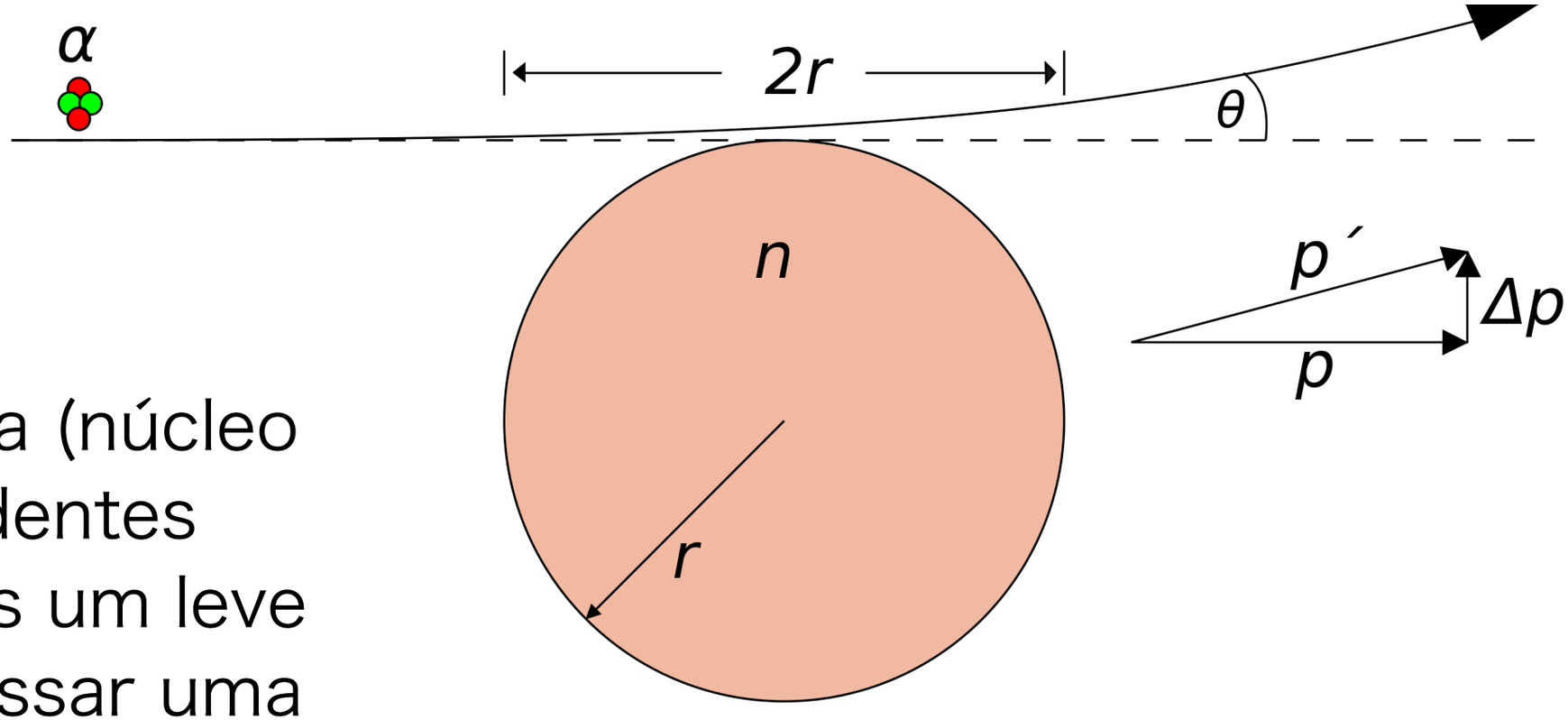
https://pt.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford



O desenho "clássico": um alvo bombardeado por um feixe de partículas, cercado pelo detector.

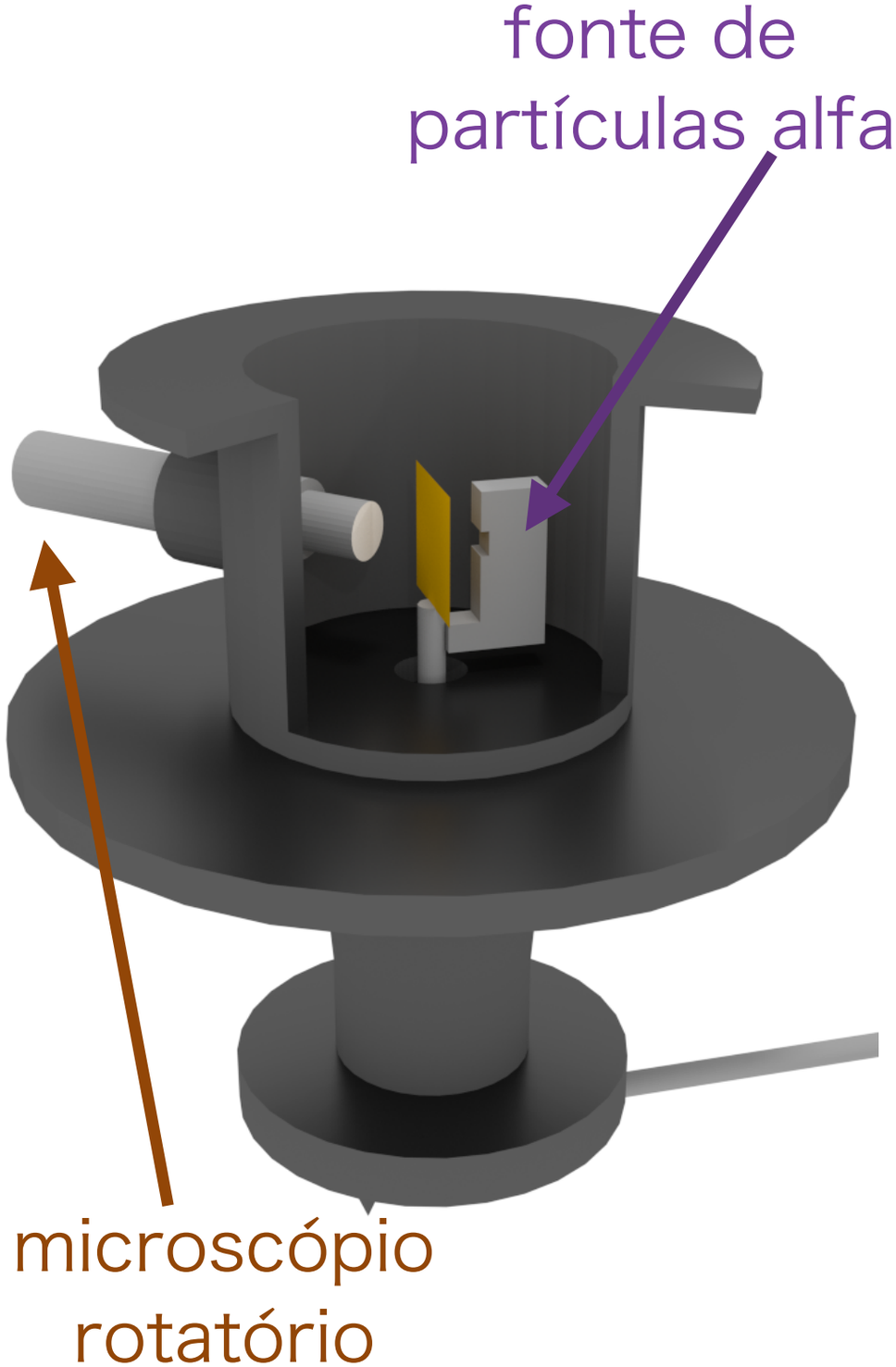


O modelo atômico de J. J. Thomson: a carga elétrica positiva ocupa toda a extensão do átomo, com cargas negativas espalhadas uniformemente.

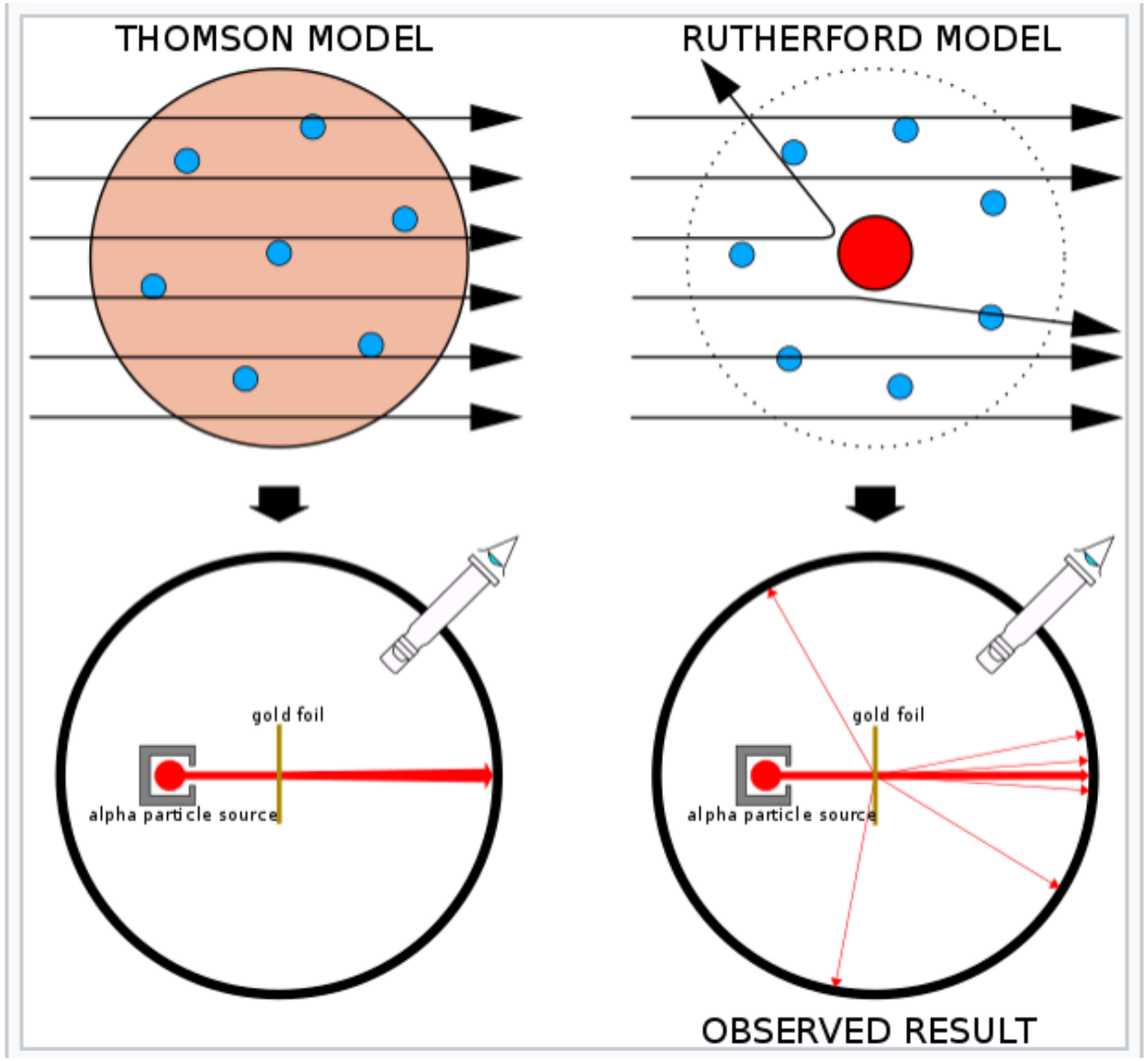


As partículas alfa (núcleo de hélio) incidentes sofreriam apenas um leve desvio ao atravessar uma folha metálica fina.

Esquema do aparato experimental usado por Geiger e Marsden.



A distribuição angular das partículas espalhadas era incompatível com a distribuição de cargas do átomo de Thomson.



Em 1919 Rutherford publicou resultados de experimentos em que nitrogênio era bombardeado por partículas alfa.

Ele observou o surgimento de uma partícula energética, com grande poder de penetração, emitida na colisão. A massa da partícula era compatível com a do hidrogênio.

Rutherford concluiu que o núcleo do hidrogênio está presente em outros núcleos. Considerando o núcleo de hidrogênio como uma partícula fundamental, Rutherford batizou-o como **próton**.

A primeira reação nuclear registrada:

$$^{14}\mathrm{N} + \alpha \rightarrow {}^{17}\mathrm{O} + p$$

Rutherford pode ser considerado o fundador da Física Experimental de Altas Energias.

Três grandes problemas:

1. Por que os elétrons têm órbitas estáveis?
2. Por que átomos com mesmo número de elétrons (isótopos) têm núcleos com massas diferentes?
3. O que mantém os prótons unidos dentro do núcleo?

A Mecânica Quântica foi desenvolvida na década de 1920, grande em parte movida pela busca de uma resposta à primeira pergunta.

A descoberta do nêutron, em 1932,
respondeu a segunda pergunta.

A resposta à terceira pergunta foi dada apenas em 1947.
E com a participação de um físico brasileiro:
Cesar Lattes, um dos fundadores do CBPF

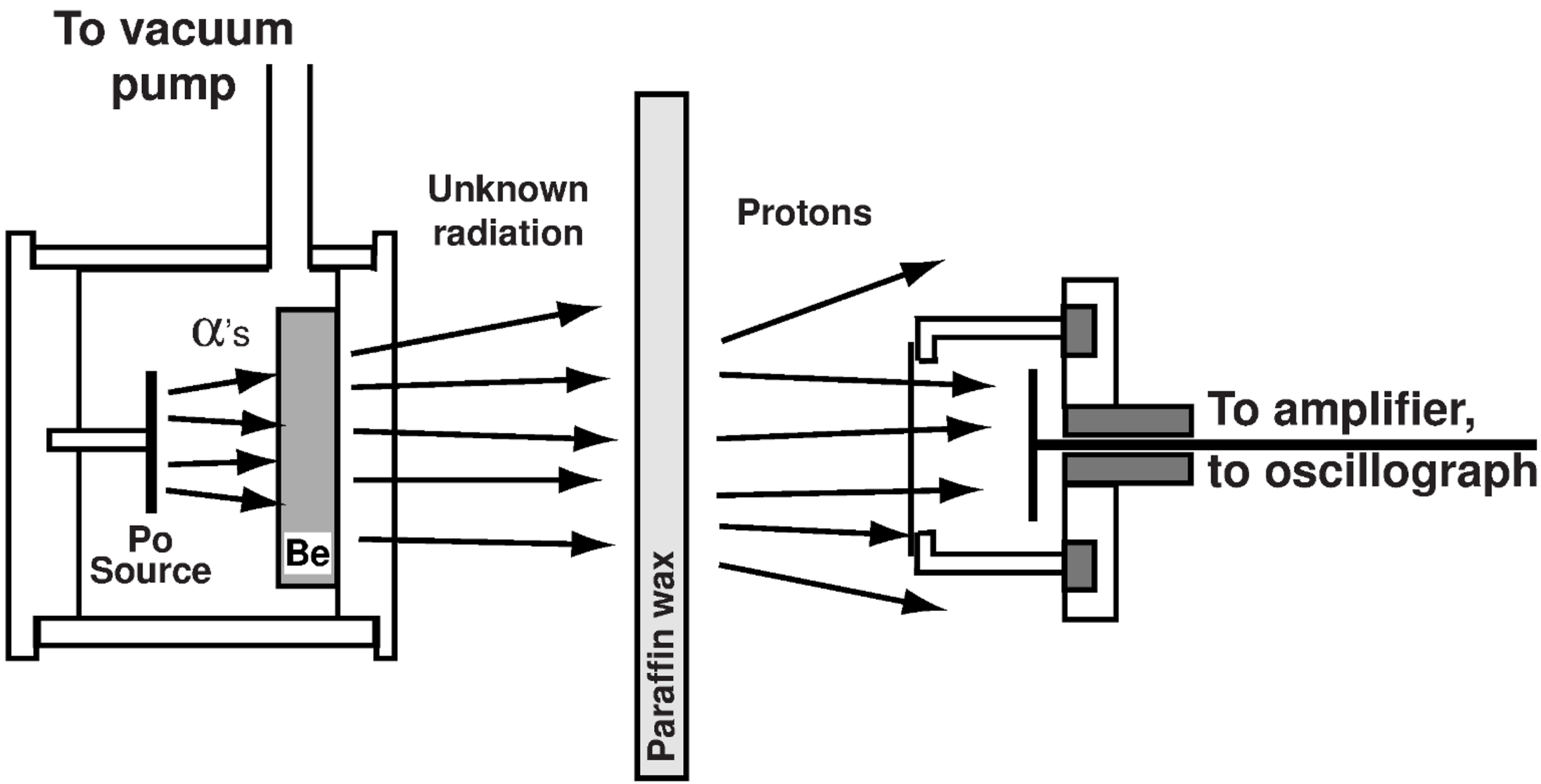
Ao longo dos anos 1920, acreditava-se que o núcleo era composto por prótons e "elétrons nucleares", que seriam a fonte da radiação beta.

Em 1930, W. Bothe e H. Becker observaram que átomos de berílio emitiam uma radiação **neutra** com grande poder de penetração quando bombardeados por partículas alfa.

Em 1932, o casal Joliot e Curie observou que a radiação neutra penetrante causava a emissão de prótons energéticos ao incidir sobre a parafina.

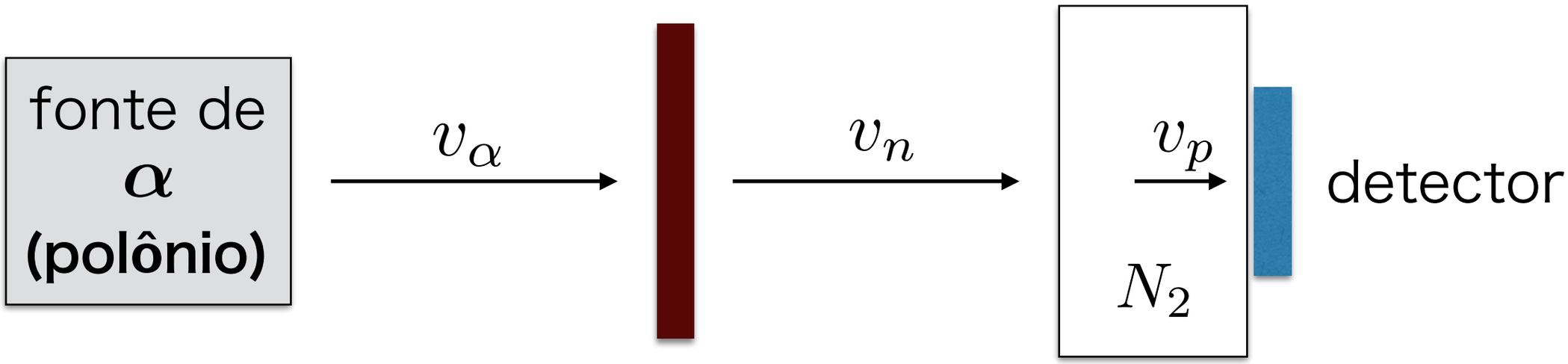
Supunha-se que a radiação neutra fosse radiação gama, mas o problema era a sua energia excepcionalmente alta.

No mesmo ano, James Chadwick utilizando um aparato mais sofisticado, concluiu que a radiação era uma partícula neutra com massa - o **nêutron**. O átomo moderno estava quase completo.



Bdushaw - Own work, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63982002

Faltava determinar a massa do nêutron.



$$\frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 + m_\alpha c^2 + m_B c^2 = \frac{1}{2}m_N v_N^2 + m_N c^2 + \frac{1}{2}m_n v_n^2 + m_n c^2$$

$$m_n c^2 = \frac{\frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 + m_\alpha c^2 + m_B c^2 - m_N c^2}{1 + \dfrac{v_n^2}{2c^2}}$$

$$m_n = 938 \pm 1.8 \text{ MeV} \quad (939.57 \text{ MeV})$$

Entender a estrutura atômica foi um dos grandes problemas da Física nas primeiras duas décadas do século XX. Está na origem da Mecânica Quântica.

Mas nos anos 1930, outras partículas além de prótons, nêutrons e elétrons foram descobertas: positrons (1932) e muons (1937).

O modelo atômico explicava toda a matéria observada no Universo. Que papel teriam essas outras partículas?

Havia também os raios cósmicos - radiação altamente energética vinda do espaço sideral, fenômeno conhecido desde 1912. Nos anos 30-40, os raios cósmicos foram amplamente utilizados como fonte de partículas energéticas.

Raios cósmicos

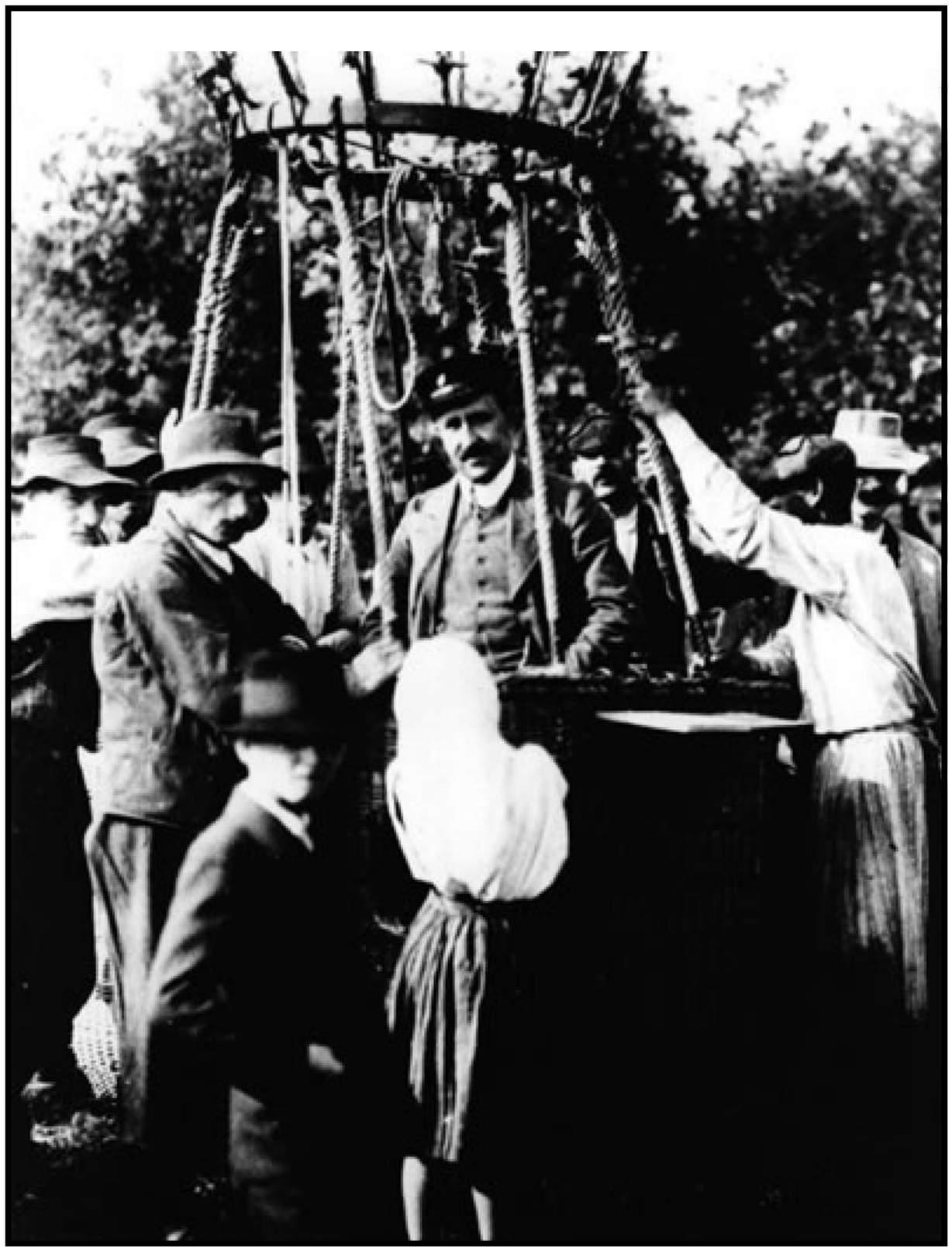
A presença de cargas livres na atmosfera (ionização) era um fenômeno conhecido.

Em 1912 Victor Hess observou que a ionização do ar aumenta com a altitude.

Hess fez vários vôos de balão, levando detectores.

Hess concluiu que a ionização era causada por radiação vinda do espaço sideral: os raios cósmicos.

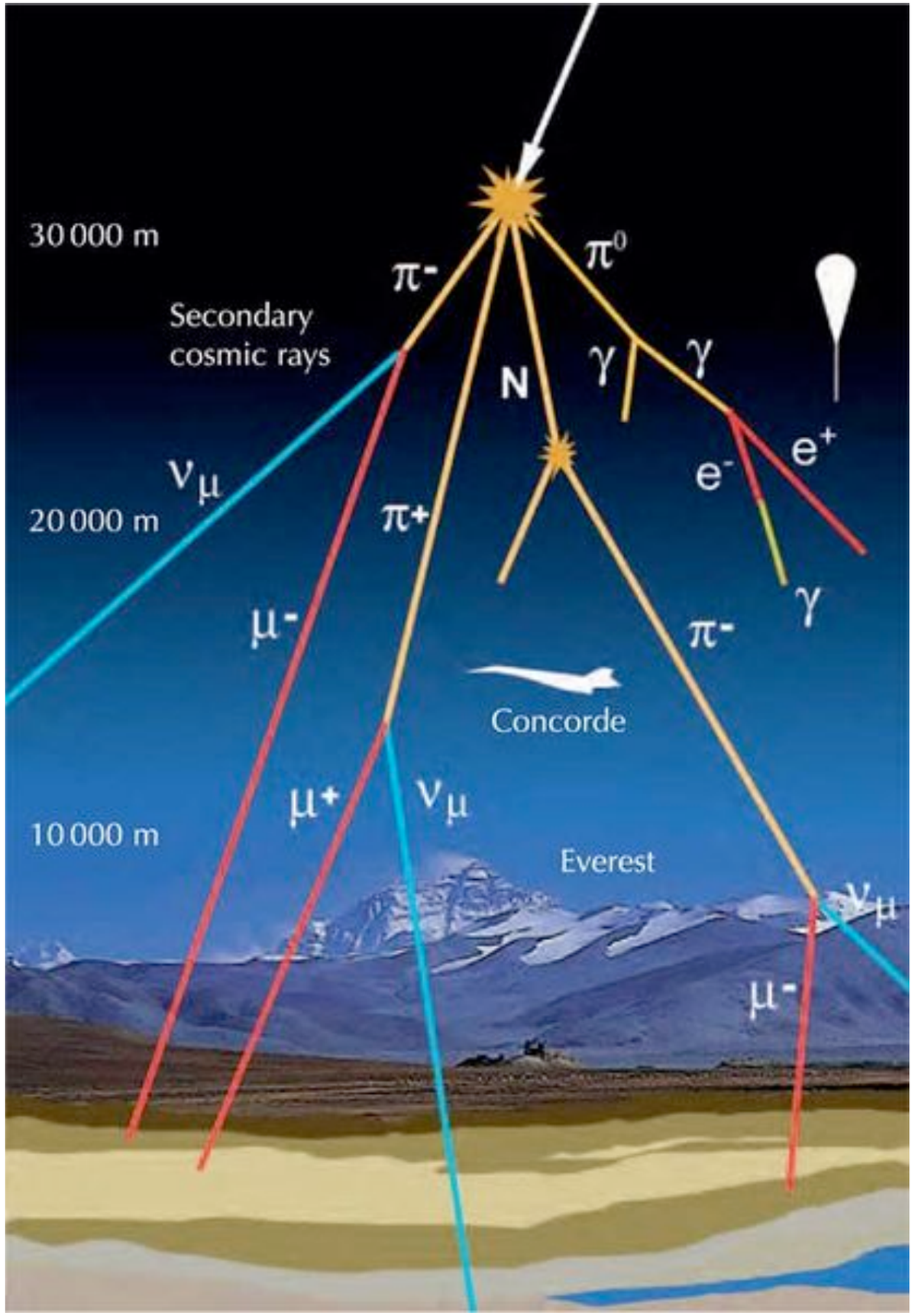
V. Hess após seu vôo em um balão



Nos anos 1930 foi demonstrado que os raios cósmicos são partículas carregadas.

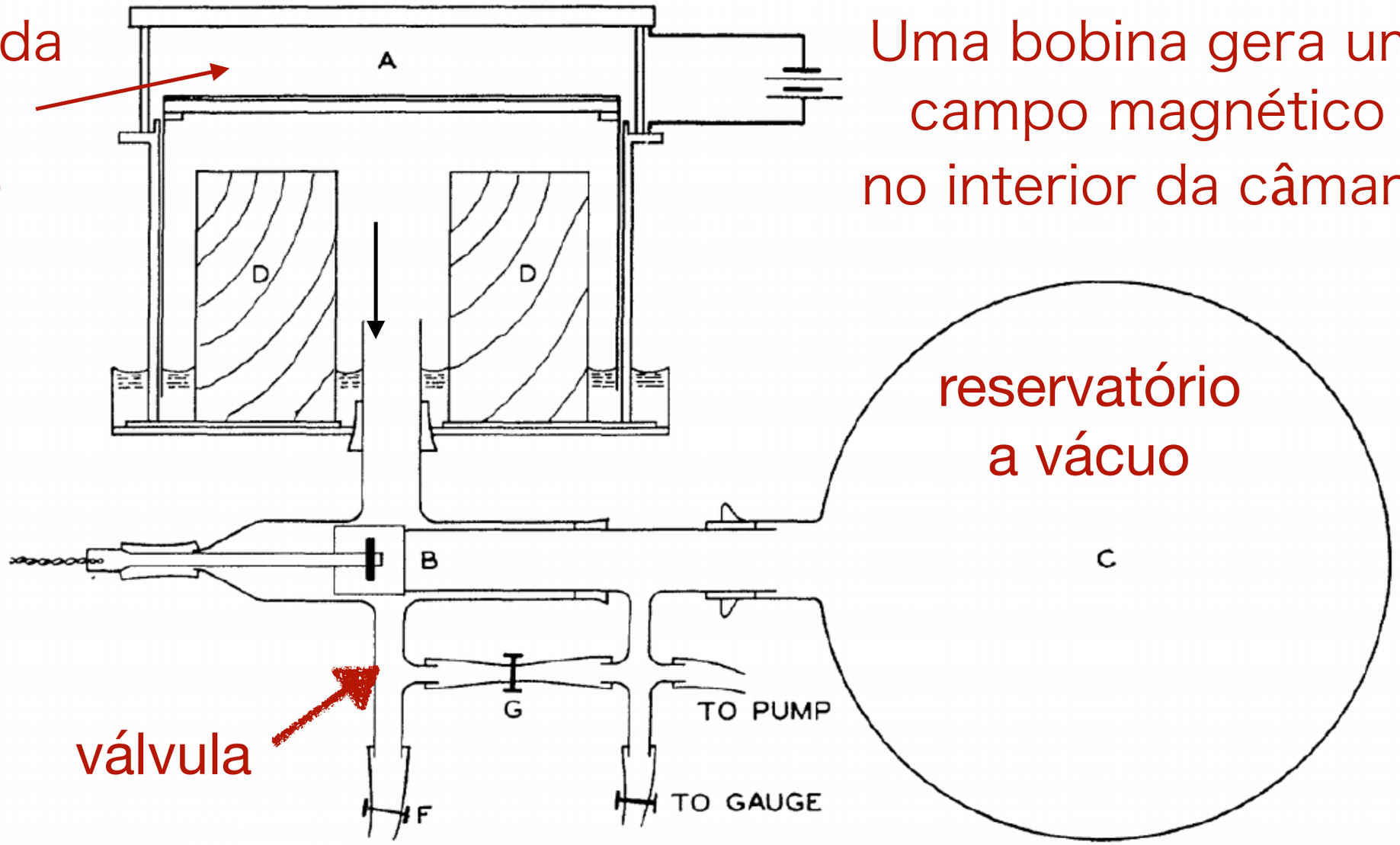
Ao interagir com núcleos atômicos na alta atmosfera, os raios cósmicos geram uma extensa cascata de partículas. Muitas chegam ao nível do mar.

O estudo dos raios cósmicos levou à descoberta acidental do pósitron.



Esquema de uma câmara de Wilson.

câmara preenchida com vapor supersaturado



Uma bobina gera um campo magnético no interior da câmara

reservatório a vácuo

válvula

Quando a válvula (B) é aberta, a câmara (A) se expande rapidamente. Se uma partícula carregada atravessa a câmara nesse momento, deixa um rastro de gotículas de vapor, registrando a sua trajetória.

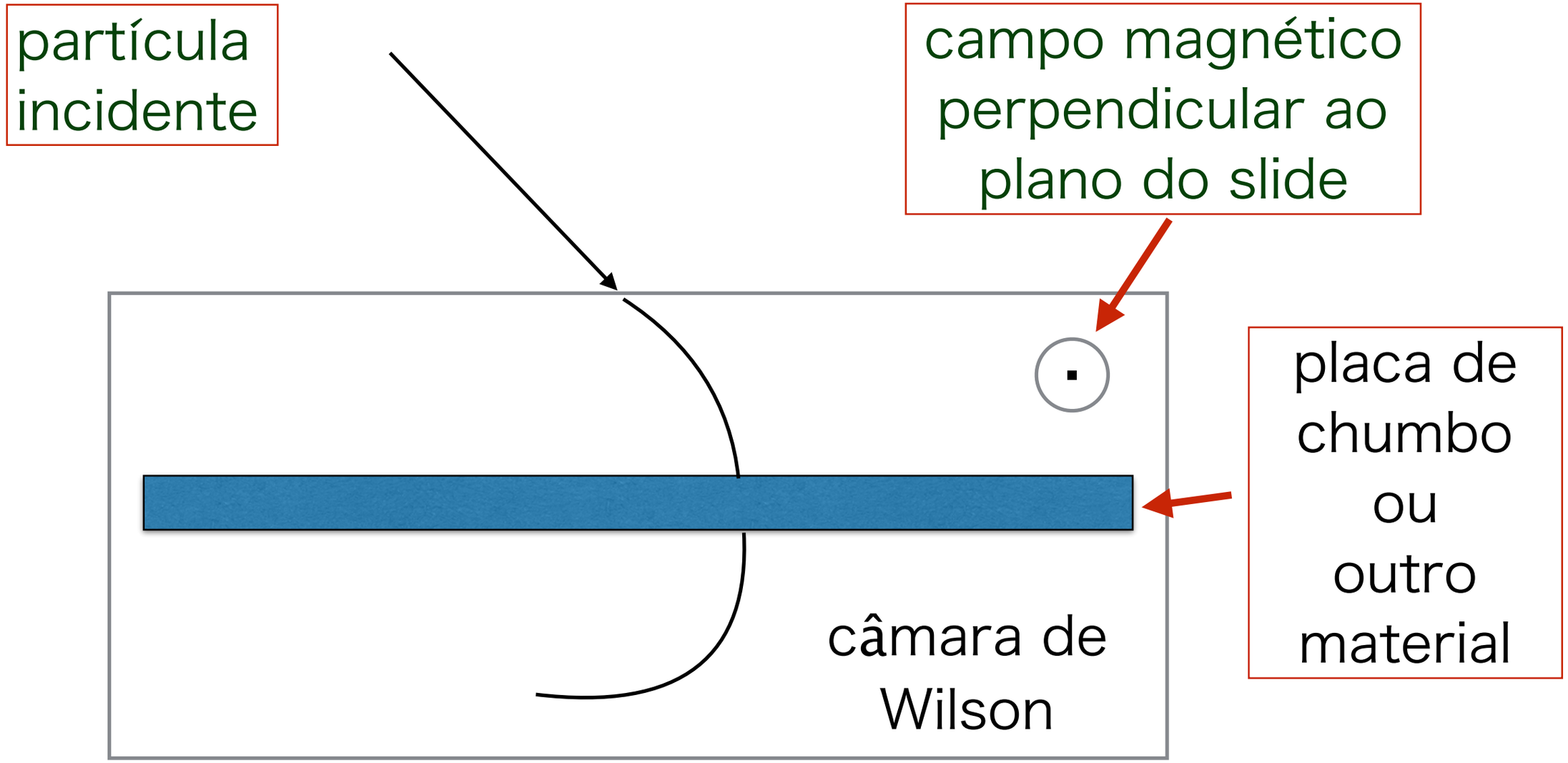
- A espessura do traço deixado e a distância média entre as gotículas permitem uma estimativa da massa da partícula incidente.

- Na presença de um campo magnético a trajetória da partícula é um arco de circunferência. A medida do raio de curvatura permite estimar seu momento:

força de Lorentz: $\vec{F} = q\ \vec{v} \times \vec{B}$

Se $\vec{v} \perp \vec{B}$, $qvB = \dfrac{mv^2}{r} \rightarrow \boxed{p = qBr}$

- A energia de uma partícula carregada pode ser estimada pela distância que percorre em um meio até atingir o repouso.



Ao penetrar na câmara a trajetória da partícula é desviada pelo campo magnético.

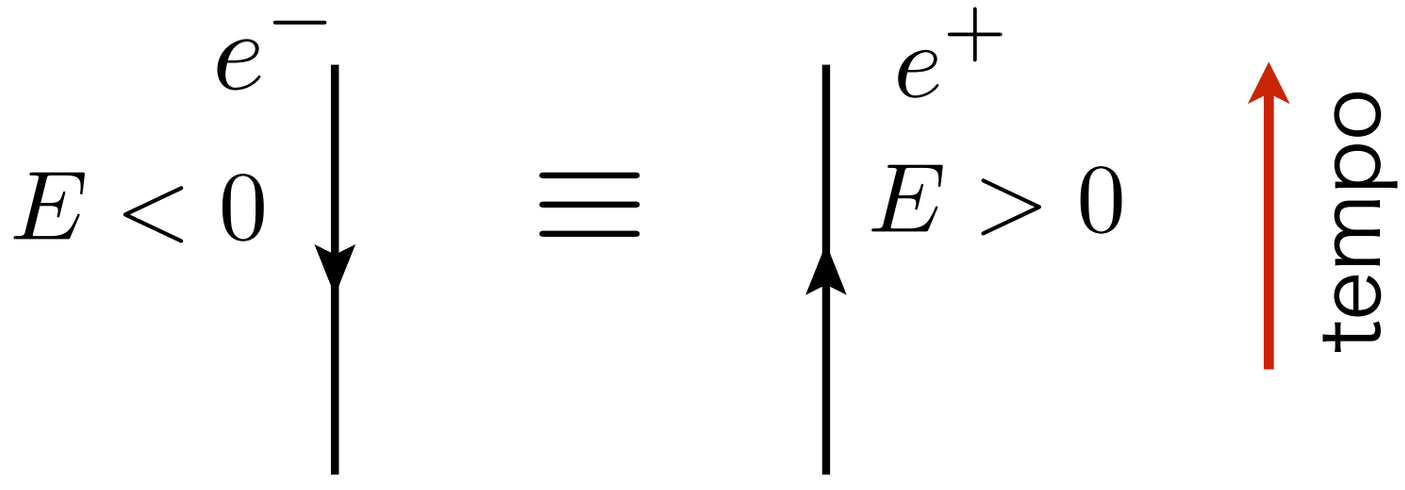
Após passar pela placa de chumbo a partícula tem energia menor e por isso sofre um desvio maior.

1928: P. Dirac uniu a Relatividade Especial e a Mecânica Quântica em uma equação para descrever o spin do elétron.
Uma consequência inesperada: soluções com energia negativa, interpretadas como sendo **antipartículas**, em tudo idênticas às partículas, mas com carga elétrica trocada.

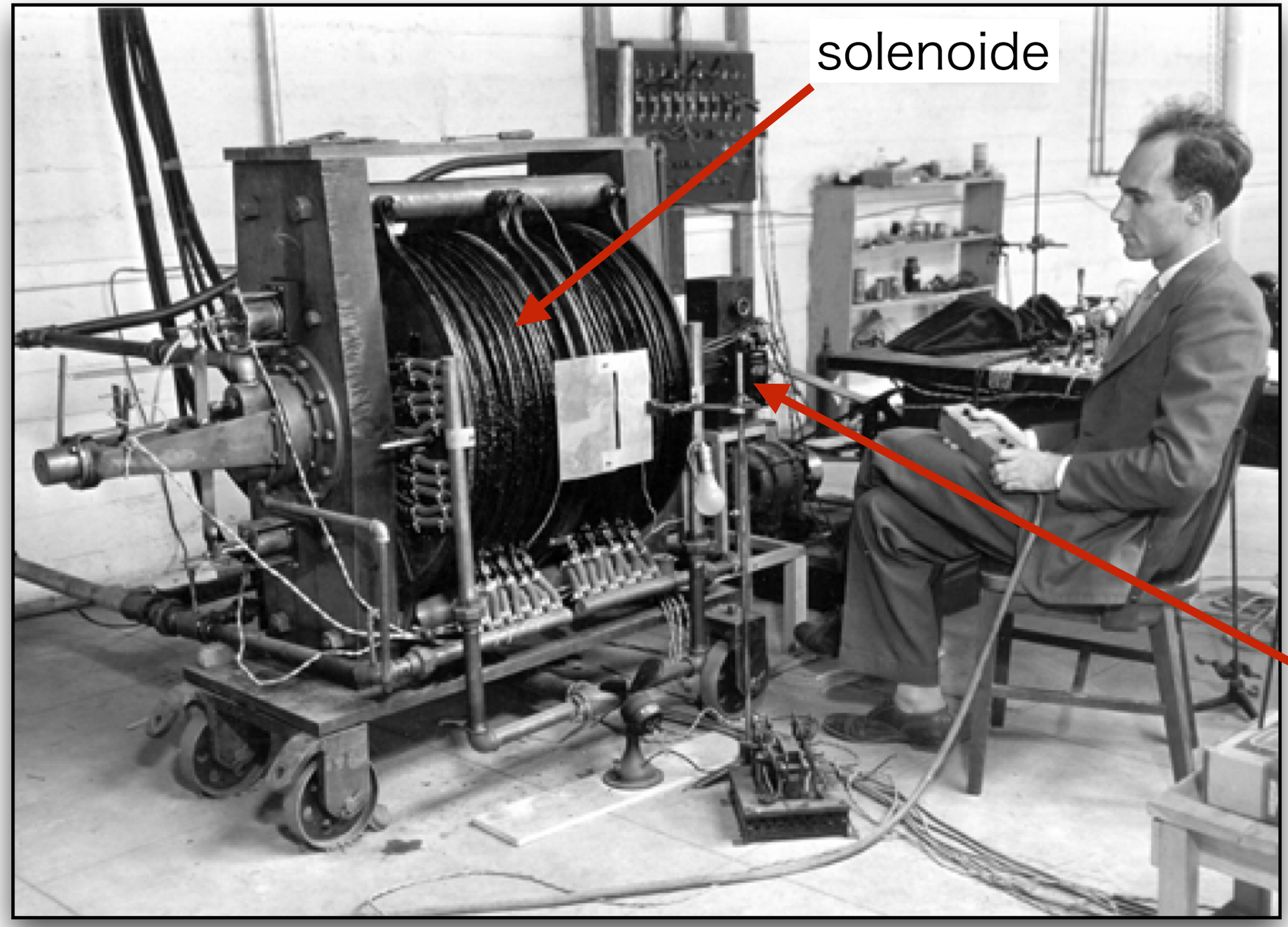
Energia de uma partícula relativista:

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \quad \longrightarrow \quad E = \pm\, c\sqrt{p^2 + m^2c^2}$$

A interpretação de Feynman e Stückelberg:

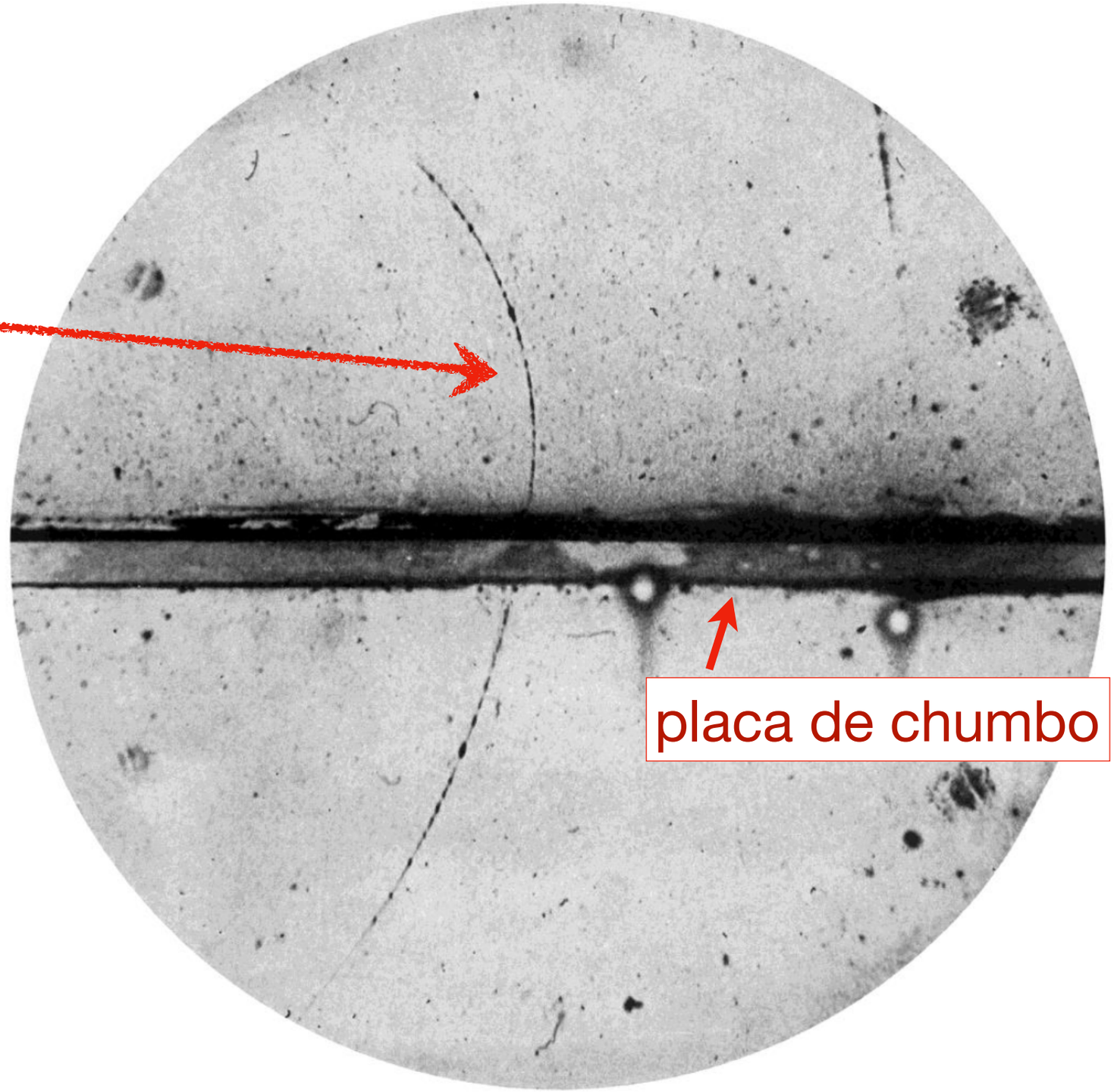


Carl Anderson e o aparato experimental usado na descoberta do pósitron. O equipamento foi colocado em um balão, atingindo 5 km de altitude.



Uma fotografia histórica

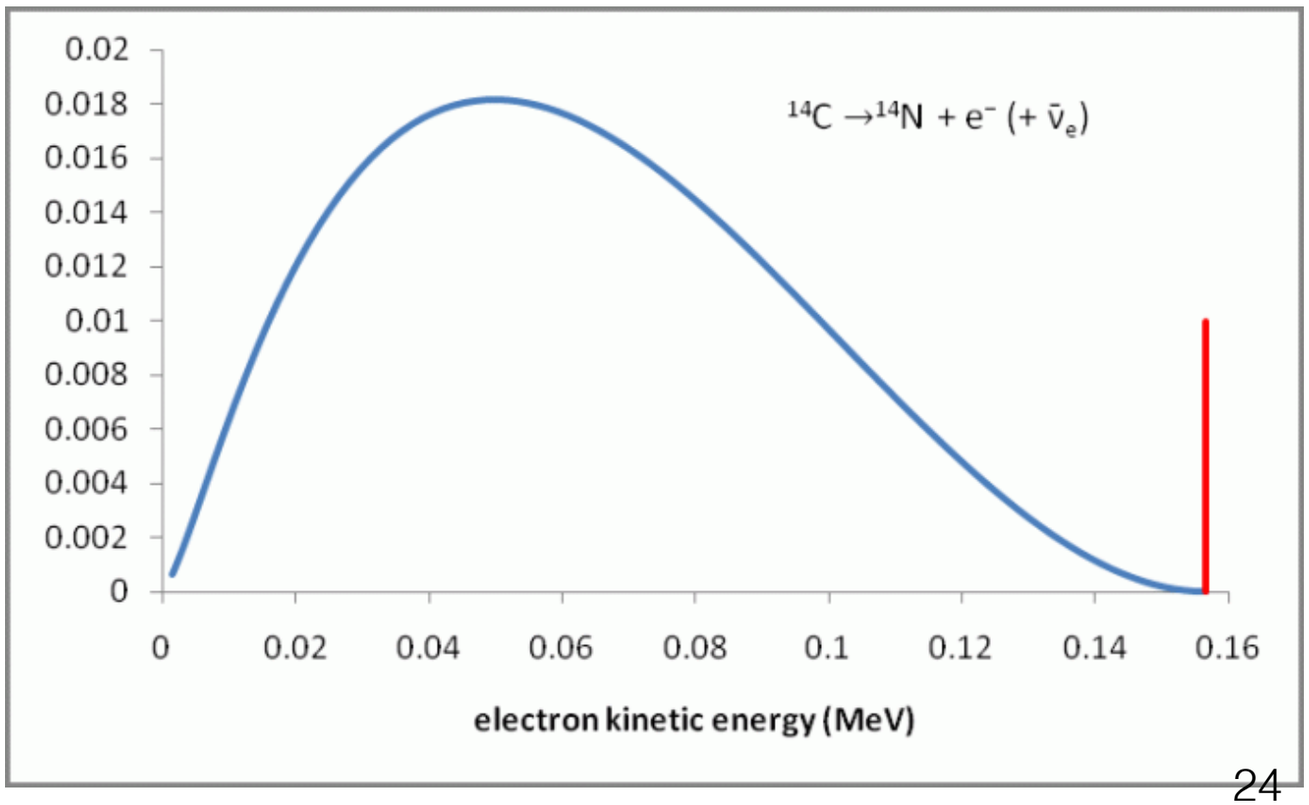
- A espessura do traço é proporcional à massa da partícula.
- O raio de curvatura depende da energia da partícula.
- O sentido do desvio na trajetória causado pelo campo magnético permite determinar o sinal da carga da partícula.
- A foto registra uma partícula com a massa do elétron mas com carga positiva: o pósitron!!



A teoria quântica da matéria explica a distribuição dos elétrons nos átomos. Nos anos 1930 a fronteira do conhecimento moveu-se para uma escala menor: o núcleo.

Duas questões críticas permaneciam:

- o que mantém prótons e nêutrons unidos nos núcleos, cujas dimensões são da ordem de 10^{-14} m?
- como explicar o espectro de energia dos elétrons no decaimento beta?



O decaimento beta:
um núcleo de número atômico Z se transforma num núcleo com Z+1 e um elétron é emitido.

A energia cinética do elétron deveria ter um valor fixo, e não uma distribuição.

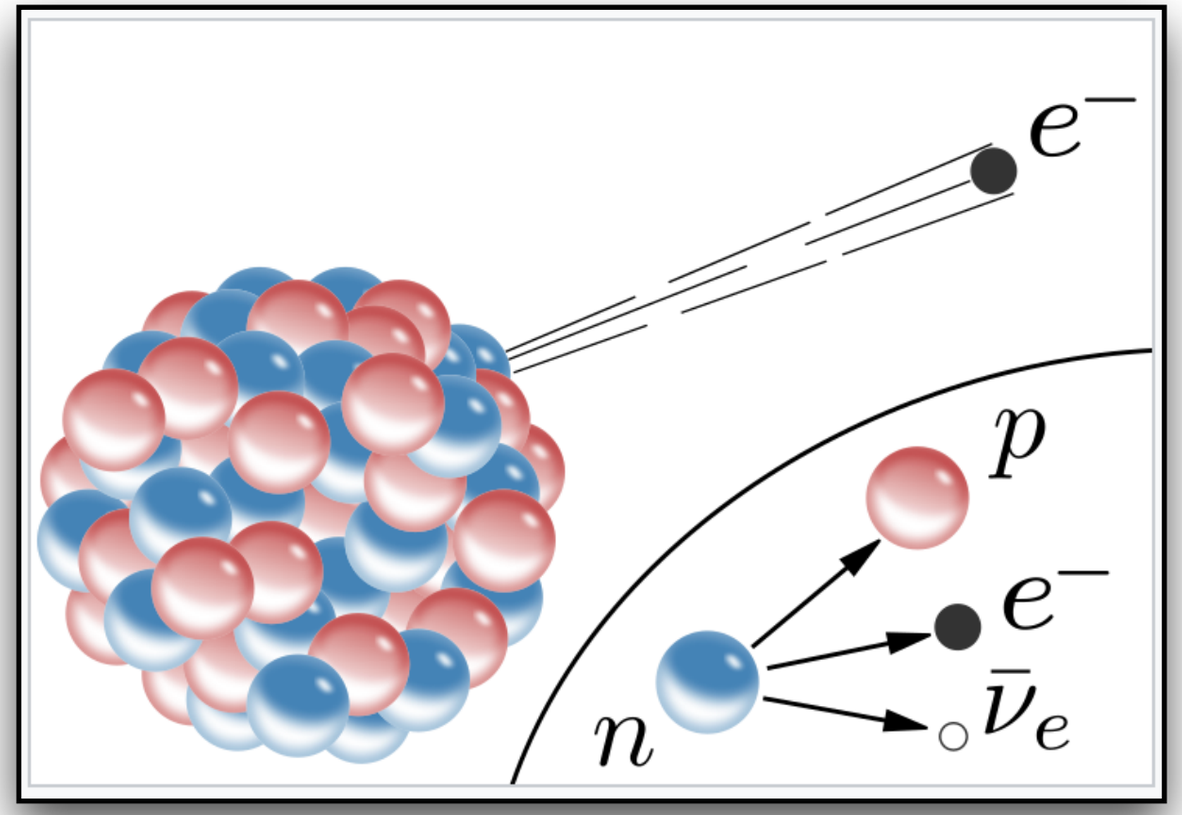
Em 1930, Wolfgang Pauli propôs a existência de uma nova partícula neutra, muito leve e com spin 1/2.

O nitrogênio é um pouco mais leve que o carbono-14.

$$_6C^{14} \rightarrow \ _7N^{14} + e^- + \overline{\nu}_e$$

O processo microscópico que ocorre no interior do núcleo:

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



Em 1934, Enrico Fermi apresentou sua teoria do decaimento beta: uma interação pontual envolvendo quatro partículas com spin 1/2, a base da moderna teoria das interações fracas.

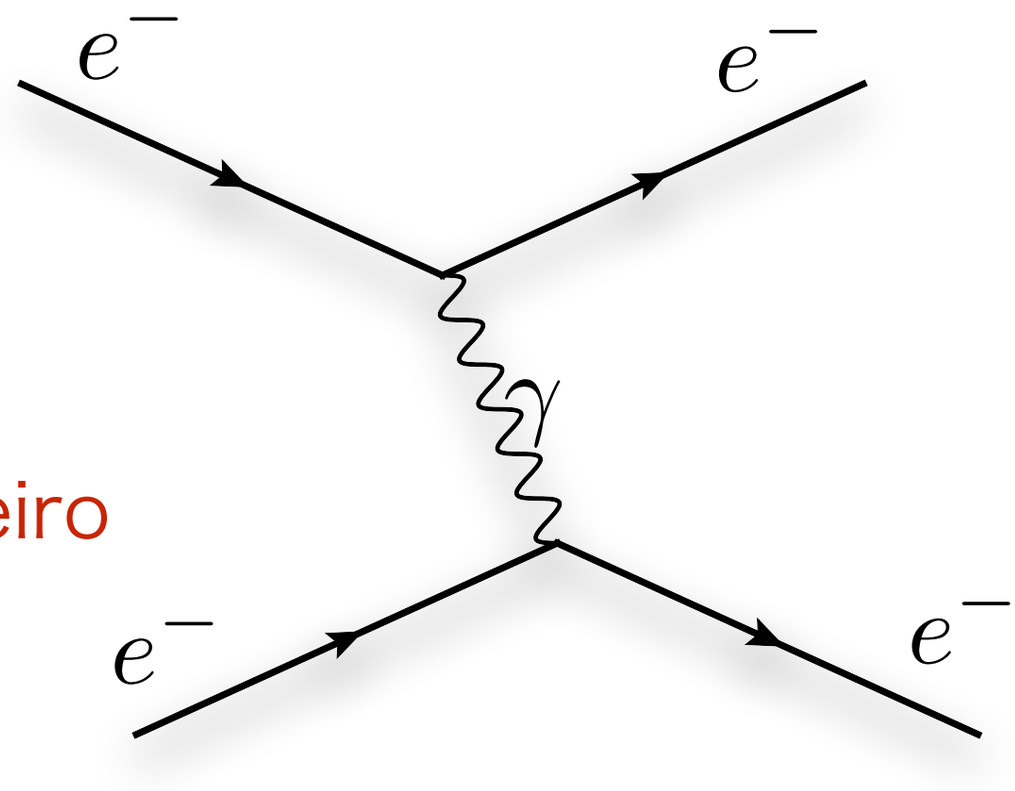
Mas os neutrinos só foram observados 20 anos depois.

A interação entre os nucleons (= prótons e nêutrons dentro dos núcleos) é um problema estudado até hoje.

Em 1935 por Hideki Yukawa propôs sua teoria dos mésons:
a interação entre nucleons ocorre mediante a troca de uma partícula com massa intermediária entre o próton e o elétron.

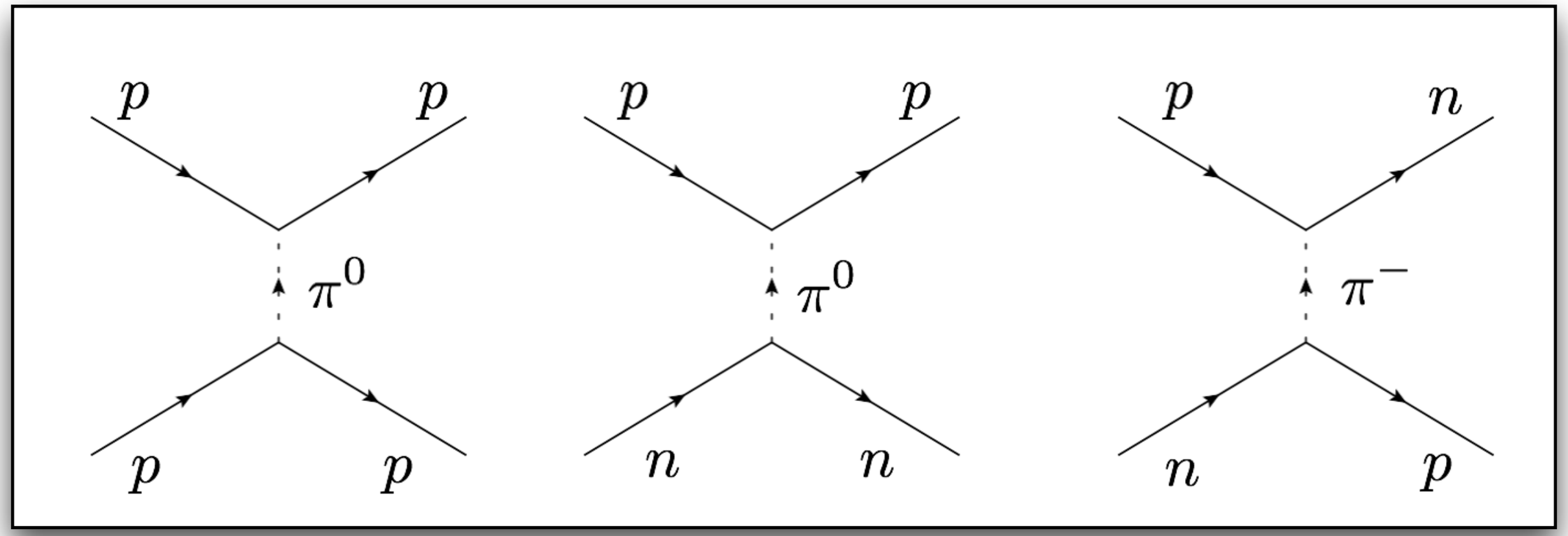
Interações entre duas partículas ocorrem via troca de uma terceira. Essa ideia surgiu do trabalho de Dirac descrevendo a interação de elétrons com a radiação.

Dois elétrons interagem via troca de um fóton, o quantum do campo eletromagnético.



fermions = partículas de spin semi-inteiro
bosons = partículas de spin inteiro

Em analogia à eletrodinâmica quântica, Yukawa postulou a existência de uma partícula sem spin e com massa ~200 MeV, que seria a intermediária da força nuclear.



Essa partícula intermediária é o pion, que só foi descoberto em 1947 por Powell, Occhialini e pelo físico brasileiro e fundador do CBPF César Lattes.

Todas as partículas intermediárias são bosons!

O potencial de Yukawa

$$V(r) = \frac{g^2}{4\pi r}\, e^{-r/R}, \qquad R = \frac{\hbar}{mc}$$

g ⟶ intensidade da interação

r ⟶ distância entre os nucleons (puntiformes)

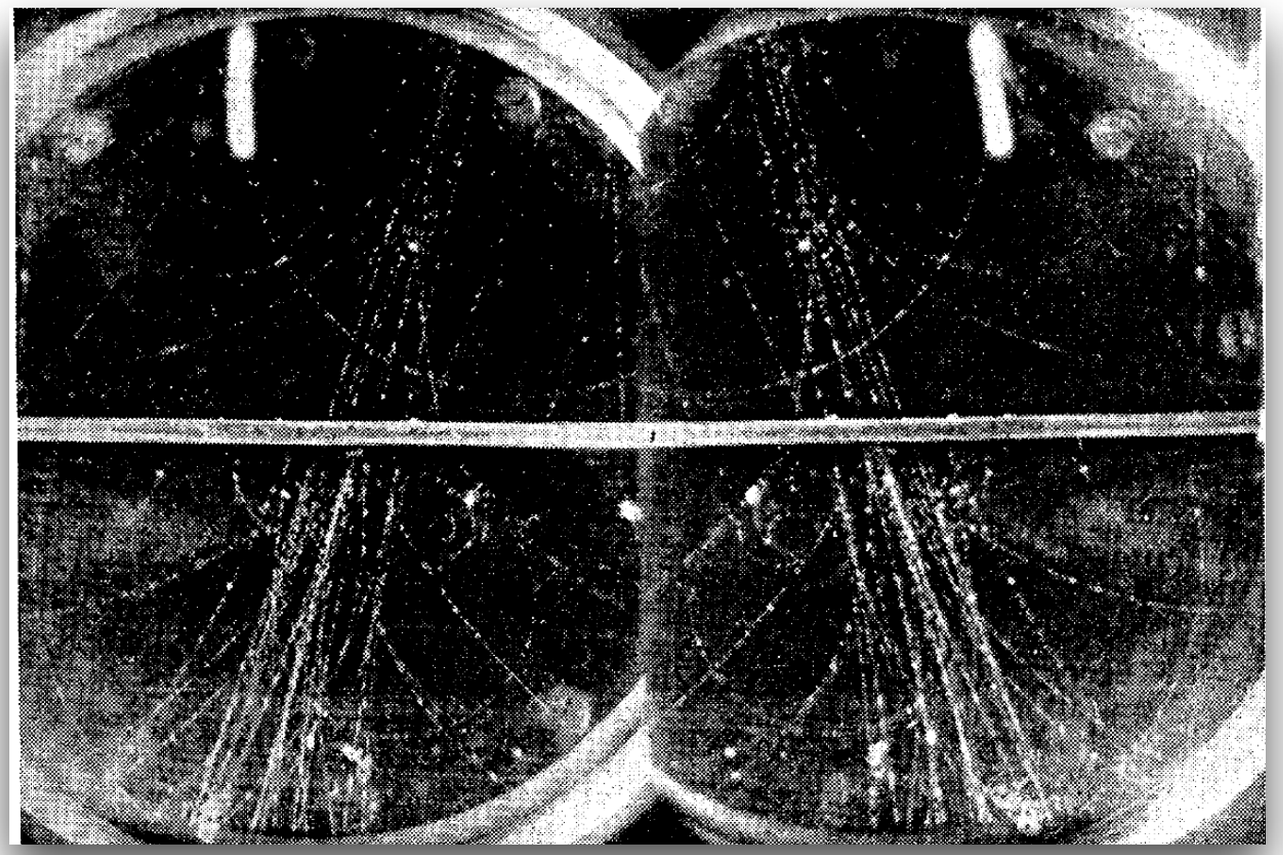
R ⟶ alcance da interação

As forças nucleares têm alcance típico da ordem de 10^{-15} m, escala de tamanho dos núcleos atômicos.

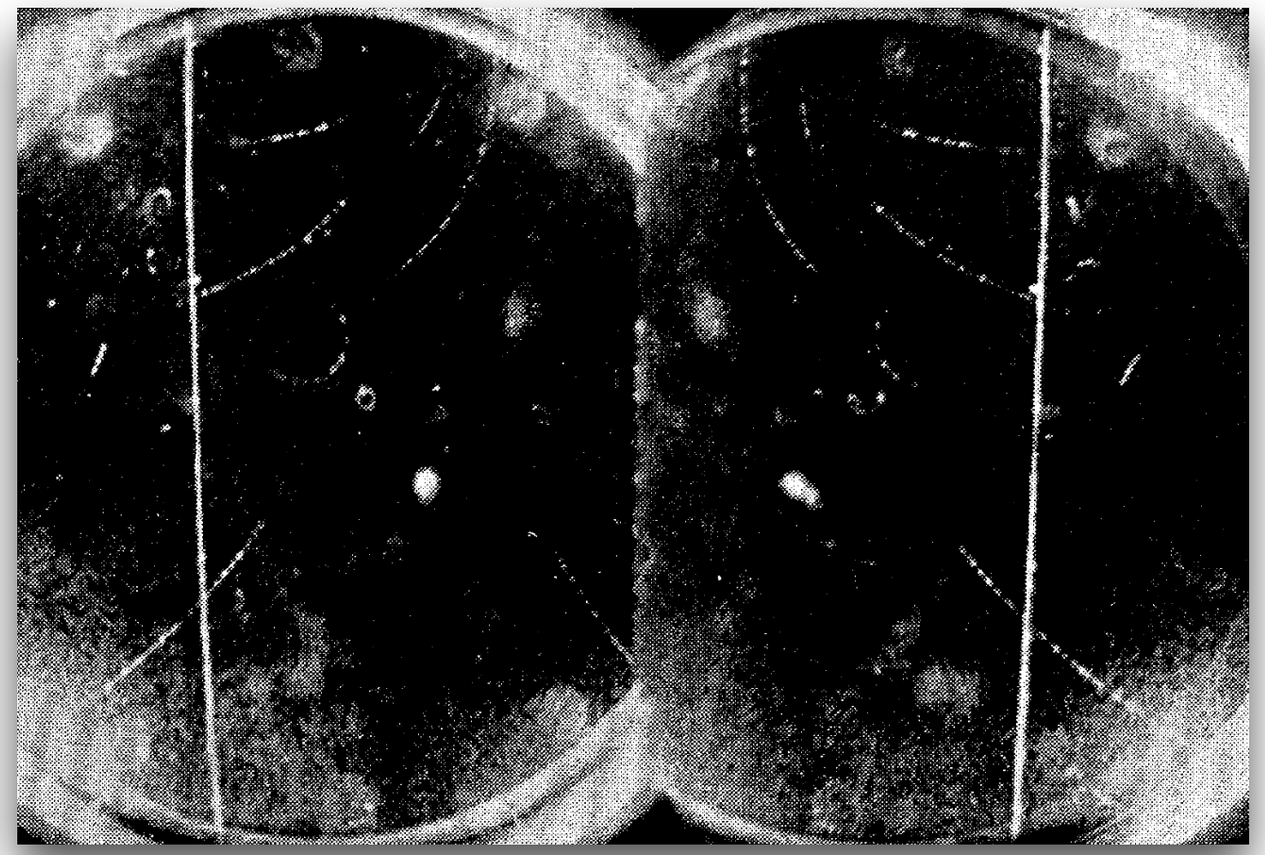
A hipótese de Yukawa previa a existência de uma partícula sem spin com massa

$$mc^2 = \frac{\hbar c}{R} \simeq 100 \text{ MeV}$$

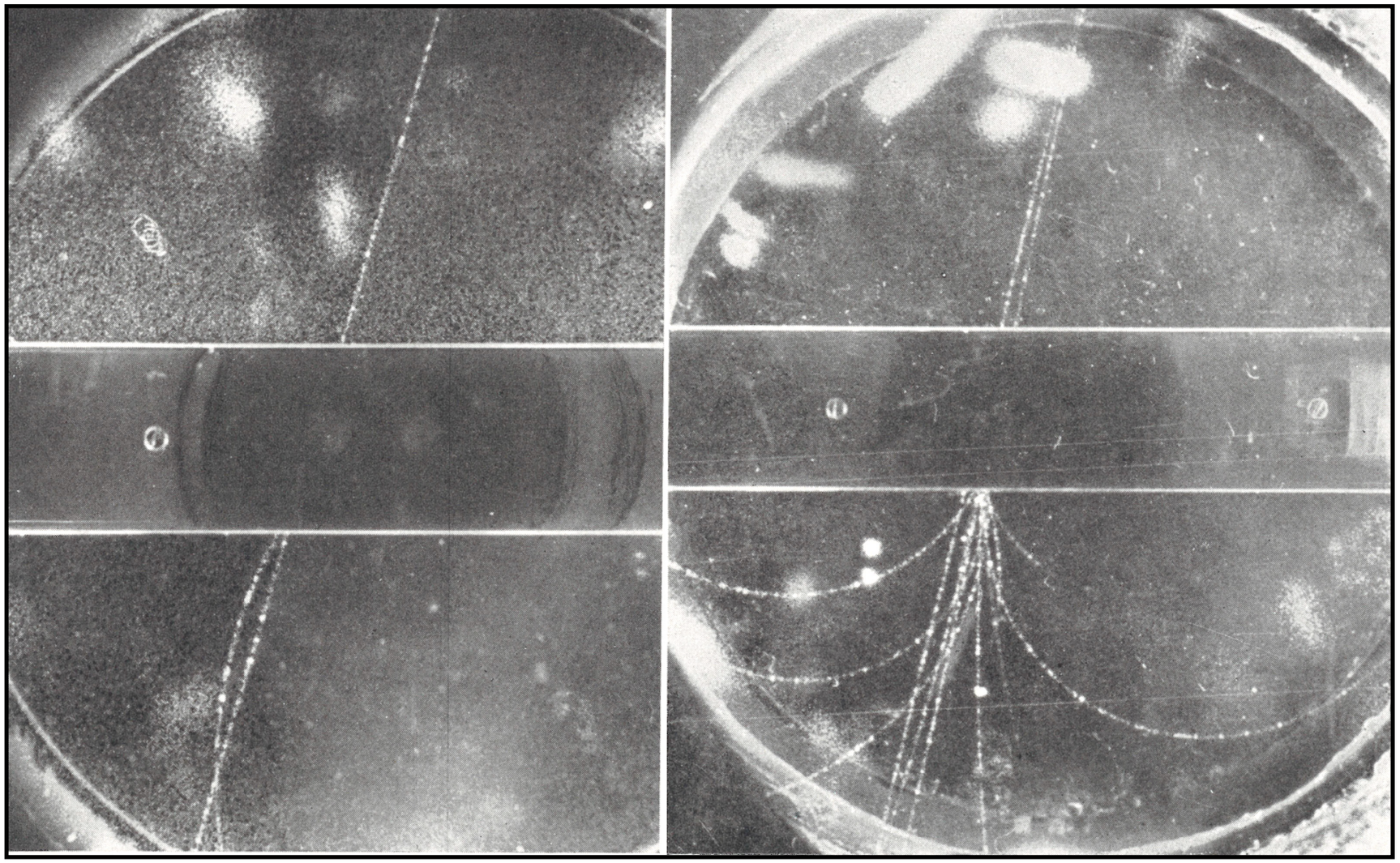
Em 1936, uma nova partícula: o múon. Descoberta por C. Anderson e S. Neddermyer usando raios cósmicos, com massa maior que a do elétron e menor que a do próton.



Elétrons interagem rapidamente com as moléculas da câmara, produzindo um chuveiro de partículas.



Prótons têm maior poder de penetração e formam traços significativamente mais espessos que os dos elétrons.



Fotografia de muons interagindo com uma placa de chumbo. À esquerda, o muon ioniza um único átomo; à direita, produz uma cascata eletromagnética.

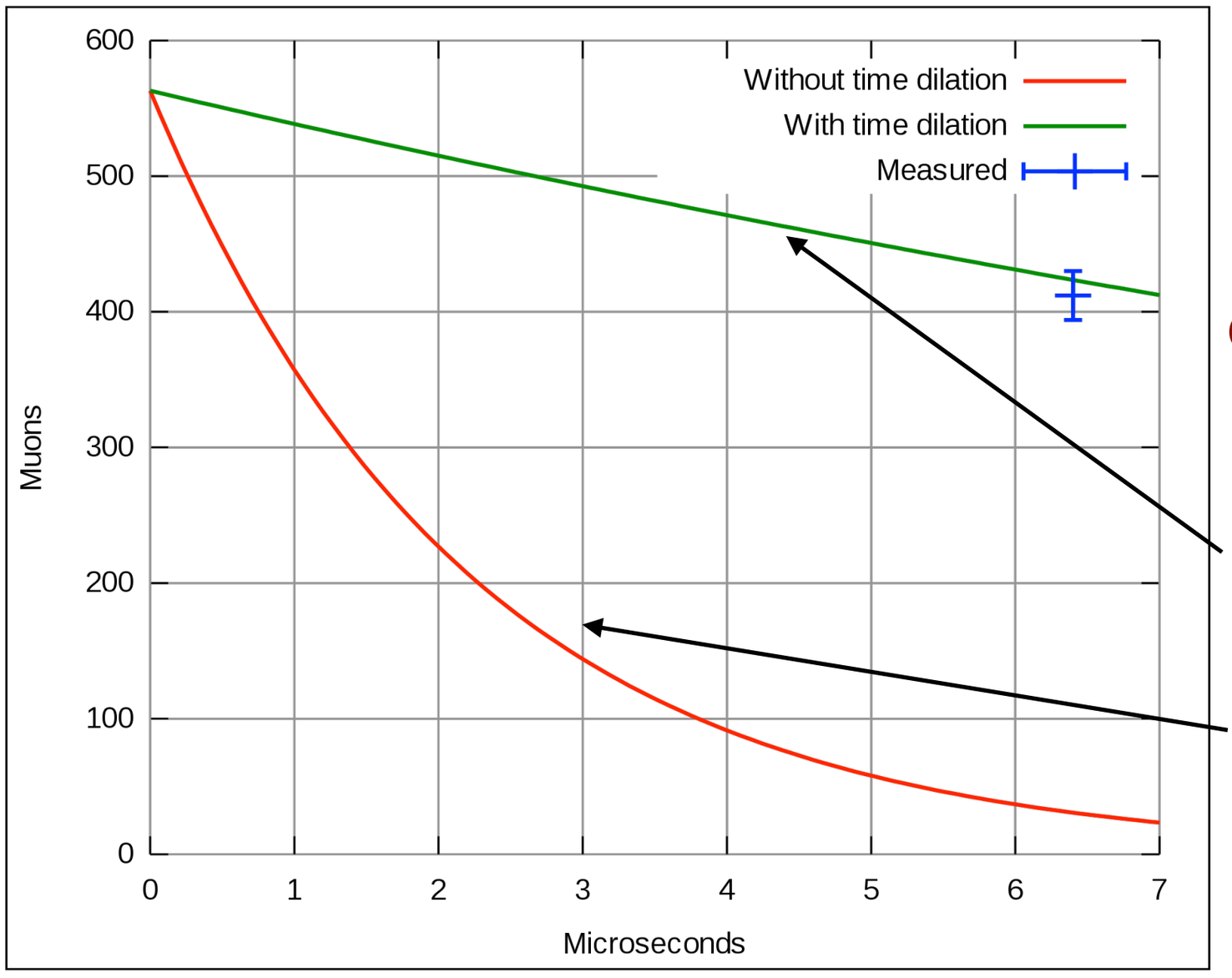
- O traço deixado pela nova partícula era mais fino que o de um próton e mais espesso que o de um elétron.
- A diferença de curvatura após a placa de chumbo é mínima: pequena perda de energia (grande poder de penetração).

Pensou-se incialmente que essa fosse a partícula de Yukawa.
Por isso foi batizada de "meson".

Em 1940 B. Rossi e D. Hall demonstraram que o "meson" era uma partícula instável, com vida média de ~2 μs.

Múons são produzidos nas camadas mais altas da atmosfera.

Mesmo tendo velocidades próximas à da luz, como é possível detectá-los ao nível do mar?



O experimento de Rossi e Hall demonstrou pela primeira vez a validade da dilatação do tempo a teoria na Relatividade Especial.

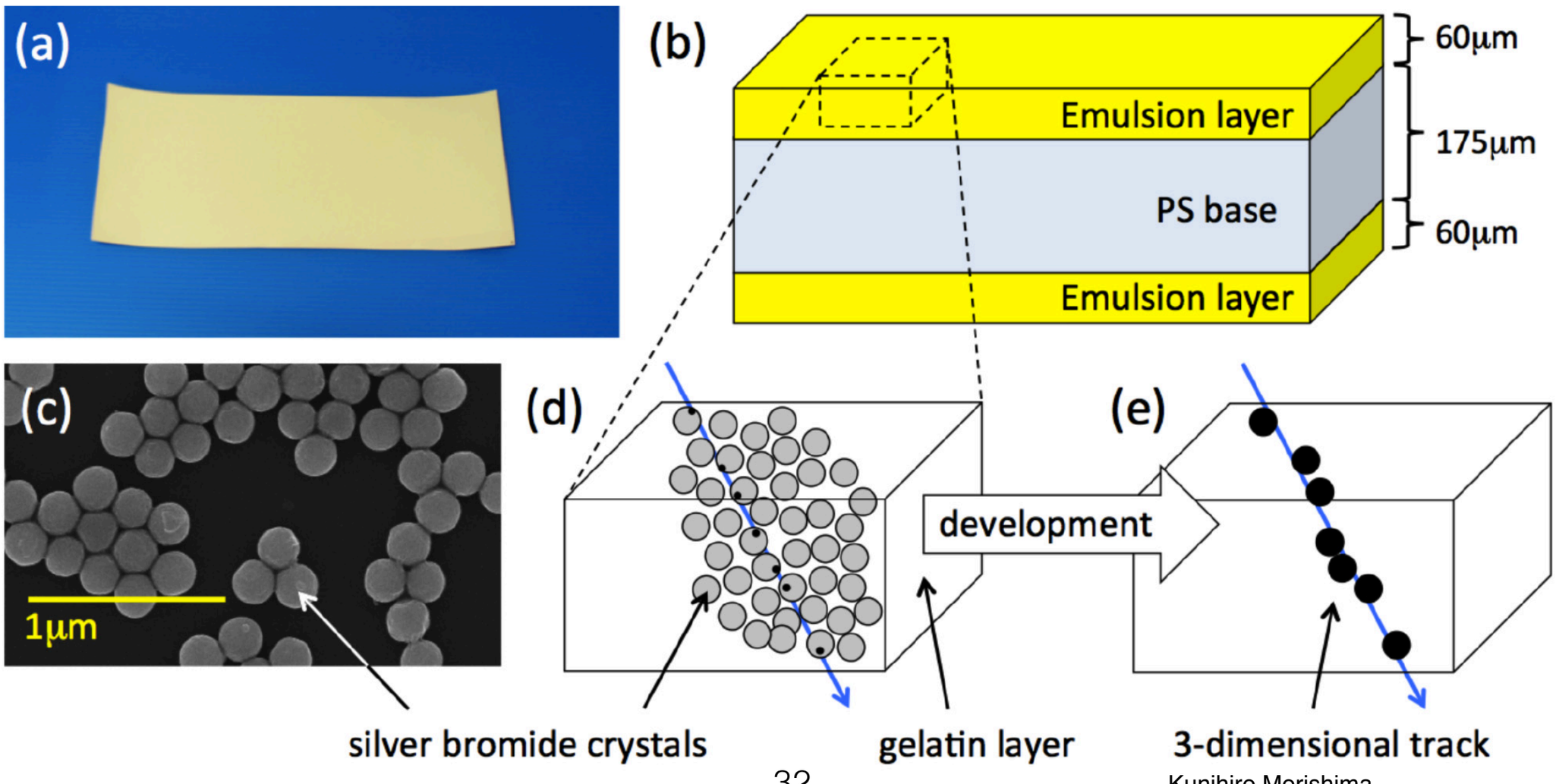
$$M_{\text{Einstein}} = N \exp[-t/\gamma t_0]$$

$$M_{\text{Newton}} = N \exp[-t/t_0]$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \ \beta = \frac{v}{c}$$

Em 1946 ficou demonstrado que os múons não são afetados pela força nuclear. Não poderiam ser a partícula de Yukawa, mas sim um "elétron mais pesado".

A "partícula de Yukawa" foi encontrada dali a pouco, graças a uma inovação tecnológica: emulsões fotográficas de grande resolução, desenvolvidas a partir do trabalho de Marietta Blau.

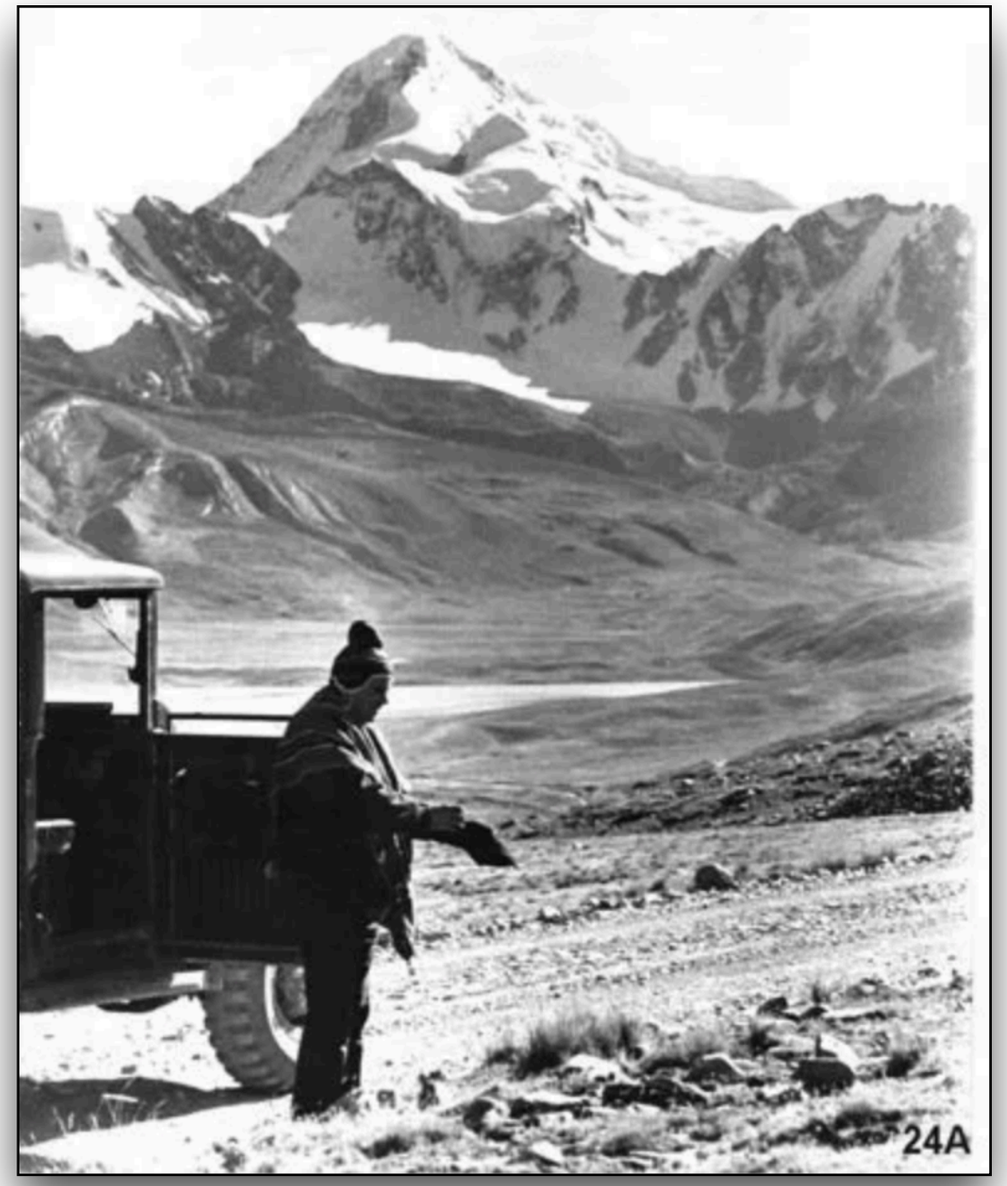


OBSERVATIONS ON THE TRACKS OF SLOW MESONS IN PHOTOGRAPHIC EMULSIONS*

By C. M. G. LATTES, Dr. G. P. S. OCCHIALINI and Dr. C. F. POWELL
H. H. Wills Physical Laboratory, University of Bristol

Em 1947, Lattes, Occhialini e Powell demonstraram a existência de dois "mesons" (partículas com massa intermediária entre o próton e o elétron).

A descoberta foi feita usando emulsões fotográficas expostas a raios cósmicos nos Alpes (Pic du Midi, 2800m) e nos Andes (Chacaltaya, 5500m).



$\pi \rightarrow \mu\nu$

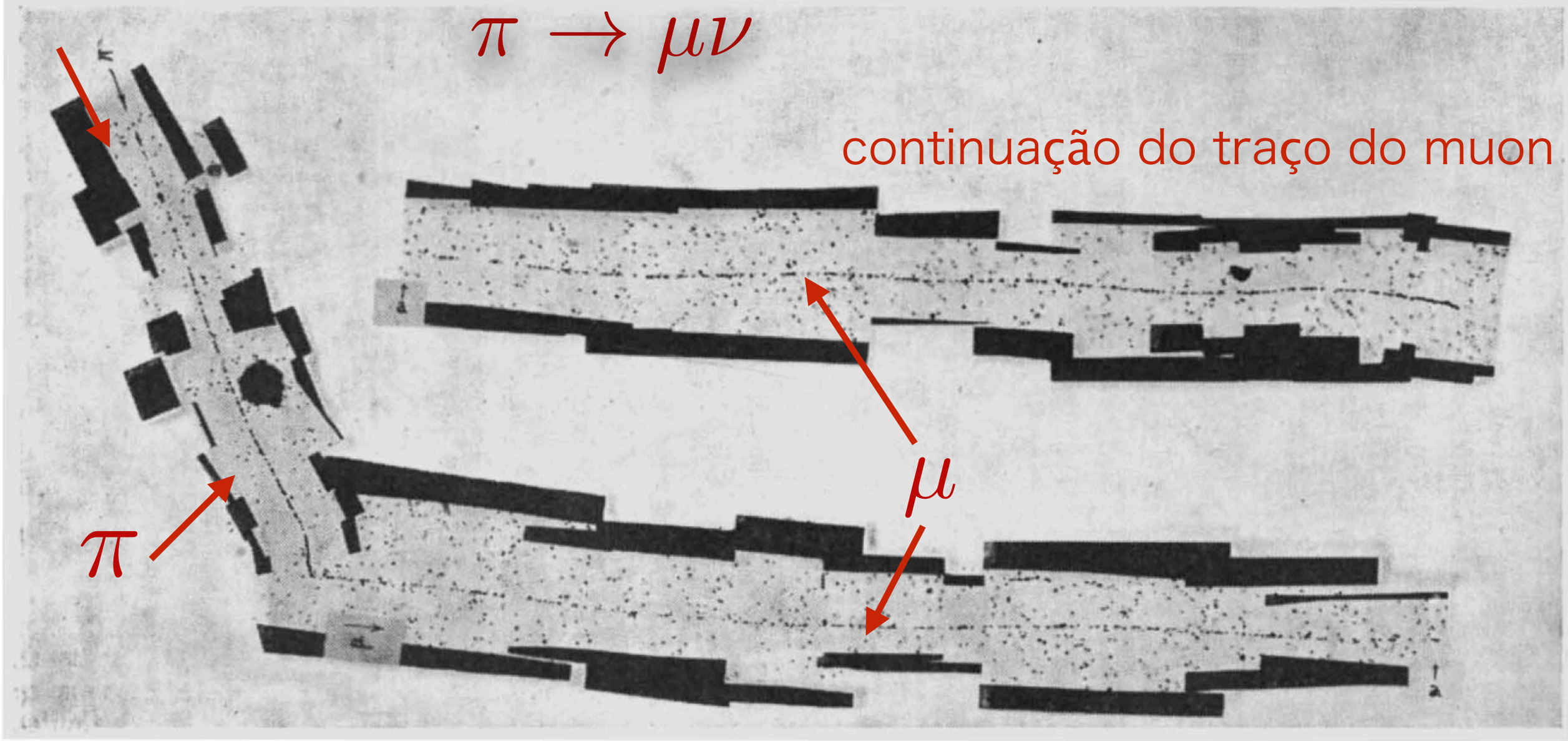


Fig. 2. COOKE × 95 ACHROMATIC OBJECTIVE. C2 ILFORD NUCLEAR RESEARCH EMULSION LOADED WITH BORON

© 1947 Nature Publishing Group

Os pions perdem energia ao atravessar a emulsão, até atingir o repouso. Alguns são absorvidos pelos núcleos atômicos, mas outros decaem em um outro "meson".

O alcance dos "mesons" secundários era aproximadamente constante, indicando que tinham a mesma massa e eram emitidos com a mesma velocidade.

A conservação do momentum requer a emissão de uma segunda partícula, neutra e de massa muito pequena.

Lattes batizou as partículas: "meson pi" e "meson mu". Hoje sabemos que os processos observados por Lattes são

$$\pi^- \to \mu^- \overline{\nu}_\mu \qquad \pi^+ \to \mu^+ \nu_\mu$$

Os pions são produzidos em colisões de raios cósmicos (prótons, na sua maioria) com núcleos da atmosfera.

Powell era o chefe do grupo e por isso ganhou sozinho o Nobel pela descoberta do pion.



Cesar Lattes e Eugene Gardner, em Berkeley, quando produziram pions em um acelerador pela primeira vez.



Partículas carregadas ao atravessarem emulsões fotográficas deixam traços micrométricos. As emulsões eram analisadas por equipes de microscopistas.

Walter Shützer

Ideki Yukawa

Cesar Lattes

Lattes, Tiomno e L. Lopes fundaram o CBPF em 1949.

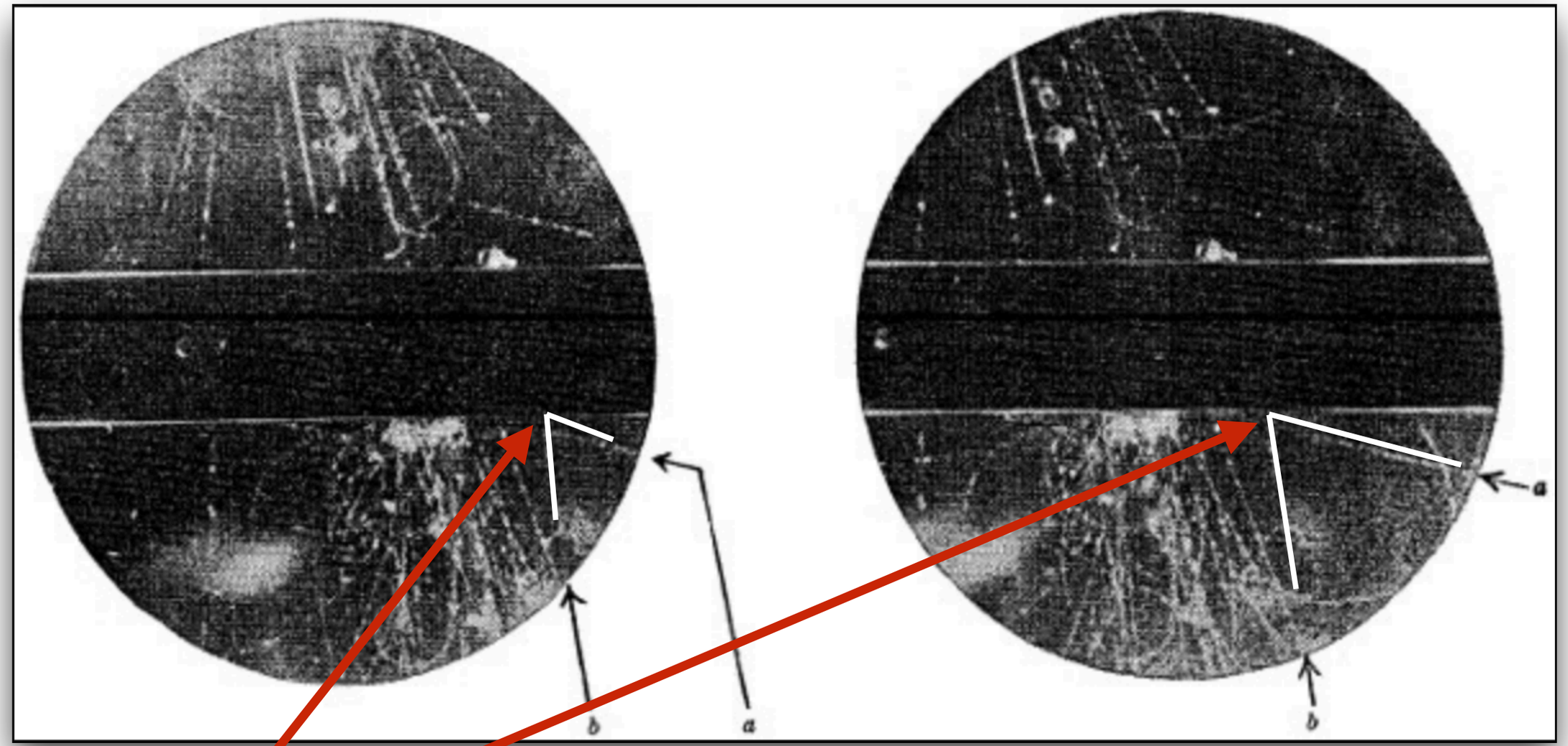


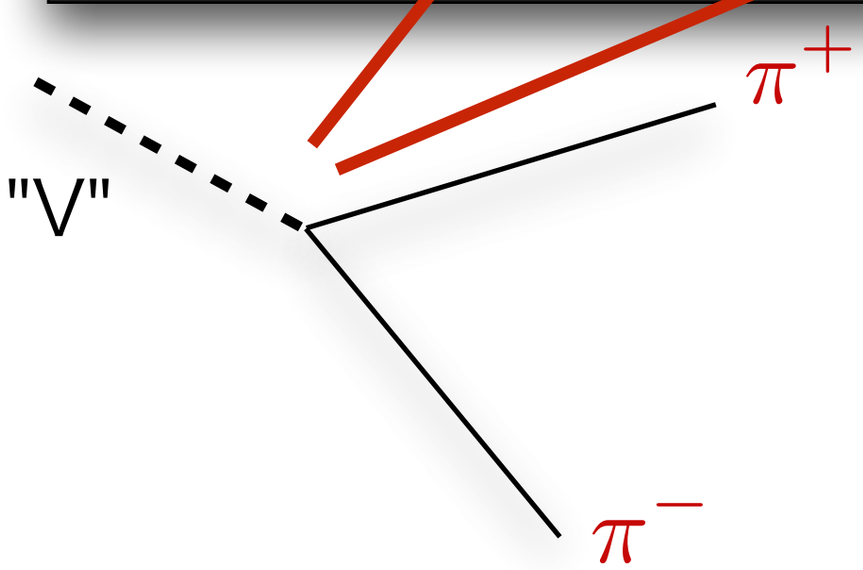
Hervásio de Carvalho

Jayme Tiomno

Jose Leite Lopes

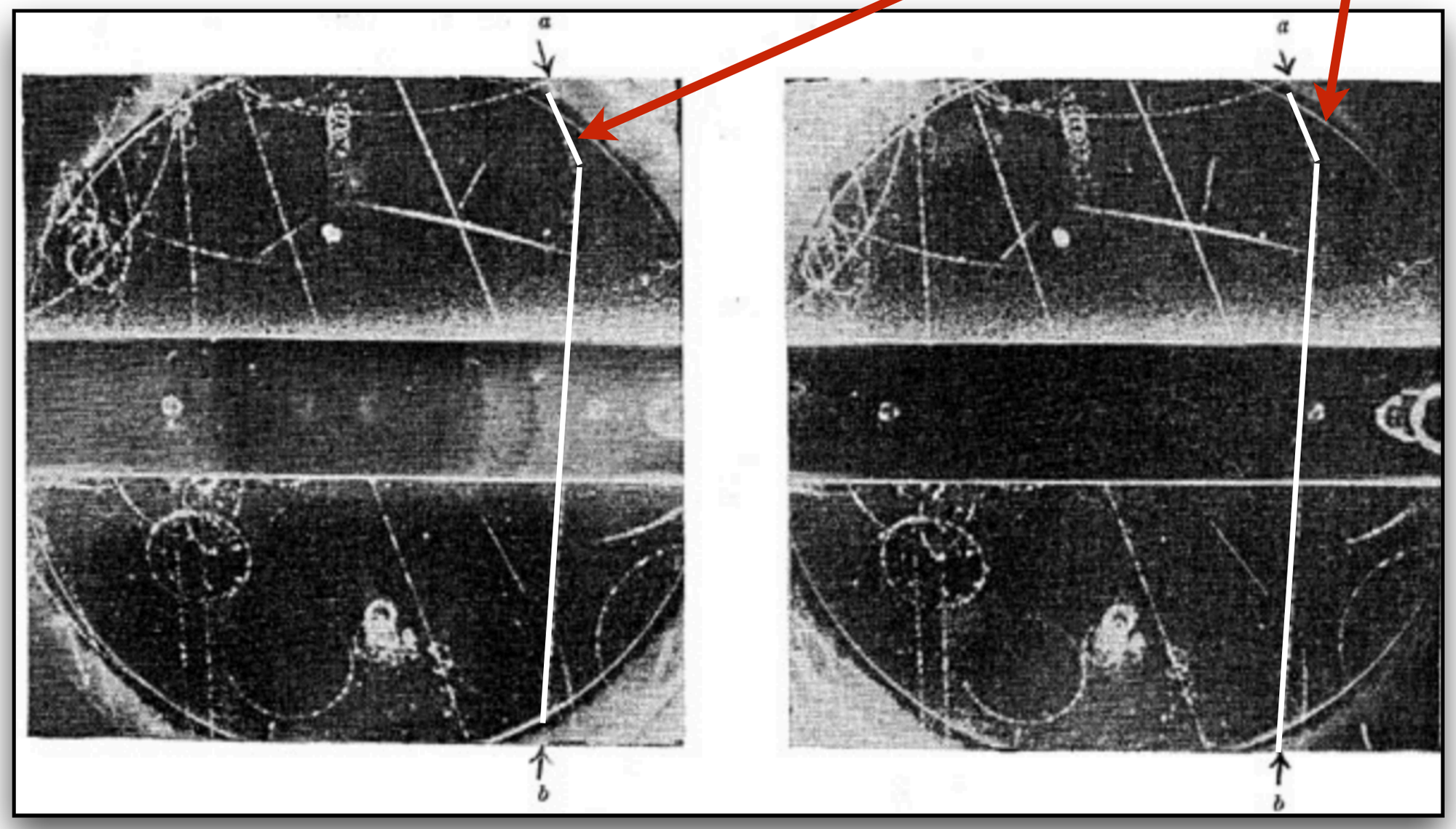
E eis que surgem as partículas estranhas!

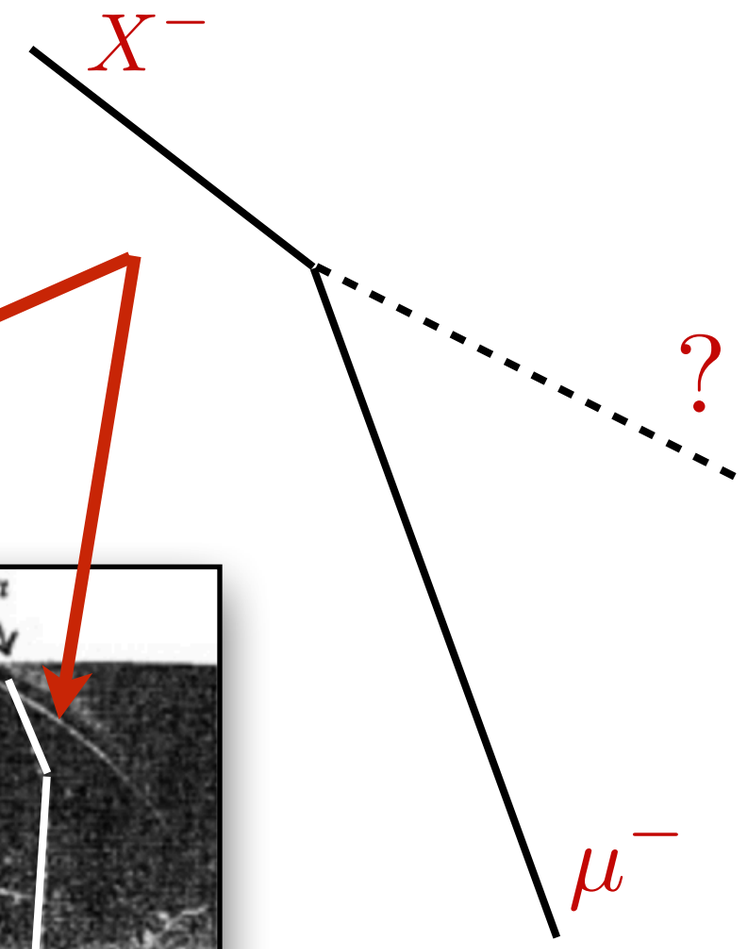




Em 1947, Butler e Rochester observaram o decaimento de uma partícula neutra, com uma vida média muito longa.

Em pouco tempo outras partículas "estranhas" foram descobertas. As fotos mostram decaimentos de partículas carregadas em um muon e uma partícula neutra.





A vida média das novas partículas era muito mais longa que a dos pions.

Hoje sabemos que os decaimentos observados são

$$K^0 \to \pi^+\pi^- \qquad\qquad K^- \to \mu^-\nu_\mu$$

Os decaimentos ocorrem por interação fraca,
a produção ocorre por interação forte.

Os kaons foram as últimas partículas descobertas com uso de raios cósmicos. A partir daí, entram em cena novos atores: os aceleradores de partícula.

A descoberta das partículas estranhas causou grande impacto.

Como encaixá-las num modelo geral?

A era moderna

A partir dos anos 1950, os aceleradores substituíram
os raios cósmicos como fonte de partículas energéticas:

Brookhaven, Berkeley, CERN.

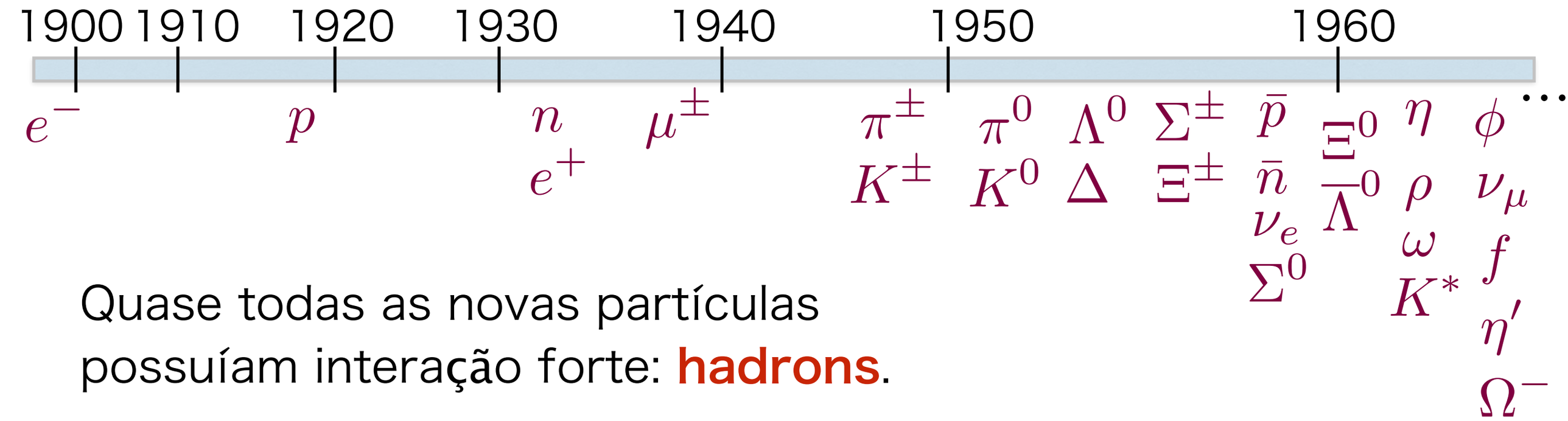
https://cas.web.cern.ch/sites/cas.web.cern.../tazzari-history.pdf

Aceleradores lineares e circulares, produzindo feixes de prótons,
elétrons e pósitrons, com energia e fluxo controlados.

O uso dos aceleradores causou uma explosão
do número de partículas elementares.

O modelo a quarks

No início da década de 1960 havia, entre mesons e barions, mais de cem partículas "elementares".



Quase todas as novas partículas possuíam interação forte: **hadrons**.

Um número tão grande de partículas sugeria a existência de estruturas mais fundamentais.

Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram, em 1964, um esquema para classificação dos hadrons baseado na ideia de "**quarks**", estranhos fermions com carga fracionária.

Mesons são estados ligados de um quark e um antiquark, agrupados em multipletos de acordo com o spin, paridade, conjugação de carga e número quântico de "sabor".

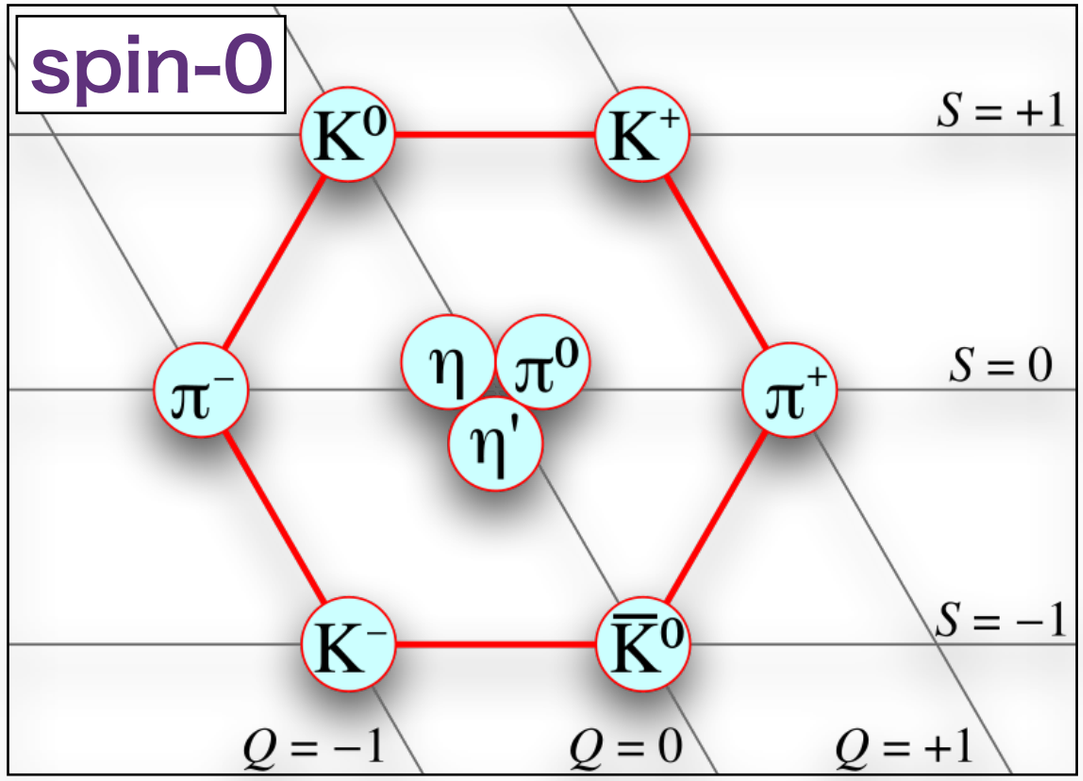
O esquema original foi composto com três tipos ("sabores") de quarks:

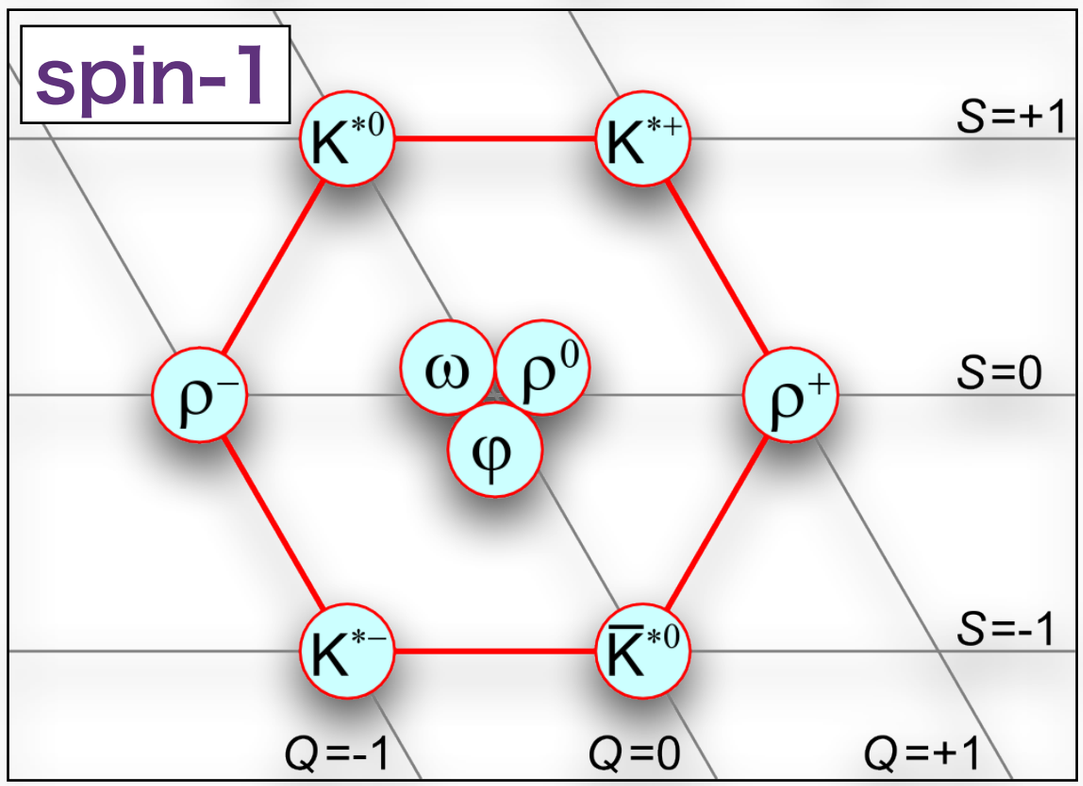
$$u\ (q = +2/3\ e)$$

$$d,\ s\ (q = -1/3\ e)$$

$\pi^{\pm},\ K^{\pm},\ K^{0}$ decaem por interação fraca e têm vida média longa.

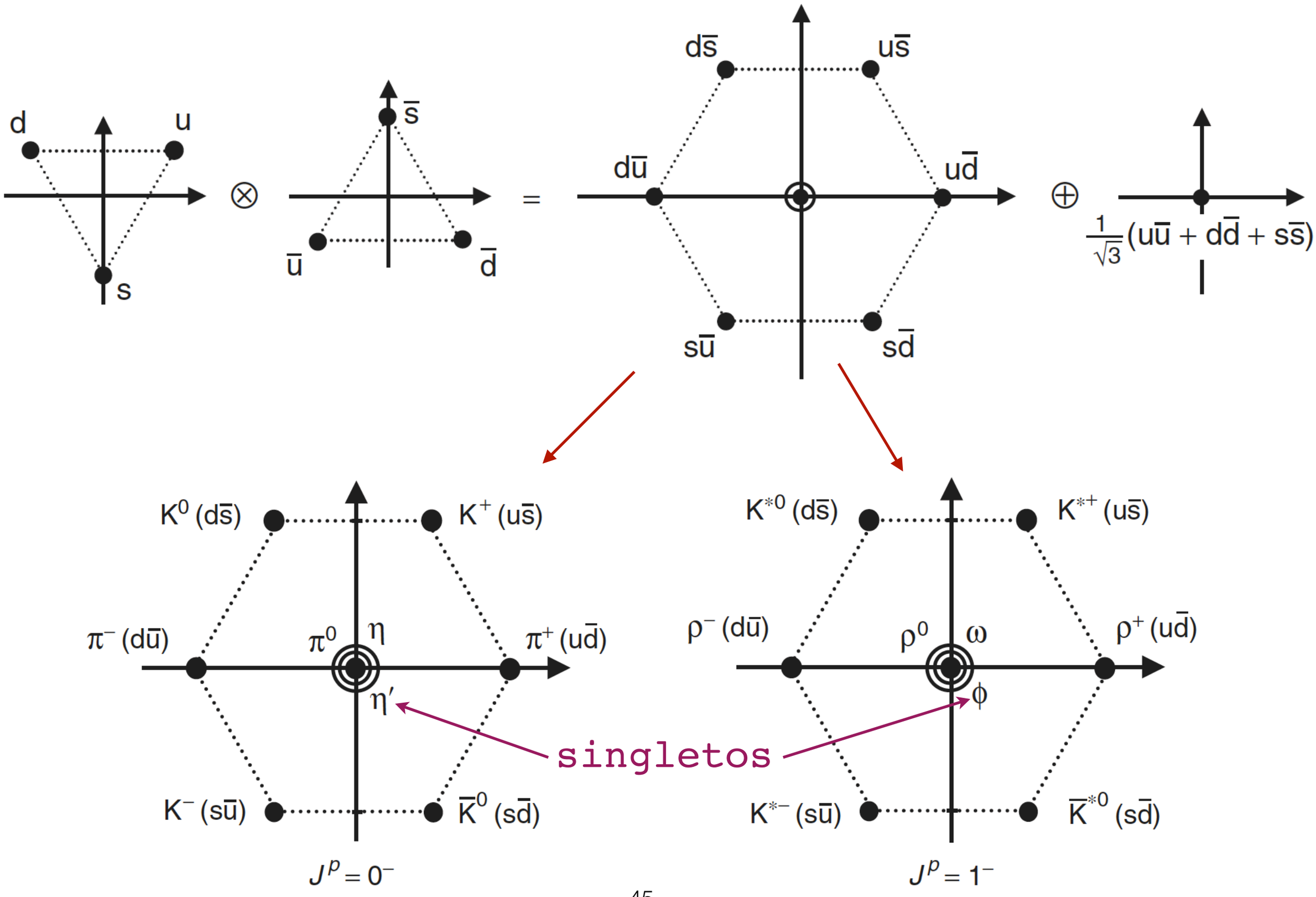
$\pi^{0},\ \eta,\ \eta'$ decaem por interação EM e têm vida média curta.





Ressonâncias: decaem por interação forte, vida média inobservável.

O modelo a quarks é baseado na Teoria de Grupos.

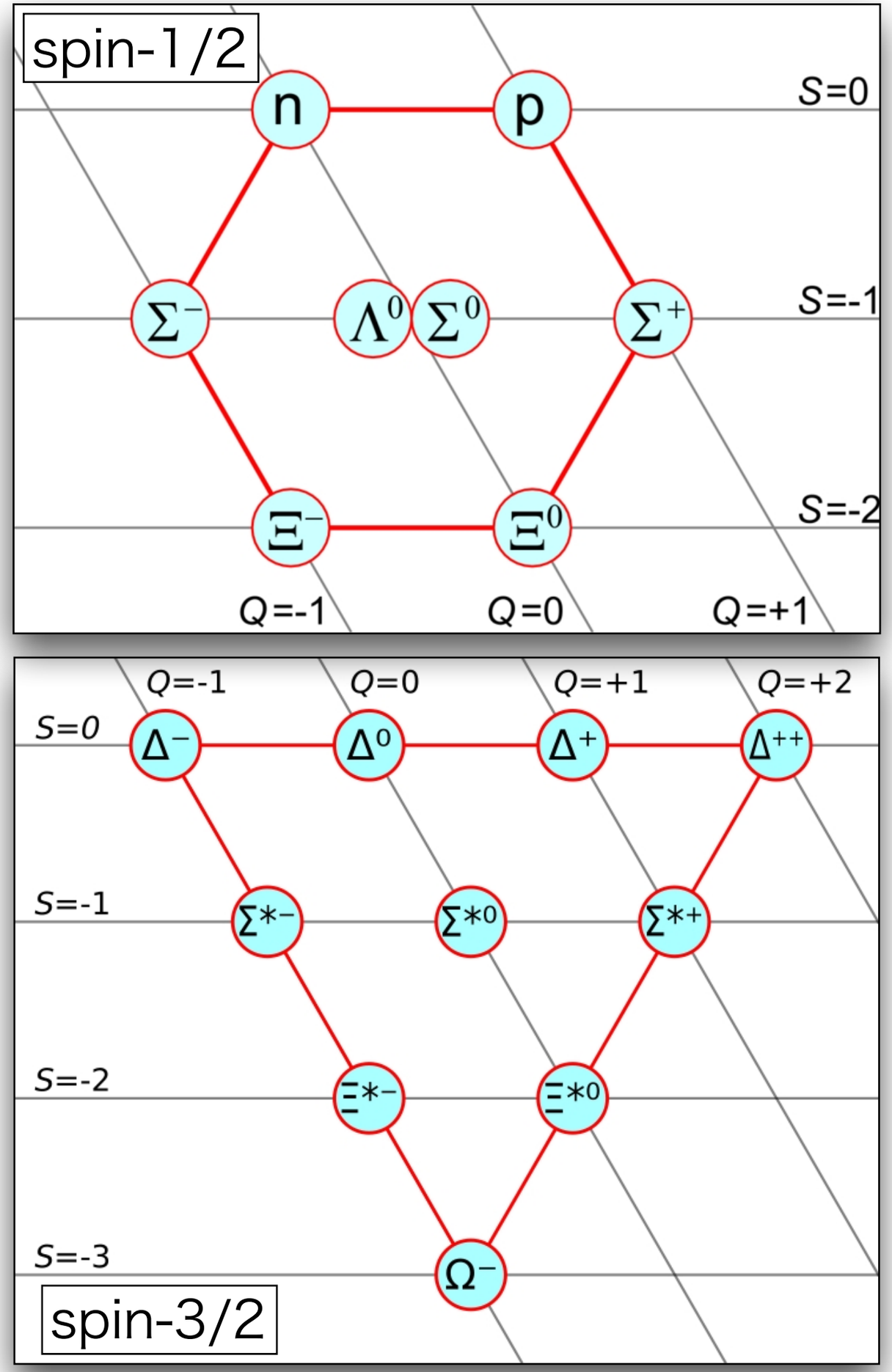


Barions são estados ligados de três quarks.

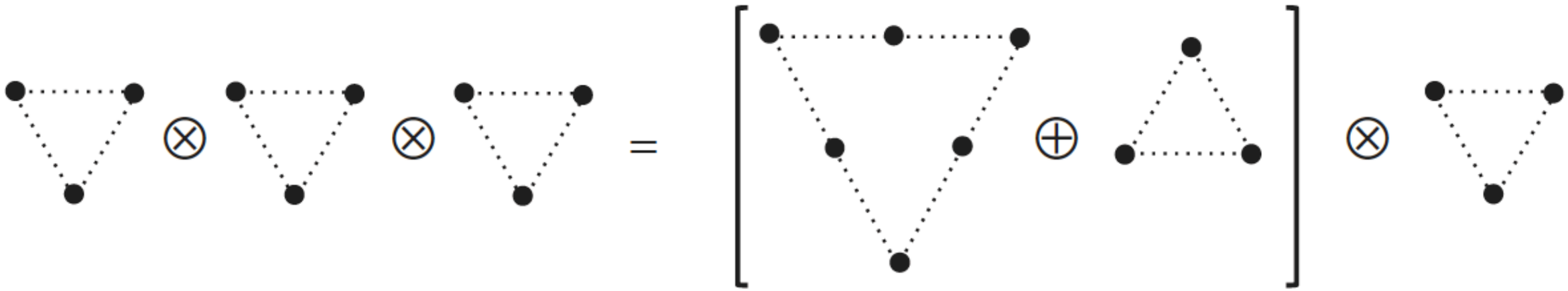
Um problema: o barion Δ^{++}, de spin 3/2 (u↑u↑u↑), violaria o princípio de exclusão de Pauli.

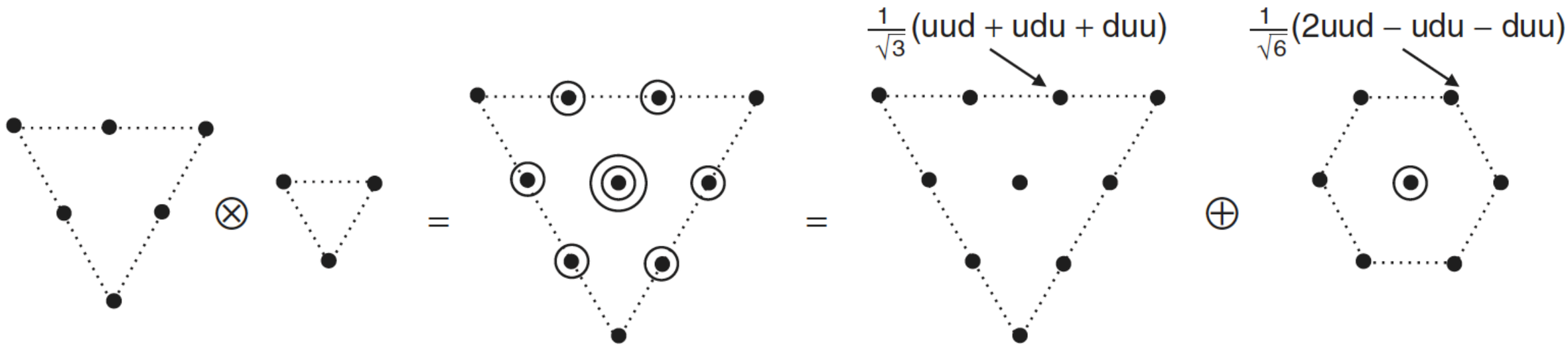
M. Han e Y. Nambu postularam a existência de uma carga de "cor" como a fonte da força forte. Cada quark poderia ter três cores distintas.

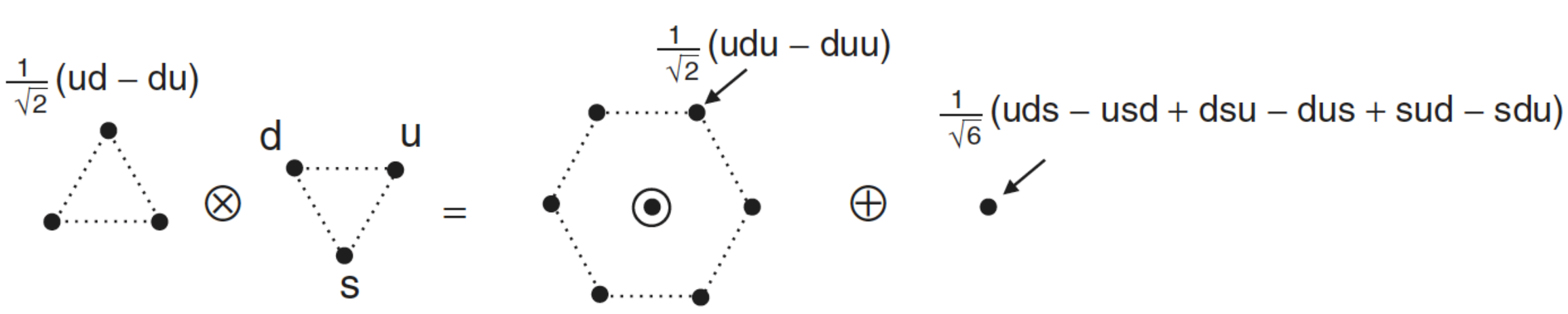
Um triunfo: o barion Ω^- foi previsto um ano antes de ser observado.



O espectro dos barions é muito mais rico:







1964: o Brasil mergulhava nas trevas, mas a Física tinha um ano luminoso.

- A descoberta da radiação cósmica de fundo

- A descoberta da violação da simetria combinada paridade-conjugação de carga (CP, operação que transforma partícula na sua antipartícula):

matéria e antimatéria não têm exatamente as mesmas propriedades!

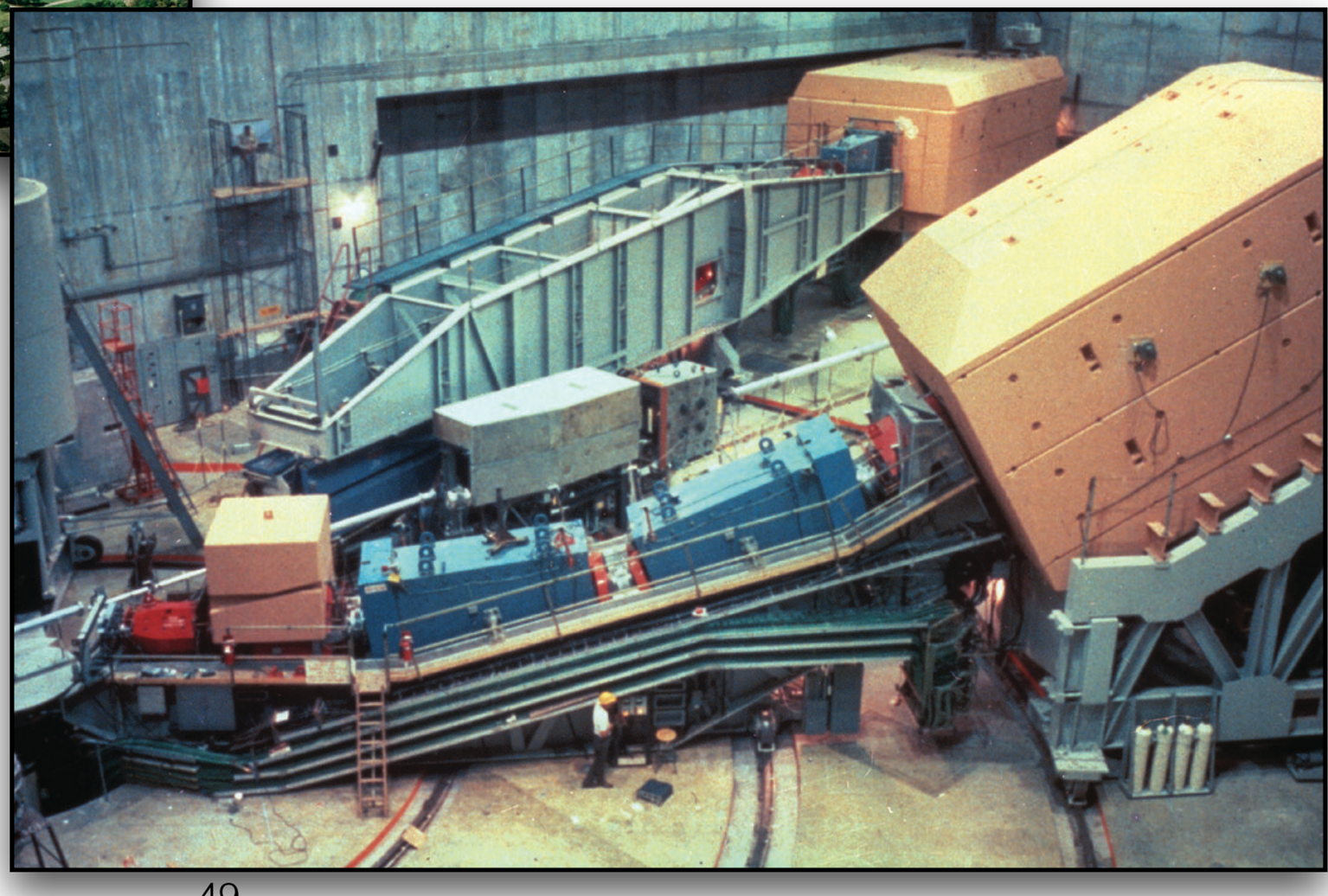
No mesmo ano, Gell-Mann, Iliopoulos e Maiani propuseram a existência do quark charm (c) para explicar a não observação do decaimento de kaons neutros em 2 muons.

Apesar do sucesso do esquema de classificação, não havia nenhuma evidência de que os quarks fossem partículas reais.

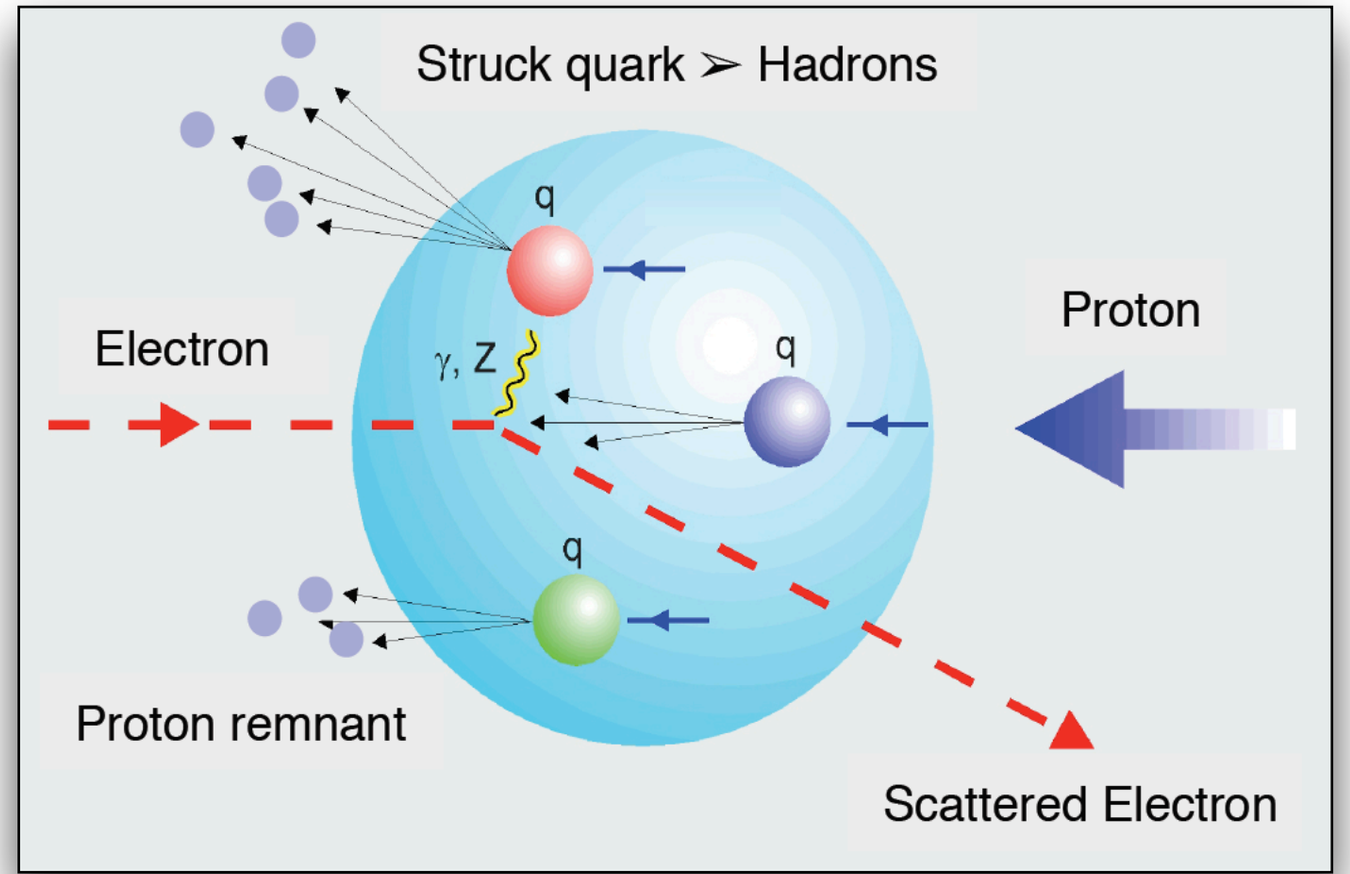


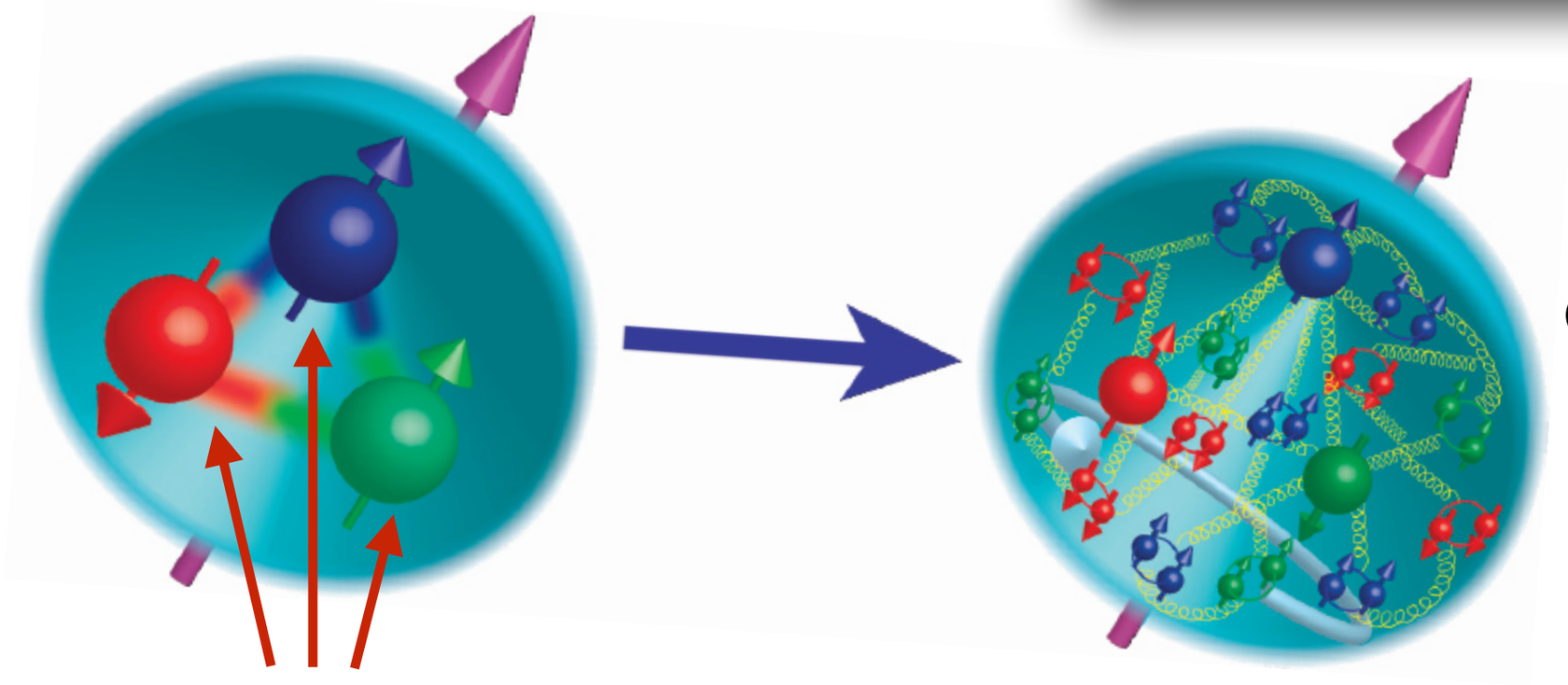
Em 1968, no SLAC (EUA), surgiram as primeiras evidências diretas da existência dos quarks.

Uma versão moderna do experimento de Rutherford: elétrons incidindo sobre prótons em vez de alfas em ouro.



Elétrons com alta energia têm pequeno comprimento de onda: poder de resolução para revelar a estrutura interna do próton.





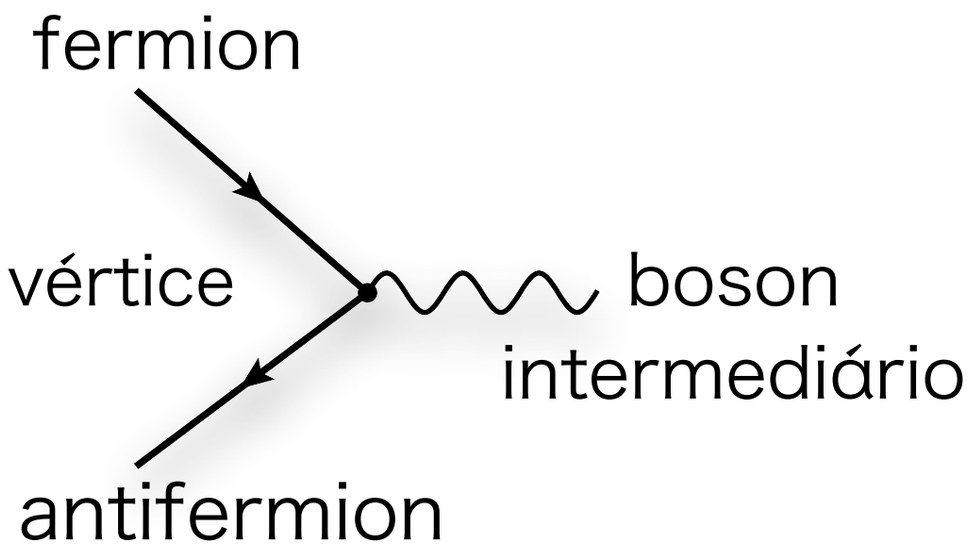
quarks de valência

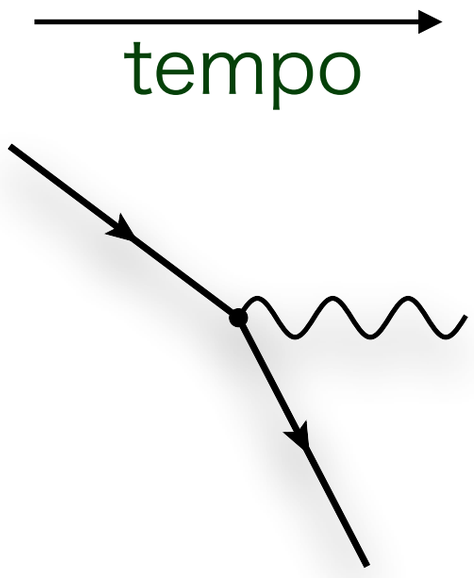
A estrutura interna do próton, como a de outros hadrons, é bastante complexa.

Interlúdio: diagramas de Feynman

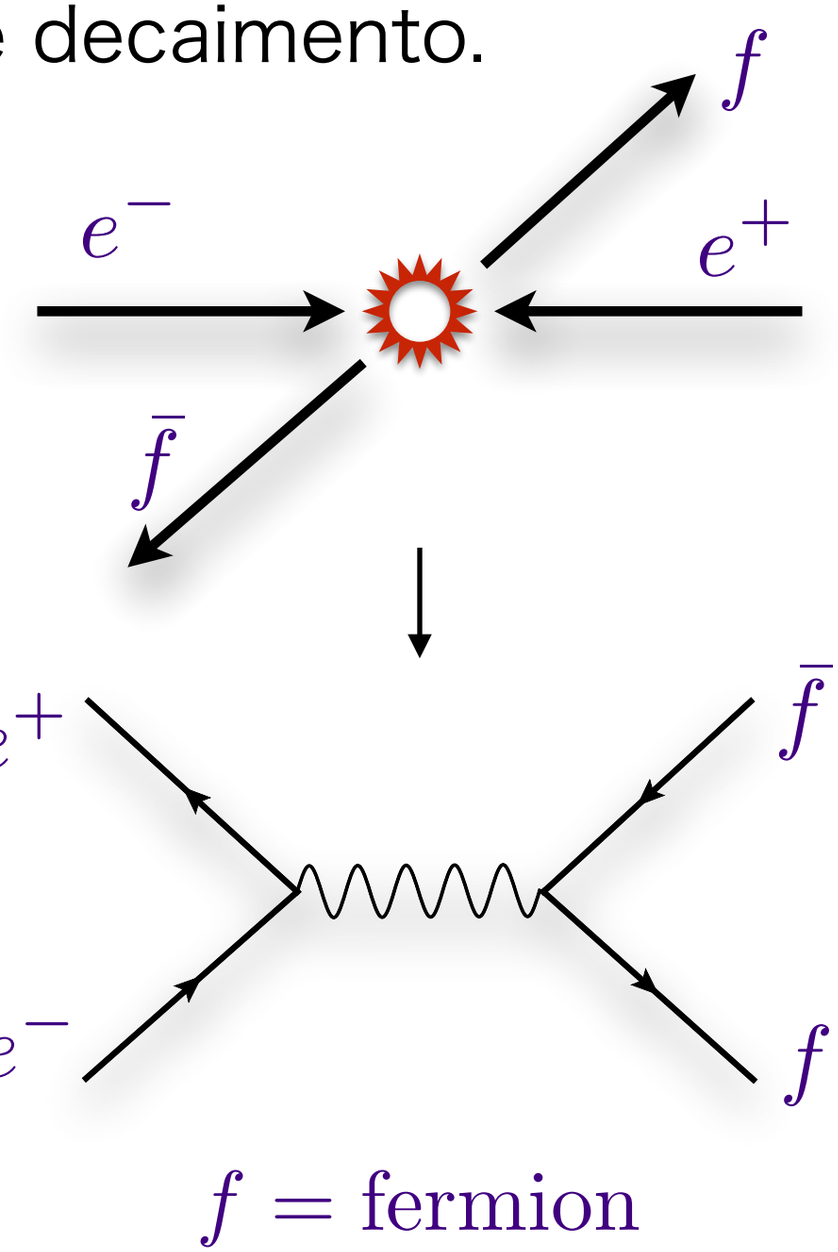
Os diagramas de Feynman representam os processos fundamentais envolvendo partículas elementares.

Regras bem definidas permitem calcular amplitudes de espalhamento e decaimento.





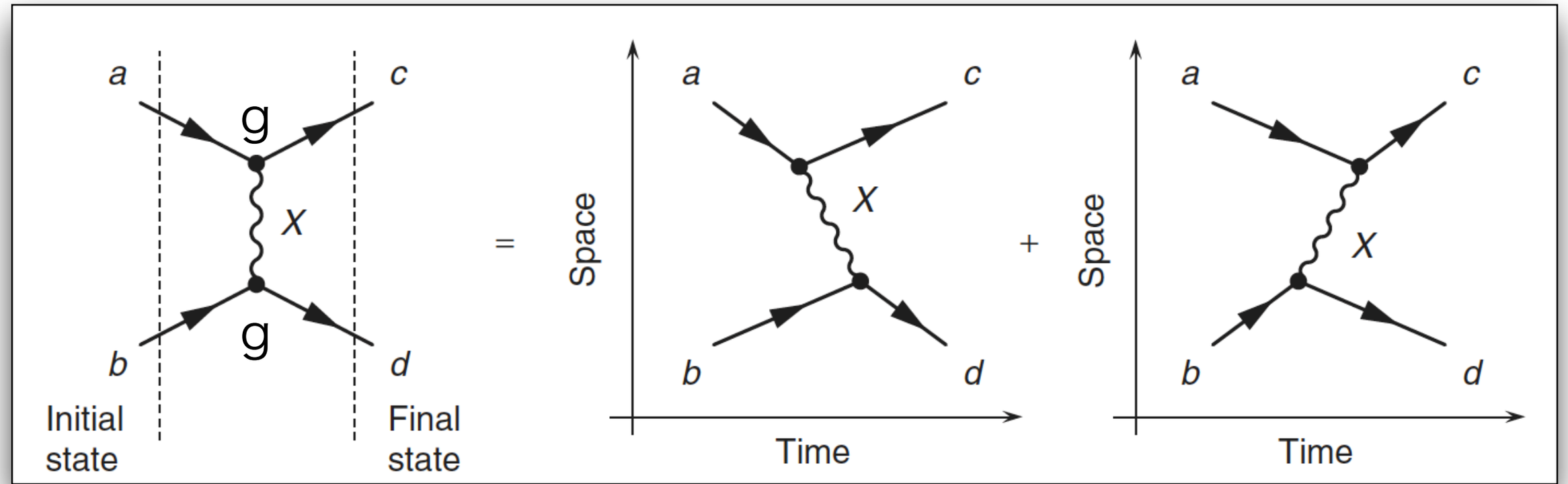
A colisão se transforma em decaimento



$f = \text{fermion}$

Diagramas de Feynman

Representação do espalhamento $a + b \rightarrow c + d$



Mark Thomson, Modern Particle Physics

Em cada vértice (aXc ou bXd) a intensidade da interação é **g** (constante de acoplamento).

A probabilidade de ocorrer o espalhamento é proporcional ao quadrado da amplitude:

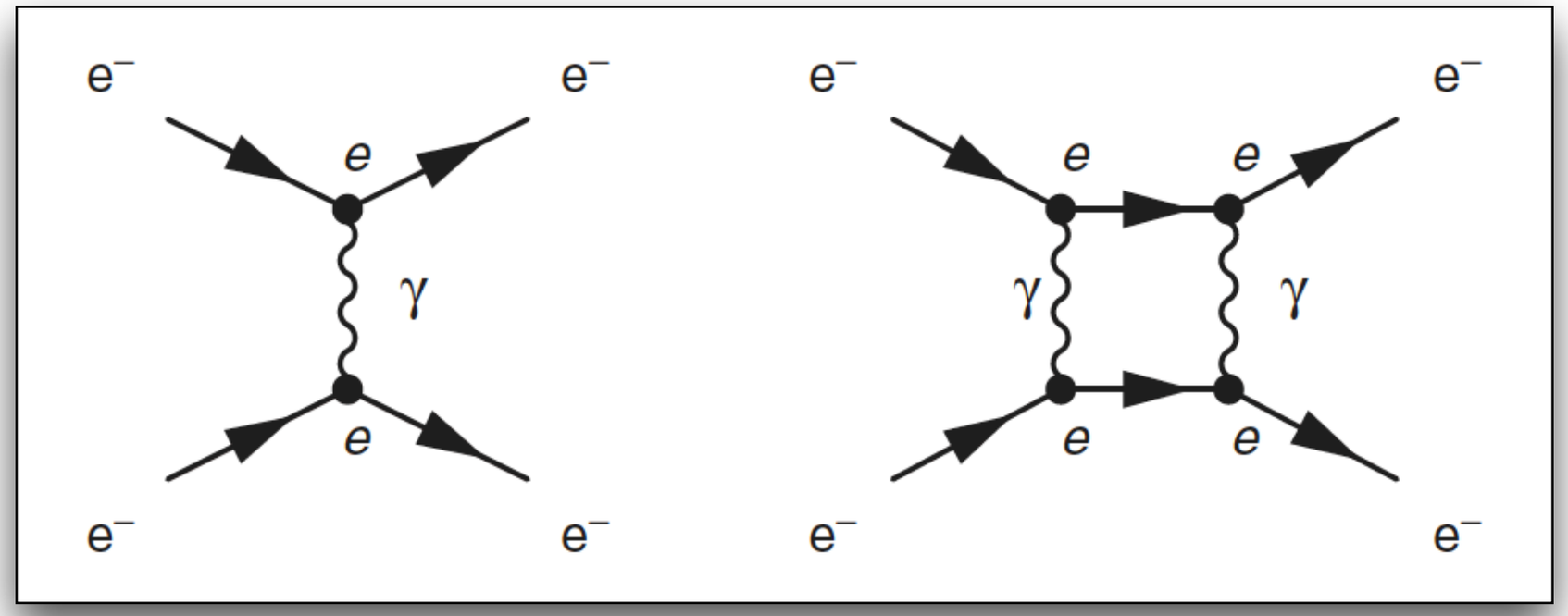
$$\mathcal{A} \propto g^2 \quad \longrightarrow \quad P \propto |\mathcal{A}|^2 \propto g^4$$

Na eletrodinâmica, a constante de estrutura fina é usada como medida da intensidade da interação:

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137} \qquad \alpha^{-1} = 137.035\ 999\ 084(21)$$

Espalhamento $e^-e^- \to e^-e^-$

$$g_{\rm EM} = e, \quad \alpha \propto e^2$$



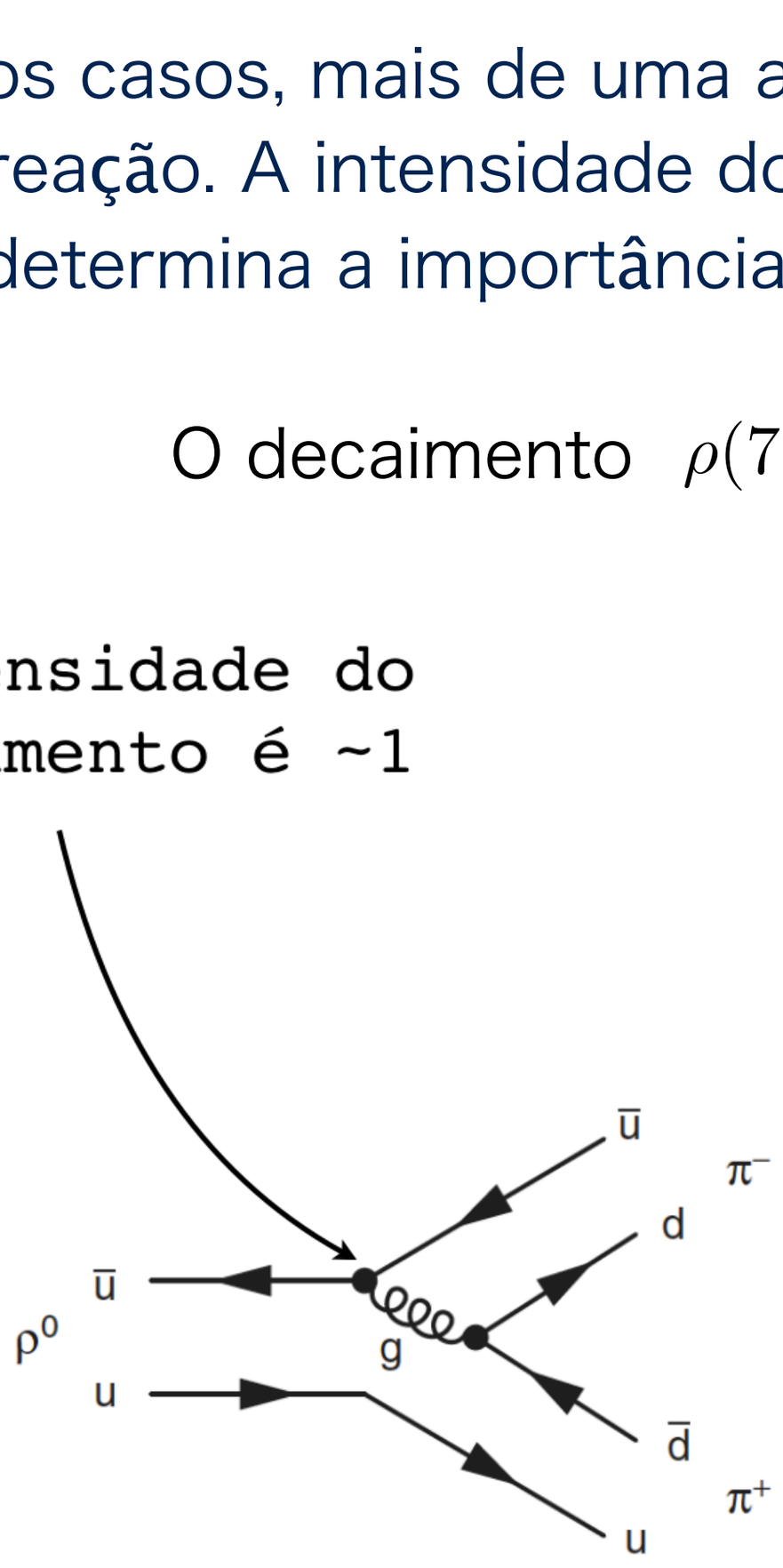
$$|\mathcal{A}|^2 \propto \alpha^2 \qquad |\mathcal{A}|^2 \propto \alpha^4$$

$$P(e^-e^- \to e^-e^-) \propto \mathcal{O}(\alpha^2) + \mathcal{O}(\alpha^4) + \mathcal{O}(\alpha^6) + ...$$

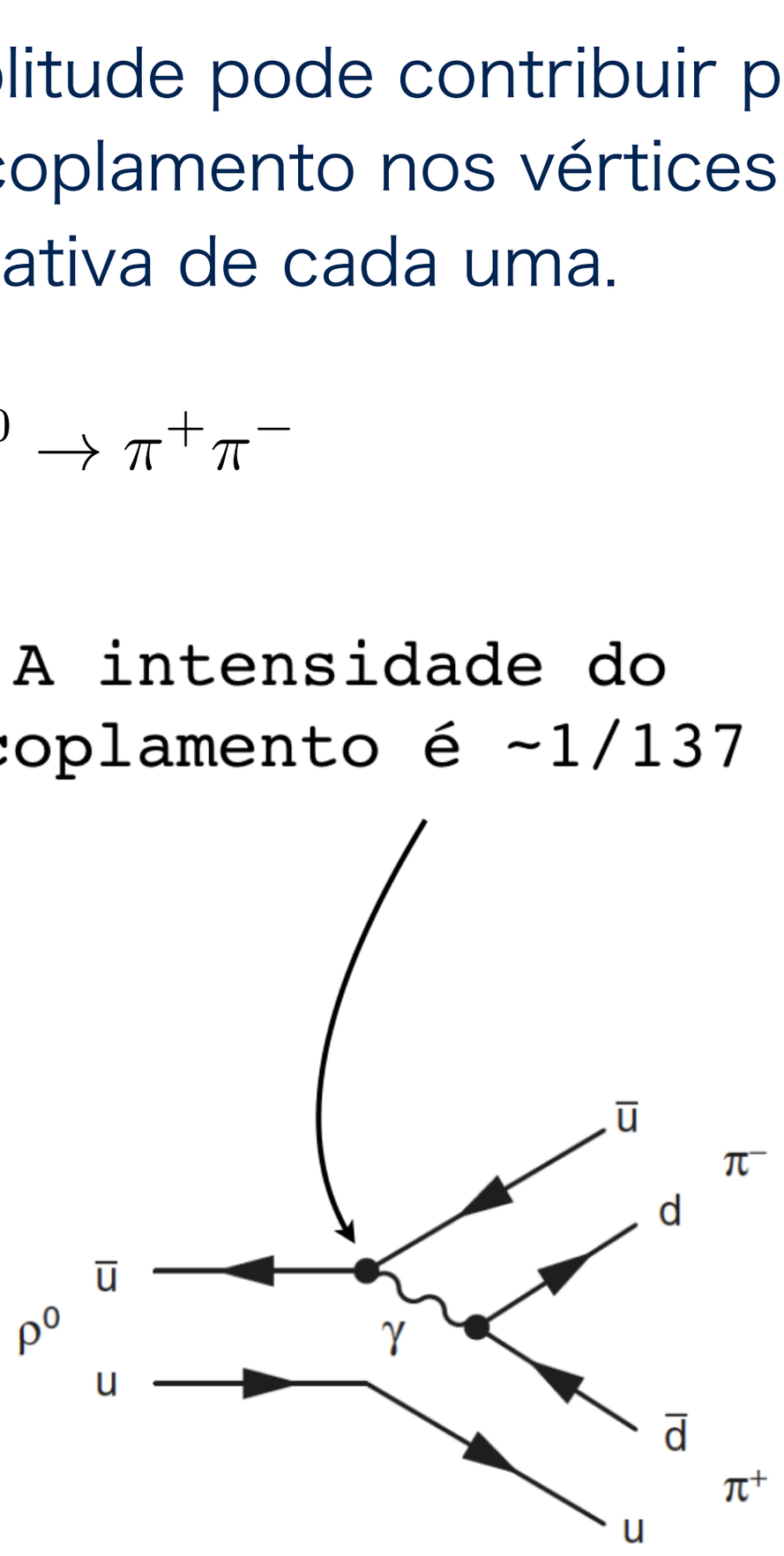
Em muitos casos, mais de uma amplitude pode contribuir para uma reação. A intensidade do acoplamento nos vértices determina a importância relativa de cada uma.

O decaimento $\rho(770)^0 \to \pi^+\pi^-$

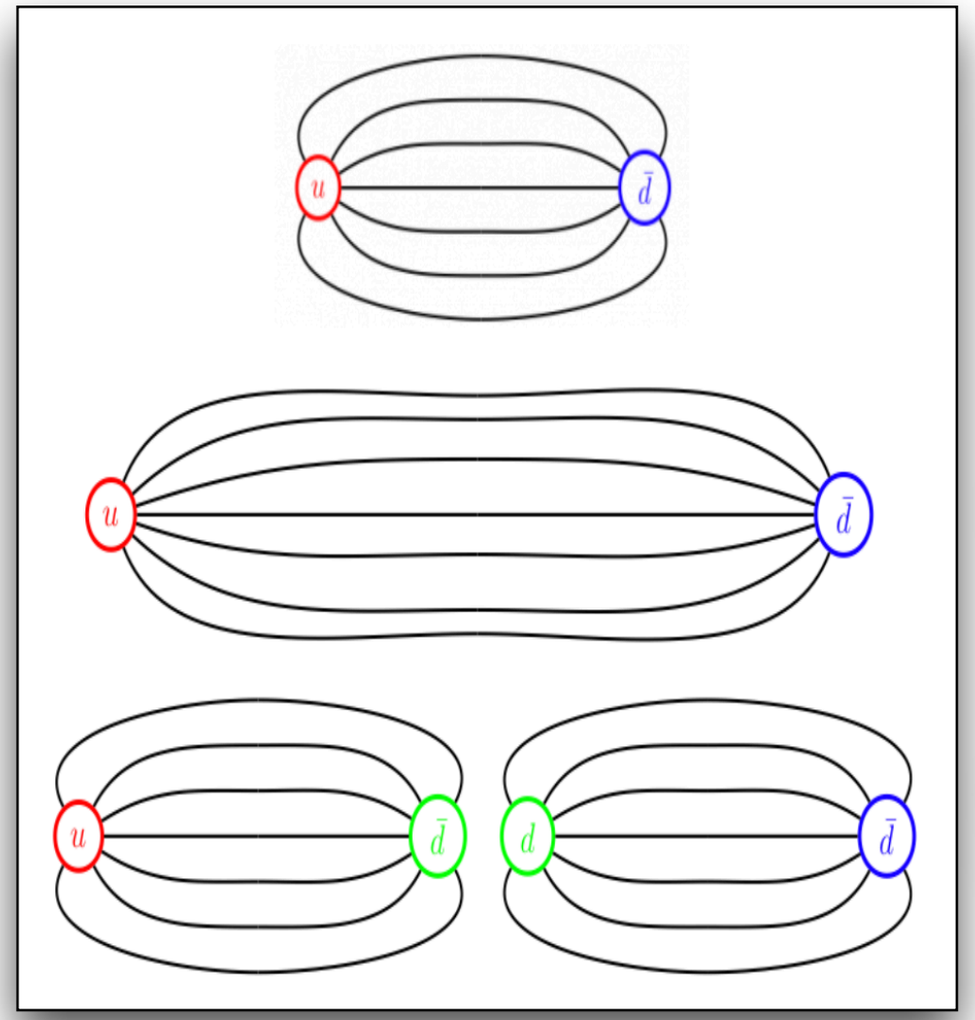
A intensidade do acoplamento é ~1



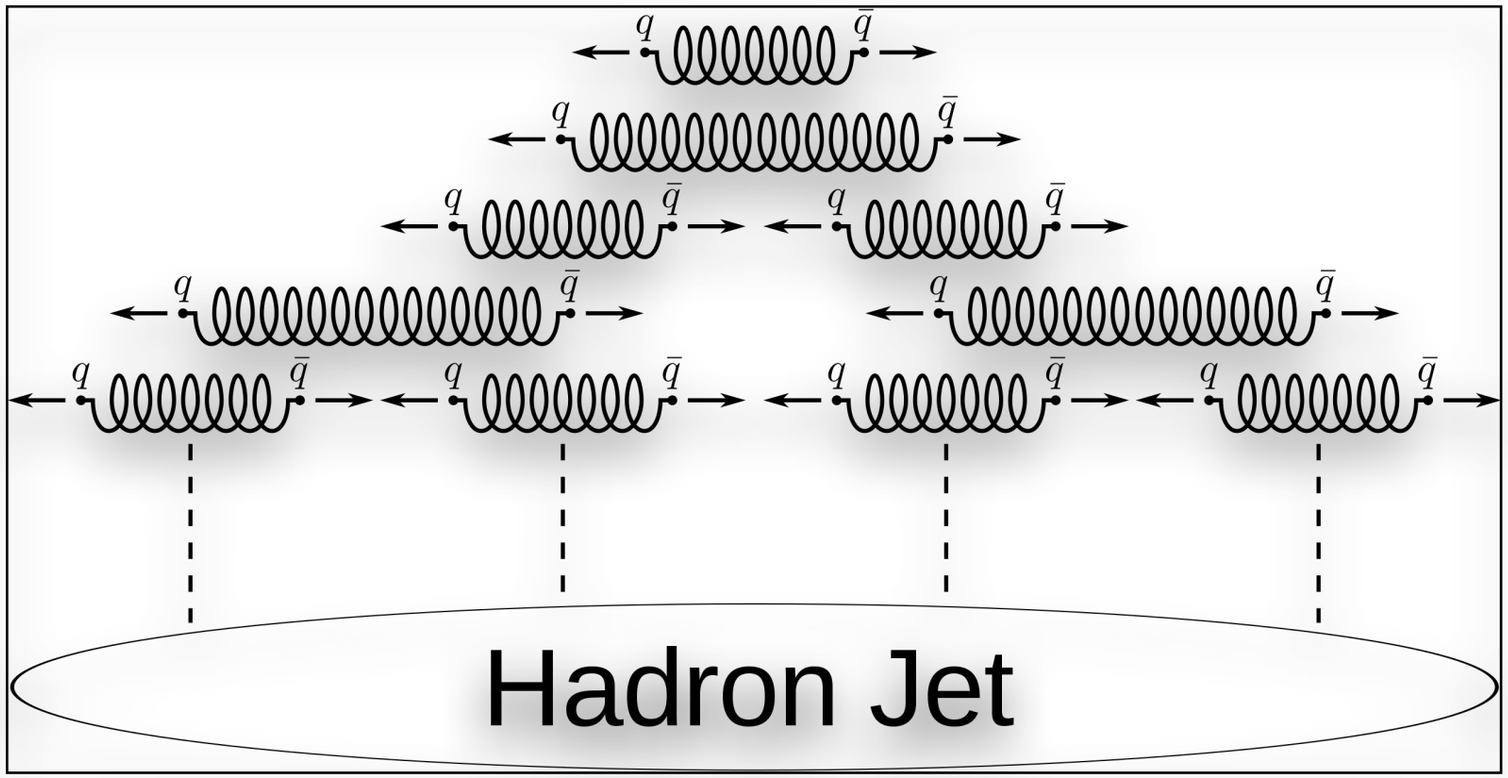
A intensidade do acoplamento é ~1/137



Quarks não podem ser observados isoladamente. Ao se afastarem, forma-se um "tubo de cor" entre eles. Quando a distância aumenta, o "tubo de cor" se rompe, originando um novo par quark-antiquark.



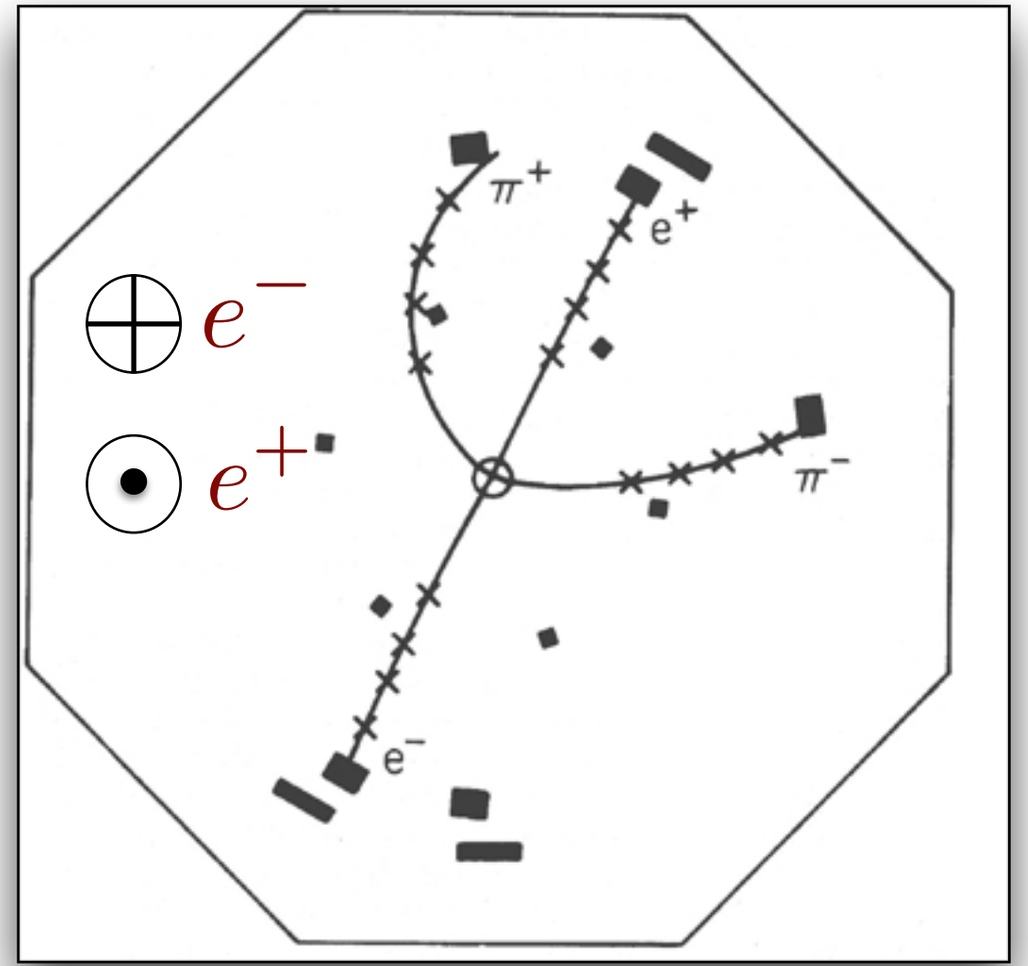
Um "tubo de cor" se forma entre os novos pares quark-antiquark, até que não haja energia suficiente para novas quebras. Formam-se então "jatos" de hadrons que são observados no laboratório.

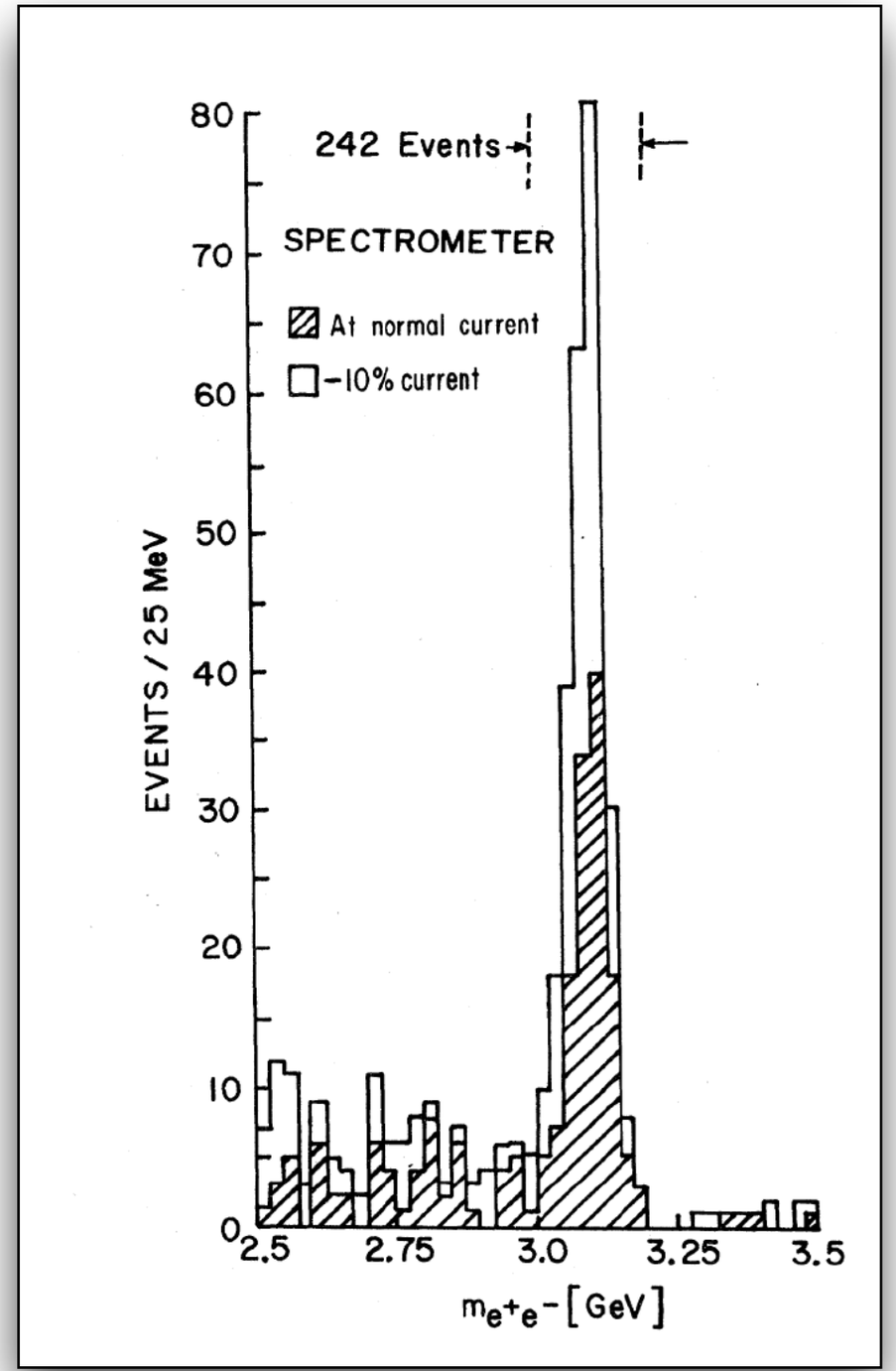


Mais uma comprovação da existência dos quarks: a descoberta do quark *charm* (1974), simultaneamente em Stanford e em Brookhaven.

$$e^+e^- \to c\bar{c}$$

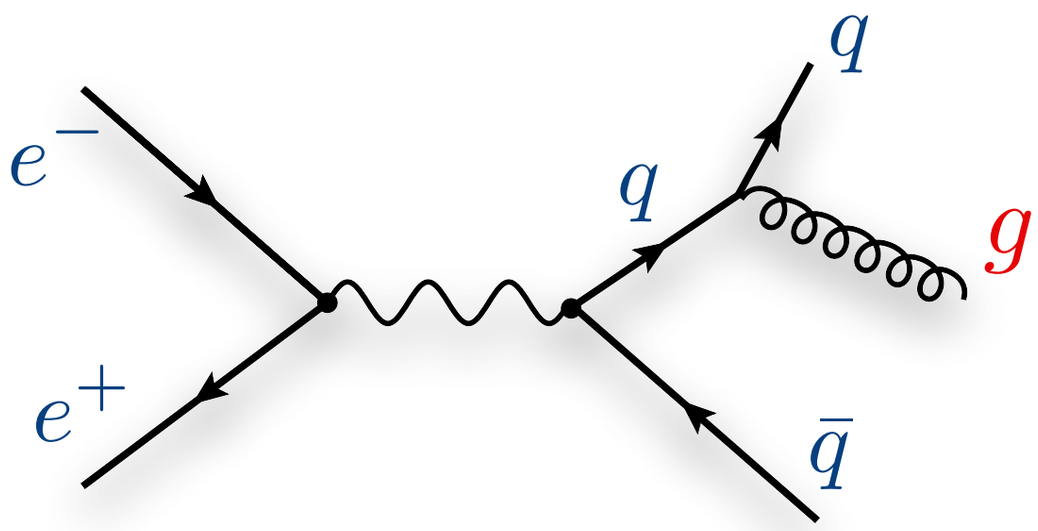
Uma imagem famosa:



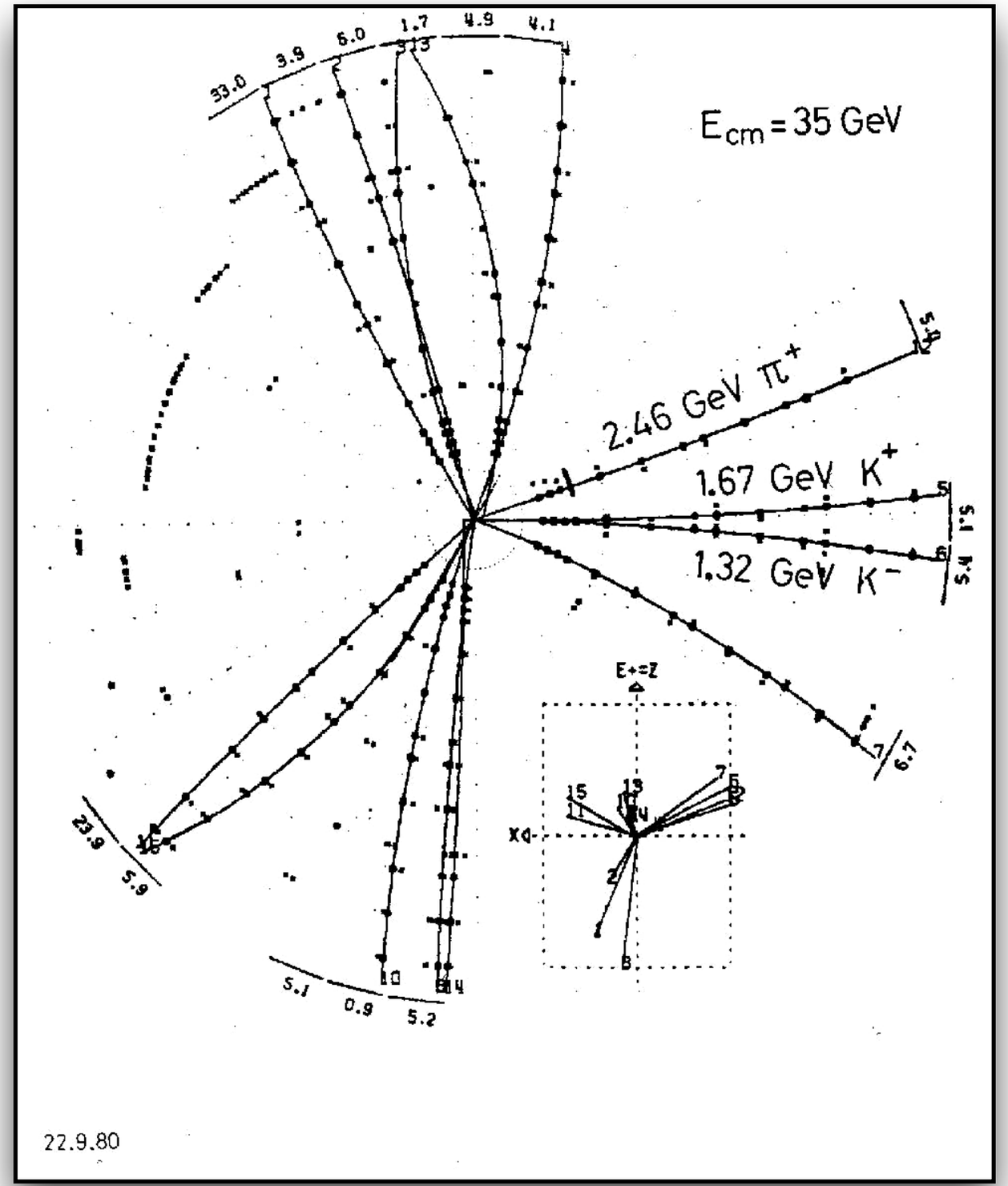


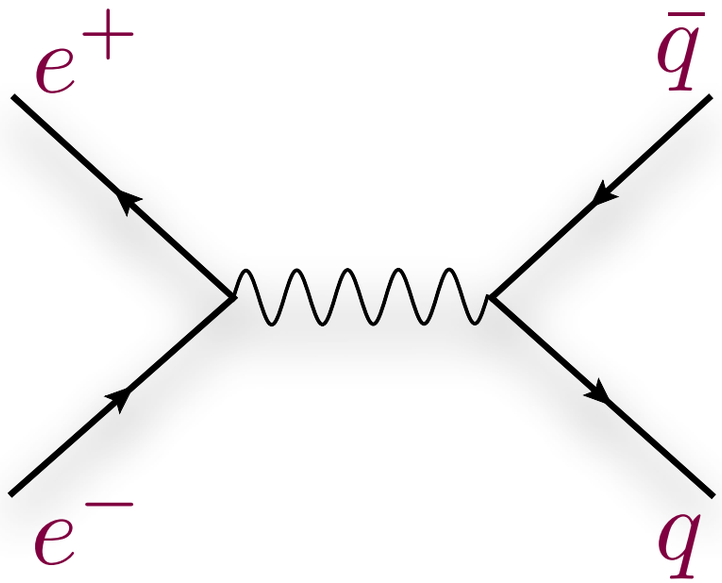
$$\psi' \to \psi\pi^+\pi^-, \quad \psi \to e^+e^-$$

A evidência experimental da existência dos gluons foi obtida em 1979, no laboratório DESY, na Alemanha.



Um gluon é irradiado por um dos quarks produzidos, dando origem a três jatos de hadrons.





Aniquilação elétron-pósitron, originando um par quark-antiquark.

A seção de choque de produção de dois fermions pode ser calculada de forma exata:

$$\sigma(E) = \frac{\pi}{3}\left(\frac{Q\alpha}{E}\right)^2 \sqrt{\frac{1-(M_q/E)^2}{1-(m_e/E)^2}}\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{m_q}{E}\right)^2\right]\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{m_e}{E}\right)^2\right]$$

$$\sigma(E) \approx \frac{\pi}{3}\left(\frac{Q\alpha}{E}\right)^2$$ para valores de energia distantes do limiar ($E_{\min} > 2\ m_q$).

A produção de hadrons é estudada através da razão

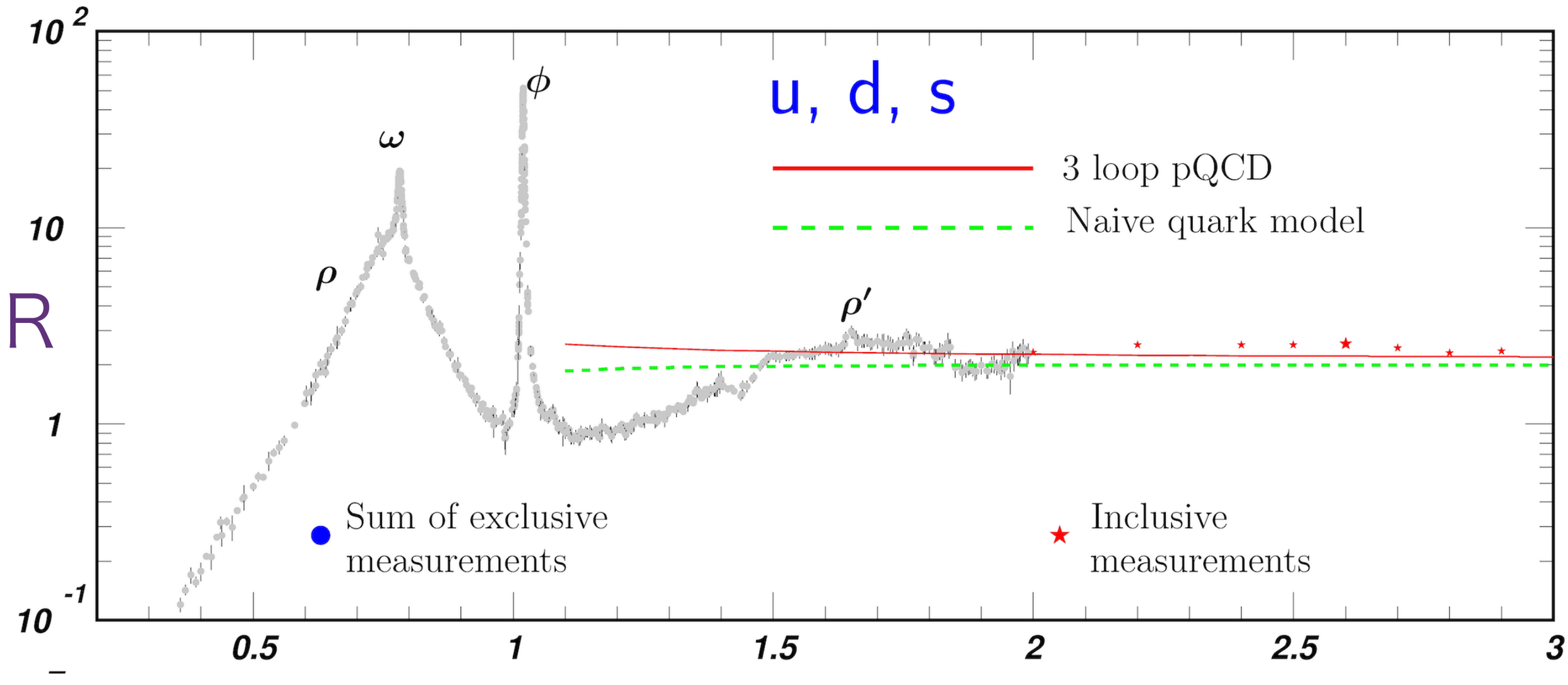
$$R(E) \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)}$$

O numerador contém a contribuição de todos os quarks, nas 3 cores:

$$R(E) = 3\sum Q_i$$

$$E < 2m_c$$

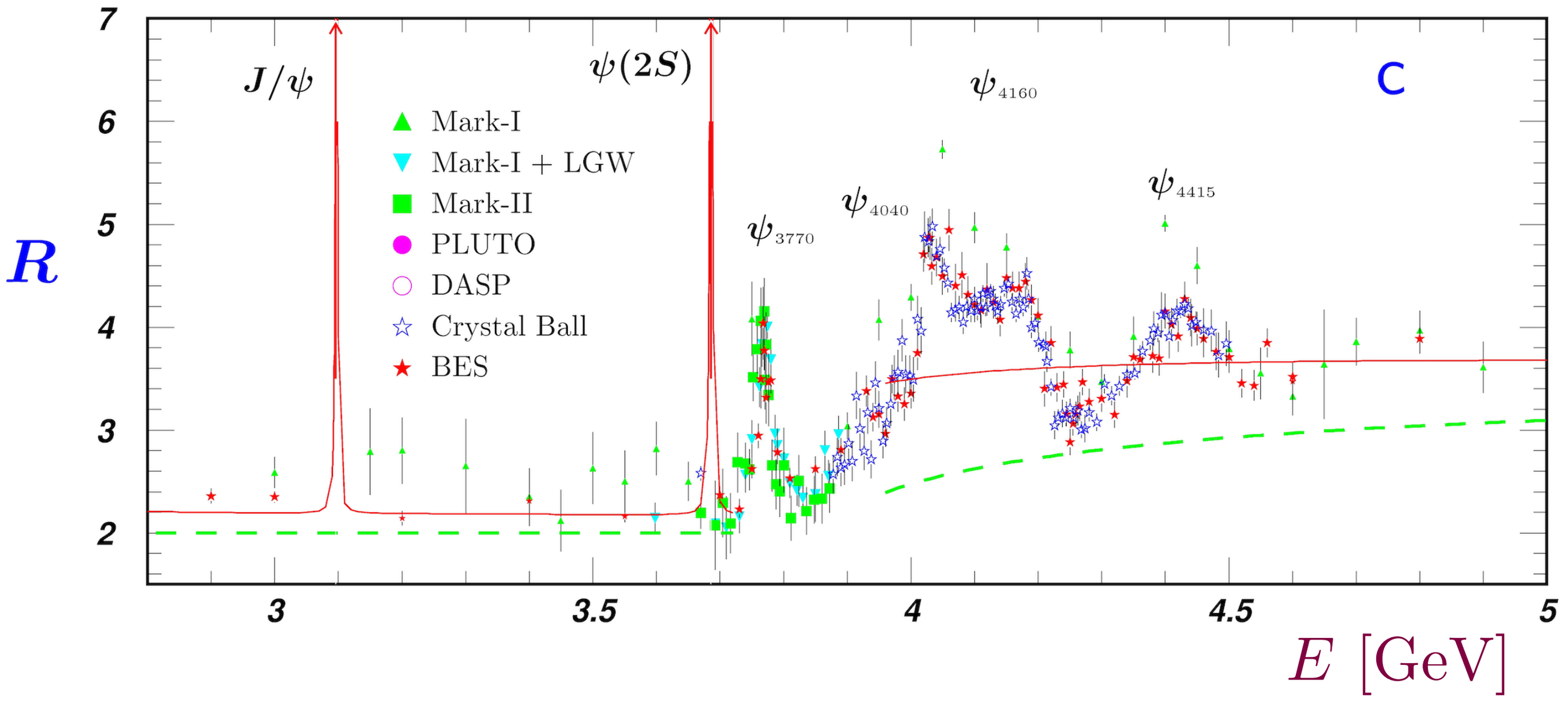
$$R(E) = 3\left[\underbrace{\left(\frac{2}{3}\right)^2}_{\text{u}} + \underbrace{\left(\frac{1}{3}\right)^2}_{\text{d}} + \underbrace{\left(\frac{1}{3}\right)^2}_{\text{s}}\right] = 2$$



$$2m_c < E < 2m_b$$

$$R(E) = 3\left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2\right] = 3.33$$

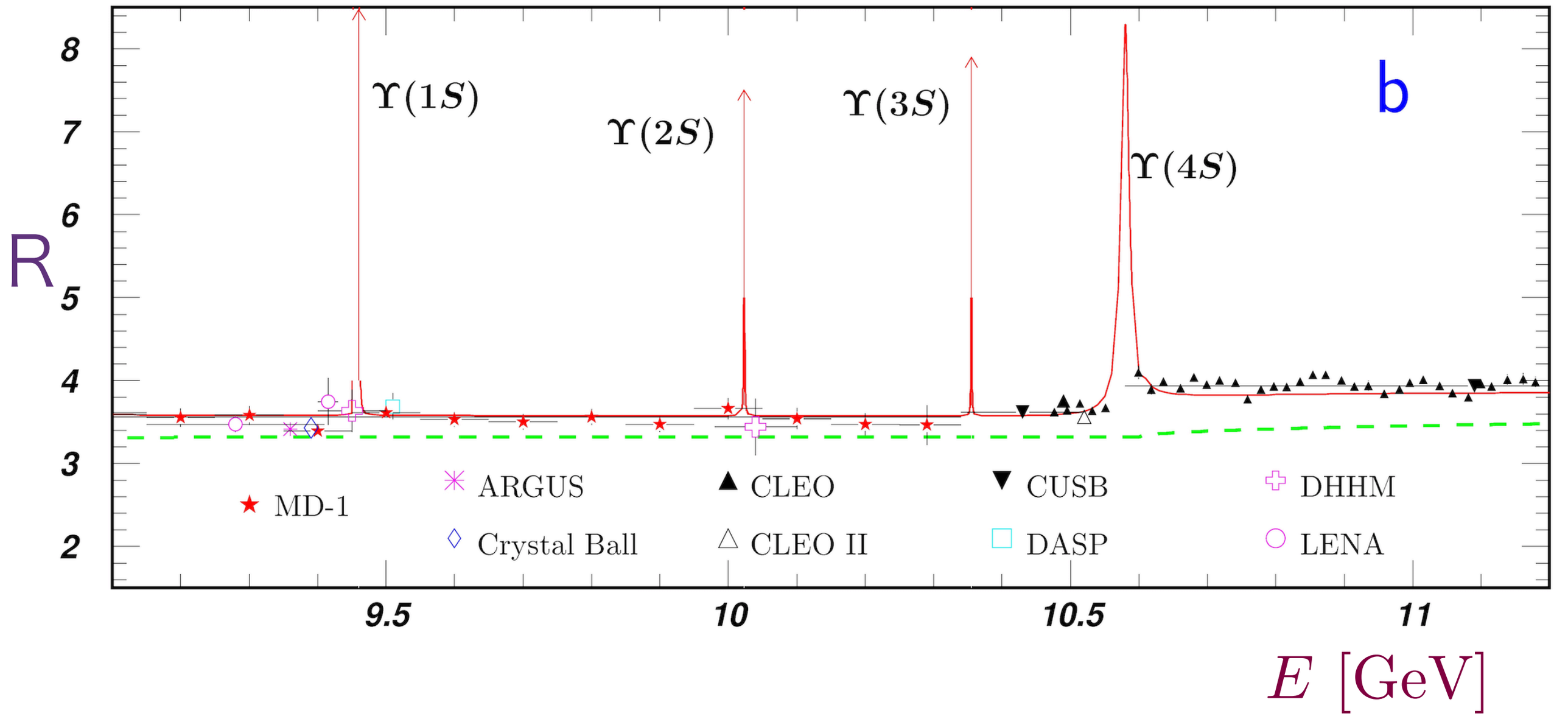
C



$$E > 2m_b$$

$$R(E) = 3\left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2\right] = 3.67$$

b



Linha do tempo, da descoberta do charm até o presente:

1974 — quark charm: c

1975 — tau: $\tau^{\pm}$

1977 — quark beauty (bottom): b

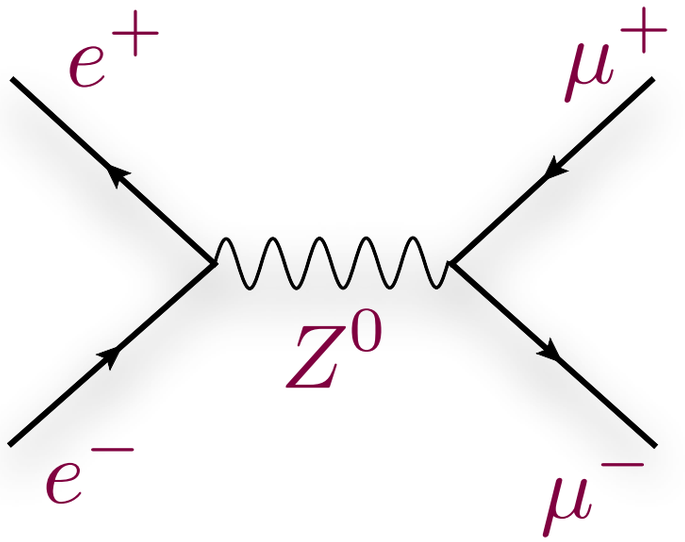
1979 — gluons: g

1983 — bosons intermediários da interação fraca: $W^{\pm}$, Z^0

1995 — quark top: t

2000 — neutrino do tau: ν_τ

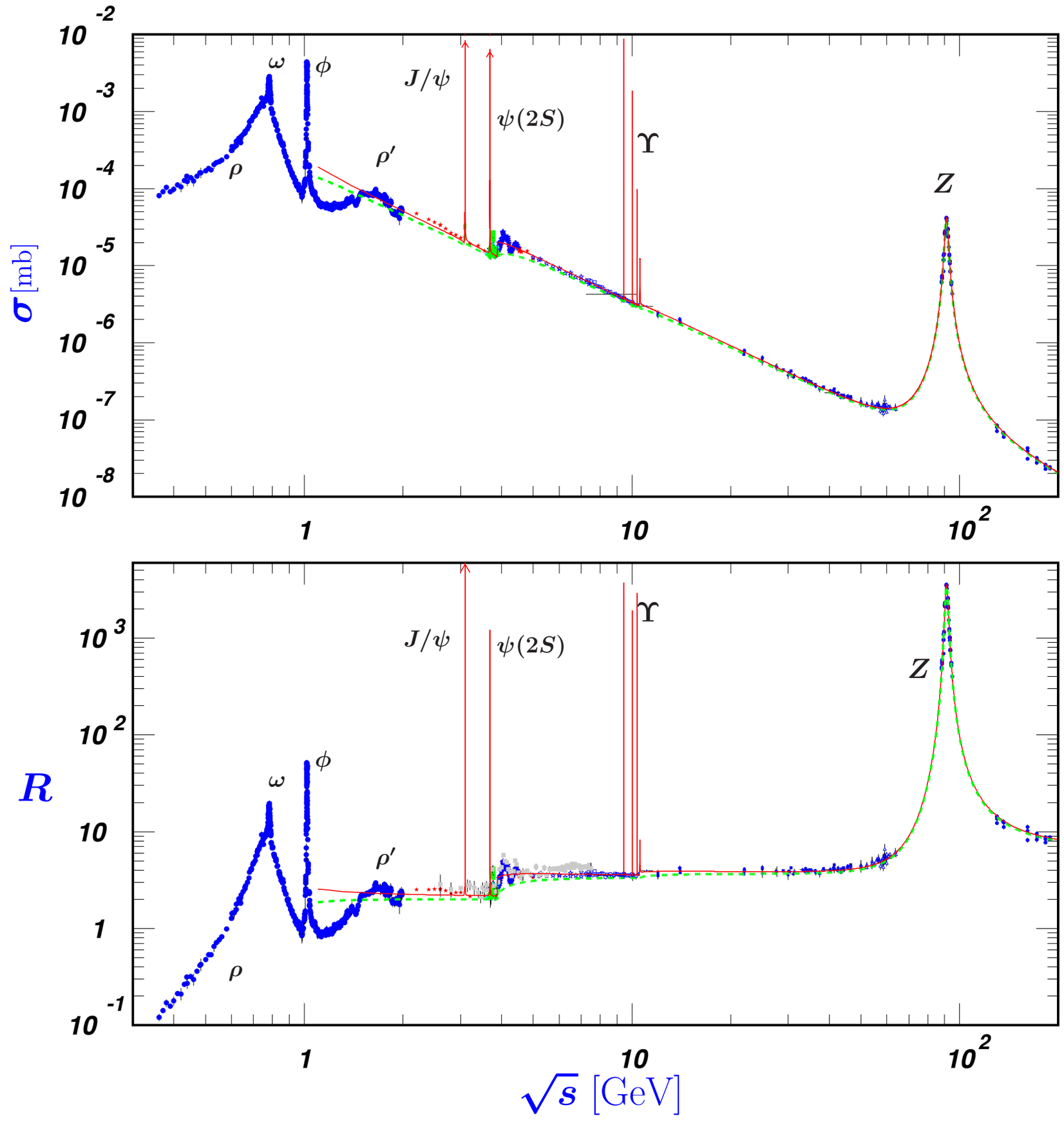
2012 — boson de Higgs: H



Em altas energias, a amplitude dominante no espalhamento

$$e^+e^- \to \mu^+\mu^-$$

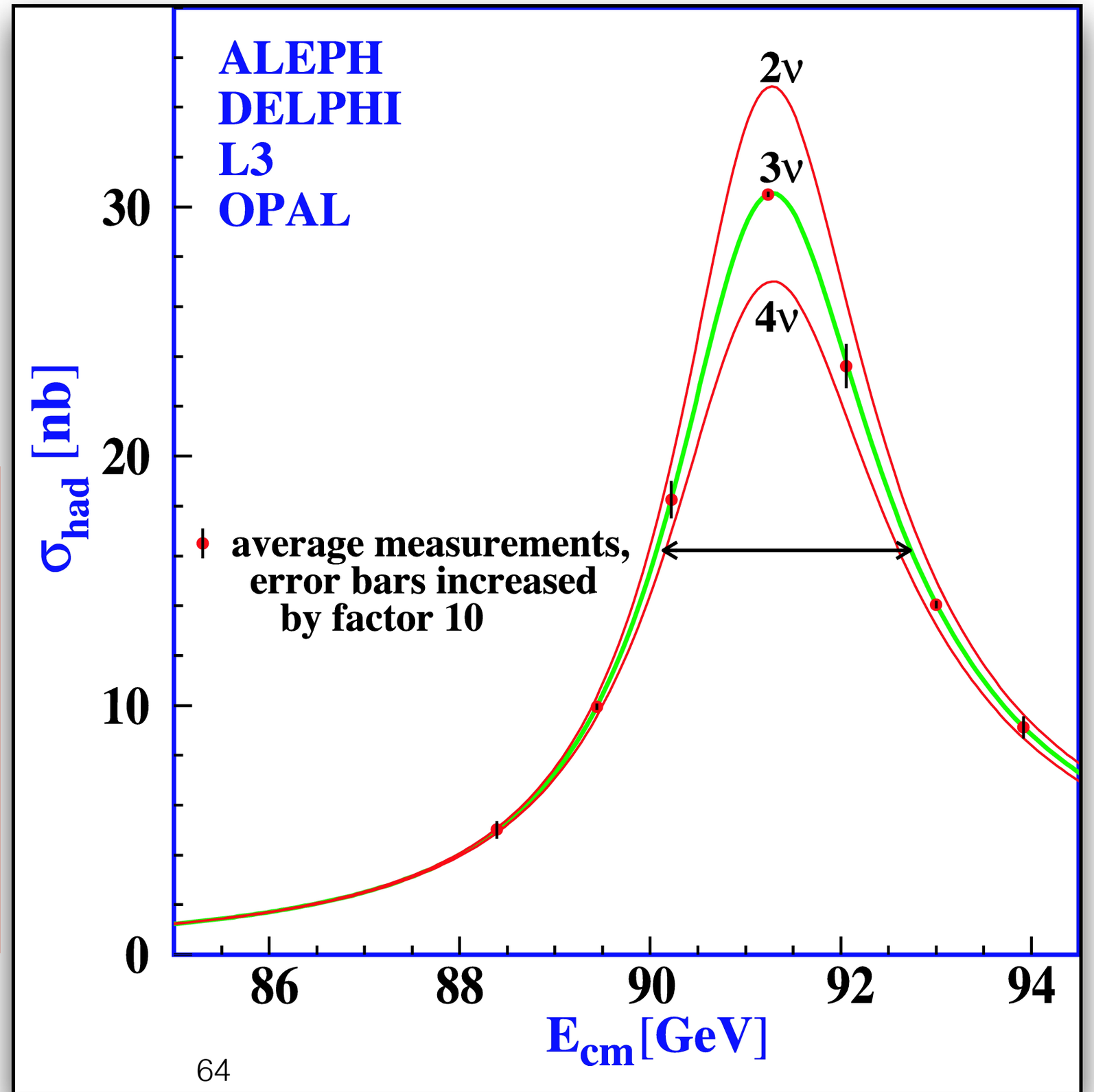
é a troca de um Z^0



Três, e apenas três gerações de neutrinos

A medida da largura do Z^0 depende do número de neutrinos.

Esse resultado, obtido pelos experimentos do LEP, no CERN, demonstra que no Modelo Padrão há apenas 3 gerações de leptons e quarks.



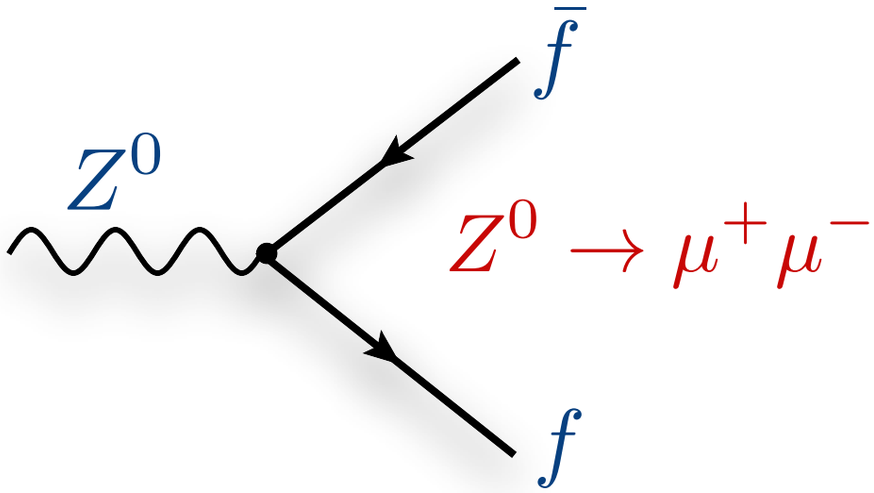
Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions) | interactions / force carriers (bosons)

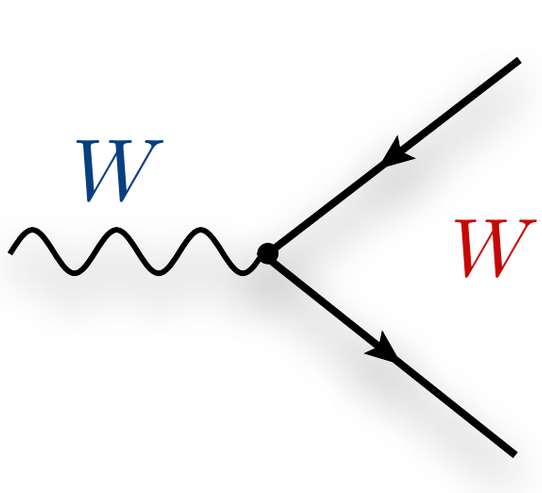
	I	II	III		
mass	≃2.2 MeV/c²	≃1.28 GeV/c²	≃173.1 GeV/c²	0	≃124.97 GeV/c²
charge	⅔	⅔	⅔	0	0
spin	½	½	½	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	≃4.7 MeV/c²	≃96 MeV/c²	≃4.18 GeV/c²	0	
	−⅓	−⅓	−⅓	0	
	½	½	½	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	≃0.511 MeV/c²	≃105.66 MeV/c²	≃1.7768 GeV/c²	≃91.19 GeV/c²	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS
	−1	−1	−1	0	
	½	½	½	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	<2.2 eV/c²	<0.17 MeV/c²	<18.2 MeV/c²	≃80.39 GeV/c²	
	0	0	0	±1	
	½	½	½	1	
	νe electron neutrino	νμ muon neutrino	ντ tau neutrino	W W boson	

SCALAR BOSONS

Interações fundamentais - teoria eletrofraca



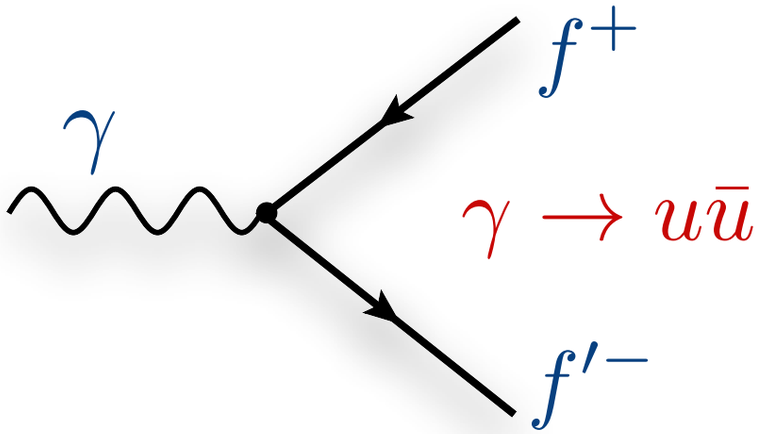
$Z^0 \to \mu^+\mu^-$



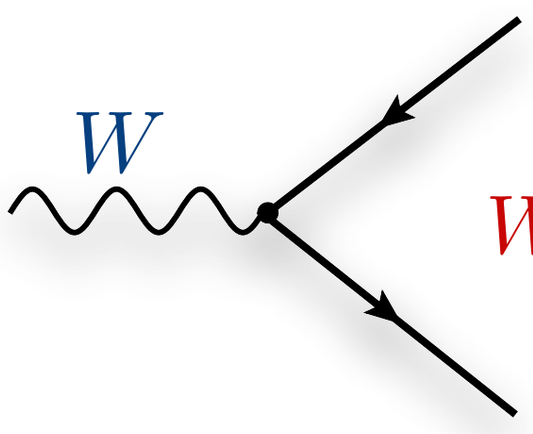
$W^+ \to e^+\nu_e$

antilepton

neutrino do lepton



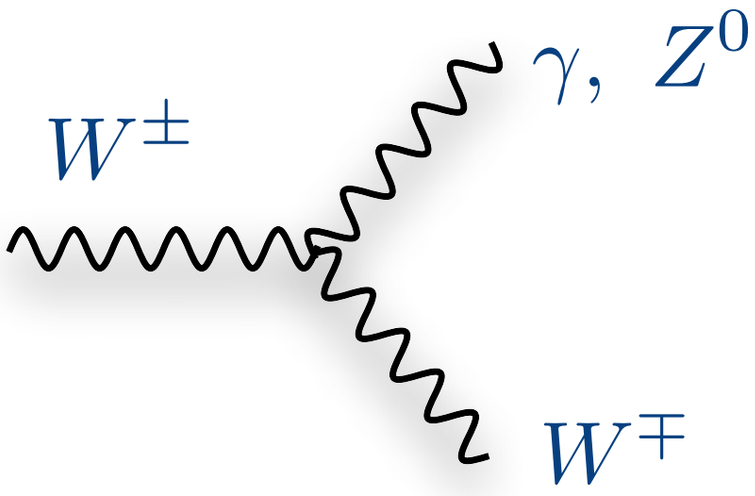
$\gamma \to u\bar{u}$



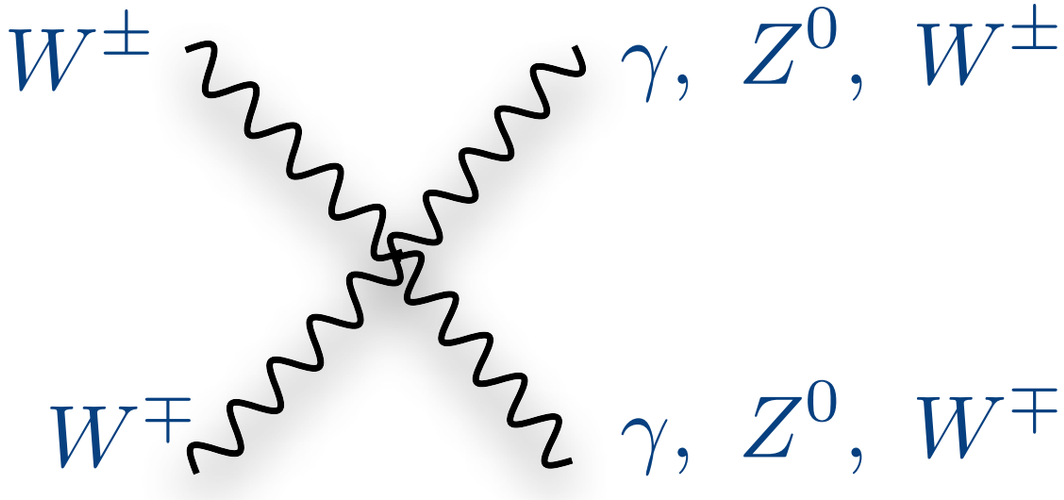
$W^+ \to c\bar{d}$

"D" antiquark (d, s, b)

"U" quark (u, c, t)



acoplamentos possíveis entre bosons intermediários



Os bosons da interação fraca:

$$W^{\pm} \rightarrow m = 80.379 \pm 0.012 \text{ GeV}, \qquad \Gamma = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV}$$

$$Z^0 \rightarrow m = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}, \qquad \Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ GeV}$$

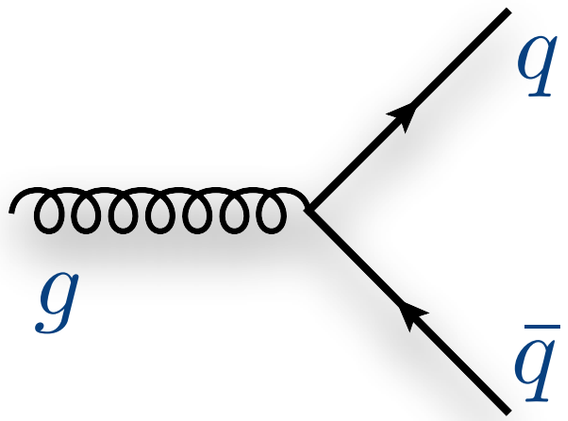
O acoplamento dos bosons Z e W com leptons é o mesmo para todas as gerações (Lepton Flavour Universality)

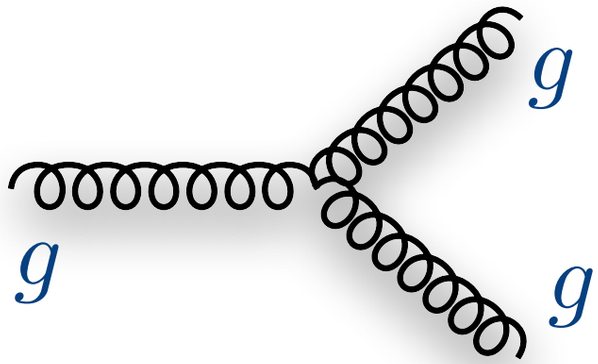
$$\frac{\Gamma(Z^0 \rightarrow e^+e^-)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (3.3632 \pm 0.0042)\% \qquad \frac{\Gamma(W^+ \rightarrow e^+\nu_e)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (10.86 \pm 0.09)\%$$

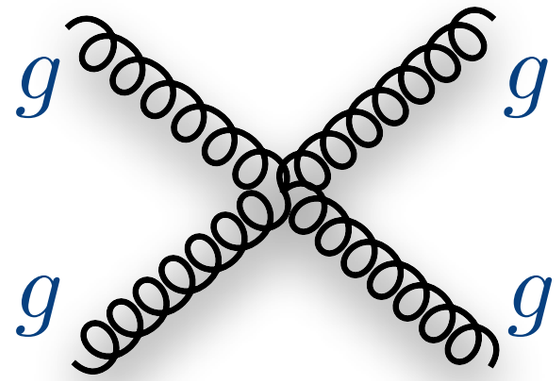
$$\frac{\Gamma(Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (3.3662 \pm 0.0066)\% \qquad \frac{\Gamma(W^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (10.63 \pm 0.15)\%$$

$$\frac{\Gamma(Z^0 \rightarrow \tau^+\tau^-)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (3.3696 \pm 0.0083)\% \qquad \frac{\Gamma(W^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau)}{\Gamma_{\text{tot}}} = (11.38 \pm 0.21)\%$$

Interações fundamentais - cromodinâmica quântica

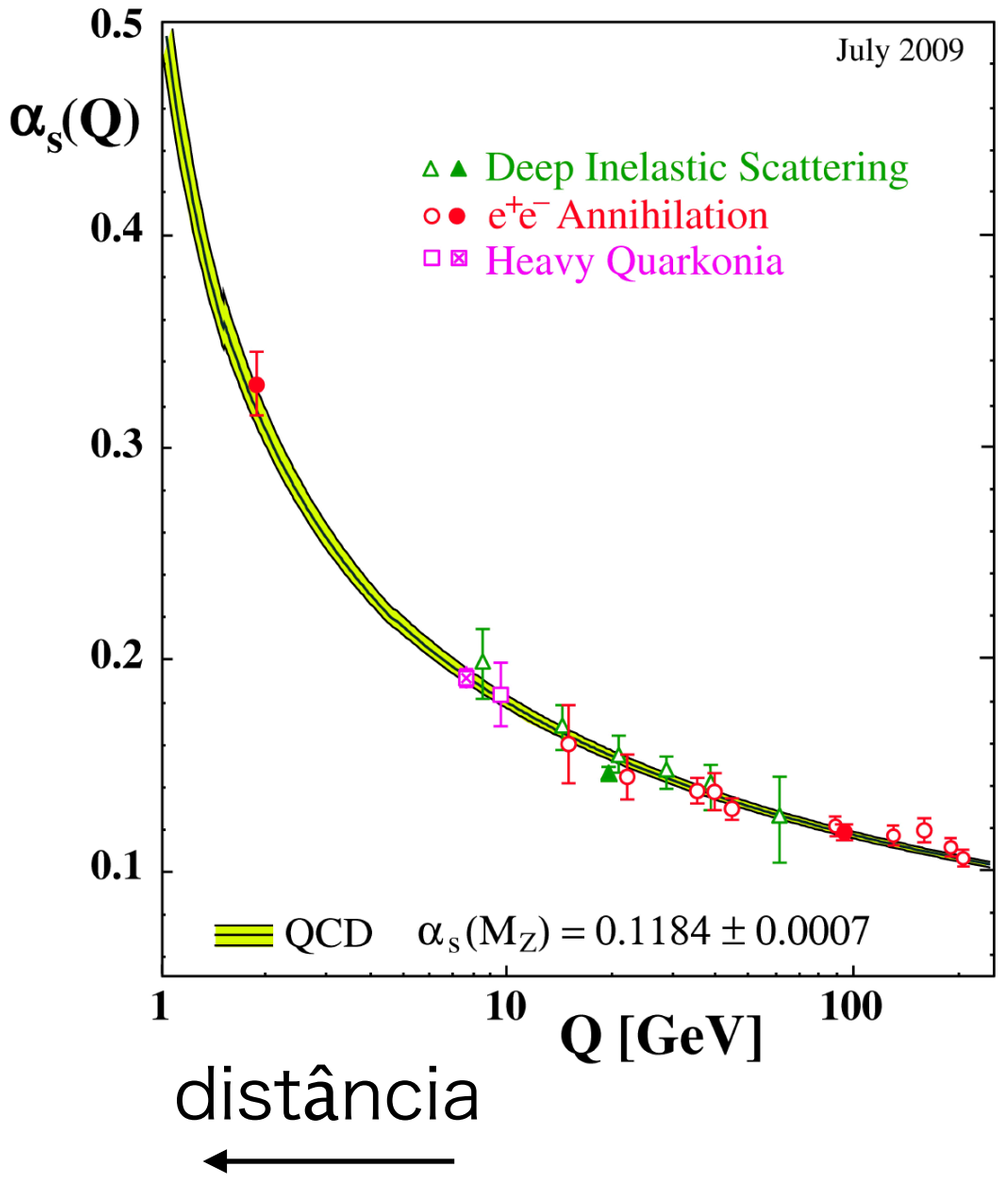




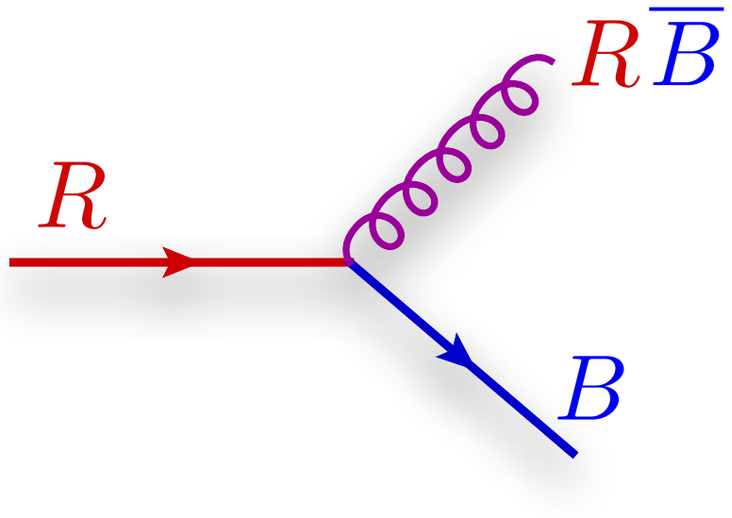


A QCD é bem diferente da QED:

- gluons interagem entre si, podendo formar estados ligados sem quarks (glueballs), partículas "invertebradas";
- liberdade assintótica (acoplamento diminui a pequenas distâncias entre os quarks;
- confinamento(acoplamento aumenta se a distância cresce).



Gluons possuem uma cor e uma anticor:



Assim como a carga elétrica, em cada vértice a carga de cor é conservada.

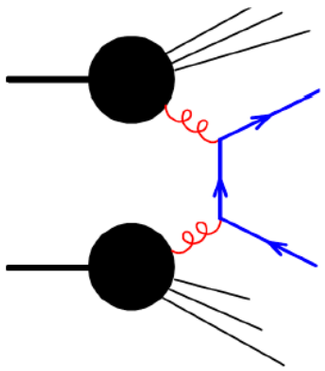
- Cada quark ou antiquark pode ter três estados de cor.
- Com três tipos de carga de cor (RBG), há oito gluons.
- Hadrons são "brancos" (estados sem carga de "cor").
- Apenas singletos de cor são observados na natureza.

Os dois regimes da QCD:

baixa energia (= grandes distâncias), cálculos analíticos não podem ser feitos;

alta energia (= pequenas distâncias), cálculos podem ser feitos com grande precisão.

Seção de choque de produção de jatos em colisões $p\bar{p}$:



$$\sigma(s) = \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 \; f_1(x_1) f_2(x_2) \hat{\sigma}_{12}(\hat{s})$$

$s \rightarrow$ energia da colisão $p\bar{p}$

$x_i \rightarrow$ fração da energia do próton ou do antipróton

$f(x_i) \rightarrow$ prob. de o parton i carregar uma fração x_i do próton

$\hat{\sigma}_{12} \rightarrow$ seção de choque parton-parton

$$\hat{s} = x_1 x_2 s$$

Seção de choque diferencial de produção de jatos, experimento D0 (Fermilab).

