

Introdução

Física de Partículas Elementares

Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira

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

11 de fevereiro de 2025



Universidade Federal do ABC

Apresentação da disciplina

Não seguro | professor.ufabc.edu.br/~leigui/ensino/pos/fis301/fis301.html

Apps Entrada (0,987) - n... Google Google Agenda Traduzir Maps Notícias Facebook YouTube Bookmarks My UFABC Sci R&D Info Read Write Financ News Music Inett Lista de leitura

FIS-301: Física de Partículas Elementares I

Ementa:

Introdução histórica. Dinâmica de partículas elementares. Cinemática relativística. Simetrias. Estados ligados. Regras de Feynman. Eletrodinâmica quântica. Introdução à de quarks e léptons. Cromodinâmica quântica. Interações fracas. Teoria de campos.

Horários e Salas:

Terças e Quintas: 18:00 - 18:55.
On-line.

Bibliografia:

- 1) D. J. Griffiths, Introduction to elementary particles (John Wiley & Sons, 1987).
- 2) F. Halzen e A. D. Martin, Quarks and leptons (John Wiley & Sons, 1984).
- 3) R. N. Cahn e G. Goobar, The experimental foundations of particle physics (Cambridge University Press, 1986).

Avaliação:

Listas de exercícios
- 3 exercícios de Griffiths, escolhidos pelo aluno (1 a 1 por aula), entregues ao final de cada aula;
- 1 exercício de cada lista deverá ser defendido em sala de aula (1 sem-repeat).

Conceitos:

A média será calculada pela média aritmética das listas e os conceitos finais serão lançados de acordo com:

- A, se $10 \geq M \geq 9,0$
- B, se $9,0 > M \geq 7,0$
- C, se $7,0 > M \geq 6,0$
- D, se $6,0 > M \geq 4,0$
- F, se $4,0 > M \geq 0,0$

Arquivo

Repositório de arquivos:

500px

Link: <http://professor.ufabc.edu.br/~leigui/ensino/pos/fis301/fis301.html>

Apresentação da disciplina

FIS-301: Física de Partículas Elementares I

Ementa:

- 1 Introdução histórica;
- 2 Dinâmica de partículas elementares;
- 3 Cinemática relativística;
- 4 Simetrias;
- 5 Estados ligados;
- 6 Regras de Feynman;
- 7 Eletrodinâmica quântica;
- 8 Eletrodinâmica de quarks e hádrons;
- 9 Cromodinâmica quântica;
- 10 Interações fracas;
- 11 Teorias de calibre.

Apresentação da disciplina

FIS-301: Física de Partículas Elementares I

Horários e Salas:

- Terças e Quintas: 16:00 - 18:00;
- Sala S-207-0, Bloco A.

Bibliografia:

- ① D. J. Griffiths, *Introduction to elementary particles* (1987);
- ② F. Halzen e A. D. Martin, *Quarks and leptons* (1984);
- ③ R. N. Cahn e G. Goldhaber, *The experimental foundations of particle physics* (1989);
- ④ I. J. R. Aitchison A. J. Hey, *Gauge Theories in Particle Physics* (Adam Hilger, 1989);
- ⑤ A. de Angelis M. J. M. Pimenta, *Introduction to Particle and Astroparticle Physics* (Springer-Verlag Italia, 2015);
- ⑥ S. Braibant, G. Giacomelli M. Spurio, *Particles and Fundamental Interactions* (Springer-Verlag Italia, 2009);
- ⑦ Notas de aula.

Apresentação da disciplina

FIS-301: Física de Partículas Elementares I

Avaliação:

Listas de exercício:

- 3 exercícios do Griffiths, de cada capítulo, escolhidos pelo aluno, entregues digitalizados, em formato PDF e por e-mail;
- 1 exercício de cada lista deverá ser defendido em aula (\sim sem repetir);

Conceitos:

A média será calculada pela média aritmética das listas e os conceitos finais serão lançados de acordo com:

A, se $10 \geq M \geq 9.0$

B, se $9.0 > M \geq 7.0$

C, se $7.0 > M \geq 5.0$

D, se $5.0 > M \geq 4.0$

F, se $4.0 > M \geq 0.0$

Apresentação da disciplina

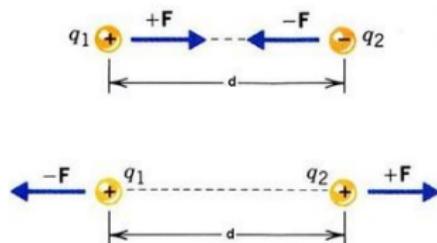
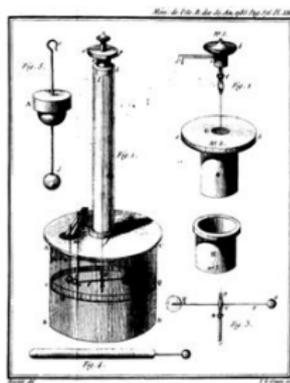


Link: <http://professor.ufabc.edu.br/~leigui/ensino/pos/fis301/fis301.html>

Física de partículas elementares

- “Do que a matéria é feita?”— na menor escala possível;
- Pequenas porções de matéria, de diferentes tipos (elétrons, prótons, nêutrons, mésons, neutrinos, ...) separados por vastos espaços vazios;
- As partículas são **indistinguíveis!** Consequência do princípio de exclusão de Pauli, sem análogo clássico;
- Introduzir os tipos e propriedades (massa, carga elétrica, spin, ...), usando uma perspectiva histórica;
- “Como as partículas interagem?”

Física de partículas elementares



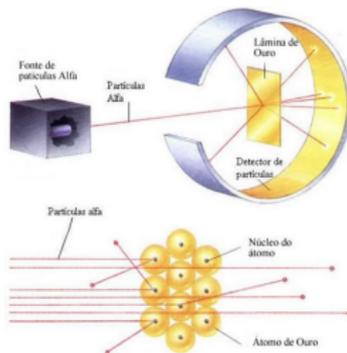
Em 1777, Charles A. Coulomb usou uma balança de torção para formular a lei da interação entre cargas elétricas, ou a **lei de Coulomb**:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2},$$

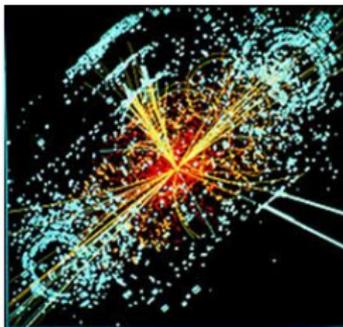
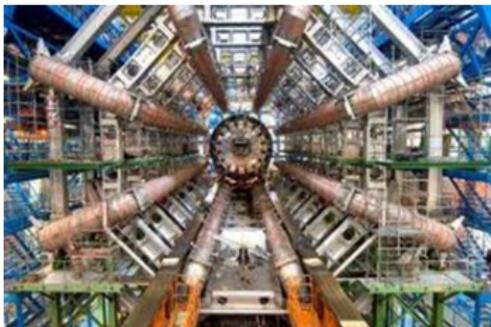
mas não dá para pegar ou pendurar um próton!

Física de partículas elementares

O experimento de Geiger e Marsden:

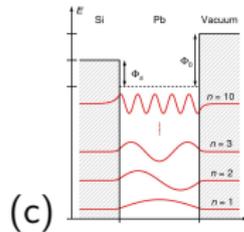
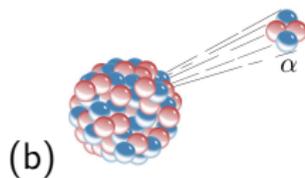
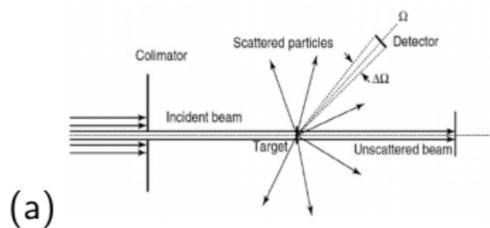


Rutherford e seus estudantes H. Geiger e E. Marsden nos laboratórios Cavendish.



Física de partículas elementares

Informação experimental:



(a) Espalhamentos; (b) decaimentos; (c) estados ligados.

⇒ Lei da interação

- Não é uma tarefa fácil! Tenta-se adivinhar a fórmula e compara-se com os resultados experimentais.

Física de partículas elementares

Small →

	Classical mechanics	Quantum mechanics
Fast ↓	Relativistic mechanics	Quantum field theory

- Tipo de mecânica x Lei de força particular:
3 leis de Newton x Lei da gravitação universal.

→ Conjunto de leis de força que governam a dinâmica das partículas elementares:

Teoria Quântica de Campos (TQC) = Mecânica Quântica (MQ) + Relatividade

Física de partículas elementares

P. ex.: na relatividade, o decaimento

$$\Delta \rightarrow p + \pi$$

é possível, mesmo sendo $m_{\Delta} > m_p + m_{\pi}$, pois

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

(Na física clássica, não, pois a massa sempre é conservada).

Se $m = 0 \Rightarrow E = pc$ (fóton).

(Na física clássica, $m = 0$ não faz sentido).

Física de partículas elementares

P. ex.: na MQ, um estado s é representado por

- função de onda ψ_s na formulação de Schrodinger, ou
- ket $|s\rangle$ na formulação de Dirac.

Um espalhamento ou um decaimento é representado pela *transição*:

$$|s_i\rangle \rightarrow |s_f\rangle,$$

que não é dado por um valor absoluto, mas pela **probabilidade** do processo ocorrer:

$$\pi^+ \rightarrow \mu + \nu_\mu \quad (99,9877\%)$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e \quad (1,23 \times 10^{-4})$$

Física de partículas elementares

P. ex.: ademais, a TQC nos traz:

- a existência de antipartículas;
- a prova do princípio de exclusão de Pauli;
- o teorema CPT.

Todos resultantes do sistema mecânico em si e não de uma força ou um modelo em particular. Todos princípios **intocáveis!**

A TQC é matematicamente profunda (**difícil!**), mas as regras de Feynman (cap. 6) simplificam a nossa vida.

Física de partículas elementares

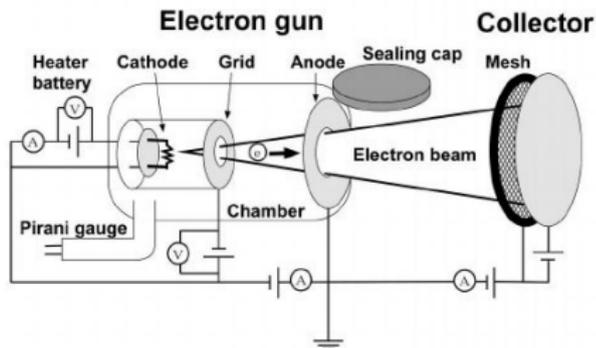
A teoria que surgiu e que descreve todas interações das partículas elementares (exceto a gravidade) é chamada de **Modelo Padrão**:

Modelo Padrão (MP) = eletrodinâmica quântica (QED) + teoria eletrofraca de Glashow-Weinberg-Salam + cromodinâmica quântica (QCD),

que não é a palavra final, mas é a descrição mais “ortodoxa” das interações fundamentais. Elas derivam de um princípio fundamental: a **invariância local de calibre**.

Como se produzem partículas elementares?

- elétrons:



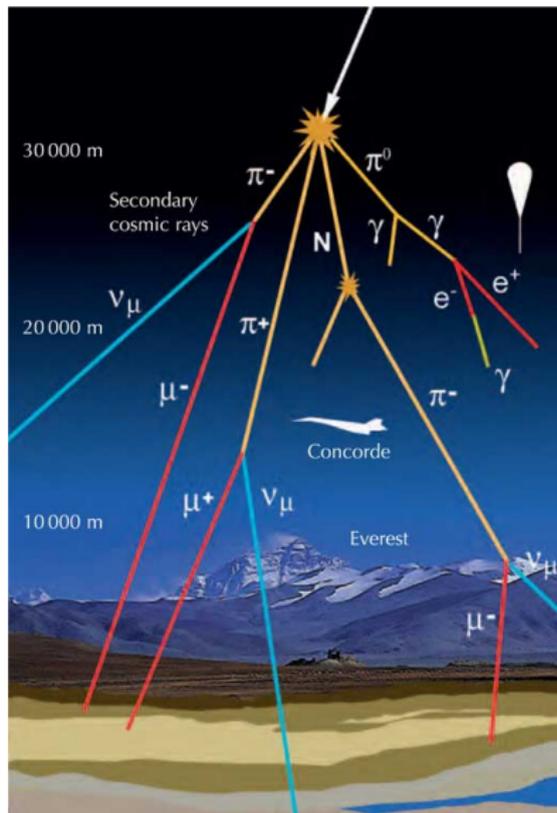
- prótons:

Fermilab Accelerator Complex



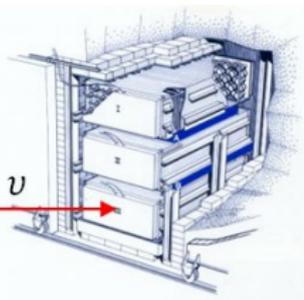
Como se produzem partículas elementares?

- Raios cósmicos:



Como se produzem partículas elementares?

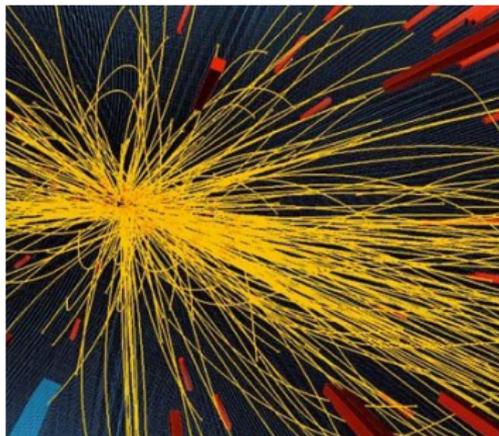
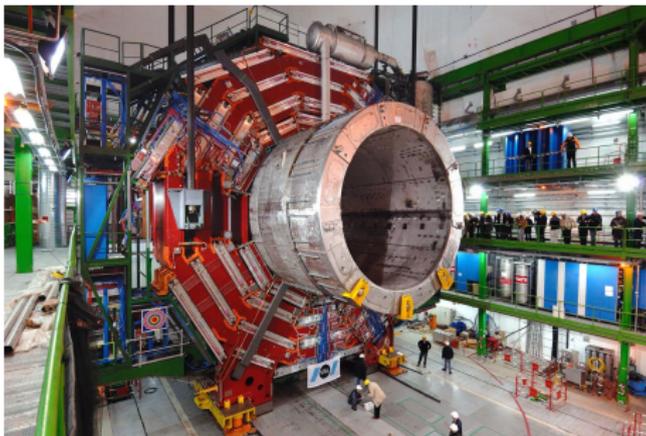
- Reatores nucleares:



Em 1956, F. Reines e C. Cowan detectam experimentalmente o neutrino.

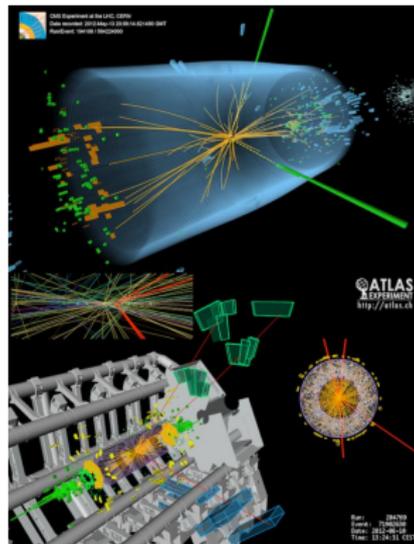
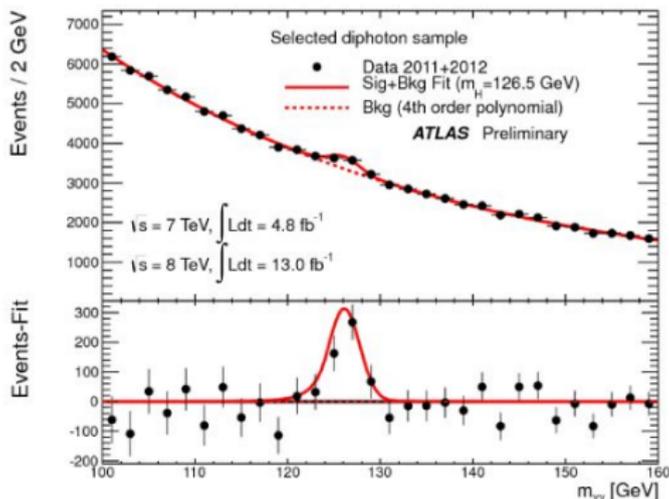
Como se produzem partículas elementares?

- Aceleradores de partículas:



O Grande Colisor de Hádrons (LHC).

Como se produzem partículas elementares?



Quanto maior a massa da partícula, maior deve ser a energia da colisão ($m_H \sim 126,5 \text{ GeV}/c^2$).

Como se produzem partículas elementares?

Em MQ, o princípio da incerteza é:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2,$$

mas pela fórmula de de Broglie, uma partícula de momento p tem associado a ela um comprimento de onda λ dado por:

$$\lambda = h/p,$$

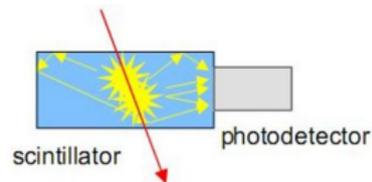
onde h é a constante de Planck. Ou seja, para resolver pequenas estruturas são necessárias grandes energias (momento).

Como se detectam partículas elementares?

- contadores Geiger;
- câmaras de nuvens;
- câmaras de bolhas;
- câmaras de faíscas;
- emulsões fotográficas;
- detectores Cherenkov;
- cintiladores;
- fotomultiplicadoras;
- etc ...



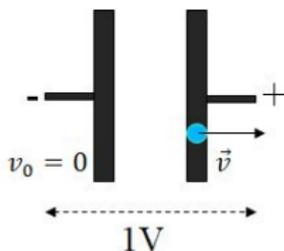
ATOMLAB 200
Dose Calibrator



Unidades

Energia:

Seja um elétron partindo do repouso e sendo acelerado numa diferença de potencial de exatamente 1 V:



A energia fornecida para este elétron é:

$$E = q \cdot V = (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Tomando-se este valor como escala de energia, define-se o *elétron-Volt*:

$$1 \text{ eV} \equiv 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Unidades

Assim:

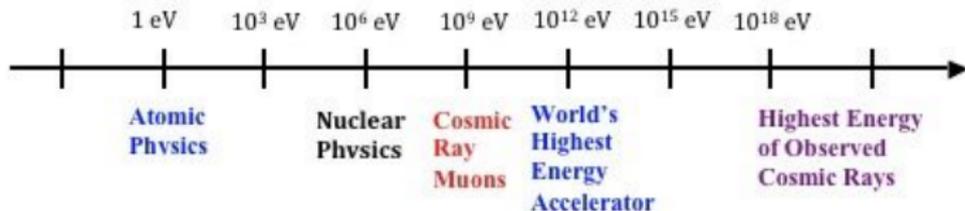
$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

corresponde a uma energia muito pequena para os fenômenos macroscópicos, contudo, é a unidade de energia mais conveniente para fenômenos atômicos e moleculares.

Em várias situações, toma-se os múltiplos dessa unidade:

$$\text{keV} = 10^3 \text{ eV}, \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV},$$

$$\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}, \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}, \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}, \dots$$



Unidades

Momento linear:

Vamos fazer uma análise dimensional das grandezas mecânicas energia e momento linear:

$$\left. \begin{array}{l} [E] = ML^2T^{-2} \\ [p] = MLT^{-1} \end{array} \right\} \text{isto sugere que: } [p] = [E] / [v],$$

onde v é uma velocidade.

Ademais, partindo da fórmula da energia relativística, se a massa for nula (como no caso de um fóton):

$$E^2 = p^2c^2 + \cancel{m_0^2}c^4 \Rightarrow E = pc,$$

que é a relação entre a energia e o momento linear do fóton.

Então, utilizaremos para o momento linear a unidade:

$$1 \text{ eV}/c \equiv 5,344 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Unidades

Massa:

De $E = mc^2$ vem:

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1,783 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Desta forma, teremos, por exemplo:

$$1 u = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2, \quad m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2, \quad m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2.$$

Unidades

Comprimento:

Para as dimensões nucleares define-se o fermi:

$$1 \text{ F} \equiv 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

Então:

$$\left. \begin{array}{l} c = 3 \cdot 10^{23} \text{ fm/s} \\ \hbar = 6,582 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\hbar c = 197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}},$$

que é um fator de conversão muito útil (exemplo 1).

Ele permite-nos calcular, por exemplo, que:

$$\alpha = \frac{ke^2}{\hbar c} \Rightarrow ke^2 = \alpha(\hbar c) = \frac{197,3}{137} \text{ MeV} \cdot \text{fm} \Rightarrow \boxed{ke^2 = 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}},$$

que é outro fator de conversão muito útil (exemplo 3).

Unidades

- ① Considere uma partícula confinada à dimensão de 1 F, determine a incerteza na medida de seu momento:

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar/2 \Rightarrow \Delta p \cdot 1 \text{ fm} = \frac{197,3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{2} \Rightarrow \Delta p = 98,7 \text{ MeV}/c$$

- ② Seja uma partícula cujo decaimento ocorre em 10^{-22} s, determine a incerteza na medida de sua energia:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar/2 \Rightarrow \Delta E \cdot 10^{-22} \text{ s} = \frac{6,582}{2} \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s} \Rightarrow \Delta E = 3,29 \text{ MeV}$$

- ③ Qual a máxima aproximação de uma partícula α de 7 MeV em colisão frontal com um núcleo de ouro ($Z = 79$)?

$$K = U = k \frac{zZe^2}{r} \Rightarrow r = \frac{zZ(ke^2)}{K} = \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm})}{7 \text{ MeV}} = 32,5 \text{ fm}$$

Unidades

Ademais, os físicos de partículas costumam usar o chamado sistema “natural” de unidades, em que:

$$\hbar \equiv c \equiv 1.$$

Com isto, vem:

$$m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2 = 938,3 \text{ MeV},$$

ou seja, massa e energia têm as mesmas unidades: $[E] = [m]$.

Ou:

$$p = 3 \text{ GeV}/c = 3 \text{ GeV},$$

ou seja, momento e energia têm as mesmas unidades: $[E] = [p]$.

Ou, ainda, pelo princípio da incerteza:

$$\Delta p \cdot \Delta x \sim 1/2,$$

ou seja, momento e comprimento têm unidades inversas: $[x] = [p]^{-1} = \text{GeV}^{-1}$.

Analogamente:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim 1/2,$$

ou seja, tempo e energia têm unidades inversas: $[t] = [E]^{-1} = \text{GeV}^{-1}$.

Finalmente:

$$x = ct \Rightarrow [x] = [t] = \text{cm}.$$

Unidades

O eletromagnetismo possui vários sistemas de unidades. Vejamos a força de Coulomb.

No Sistema Internacional (SI), temos:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

onde $k = 1/4\pi\epsilon_0$, $[F] = \text{N}$, $[q] = \text{C}$ e $[r] = \text{m}$.

No sistema Gaussiano (G), temos:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

onde $[F] = \text{dina}$, $[q] = \text{stC} = \text{esu}$ (*unidades eletrostáticas*) e $[r] = \text{cm}$.

No sistema de Heaviside-Lorentz (HL), temos:

$$F = \frac{1}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

onde $[F] = \text{dina}$, $[q] = \text{emu}$ (*unidades eletromagnéticas*) e $[r] = \text{cm}$.

Assim:

$$q_{SI} = \sqrt{4\pi\epsilon_0} q_G = \sqrt{4\pi} q_{HL}.$$