

# IX FÍSICA NAS FÉRIAS VII ESCOLA AVANÇADA DE FÍSICA

◻ QUE EXISTE ALÉM DE PRÓTONS, ELÉTRONS E  
NÊUTRONS?  
UMA INTRODUÇÃO ÀS PARTÍCULAS  
ELEMENTARES

O Modelo Padrão da Física de Partículas

RAFAEL ALVES BATISTA

# Algumas unidades de medida da Física de Partículas

Qual a unidade em que medimos energias em Física de Partículas?

Unidade de energia: eV, keV, MeV, GeV, TeV, ...

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} \Rightarrow 10^6 \text{ eV} \text{ (megaeletronvolt)}$$

$$1 \text{ GeV} \Rightarrow 10^9 \text{ eV} \text{ (gigaeletronvolt)}$$

$$1 \text{ TeV} \Rightarrow 10^{12} \text{ eV} \text{ (teraeletronvolt)}$$

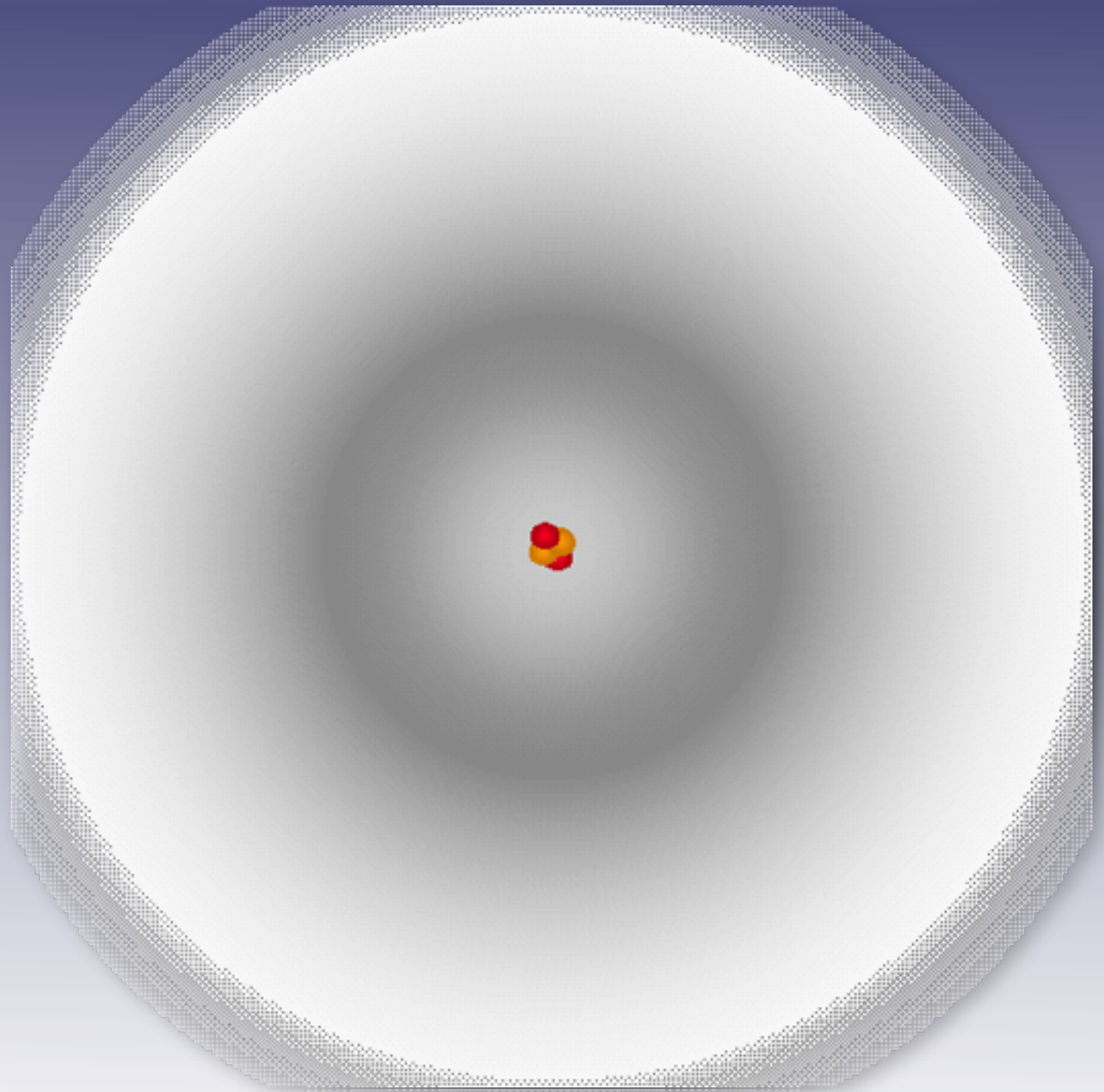
E para massas, qual é a unidade geralmente utilizada? ( $E=mc^2$ )

Unidade de massa: eV/c<sup>2</sup>, keV/c<sup>2</sup>, MeV/c<sup>2</sup>, GeV/c<sup>2</sup>, TeV/c<sup>2</sup>, ...

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1,78 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

# 1932: O que conhecemos até agora?

- fótons
- elétrons - Thomson, 1897
- prótons - Rutherford, 1919
- nêutrons - Chadwick, 1932



# Inglaterra, 4 anos antes...



- Paul Dirac buscava uma equação geral para descrever o elétron que obedecesse à recém-criada teoria da relatividade.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{energia} & \leftarrow & E^2 & = & p^2 c^2 & + & m^2 c^4 \\ & & & & \text{momento (quantidade de movimento)} & & \downarrow \text{massa} \\ & & & & & & \text{velocidade da luz} \end{array}$$

# Inglaterra, 4 anos antes...



- Paul Dirac buscava uma equação geral para descrever o elétron que obedecesse à recém-criada teoria da relatividade.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{energia} & \leftarrow & E^2 & = & p^2 c^2 & + & m^2 c^4 \\ & & & & \text{momento (quantidade de movimento)} & & \downarrow \text{massa} \\ & & & & & & \text{velocidade da luz} \end{array}$$

- Dirac obteve soluções com energia negativa !!!!!!!

# Inglaterra, 4 anos antes...



- Paul Dirac buscava uma equação geral para descrever o elétron que obedecesse à recém-criada teoria da relatividade.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{energia} & \leftarrow & E^2 & = & p^2 c^2 & + & m^2 c^4 \\ & & & & \text{momento (quantidade de movimento)} & & \downarrow \text{massa} \\ & & & & & & \text{velocidade da luz} \end{array}$$

- Dirac obteve soluções com energia negativa !!!!!!!
- Dirac argumentou que: "...um elétron com energia negativa se move através de um campo eletromagnético externo como se carregasse carga positiva".
- Todo o espaço pode ser considerado um "mar de elétrons" de energias negativas.

# Inglaterra, 4 anos antes...



- Paul Dirac buscava uma equação geral para descrever o elétron que obedecesse à recém-criada teoria da relatividade.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{energia} & \leftarrow & E^2 & = & p^2 c^2 & + & m^2 c^4 \\ & & & & \leftarrow & & \downarrow & \searrow \\ & & \text{momento (quantidade} & & & & \text{massa} & \text{velocidade} \\ & & \text{de movimento)} & & & & & \text{da luz} \end{array}$$

- Dirac obteve soluções com energia negativa !!!!!!!
- Dirac argumentou que: "...um elétron com energia negativa se move através de um campo eletromagnético externo como se carregasse carga positiva".
- Todo o espaço pode ser considerado um "mar de elétrons" de energias negativas.
- Seria o próton?

# Inglaterra, 4 anos antes...



- Paul Dirac buscava uma equação geral para descrever o elétron que obedecesse à recém-criada teoria da relatividade.

$$\begin{array}{ccccccc} \text{energia} & \leftarrow & E^2 & = & p^2 c^2 & + & m^2 c^4 \\ & & & & \text{momento (quantidade de movimento)} & & \downarrow \text{massa} \\ & & & & & & \text{velocidade da luz} \end{array}$$

- Dirac obteve soluções com energia negativa !!!!!!!
- Dirac argumentou que: "...um elétron com energia negativa se move através de um campo eletromagnético externo como se carregasse carga positiva".
- Todo o espaço pode ser considerado um "mar de elétrons" de energias negativas.
- Seria o próton?
- Robert Oppenheimer discordou da hipótese do próton

# Inglaterra, 4 anos antes...

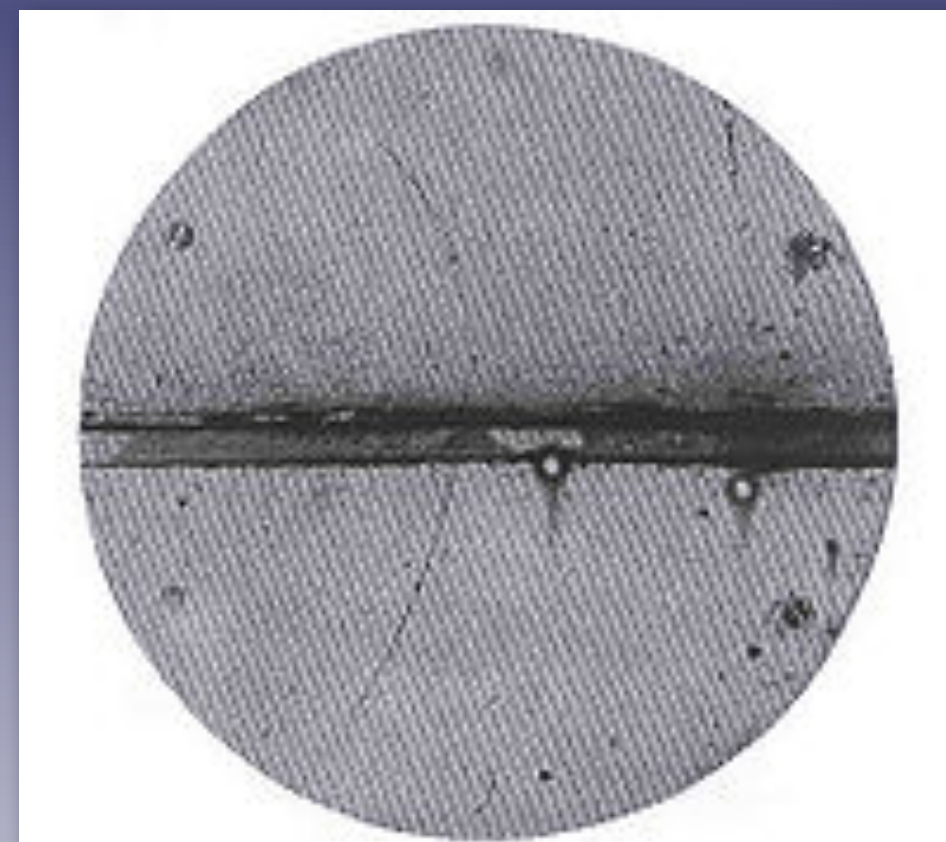
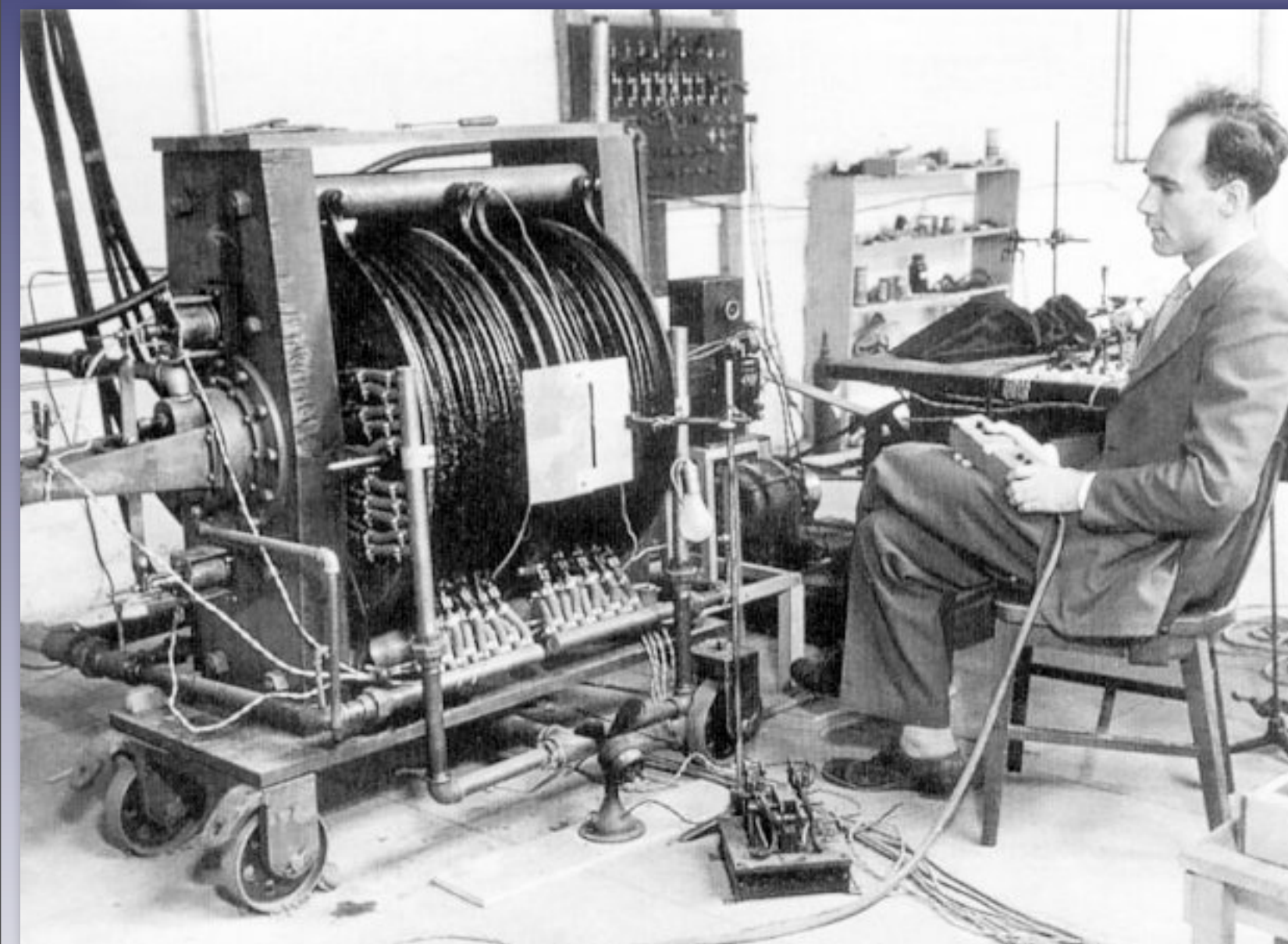


- Paul Dirac buscava uma equação geral para descrever o elétron que obedecesse à recém-criada teoria da relatividade.

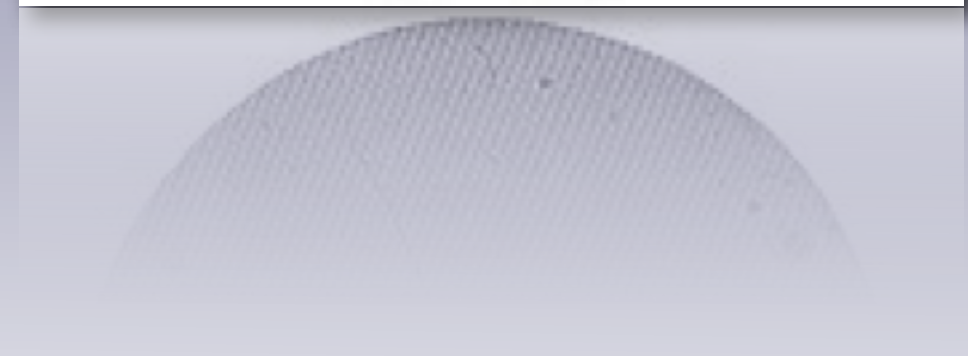
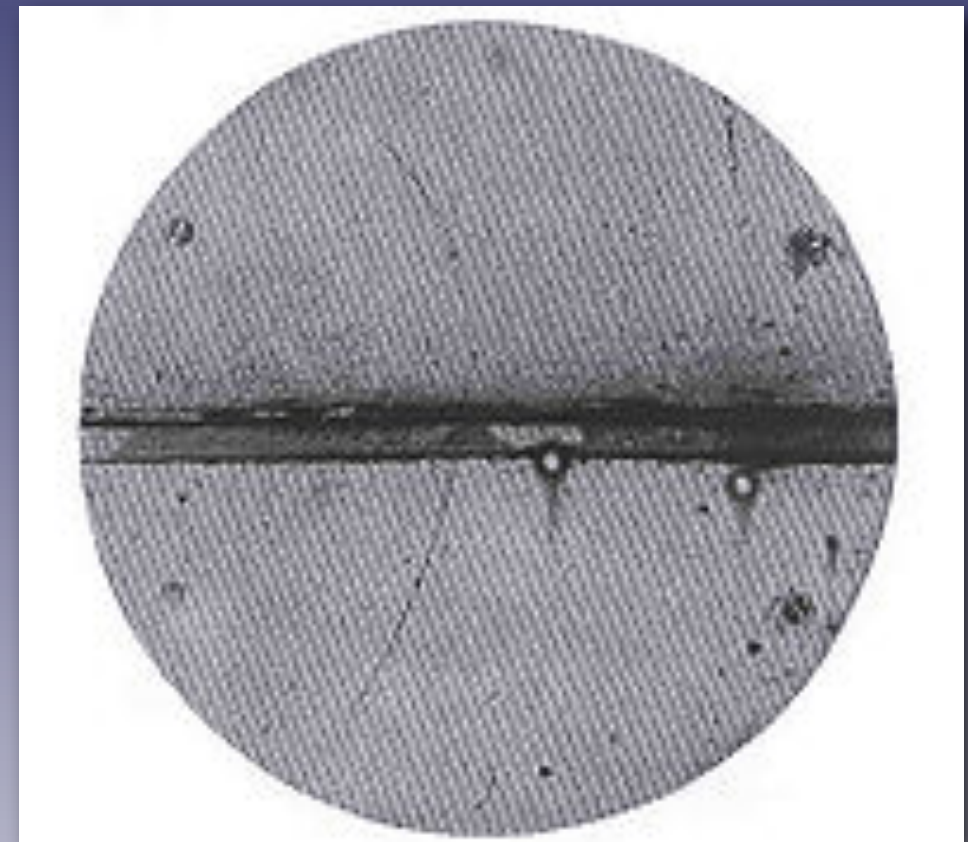
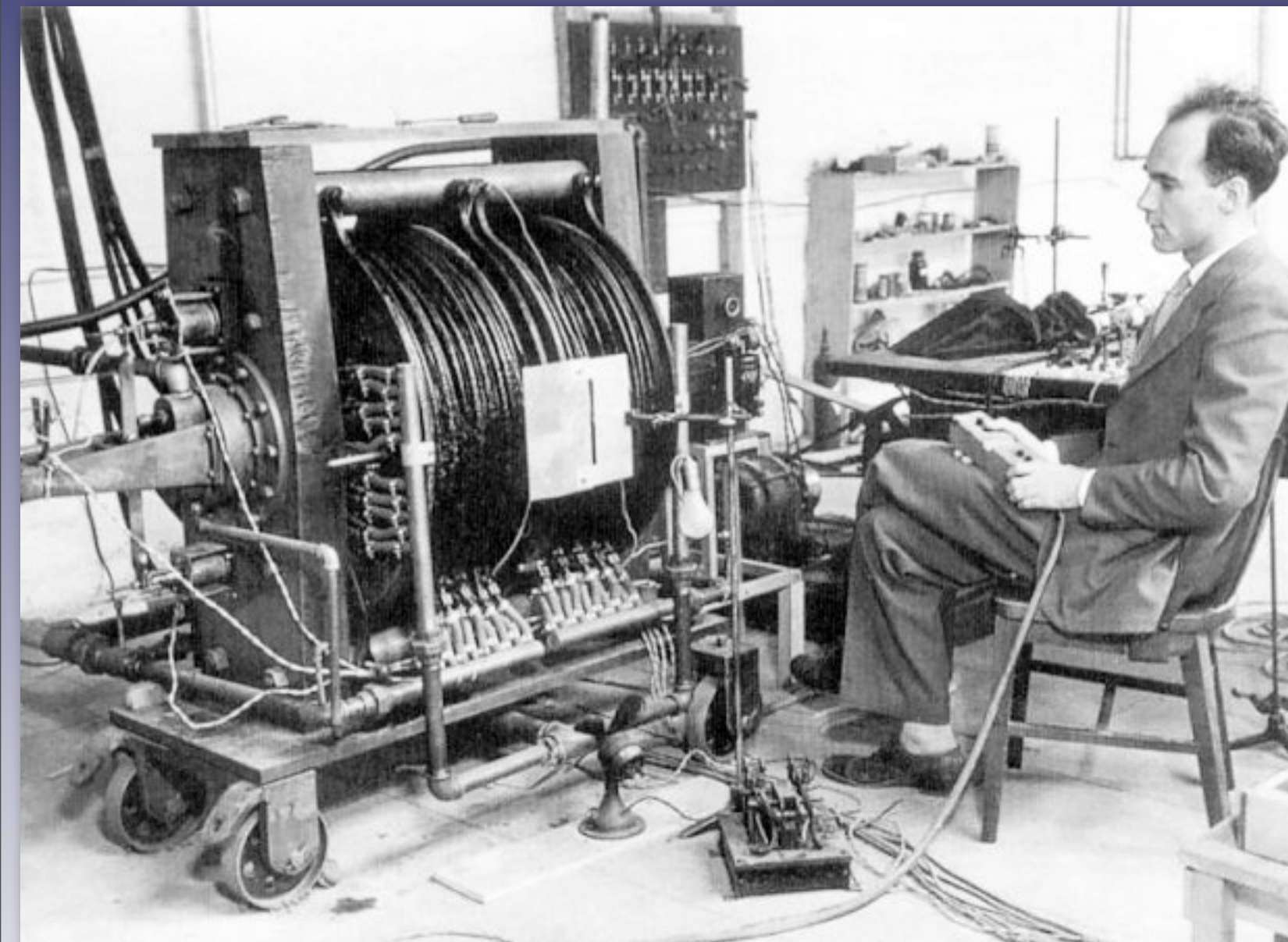
$$\begin{array}{ccccccc} \text{energia} & \leftarrow & E^2 & = & p^2 c^2 & + & m^2 c^4 \\ & & & & \text{momento (quantidade de movimento)} & & \downarrow \text{massa} \\ & & & & & & \text{velocidade da luz} \end{array}$$

- Dirac obteve soluções com energia negativa !!!!!!!
- Dirac argumentou que: "...um elétron com energia negativa se move através de um campo eletromagnético externo como se carregasse carga positiva".
- Todo o espaço pode ser considerado um "mar de elétrons" de energias negativas.
- Seria o próton?
- Robert Oppenheimer discordou da hipótese do próton
- Em 1931 Dirac postula a existência de uma partícula ainda não descoberta.

# Estados Unidos, 1932...



# Estados Unidos, 1932...



- Carl Anderson descobre uma partícula com as características previstas por Dirac ao realizar experimentos com radiação cósmica.

# Europa, anos 30...

- Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$
- Observa-se que havia energia e momento “faltando” nesta reação.

# Europa, anos 30...

- Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$
- Observa-se que havia energia e momento “faltando” nesta reação.



Niels Bohr

# Europa, anos 30...

• Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$

Acho que acabamos de encontrar o primeiro sistema físico que não conserva energia.

momento "faltando" nesta reação.



Niels Bohr

# Europa, anos 30...

• Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$

Acho que acabamos de encontrar o primeiro sistema físico que não conserva energia.

momento "faltando" nesta reação.



Niels Bohr



Wolfgang Pauli

# Europa, anos 30...

• Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$

Acho que acabamos de encontrar o primeiro sistema físico que não conserva energia.

momento "faltando" na

Ou então deve existir uma partícula que ainda não conhecemos levando esta energia embora...



Niels Bohr



Wolfgang Pauli

# Europa, anos 30...

• Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$

Acho que acabamos de encontrar o primeiro sistema físico que não conserva energia.

momento "faltando" na

Ou então deve existir uma partícula que ainda não conhecemos levando esta energia embora...



Niels Bohr



Enrico Fermi



Wolfgang Pauli

# Europa, anos 30...

• Decaimento Beta:  $n \rightarrow p + e$

Acho que acabamos de encontrar o primeiro sistema físico que não conserva energia.

momento "faltando" na

Ou então deve existir uma partícula que ainda não conhecemos levando esta energia embora...

É uma partícula eletricamente neutra, assim como o nêutron, e é pequena. Vamos chamá-la de neutrino!



Niels Bohr



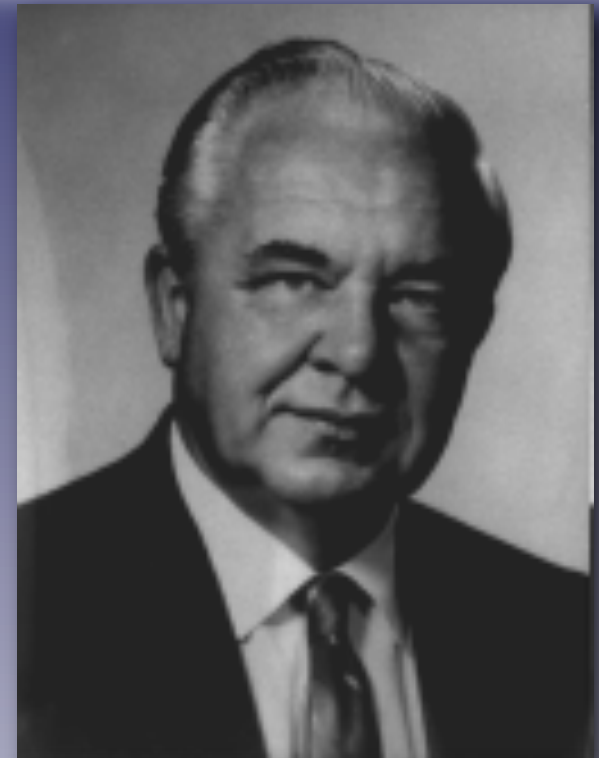
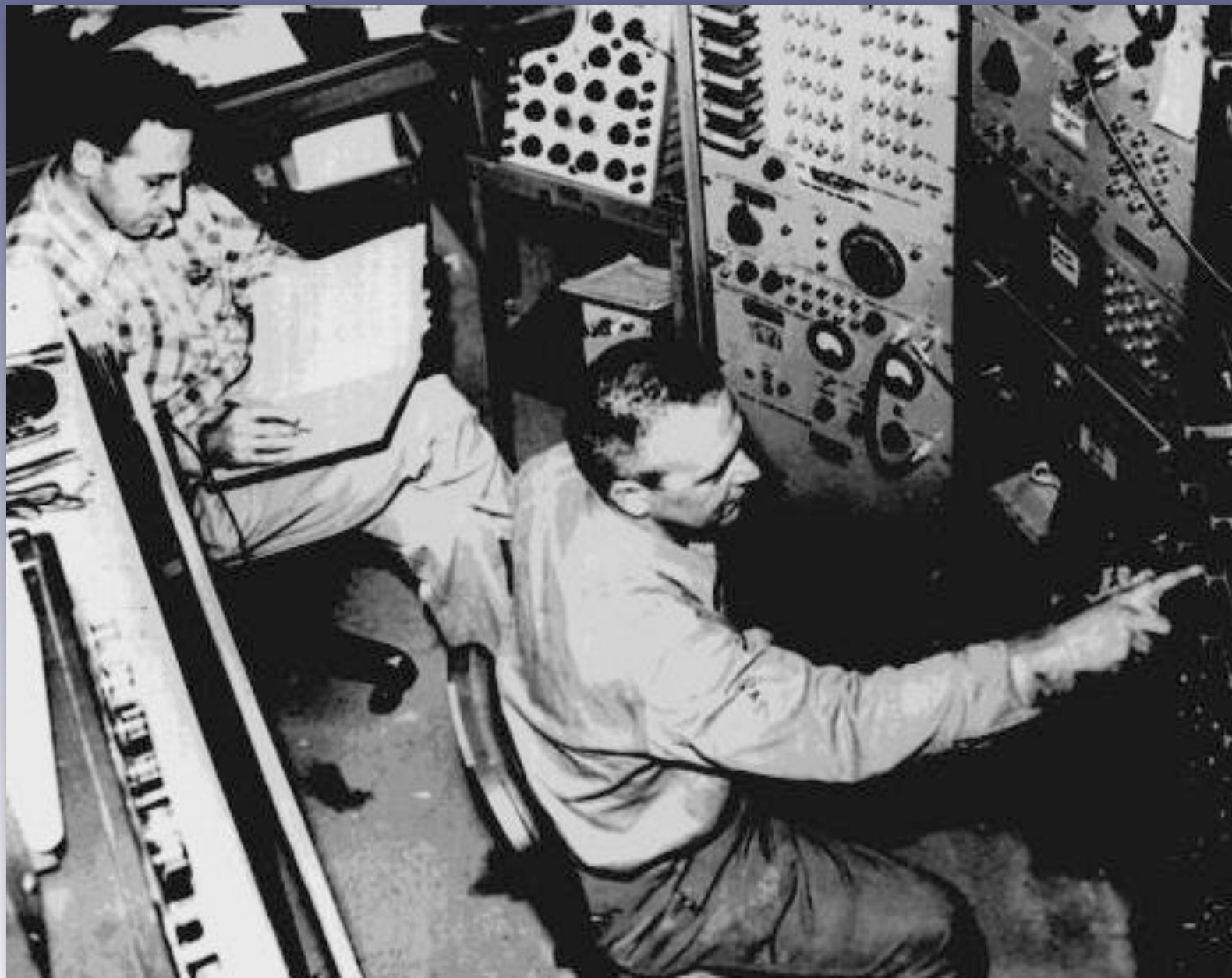
Enrico Fermi



Wolfgang Pauli

# A descoberta do neutrino (1956)

Experimento de Cowan-Reines (1953-1956)



Frederick  
Reines



Clyde  
Cowan

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga. Cargas iguais se repelem. Então como o núcleo se mantém estável?

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga. Cargas iguais se repelem. Então como o núcleo se mantém estável?



Hideki Yukawa

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

Devem existir partículas no núcleo que fazem com que ele se mantenha estável.



Hideki Yukawa

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga. Cargas iguais se repelem. Então como o núcleo se mantém estável?

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

Devem existir partículas no núcleo que fazem com que ele se mantenha estável.



Hideki Yukawa

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga. Cargas iguais se repelem. Então como o núcleo se mantém estável?

- 1933: Yukawa propõe a existência de uma partícula com massa intermediária entre a massa do elétron e a massa do próton. Esta partícula estaria associada a uma força mais forte que a eletromagnética (força nuclear forte).

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

Devem existir partículas no núcleo que fazem com que ele se mantenha estável.

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga.

Como elas têm massa intermediária, vou chamá-las de mésons.

Então como o núcleo se

1933: Yukawa propõe a existência de uma partícula com massa intermediária entre a massa do elétron e a massa do próton. Esta partícula estaria associada a uma força mais forte que a eletromagnética (força nuclear forte).



Hideki Yukawa

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

Devem existir partículas no núcleo que fazem com que ele se mantenha estável.

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga.

Como elas têm massa intermediária, vou chamá-las de méso-trons.

Então como o núcleo se

1933: Yukawa propõe a existência de uma partícula com massa intermediária entre a massa do elétron e a massa do próton. Esta partícula estaria associada a uma força mais forte que a eletromagnética (força nuclear forte).



Hideki Yukawa



Werner Heisenberg

# (Voltando) Ainda nos anos 30...

Devem existir partículas no núcleo que fazem com que ele se mantenha estável.

O núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Prótons têm carga positiva e nêutrons não têm carga.

Como elas têm massa intermediária, vou chamá-las de mésontrons.

Então como o núcleo se

1933: Yukawa propõe a existência de uma partícula com massa intermediária entre a massa do elétron e a massa do próton. Esta partícula estaria associada a uma força mais forte que a eletromagnética (força

O correto em grego não é mésontron, e sim méson :)



Hideki Yukawa



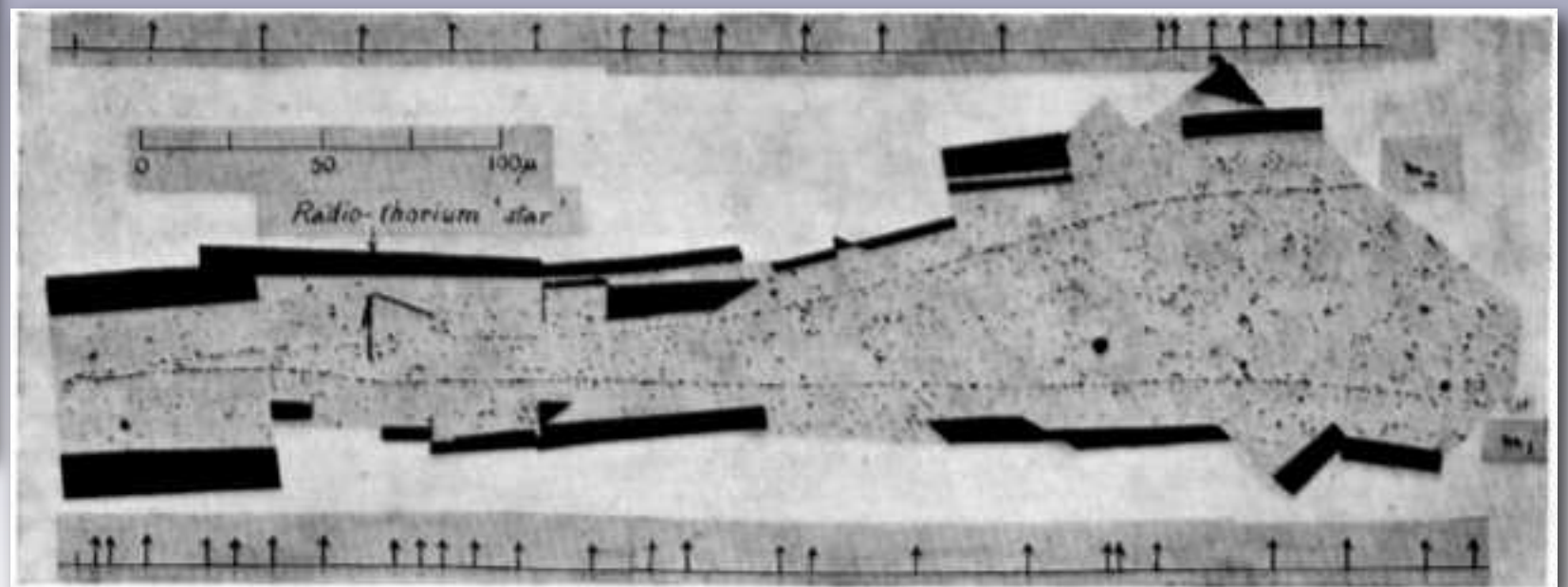
Werner Heisenberg

# A descoberta do "méson" $\mu$

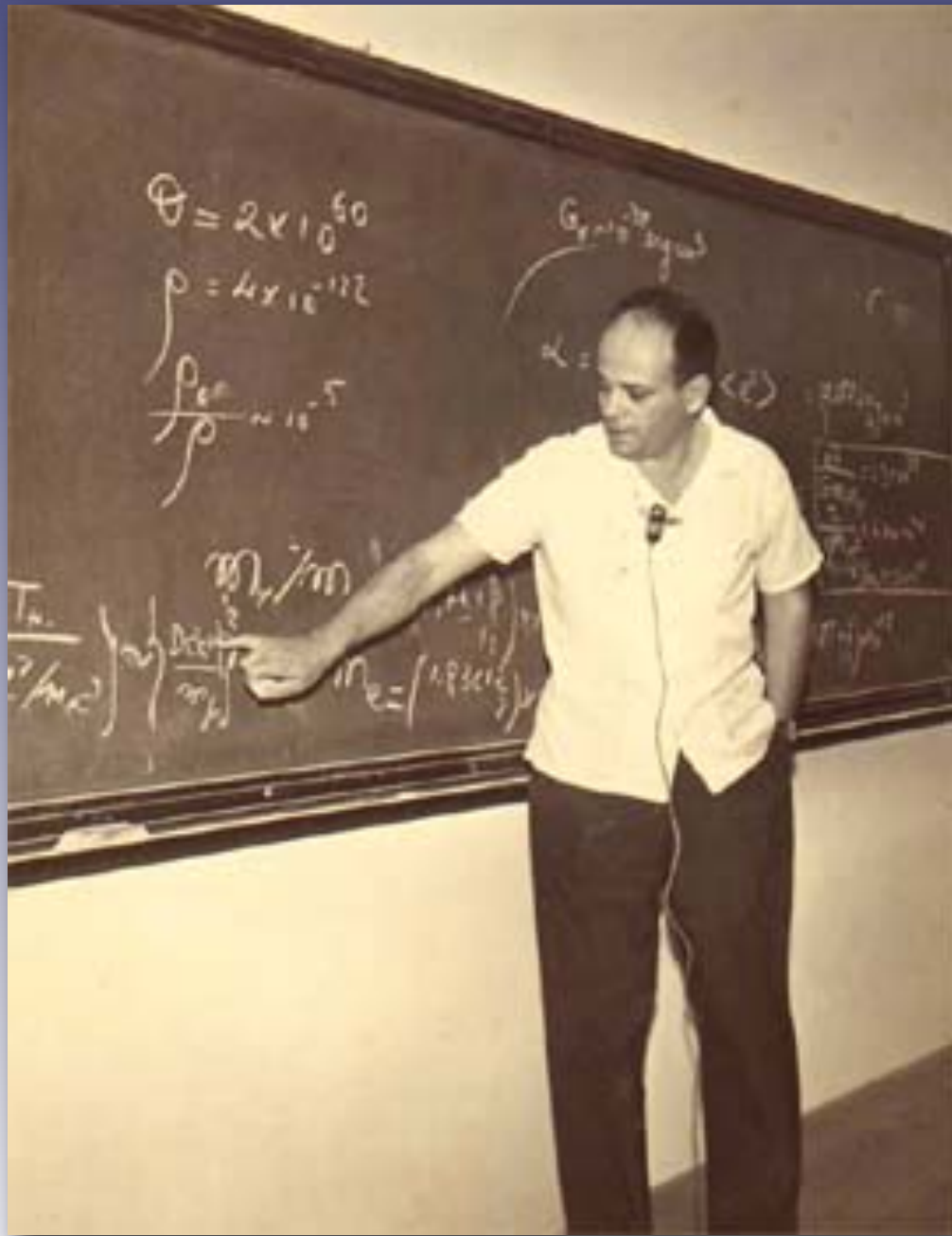
- 1936: Carl Anderson e Seth Neddermeyer
- 1937: J. C. Street e E. C. Stevenson confirmam a descoberta do "méson"  $\mu$ .
- Seria este o méson previsto por Yukawa???
- O comportamento desta partícula não coincidia com as previsões teóricas.
- Previsões teóricas: se o méson de Yukawa tem carga positiva ele desintegra resultando no méson de Anderson; se ele tem carga negativa ele causa a desintegração do núcleo.
- 1947: Shoiti Sakata e Yasutaka Tanikawa resolvem o problema assumindo a existência de dois mésons: um seria o méson de Yukawa (mais pesado), que atua na estabilidade do núcleo; o outro seria o "méson"  $\mu$  (mais leve), que resultaria do decaimento deste méson mais pesado.

# A descoberta do "méson" $\pi$

- 1947: Cecil Powell, César Lattes, Giuseppe Occhialini descobrem o méson  $\pi$ .
- 1947: Donald Perkins confirma a descoberta.
- 1949: Yukawa ganha o prêmio Nobel por sua previsão teórica.
- 1950: Powell ganha o prêmio nobel pelo "desenvolvimento do método fotográfico para estudos de processos nucleares e pela descoberta do méson feita com este método.



# César Lattes



# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

→ léptons

# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

→ léptons

# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

→ léptons

→ bárions

# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

→ léptons

→ bárions

# Depois do pión...

| Partícula      | Spin | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|----------------|------|-----------------------------|
| e <sup>-</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| e <sup>+</sup> | 1/2  | 0,5                         |
| μ <sup>-</sup> | 1/2  | 106                         |
| μ <sup>+</sup> | 1/2  | 106                         |
| ν              | 1/2  | 0                           |
| p              | 1/2  | 938                         |
| n              | 1/2  | 939                         |
| π <sup>+</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>-</sup> | 0    | 140                         |
| π <sup>0</sup> | 0    | 140                         |

→ léptons

→ bárions

→ mésons

hádrons

# Mésons, mésons e mais mésons..

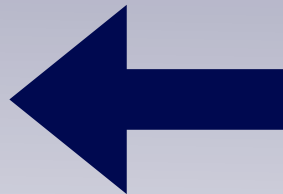
| Partícula   | Spin    | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|-------------|---------|-----------------------------|
| $\pi^+$     | inteiro | 140                         |
| $\pi^-$     | inteiro | 140                         |
| $\pi^0$     | inteiro | 140                         |
| $K^+$       | inteiro | 500                         |
| $K^-$       | inteiro | 500                         |
| $K^0$       | inteiro | 500                         |
| $\bar{K}^0$ | inteiro | 500                         |

\* As massas não são os melhores valores experimentais da época, apenas valores aproximados.

# Mésons, mésons e mais mésons..

| Partícula   | Spin    | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|-------------|---------|-----------------------------|
| $\pi^+$     | inteiro | 140                         |
| $\pi^-$     | inteiro | 140                         |
| $\pi^0$     | inteiro | 140                         |
| $K^+$       | inteiro | 500                         |
| $K^-$       | inteiro | 500                         |
| $K^0$       | inteiro | 500                         |
| $\bar{K}^0$ | inteiro | 500                         |

partículas  
estranhas



\* As massas não são os melhores valores experimentais da época, apenas valores aproximados.

# Mésons, mésons e mais mésons..

novo número quântico:  
estranheza (S)

↑  
partículas  
estranhas ←

| Partícula   | Spin    | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|-------------|---------|-----------------------------|
| $\pi^+$     | inteiro | 140                         |
| $\pi^-$     | inteiro | 140                         |
| $\pi^0$     | inteiro | 140                         |
| $K^+$       | inteiro | 500                         |
| $K^-$       | inteiro | 500                         |
| $K^0$       | inteiro | 500                         |
| $\bar{K}^0$ | inteiro | 500                         |

\* As massas não são os melhores valores experimentais da época, apenas valores aproximados.

# A estranheza

# A estranheza



# A estranheza

- Apresentavam um comportamento “estranho”: diferentes mecanismos de produção e desintegração.
- Eram produzidas rapidamente facilmente produzidos ( $10^{-23}$  s).
- Decaiam lentamente ( $10^{-10}$  s).
- A. Païs sugere que as partículas estranhas são produzidas aos pares e postula a existência do número quântico estranheza (S).
- A estranheza deve ser conservada nos processos envolvendo partículas estranhas.

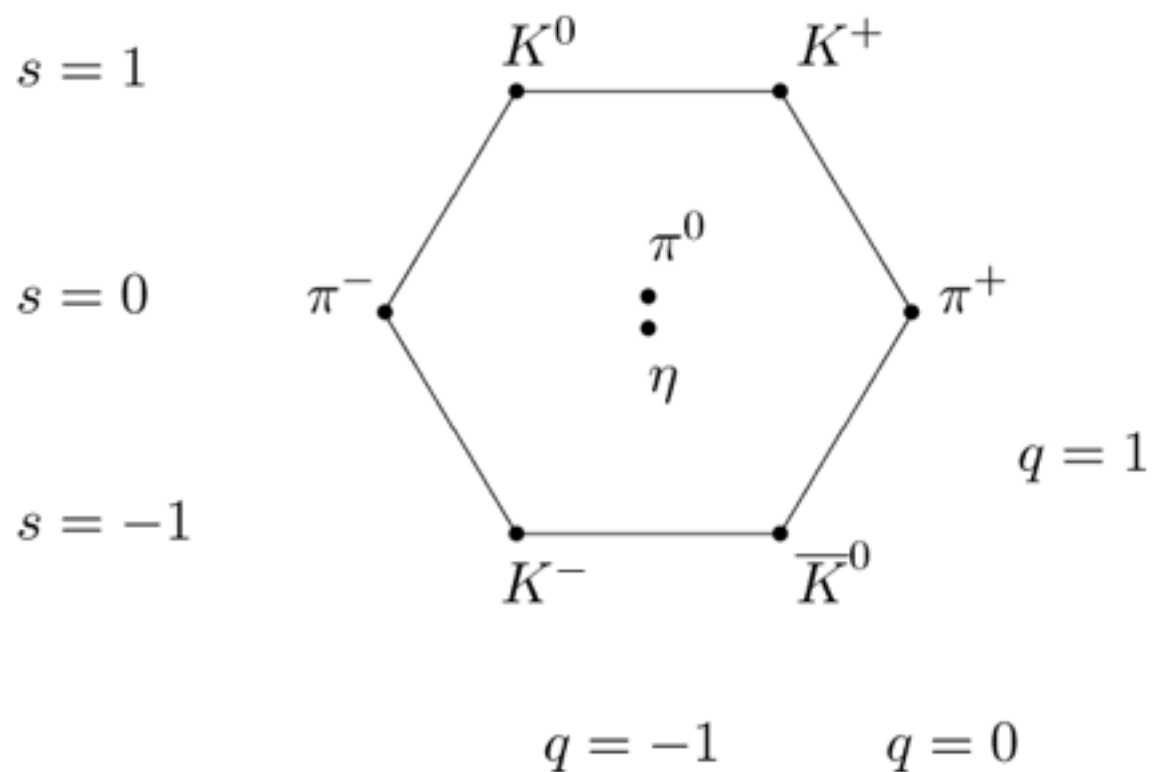
# Bárions, bárions e mais bárions...

| Partícula  | Spin         | Massa (MeV/c <sup>2</sup> ) |
|------------|--------------|-----------------------------|
| p          | semi-inteiro | 938                         |
| n          | semi-inteiro | 939                         |
| $\Sigma^0$ | semi-inteiro | 1190                        |
| $\Sigma^+$ | semi-inteiro | 1190                        |
| $\Sigma^-$ | semi-inteiro | 1190                        |
| $\Lambda$  | semi-inteiro | 1115                        |
| $\Xi^+$    | semi-inteiro | 1320                        |
| $\Xi^0$    | semi-inteiro | 1320                        |

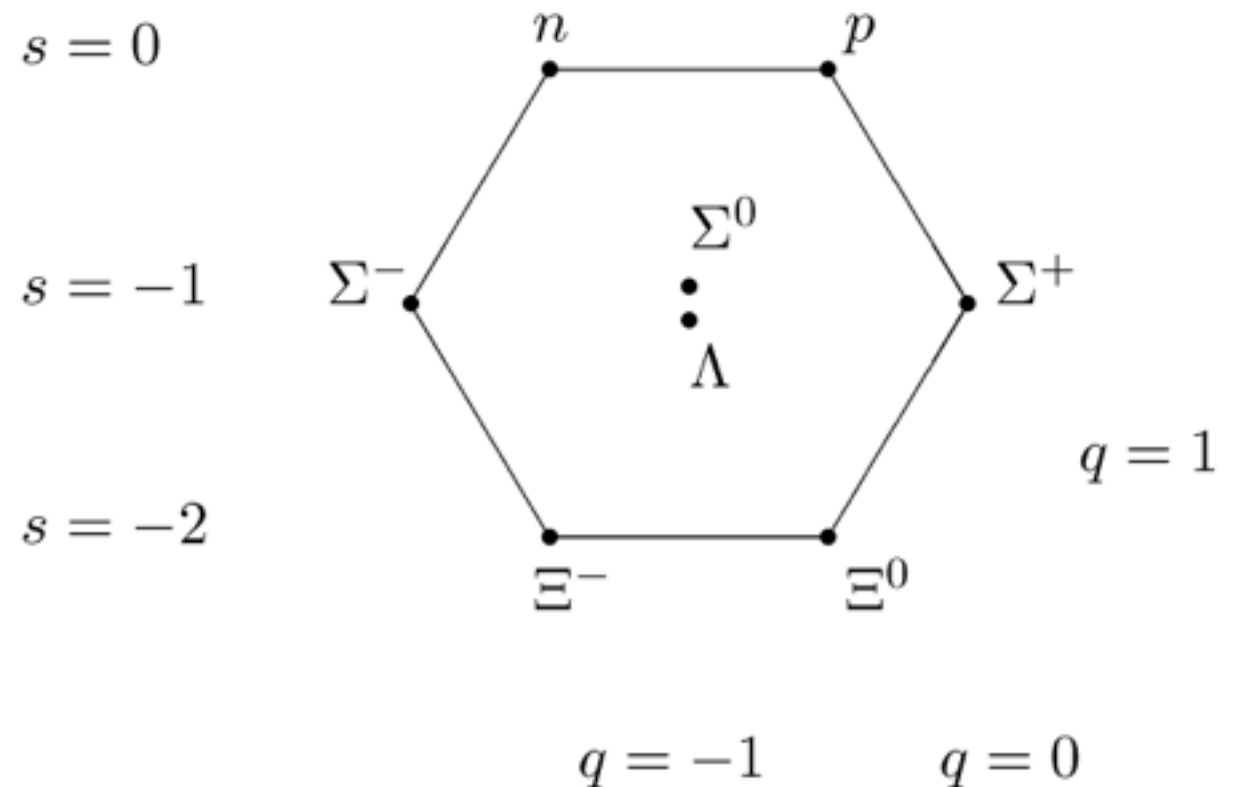
\* As massas não são os melhores valores experimentais da época, apenas valores aproximados.

# Como organizar tudo isto?

Como organizar todas estas partículas?



Octeto de mésons

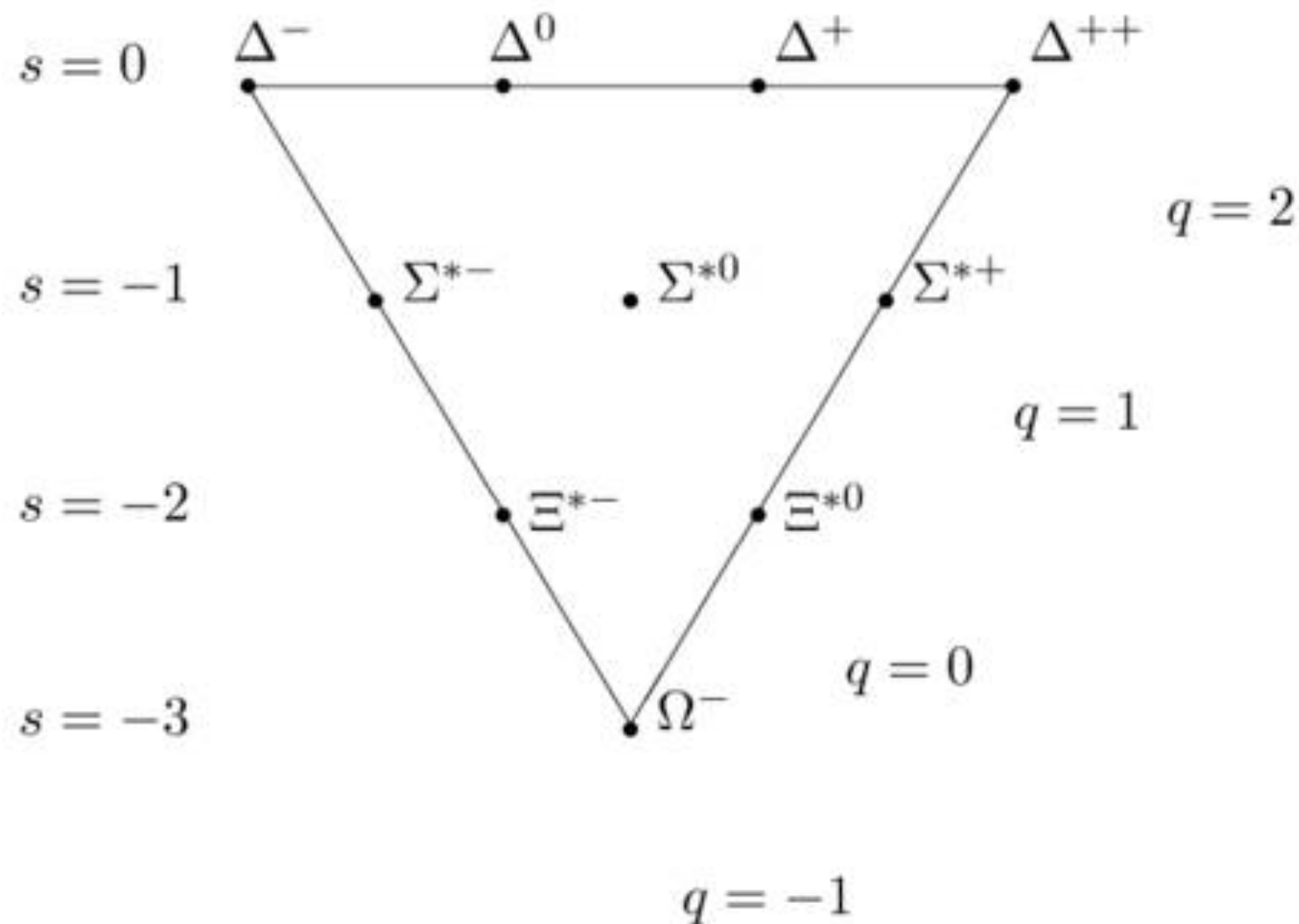


Octeto de bárions

Os mésons e bárions mais leves descobertos formavam um octeto.

# Como organizar tudo isto?

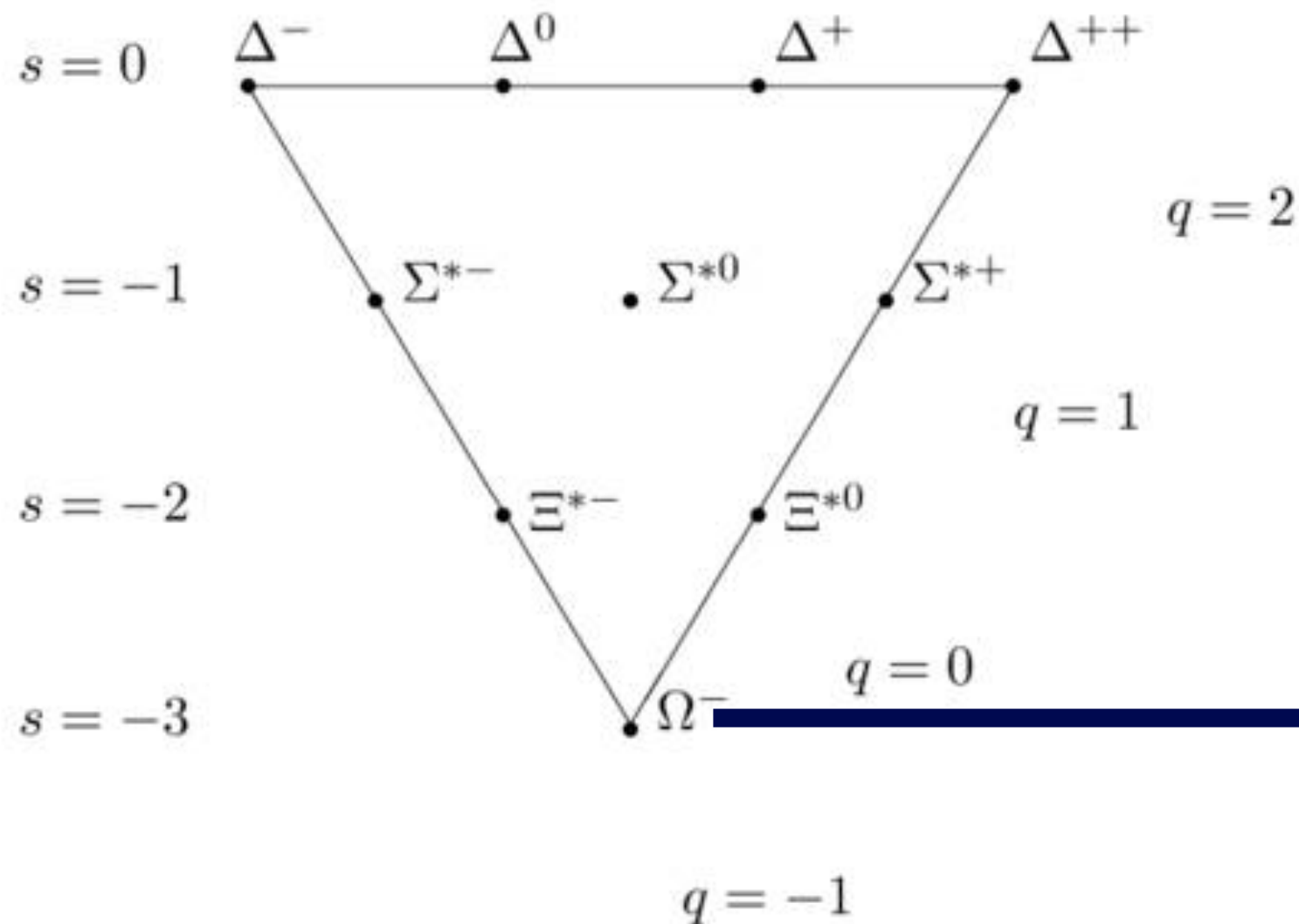
Com a descoberta de mais partículas...



Decuplete de bárions

# Como organizar tudo isto?

Com a descoberta de mais partículas...



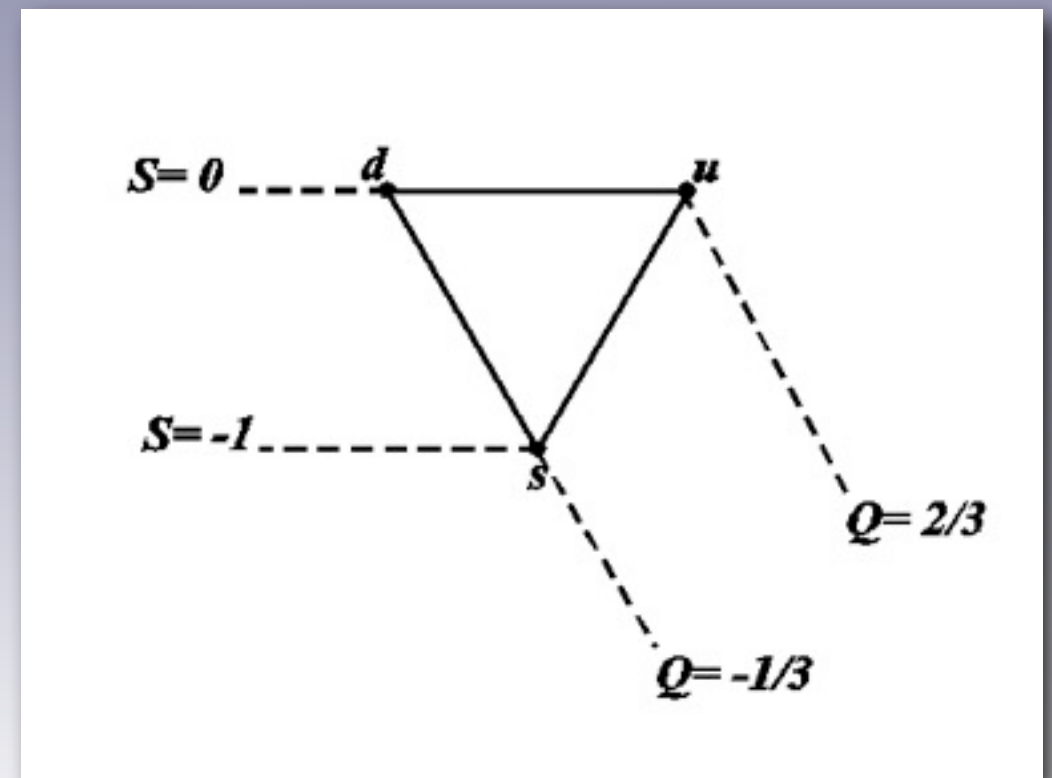
Não havia sido descoberta experimentalmente. Este arranjo foi capaz de prever sua carga, massa, estranheza e spin.

Decuplete de bárions

# O modelo a quarks

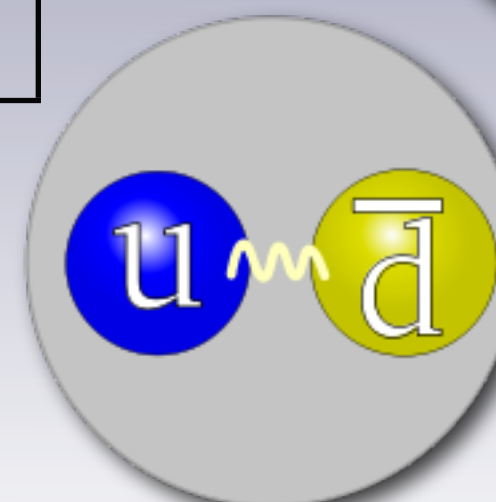
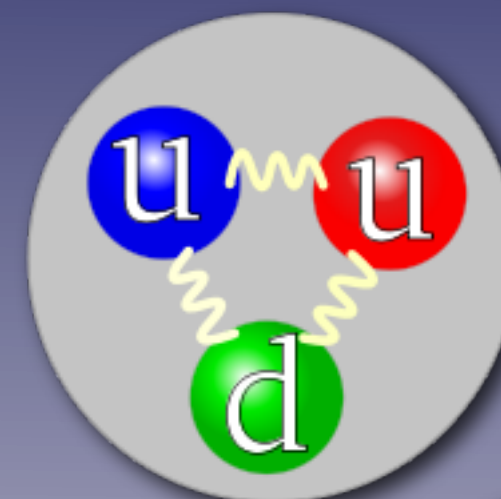
*"Three quarks for Muster Mark!  
Sure he has not got much of a bark  
And sure any he has it's all beside the mark."  
James Joyce, Finnegans Wake*

- A existência de regularidades em hádrons sugere a existência de uma subestrutura.
- 1964: Gell-Mann e Zweig propõem que hádrons são compostos por estruturas ainda menores, os quarks.
- Os quarks vêm em 3 sabores:  $u$ ,  $d$  e  $s$ .



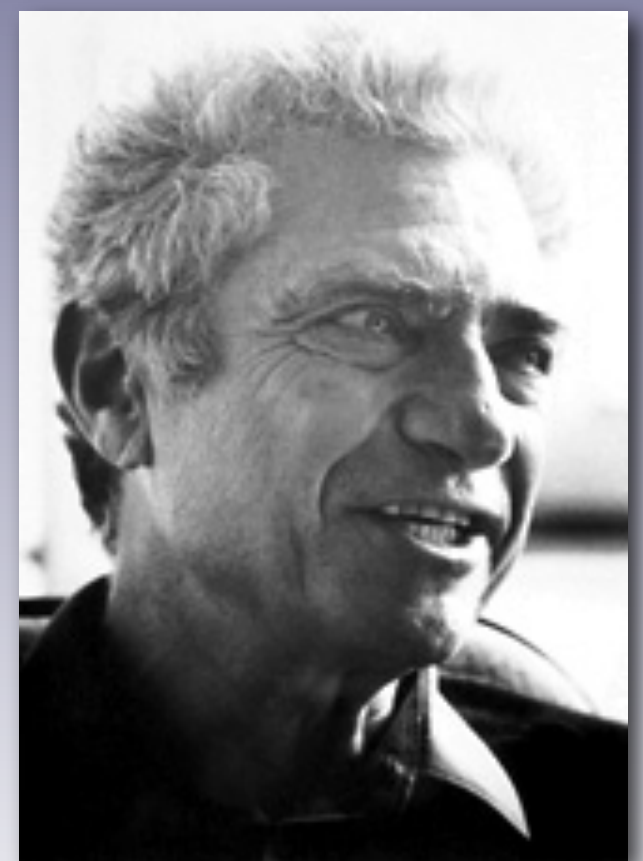
# O modelo a quarks

| Partícula     | Composição | Spins                        | Carga              |
|---------------|------------|------------------------------|--------------------|
| p             | uud        | $\uparrow\downarrow\uparrow$ | $2/3+2/3-1/3=1$    |
| n             | udd        | $\uparrow\downarrow\uparrow$ | $-1/3-1/3+2/3=0$   |
| $\Delta^+$    | uud        | $\uparrow\uparrow\uparrow$   | $2/3+2/3-1/3=1$    |
| $\Delta^{++}$ | uuu        | $\uparrow\uparrow\uparrow$   | $2/3+2/3+2/3=2$    |
| $\Omega^-$    | sss        | $\uparrow\uparrow\uparrow$   | $-1/3-1/3-1/3=-1$  |
| $\pi^+$       | $u\bar{d}$ | $\uparrow\downarrow$         | $2/3+[-(-1/3)]=1$  |
| $\pi^-$       | $\bar{u}d$ | $\uparrow\downarrow$         | $[-(-2/3)]+1/3=-1$ |



# O neutrino do múon (1962)

- Diversas pessoas previram sua existência na década de 1940.
- 1962: L. Lederman, M. Schwartz e J. Steinberg detectam um neutrino que acompanha os múons.
- 1988: Lederman, Schwartz e Steinberg recebem o prêmio Nobel.

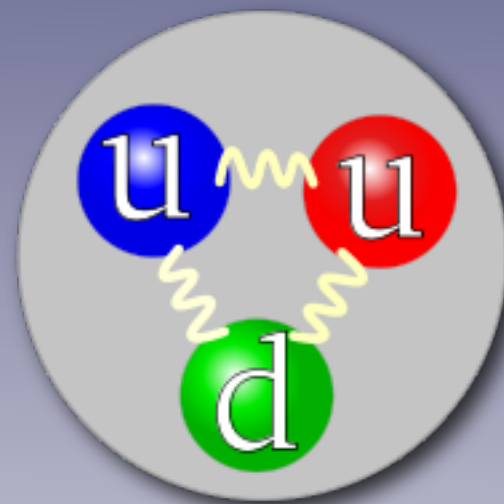


# Alguns "problemas" do modelo a quarks

Quarks nunca foram observados sozinhos!!!

# Alguns "problemas" do modelo a quarks

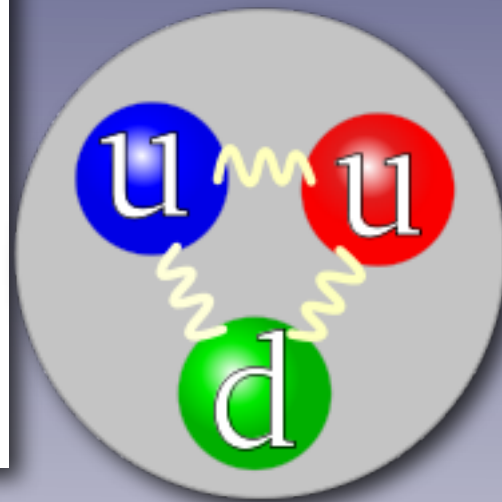
Quarks nunca foram observados sozinhos!!!



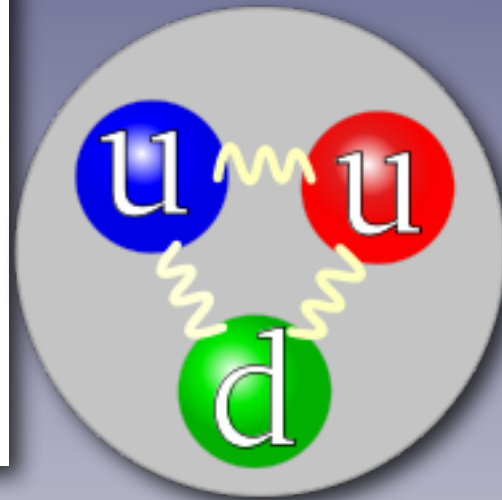
# Alguns "problemas" do modelo a quarks



Quarks nunca foram observados sozinhos!!!



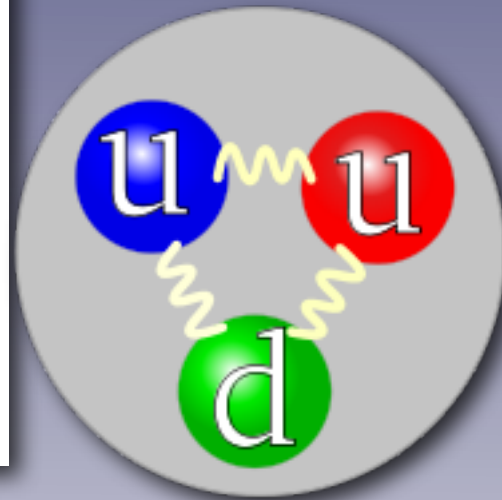
# Alguns "problemas" do modelo a quarks



Quarks nunca foram observados sozinhos!!!

- Experimentos de deep inelastic scattering (como o experimento de Rutherford), visando sondar a estrutura do próton.
- Assim como no experimento de Rutherford, conclui-se que as cargas concentram-se em algumas regiões específicas (3 regiões, os quarks).

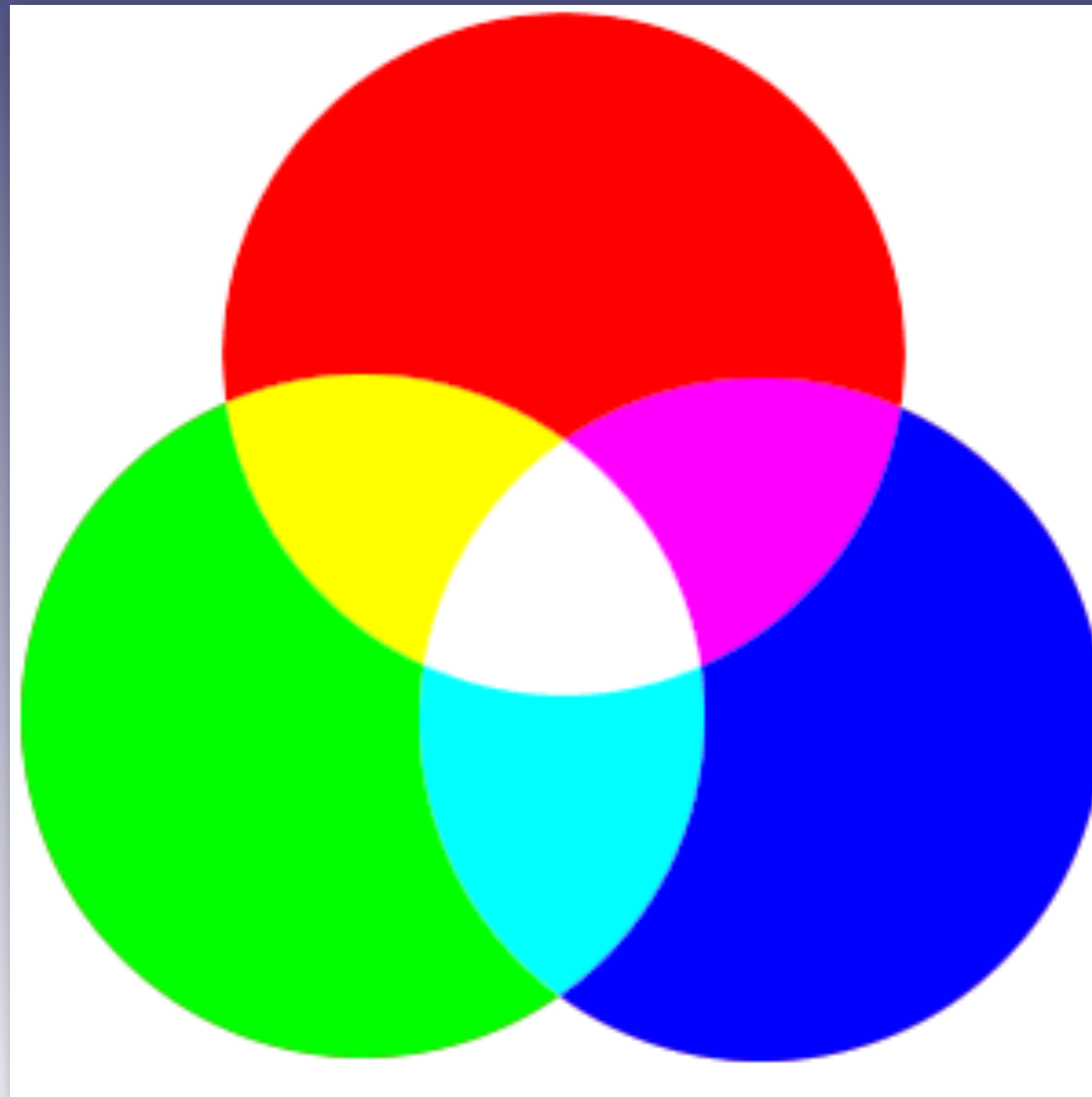
# Alguns "problemas" do modelo a quarks



Quarks nunca foram observados sozinhos!!!

- Experimentos de deep inelastic scattering (como o experimento de Rutherford), visando sondar a estrutura do próton.
- Assim como no experimento de Rutherford, conclui-se que as cargas concentram-se em algumas regiões específicas (3 regiões, os quarks).
- Problema: os quarks parecem violar o princípio de exclusão de Pauli (duas partículas de spin semi-inteiro não podem ocupar o mesmo estado quântico).
- Solução: "colorir" os quarks, conforme proposto por O. W. Greenberg em 1964.

# As "cores" dos quarks

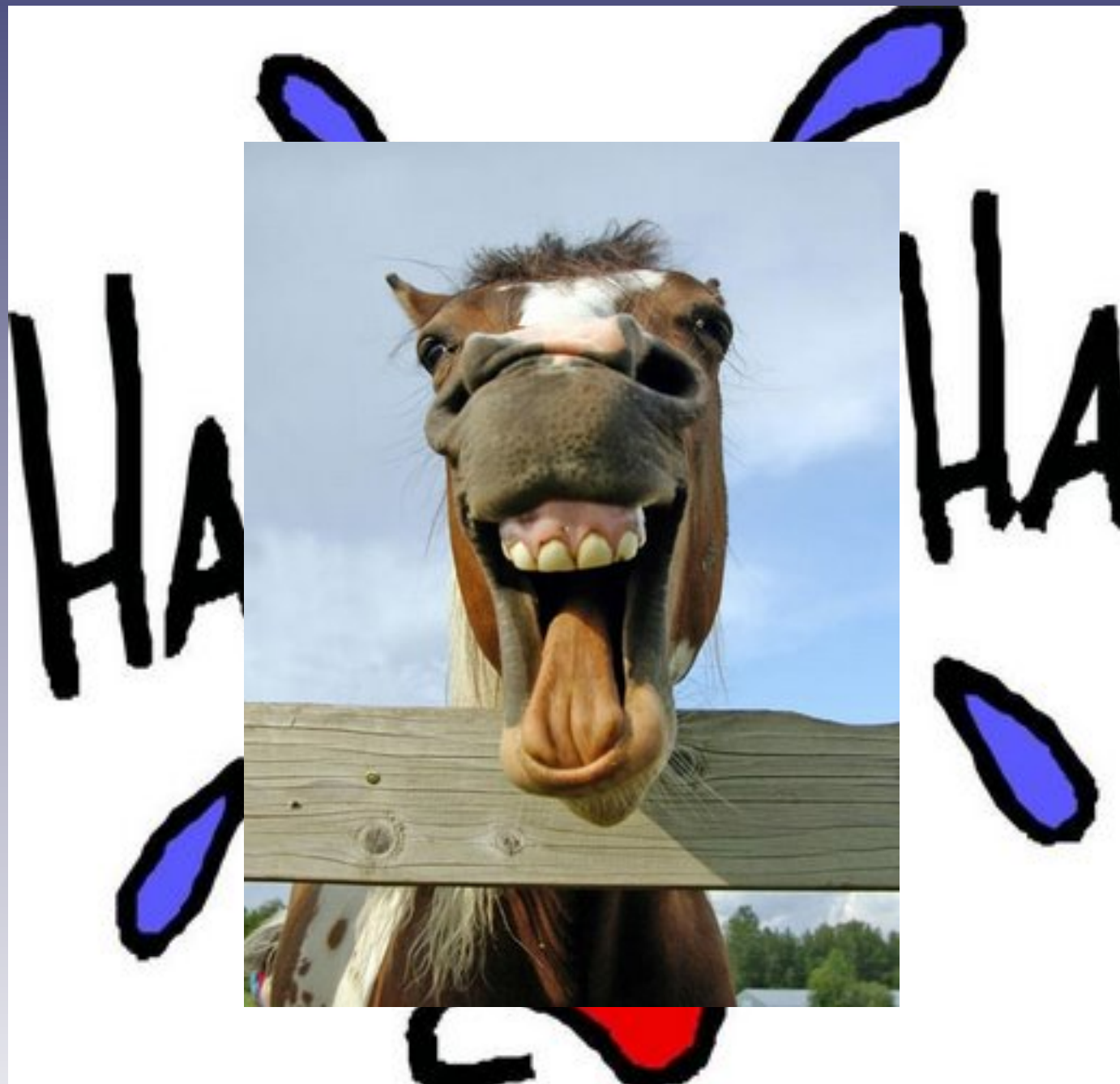


# A situação do modelo a quarks

# A situação do modelo a quarks



# A situação do modelo a quarks



# A situação do modelo a quarks



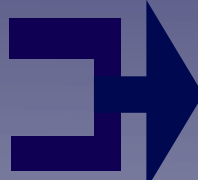
# A situação do modelo a quarks

- A situação do modelo a quarks não era boa.
- Quarks livres nunca haviam sido observados (a hipótese de confinamento não era muito bem aceita) e o princípio da exclusão de Pauli era violado (quarks “coloridos” não agradavam à comunidade científica da época).

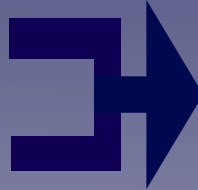
# A Revolução de Novembro

- Novembro de 1964: C. C. Ting e seu grupo descobrem o méson J.
- Novembro de 1964: B. Richter e seu grupo descobrem o méson  $\psi$ .

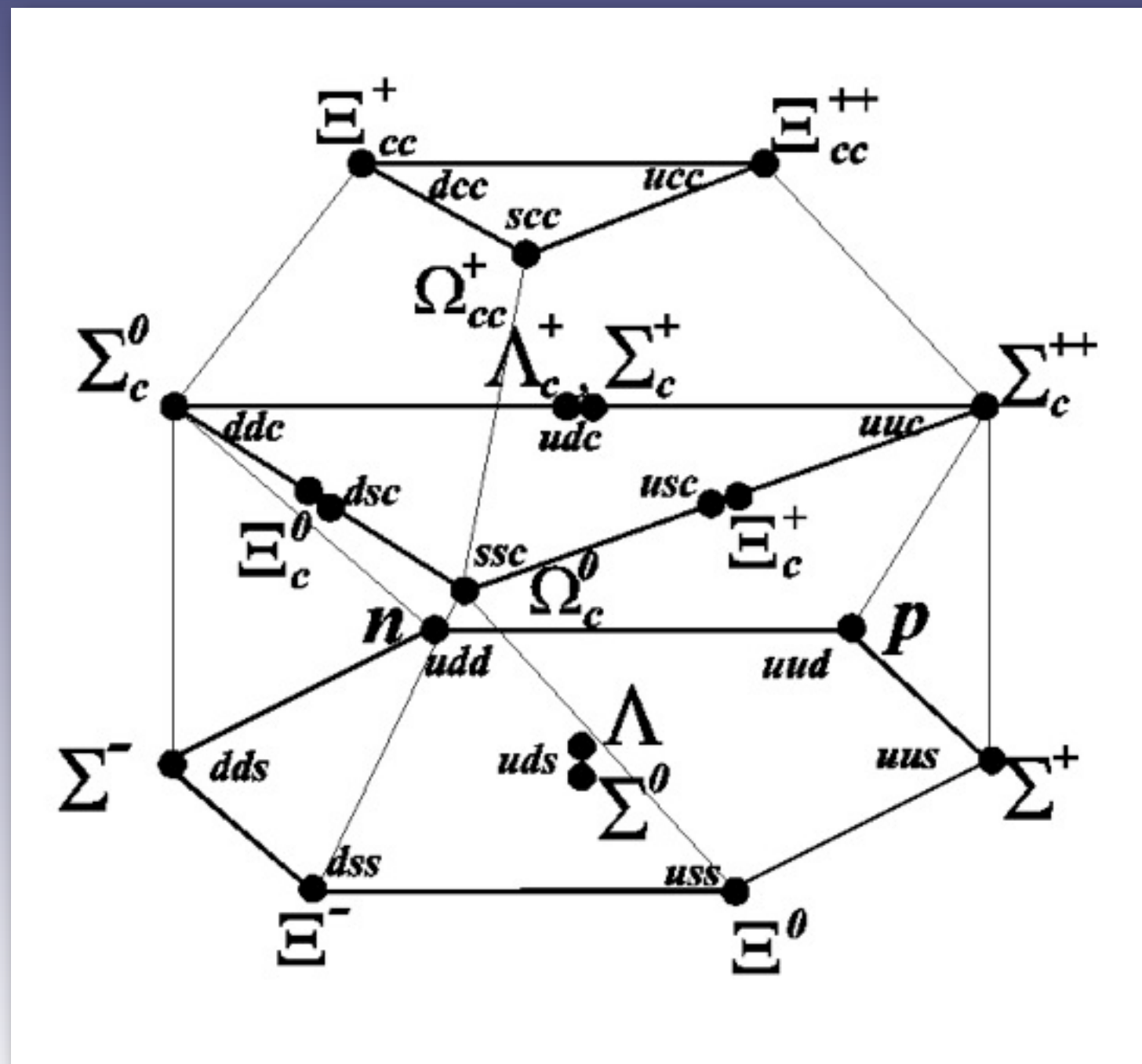
# A Revolução de Novembro

- Novembro de 1964: C. C. Ting e seu grupo descobrem o méson J.
  - Novembro de 1964: B. Richter e seu grupo descobrem o méson  $\psi$ .
- 
- méson J/ $\psi$

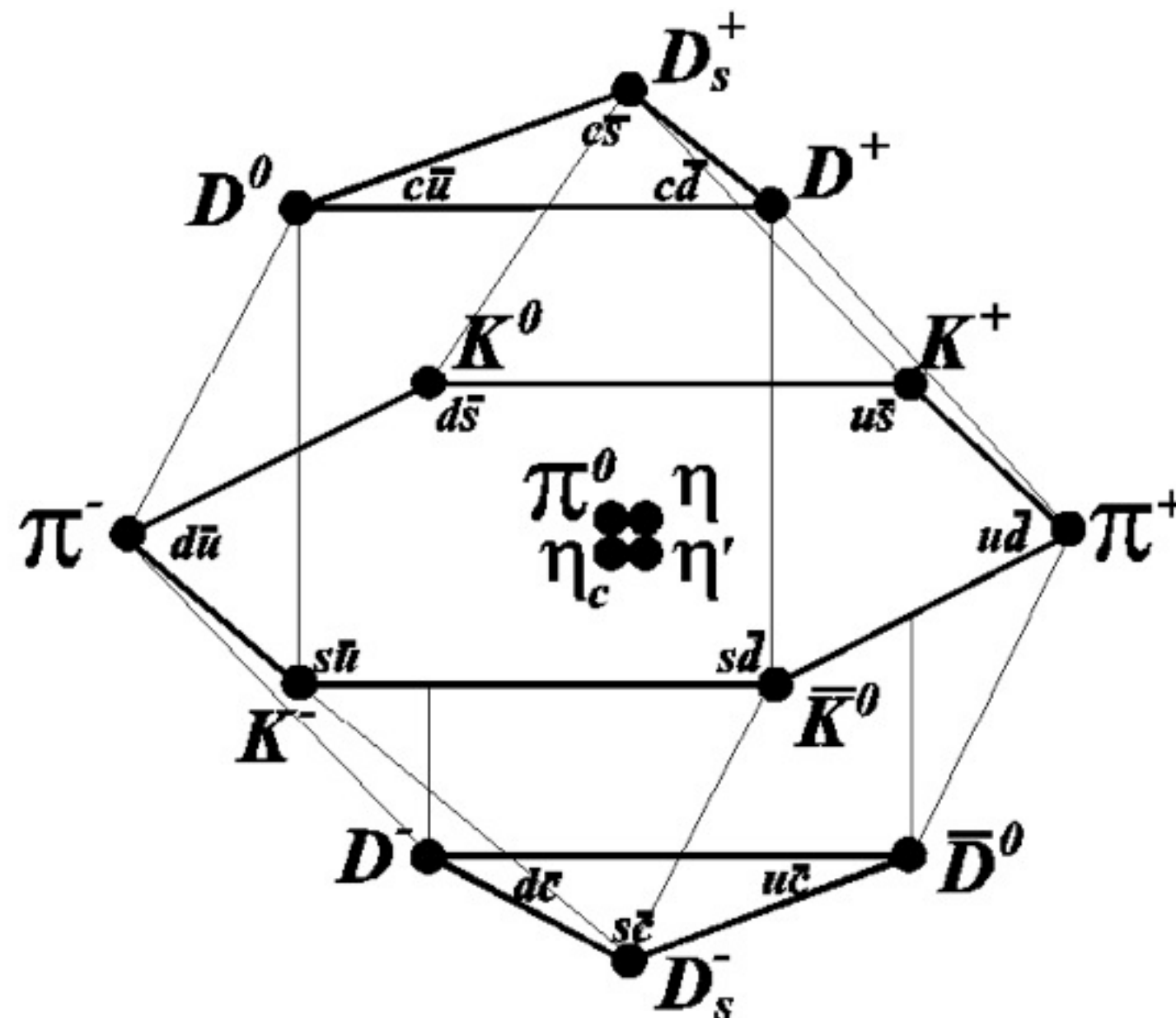
# A Revolução de Novembro

- Novembro de 1964: C. C. Ting e seu grupo descobrem o méson J.
  - Novembro de 1964: B. Richter e seu grupo descobrem o méson  $\psi$ .
- 
- méson J/ $\psi$
- O J/ $\psi$  é um méson muito pesado eletricamente neutro.
  - Seu tempo de vida é extremamente longo ( $10^{-20}$  s, comparado aos usuais  $10^{-23}$  s).
  - Já havia sido proposta a existência de uma quarta geração de quarks.
  - Verificou-se que o J/ $\psi$  é um estado ligado  $c\bar{c}$ .
  - O nome quark charmoso (charm) havia sido introduzido previamente por Bjorken e Glashow.
  - A descoberta do J/ $\psi$  resgatou o modelo a quarks e o colocou na vanguarda da física de partículas, por isto esta descoberta e os eventos que a sucederam são a “Revolução” de Novembro.

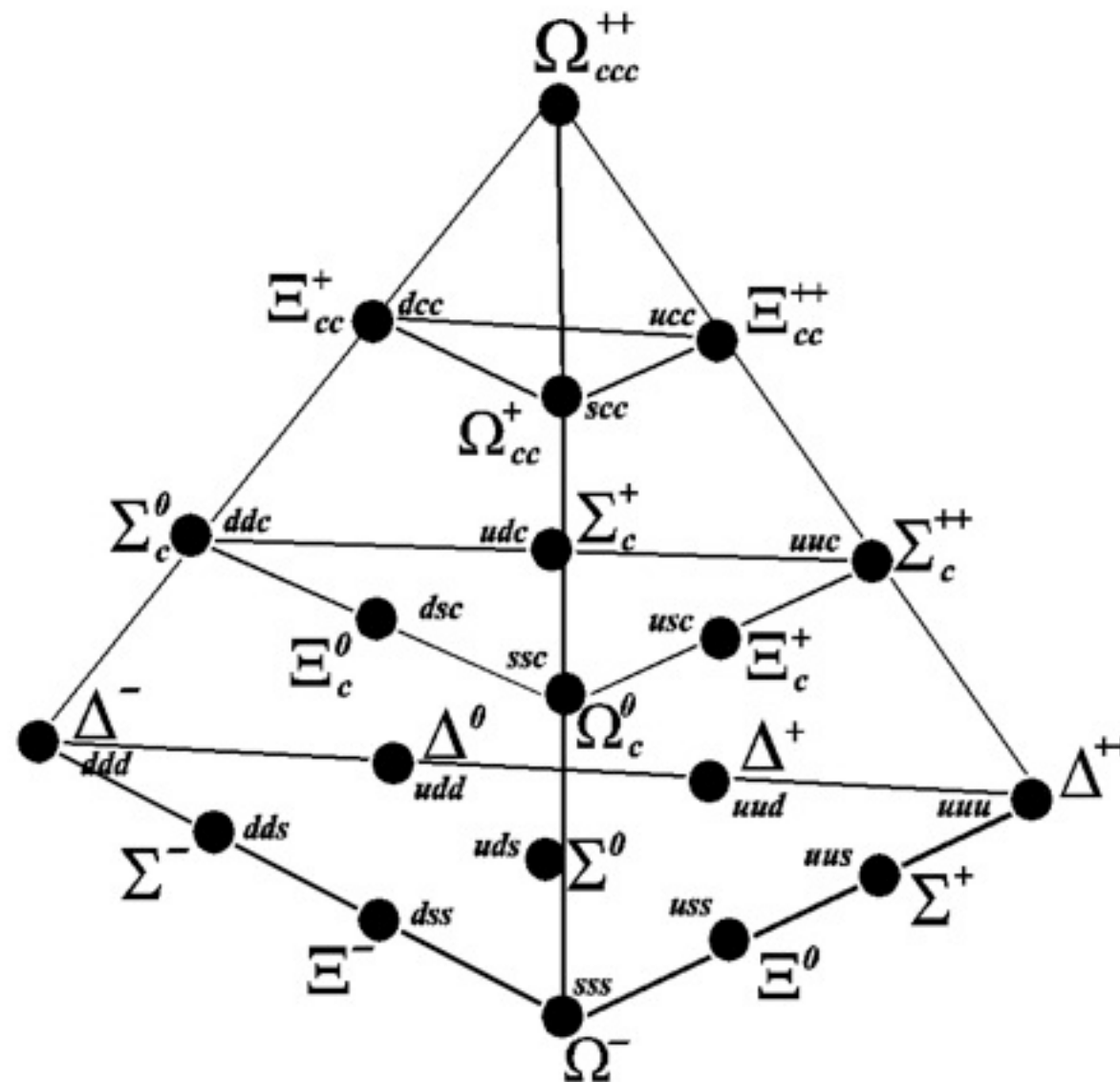
E a bagunça aumenta...



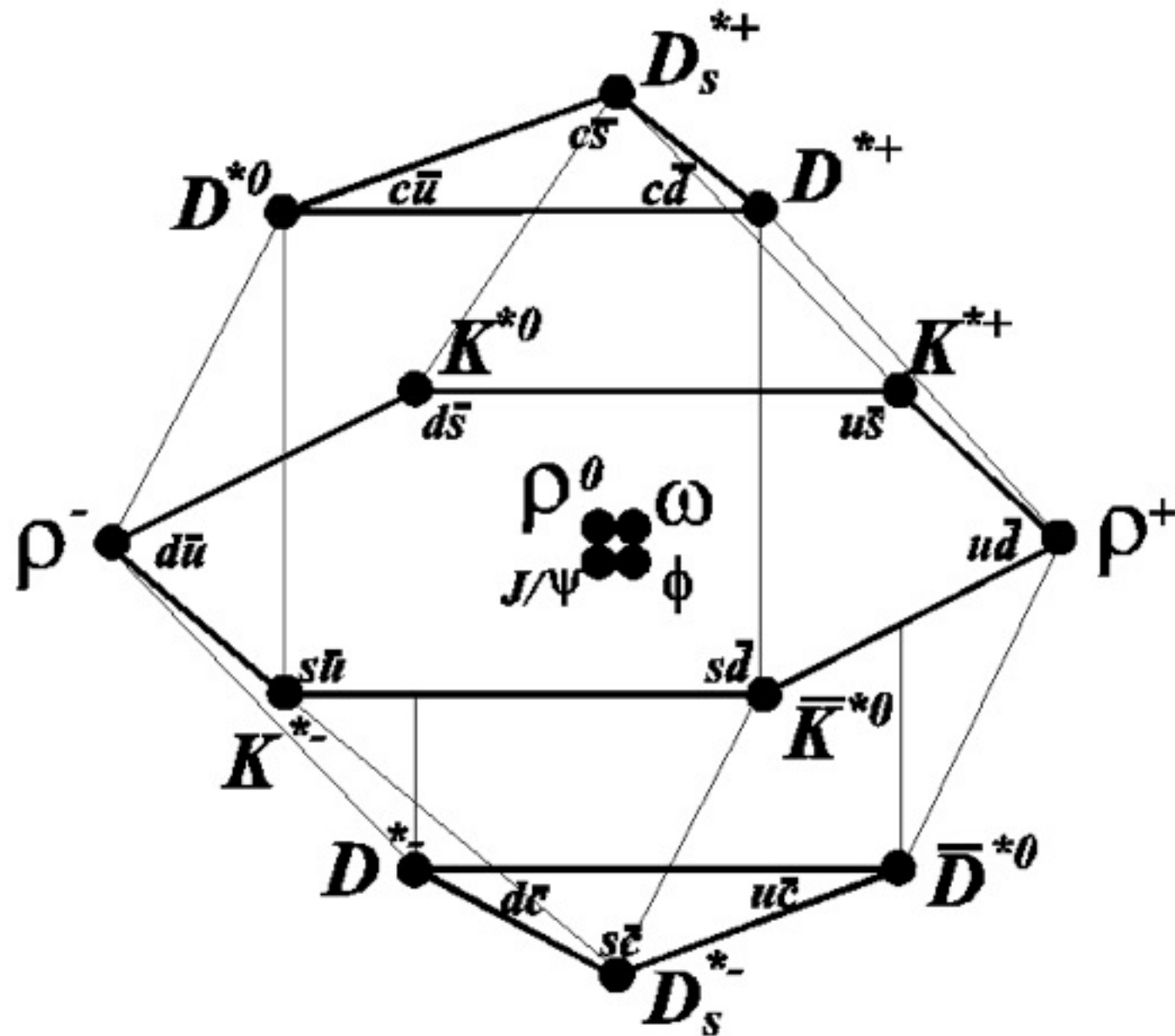
# E a bagunça aumenta...



# E a bagunça aumenta...



# E a bagunça aumenta...



# Uma terceira geração de léptons

- 1975: M. Perl e colaboradores descobrem um quinto lépton, o  $\tau$ .
- A massa do  $\tau$  seria  $1,7 \text{ GeV}/c^2$  (note que a classificação de léptons como partículas leves, e bárions como partículas pesadas já não fazia o menor sentido).
- Seguindo a lógica, se há um terceiro lépton, deve haver também um neutrino associado, o neutrino do  $\tau$ .
- O neutrino do  $\tau$  foi descoberto em 2000.

# Um quinto sabor de quark: o b

- 1973: Kobaysahi e Maskawa postulam a existência de um quinto quark para explicar violação de CP.
- 1977: o time de M. Lederman descobre-se o méson upsilon  $\Upsilon$ .
- O  $\Upsilon$  foi interpretado como um estado ligado de  $b\bar{b}$ .
- b significa bottom.
- A massa do quark b é aproximadamente  $4,5 \text{ GeV}/c^2$ .
- Novos bárions e mésons contendo o quark b foram descobertos nos anos que sucederam sua descoberta.

# O último (?) quark que faltava: o top

- 1973: Kobaysahi e Maskawa postulam a existência de uma terceira geração de quarks.
- 1977: o time de M. Lederman descobre-se o bottom.
- O top demorou mais de 18 anos pra ser observado após a descoberta do b.
- A massa do quark t é aproximadamente  $175 \text{ GeV}/c^2$ .
- 1995: a colaboração dos experimentos CDF e D0 publicam a descoberta do t.

# Construindo o Modelo Padrão - Parte I

## FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

### Leptons spin = 1/2

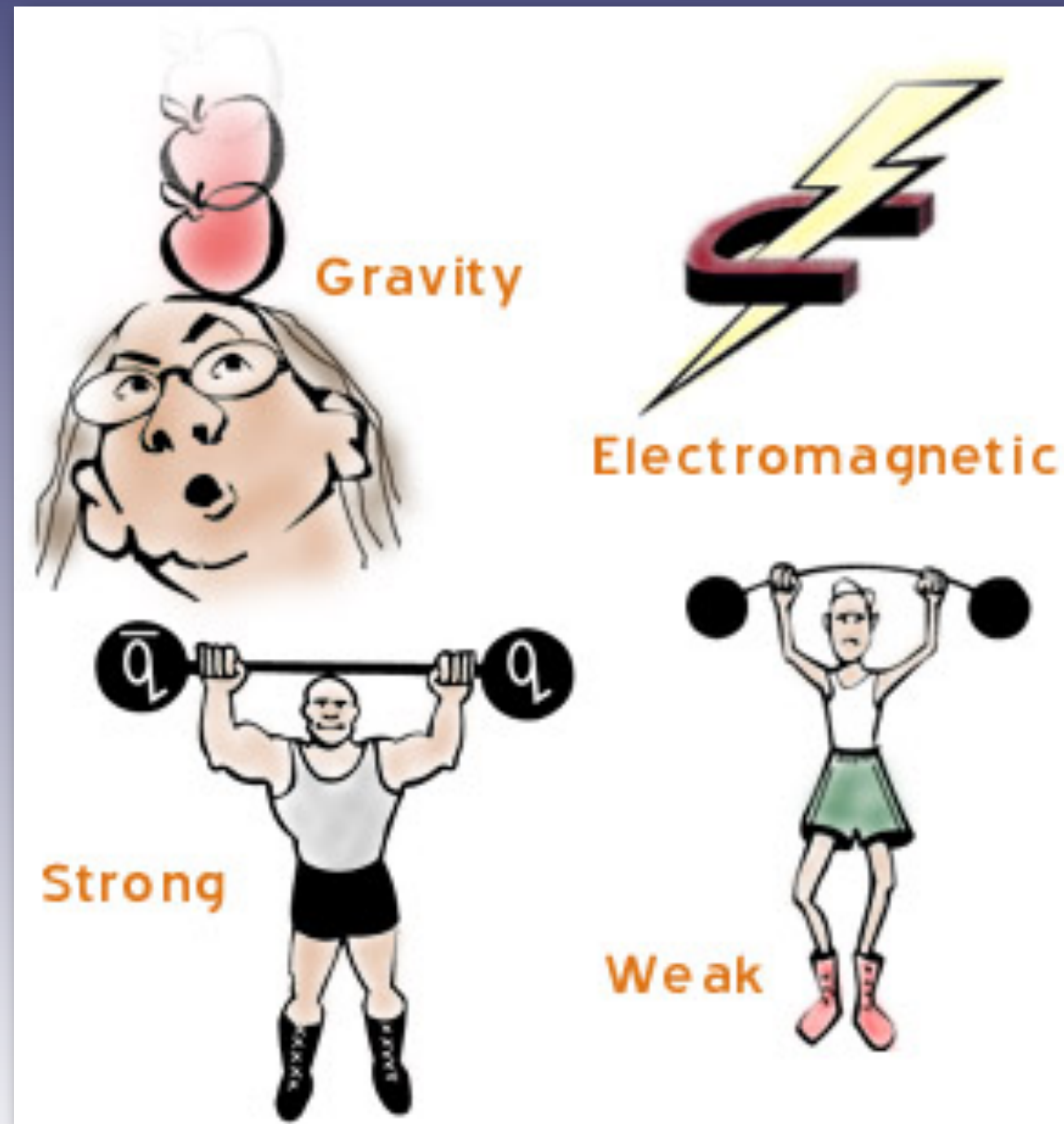
| Flavor                     | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup>   | Electric<br>charge |
|----------------------------|------------------------------|--------------------|
| $\nu_L$ lightest neutrino* | $(0-0.13)\times 10^{-9}$     | 0                  |
| $e$ electron               | 0.000511                     | -1                 |
| $\nu_M$ middle neutrino*   | $(0.009-0.13)\times 10^{-9}$ | 0                  |
| $\mu$ muon                 | 0.106                        | -1                 |
| $\nu_H$ heaviest neutrino* | $(0.04-0.14)\times 10^{-9}$  | 0                  |
| $\tau$ tau                 | 1.777                        | -1                 |

### Quarks spin = 1/2

| Flavor      | Approx.<br>Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|-------------|---------------------------------------|--------------------|
| $u$ up      | 0.002                                 | 2/3                |
| $d$ down    | 0.005                                 | -1/3               |
| $c$ charm   | 1.3                                   | 2/3                |
| $s$ strange | 0.1                                   | -1/3               |
| $t$ top     | 173                                   | 2/3                |
| $b$ bottom  | 4.2                                   | -1/3               |

<http://particleadventure.org/>

# Construindo o Modelo Padrão - Parte II



<http://particleadventure.org/>

# Construindo o Modelo Padrão - Parte II

## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

### Unified Electroweak spin = 1

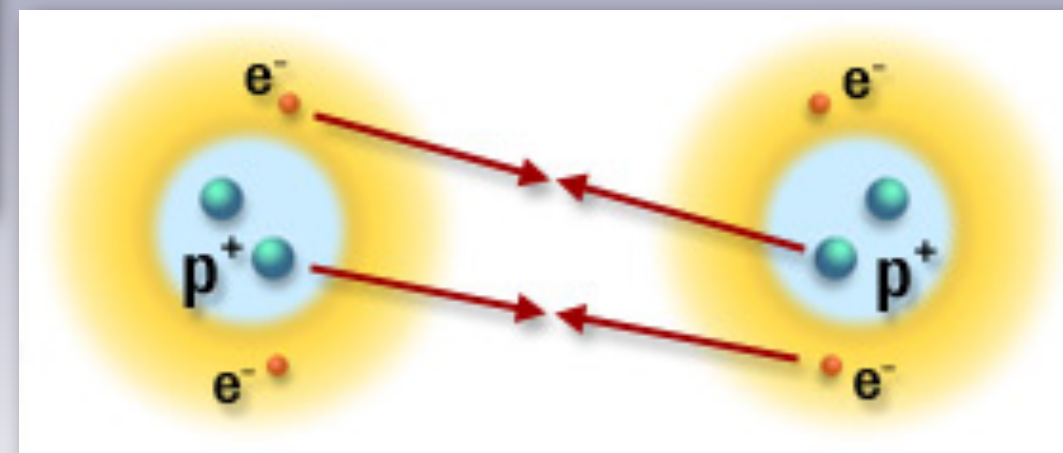
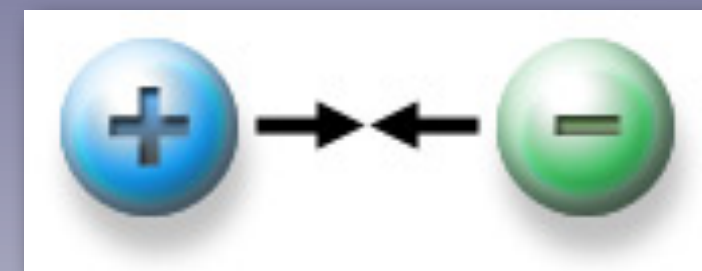
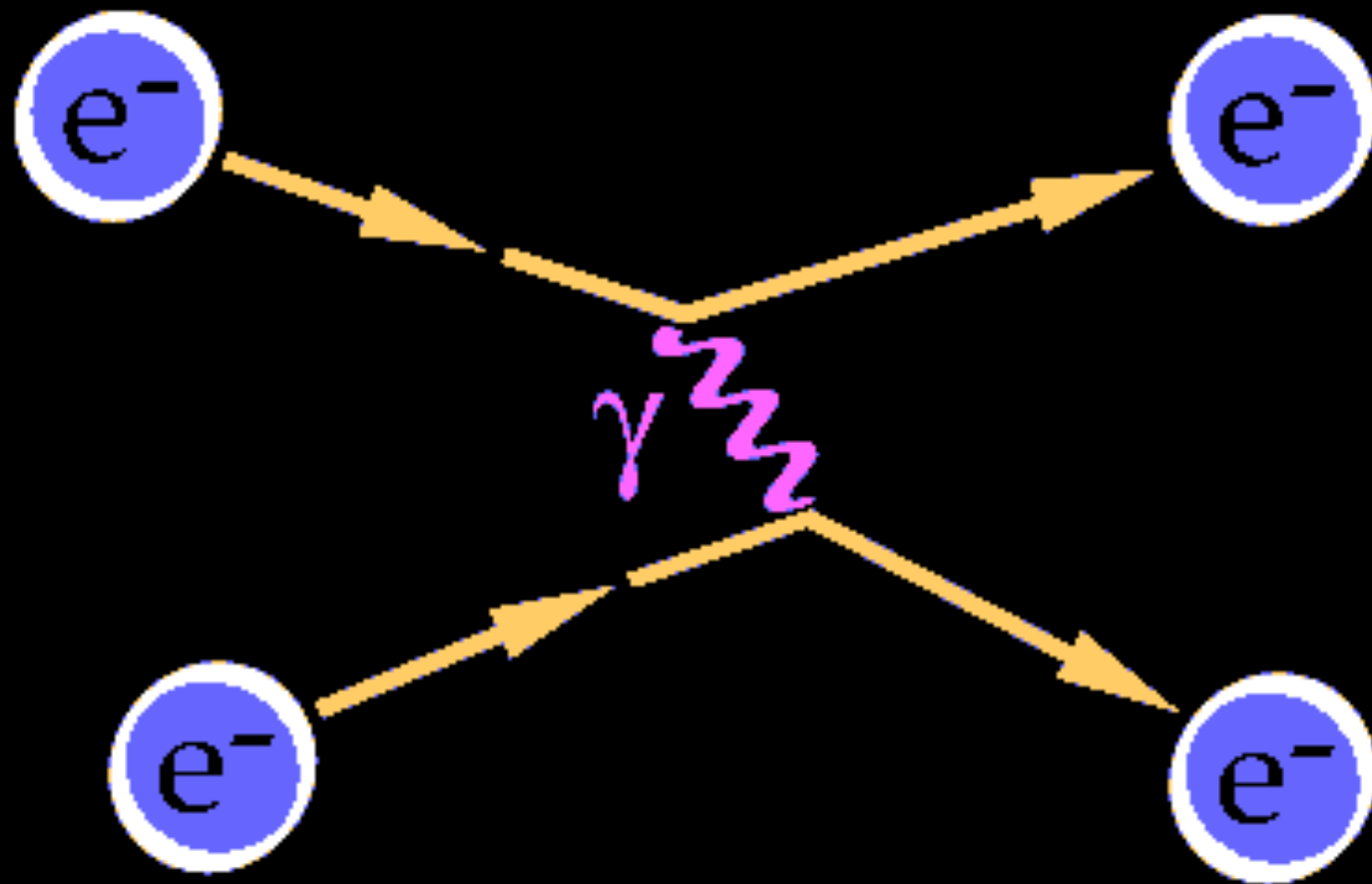
| Name                                                                                                              | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| <br>photon                     | 0                          | 0                  |
| <br>W <sup>-</sup>             | 80.39                      | -1                 |
| <br>W <sup>+</sup><br>W bosons | 80.39                      | +1                 |
| <br>Z <sup>0</sup><br>Z boson  | 91.188                     | 0                  |

### Strong (color) spin = 1

| Name                                                                                           | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| <br>gluon | 0                          | 0                  |

<http://particleadventure.org/>

# Interação eletromagnética

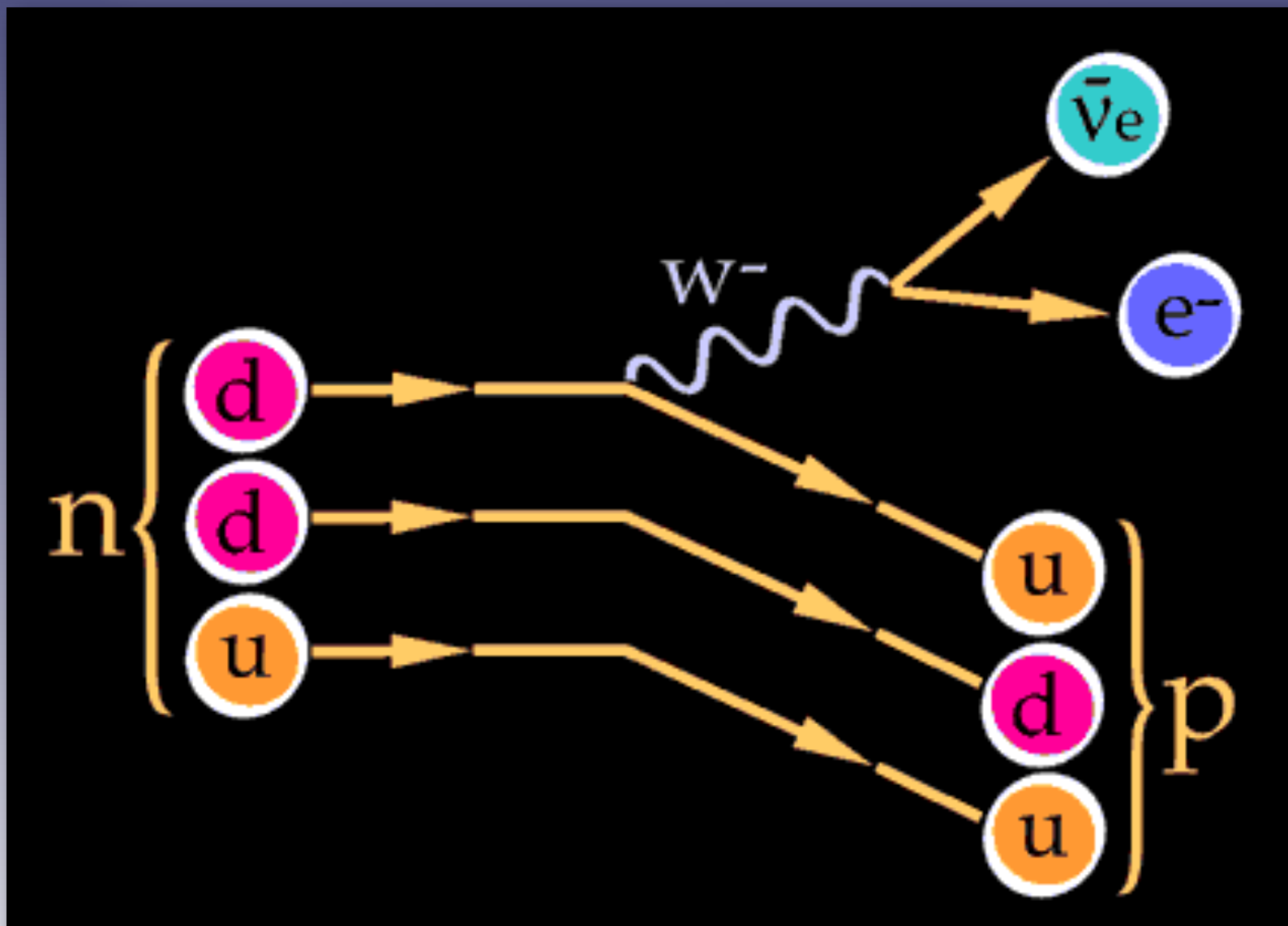


- Interação de alcance infinito.
- Mensageiros: fótons.
- Fótons não têm massa nem carga.
- Só há interação eletromagnética se a partícula possuir carga.

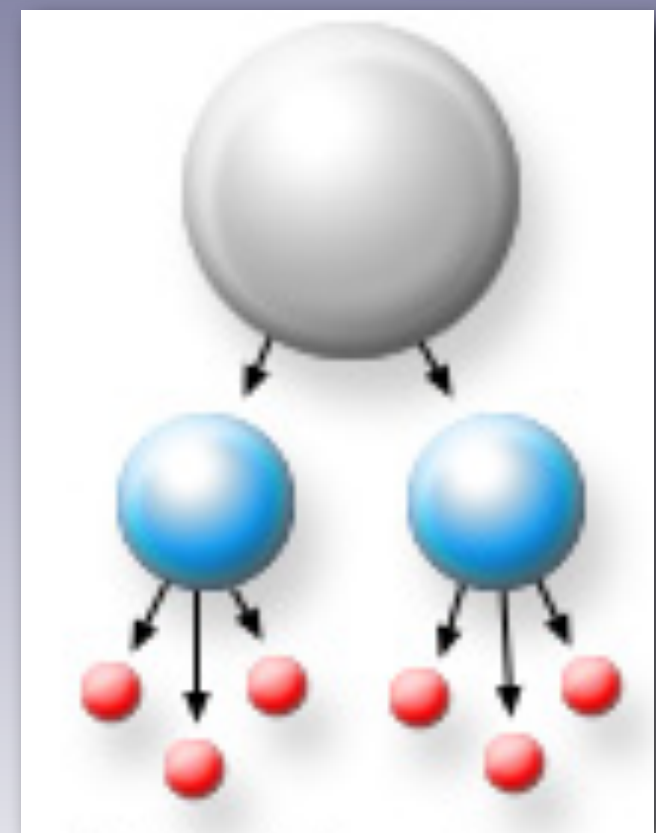
# Interação eletromagnética



# Interação fraca

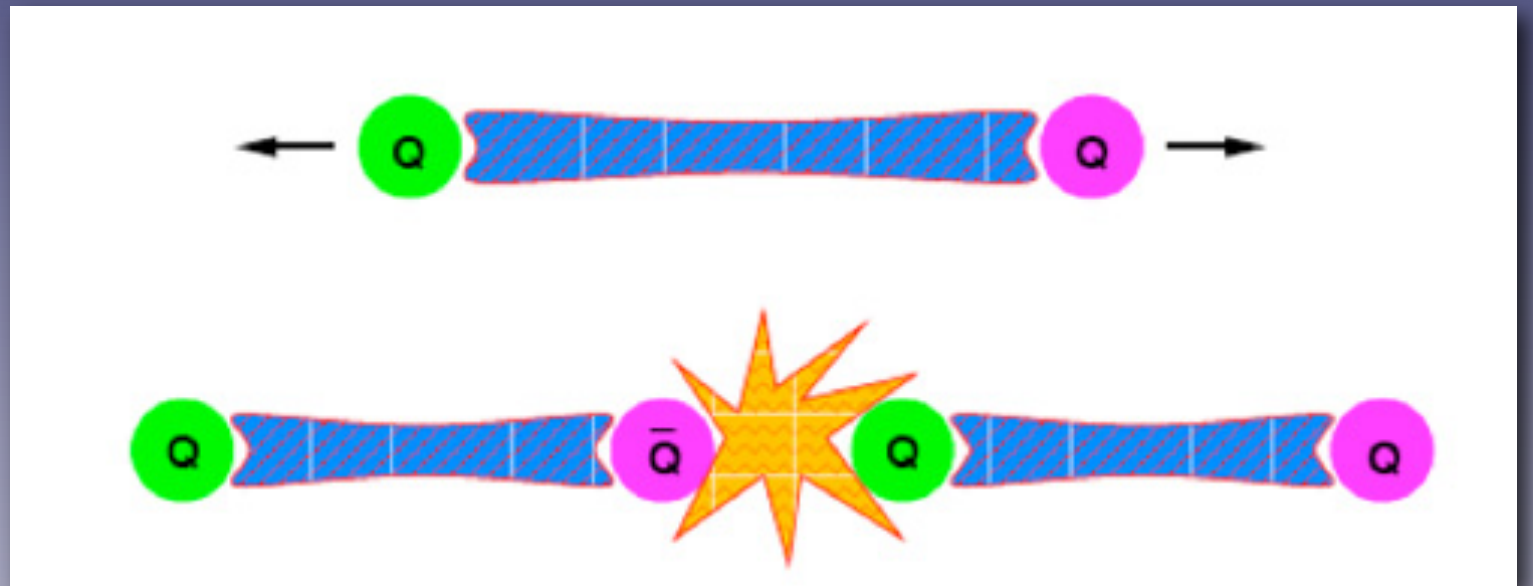
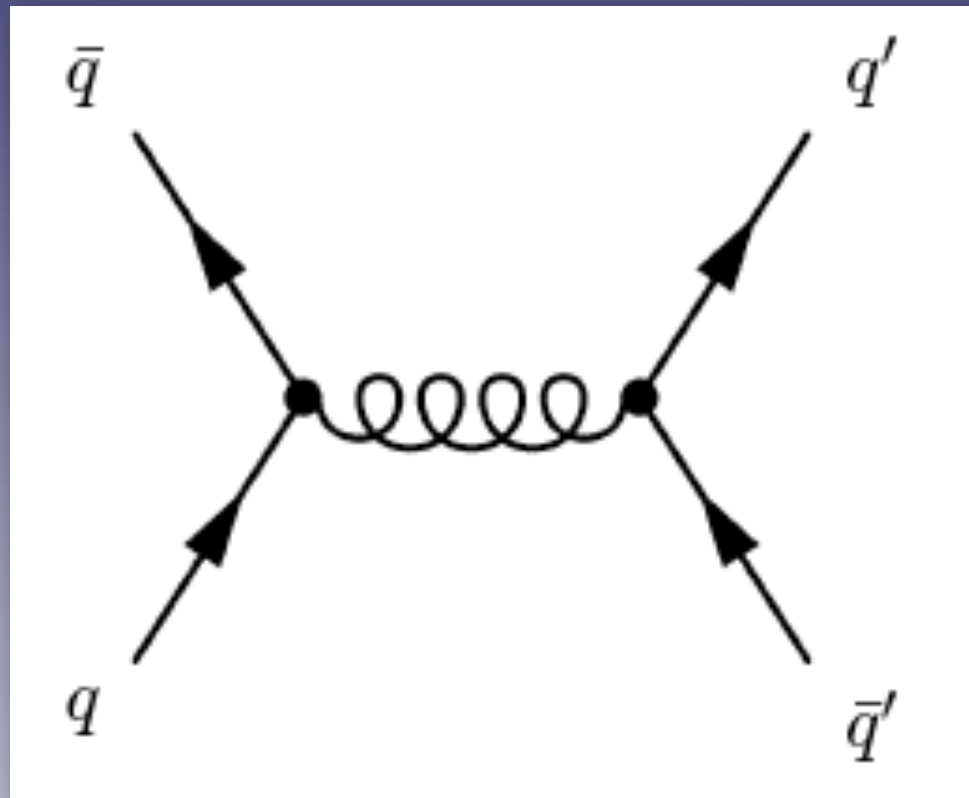


Por que só observamos os férmions mais leves?

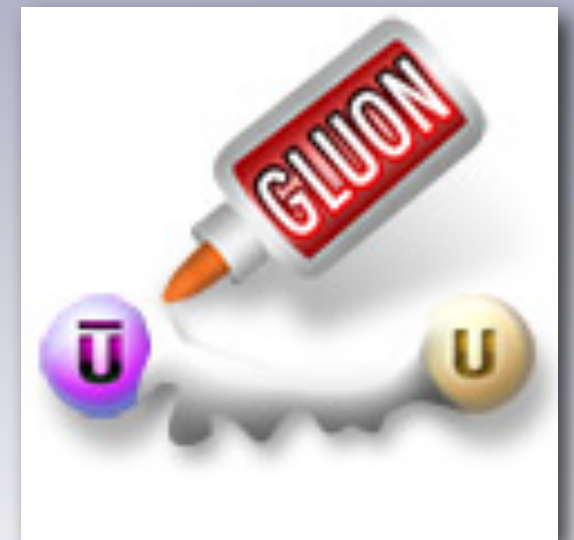


- Interação de curto alcance.
- Mensageiros: bósons da força fraca ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ).
- Lida com reações em que há mudanças de "sabor".

# Interação forte



- Interação de curto alcance.
- Mensageiros: glúons.
- Glúons têm massa zero, mas possuem cor.
- A interação entre quarks é mais intensa quanto mais distantes eles estiverem (CONFINAMENTO).
- A interação entre quarks é menos intensa quanto mais próximos eles estiverem (LIBERDADE ASSINTÓTICA).



# Construindo o Modelo Padrão - Parte III

## Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

| Property                                                                                  | Gravitational Interaction      | Weak Interaction<br>(Electroweak) | Electromagnetic Interaction | Strong Interaction |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Acts on:                                                                                  | Mass – Energy                  | Flavor                            | Electric Charge             | Color Charge       |
| Particles experiencing:                                                                   | All                            | Quarks, Leptons                   | Electrically Charged        | Quarks, Gluons     |
| Particles mediating:                                                                      | Graviton<br>(not yet observed) | $W^+$ $W^-$ $Z^0$                 | $\gamma$                    | Gluons             |
| Strength at $\begin{cases} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{cases}$ | $10^{-41}$<br>$10^{-41}$       | 0.8<br>$10^{-4}$                  | 1<br>1                      | 25<br>60           |

Strength at  $\begin{cases} 3 \times 10^{-17} \text{ m} \\ 10^{-18} \text{ m} \end{cases}$

Particles mediating:

(not yet observed)  
Graviton

$W^+$   $W^-$   $Z^0$

$\gamma$

Gluons

# ESTRUTURA ELEMENTAR DA MATÉRIA

PARTÍCULAS MEDIADORAS

|                                                                |
|----------------------------------------------------------------|
| Interação Eletromagnética                                      |
| <b>FÓTON</b>                                                   |
| Interação Fraca                                                |
| <b>W<sup>+</sup></b> <b>Z<sup>0</sup></b> <b>W<sup>-</sup></b> |
| Interação Forte                                                |
| <b>GLÚON</b>                                                   |
| Interação Gravitacional                                        |
| <b>GRÁVITON</b>                                                |

QUARKS

|                  |                     |                    |
|------------------|---------------------|--------------------|
| <b>u</b><br>up   | <b>c</b><br>charm   | <b>t</b><br>top    |
| <b>d</b><br>down | <b>s</b><br>strange | <b>b</b><br>bottom |

LÉPTONS

|                                    |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>ν<sub>e</sub></b><br>neutrino e | <b>ν<sub>μ</sub></b><br>neutrino μ | <b>ν<sub>τ</sub></b><br>neutrino τ |
| <b>e</b><br>elétron                | <b>μ</b><br>múon                   | <b>τ</b><br>tau                    |

## Léptons

Léptons são partículas que interagem por meio das interações eletromagnética e fraca. Há três famílias de léptons, cada uma composta por um lépton carregado, que interage eletromagnética e fracamente, e por um neutrino, que interage apenas fracamente.

Os **elétrons** (e) são estáveis e compõem a eletrosfera que envolve o núcleo dos átomos, sendo os responsáveis pelas ligações químicas entre os elementos. Em movimento, produzem a corrente elétrica e geram campos magnéticos. Os léptons **múon** (μ) e **tau** (τ) possuem características similares às do elétron, mas são muito mais pesados e instáveis, decaindo rapidamente em partículas mais leves.

Os **neutrinos** (ν) são extremamente leves, não possuem carga elétrica e interagem muito fracamente, a ponto de serem capazes de atravessar toda a Terra sem se chocar com nenhuma partícula. São produzidos em decaimentos nucleares e na fusão nuclear que ocorre no Sol; são responsáveis pelo seu brilho.

## Quarks

Quarks são partículas que interagem por meio das interações eletromagnética, fraca e forte, e possuem carga elétrica fracionária (+2/3 e -1/3), além das "cargas de cor" relativas à interação forte. Eles formam os hádrons (três quarks ou um quark e um antiquark) e permanecem confinados dentro deles, não sendo observados em estado livre.

Os quarks da primeira família, **up** (u) e **down** (d), formam os prótons (uud) e nêutrons (udd) e, portanto, toda a matéria usual, além de diversos mésons, como o pión π<sup>+</sup> (u d̄) e o káon K<sup>0</sup> (d s̄).

As outras duas famílias de quarks, compostas pelo **strange** (s) e **charm** (c), e pelo **bottom** (b) e **top** (t), não formam a matéria usual, sendo apenas produzidas como resultado de colisões entre outras partículas.



## Interação Eletromagnética (γ)

O fóton (γ) é o quantum do campo eletromagnético. Toda radiação **eletromagnética**, desde as ondas de rádio e televisão, passando pela luz visível, até os raios ultravioleta e gama, é formada por fótons. Partículas sem massa ou carga, os fótons são responsáveis pela transmissão da interação entre as partículas eletricamente carregadas.

## Interação Gravitacional (G)

A interação gravitacional atua sobre todas as partículas e seria intermediada pelo gráviton. No entanto, no mundo subatômico, ela não tem nenhuma influência, já que ela é uma centena de milhão de milhão de milhão de milhão de milhão (10<sup>-36</sup>) de vezes mais fraca que as outras três interações.

## Interação Fraca (W e Z)

A **interação fraca** é intermediada pelos bósons carregados W<sup>+</sup> e W<sup>-</sup> e pelo bóson neutro Z<sup>0</sup>. A interação fraca é de curtíssimo alcance, agindo em distâncias 1.000 vezes menores que o núcleo atômico, sendo 10.000 mais fraca que a interação eletromagnética. A interação fraca afeta tanto léptons como quarks e é responsável pelo decaimento beta, quando um nêutron se transforma em um próton, emitindo um elétron e seu antineutrino. Ela também desempenha importante papel na geração da energia das estrelas como o Sol.

## Interação Forte (g)

O glúon (g) desempenha para a **interação forte** papel semelhante ao dos fótons para a interação eletromagnética. Eles são trocados entre partículas que possuem "cargas de cor", como os quarks. As três "cores" são as "cargas fortes" equivalentes às cargas elétricas positiva e negativa. A interação forte é 100 vezes mais intensa que a interação eletromagnética e seu alcance não vai além do núcleo atômico. Ela é responsável por manter os quarks ligados, formando prótons e nêutrons, e seu efeito residual de longa distância mantém prótons e nêutrons unidos, formando o núcleo atômico.

## Antipartículas

Toda partícula possui sua antipartícula, com mesma massa e spin, mas com carga oposta. Para diferenciar as antipartículas das partículas, as correspondentes antipartículas são denotadas com uma barra sobre seu símbolo ou então pela troca de carga (+ ↔ -). A matéria formada por antipartículas é chamada de **antimatéria**.

Para obter mais informações sobre os conceitos apresentados neste cartaz, acesse o site:

<http://www.sprace.org.br/eem/>

Se você quiser fazer perguntas sobre o tema para especialistas na área ou discutir com seus colegas, acesse o Fórum de Discussão no site:

<http://www.sprace.org.br/forum/>



# The PARTICLE ZOO

Subatomic Particle Plush Toys FROM THE STANDARD MODEL OF PHYSICS & beyond!

## QUARKS



### UP QUARK

A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.



### CHARM QUARK

A second generation quark, he is charmed, indeed.



### TOP QUARK

This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.

### DOWN QUARK

A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.



### STRANGE QUARK

What's so strange about this second generation quark?



### BOTTOM QUARK

This third generation quark is puttin' on the pounds.



## LEPTONS

### ELECTRON-NEUTRINO

These minuscule bandits like to steal away energy and escape detection.



### MUON-NEUTRINO

A slightly heavier bandit than his sibling to the left.



### TAU-NEUTRINO

Wily and sneaky, this bandit is the newest particle to arrive at the Zoo.



### ELECTRON

A familiar friend, this negatively charged, busy li'l guy likes to bond.



### MUON

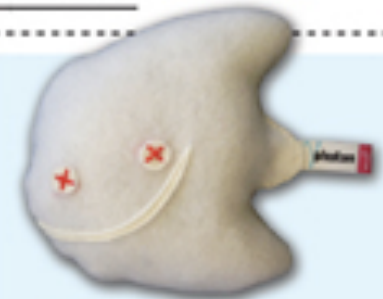
A "heavy electron" who lives fast and dies young.



### TAU

A "heavy muon" who could stand to lose a little weight.

## FORCE CARRIERS



### PHOTON

The massless wavicle we know and love.



### GLUON

The "glue" of the strong nuclear force.

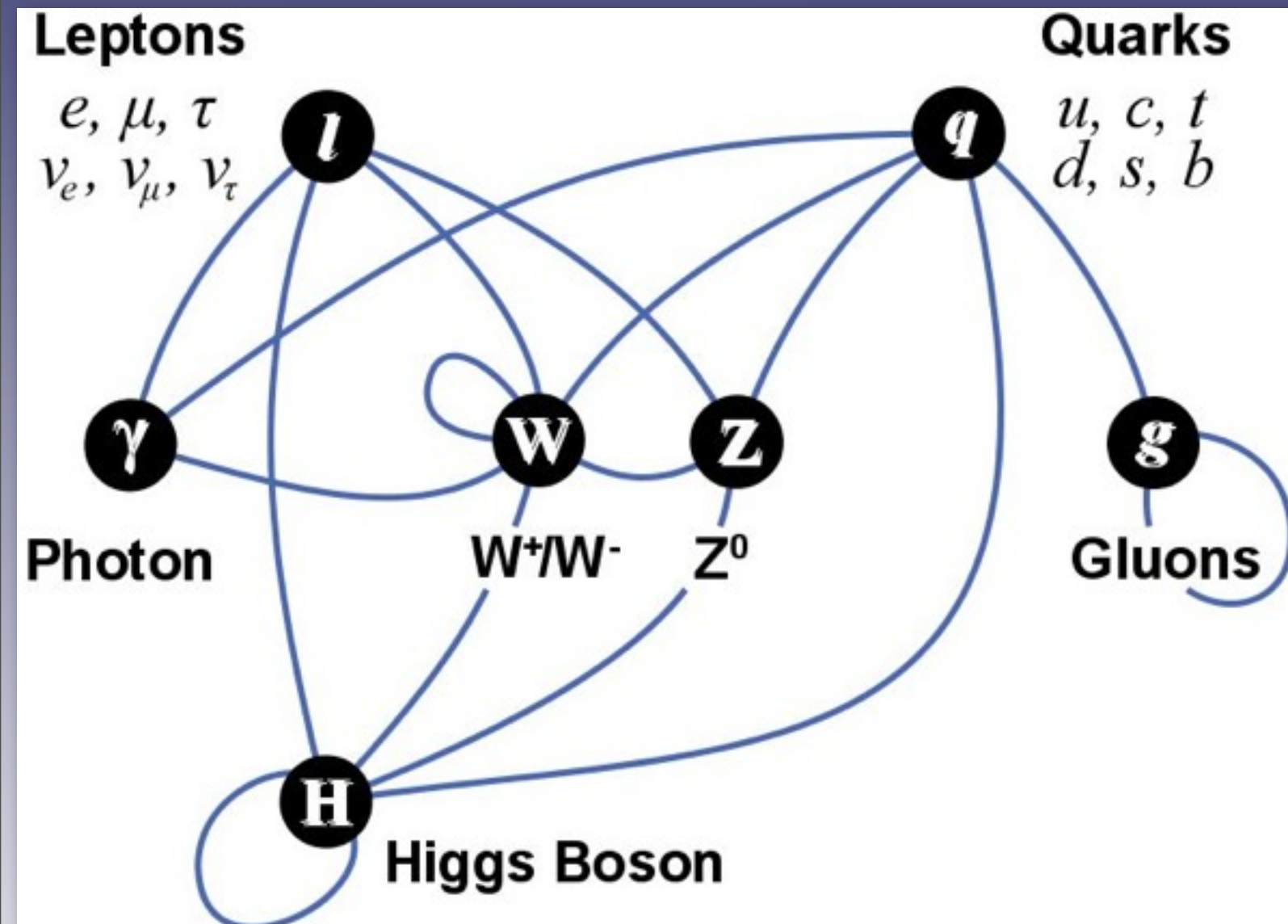


### W BOSON Z BOSON



As the carrier particles of the weak nuclear force, they're downright obese.

# E o tal do bóson de Higgs?



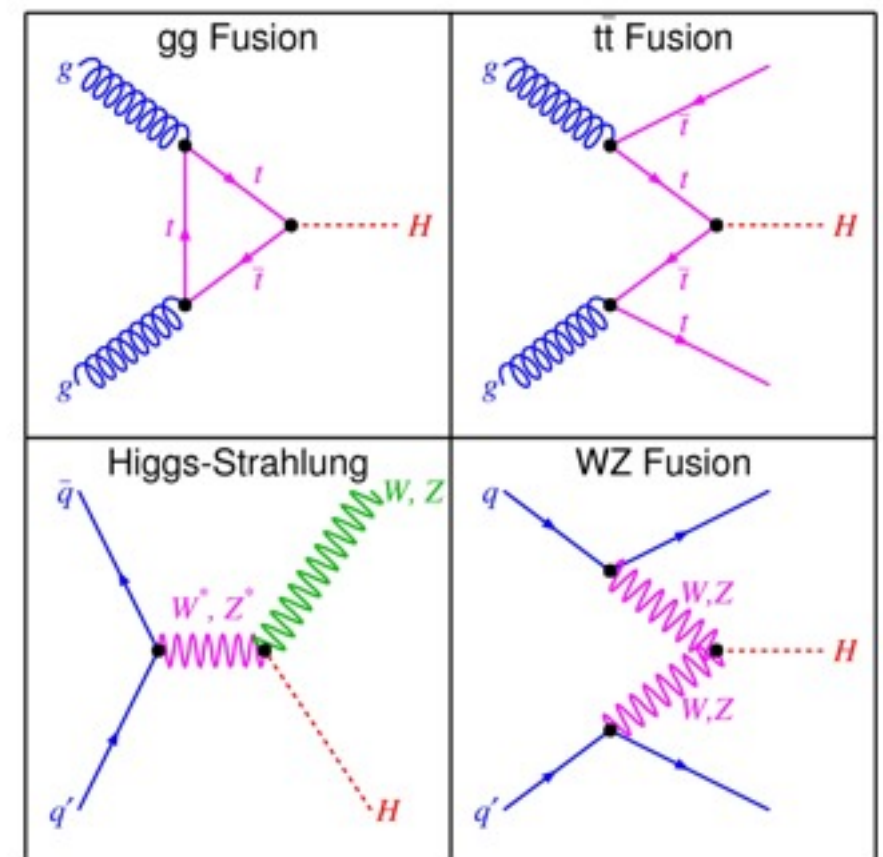
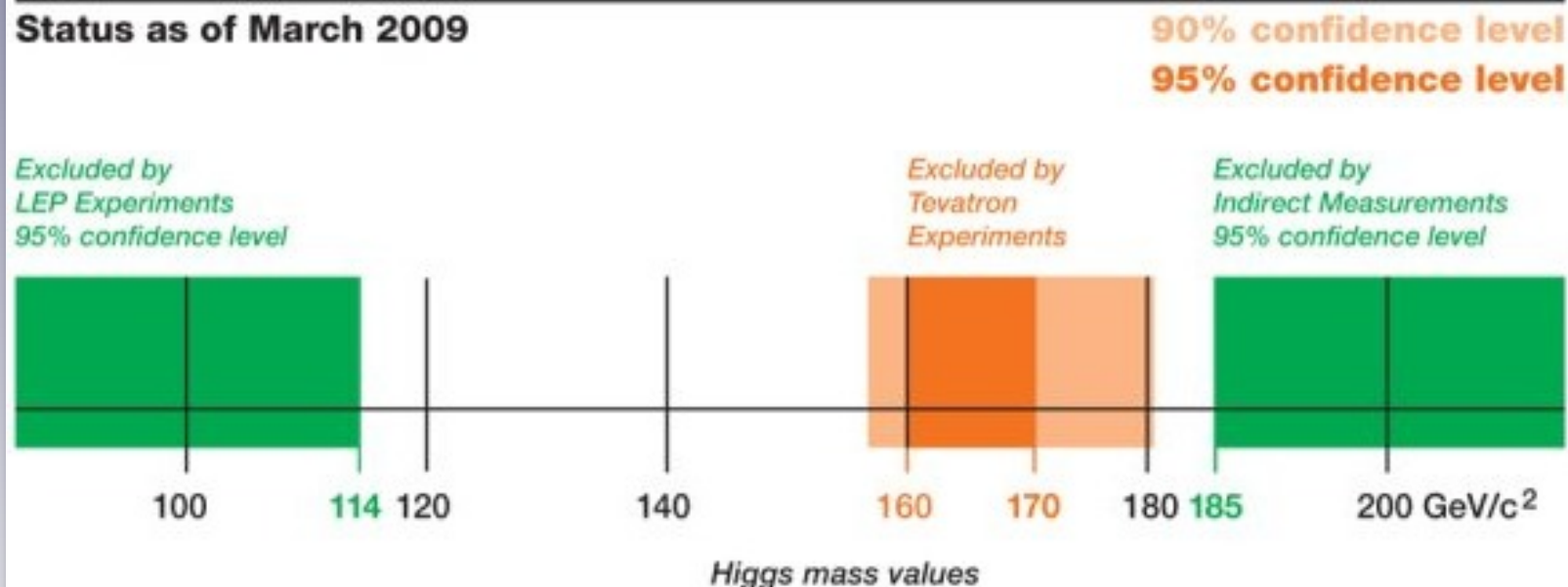
- É a última partícula do Modelo Padrão que falta ser descoberta.
- O Modelo Padrão não prevê como as partículas existentes podem ter massa.
- Originalmente foi introduzida para gerar a massa dos bósons da força fraca.
- Para a surpresa de muitos, também explica a geração de massa das demais partículas do modelo.

# O bóson de Higgs será detectado?

- O Large Hadron Collider (LHC) custou cerca de 10 bilhões de dólares e um de seus principais objetivos é a detecção do bóson de Higgs.
- Milhares de cientistas trabalham intensamente buscando o bóson de Higgs.
- Devido aos sucessos do Modelo Padrão, muitos acreditam que o bóson de Higgs será encontrado no LHC. Outros, como Stephen Hawking, não acreditam.

## Search for the Higgs Particle

Status as of March 2009



Fonte: CDF, Fermilab

# E por fim temos o Modelo Padrão

# E por fim temos o Modelo Padrão

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\ & Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - igs_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\ & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\ & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\ & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\ & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\ & igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + \\ & 2\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\ & \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + \\ & m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + \\ & (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} [H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\ & i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \\ & \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\ & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\ & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igMs_w[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0] \end{aligned}$$

E por f

adrão

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \\ & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 - \right. \\ & Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\ & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ \\ & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) \\ & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0 \\ & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H \\ & i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \\ & 2\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 \\ & \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} \\ & m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\ & (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 \\ & \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C \\ & i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} \\ & \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \\ & \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ \\ & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \\ & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & c \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\ & A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - \\ & + A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) + \\ & [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\ & \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\ & i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\ & - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + \\ & \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\ & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + \\ & )] + \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + \\ & ) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \\ & (\gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\ & ) u_j^\kappa] - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \\ & - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \\ & \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\ & + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\ & + \frac{1}{2} i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0] \end{aligned}$$

# E se não encontrarem o bóson de Higgs?

E se não encontrarem o bóson de Higgs?

NOVA FÍSICA???

E se não

e Higgs?

Homer's Physics 101



# Um pouco sobre o LHC



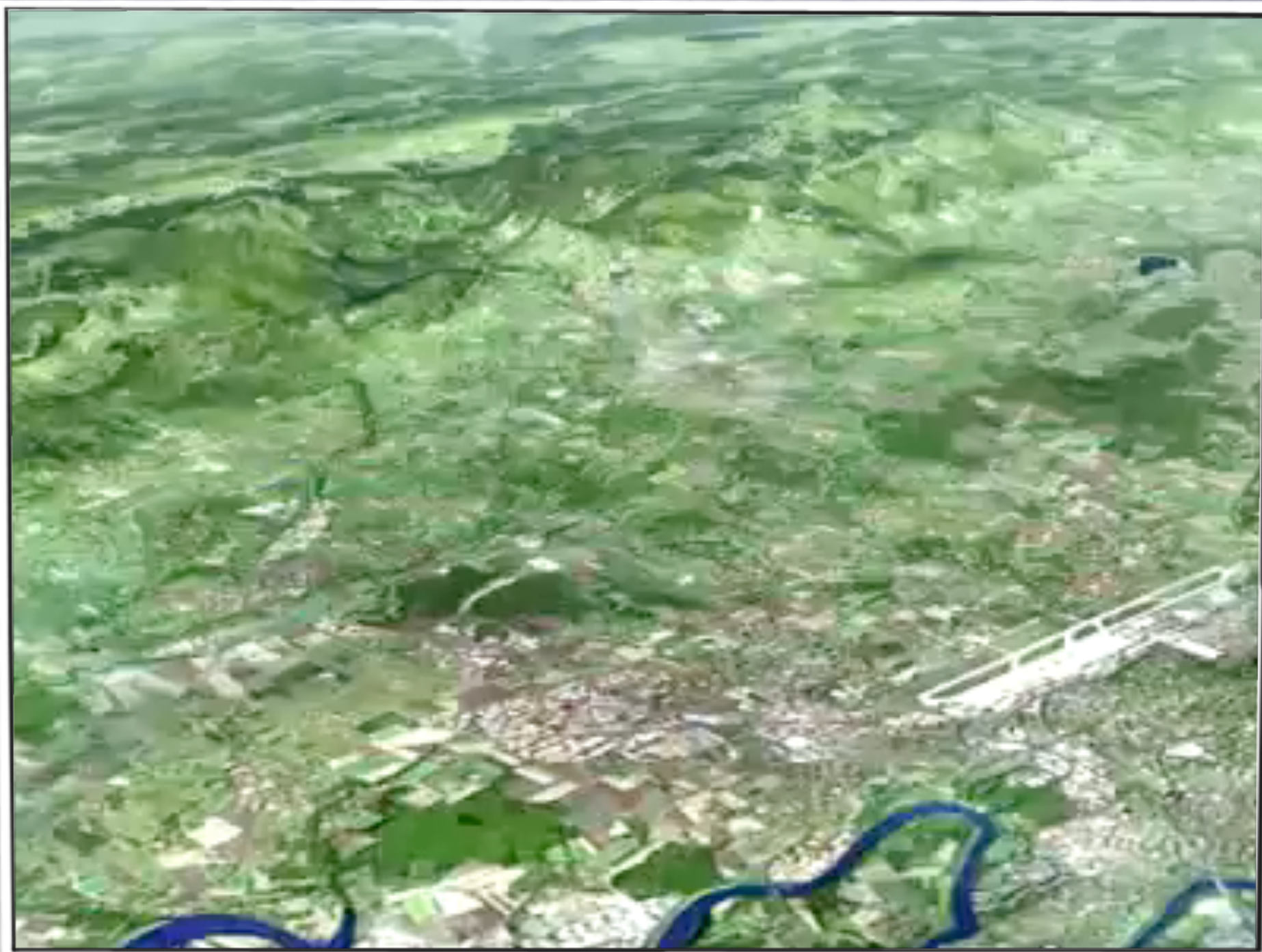
<http://www.youtube.com/watch?v=bVLpf1z836Q>

# Será que o LHC vai destruir o mundo?

<http://www.youtube.com/watch?v=BXzugu39pKM&feature=related>

# Será que o LHC vai destruir o mundo?

<http://www.youtube.com/watch?v=BXzugu39pKM&feature=related>



# Será que o LHC vai destruir o mundo?

<http://www.youtube.com/watch?v=BXzugu39pKM&feature=related>

