

Física do spin

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

edisciplinas.if.usp.br

(buscar: física do spin)

Plano do curso

28/02 aula 1: Partículas elementares idéias da física quântica

07/03 aula 2: Átomo de Bohr, momento de dipolo magnético

14/03 aula 3: Momento angular total

21/03 aula 4: Princípio de Pauli

28/03 não haverá aula (semana santa)

04/04 1ª Prova Diurno

05/04 1ª Prova Noturno

11/04 aula 5: Postulados da mecânica quântica

18/04 aula 6: Probabilidades, estados e operadores

25/04 aula 7: Operadores de spin, relações de comutação

02/05 aula 8: Medidas e valores médios

09/05 aula 9: Adição de spins

16/05 2ª Prova Diurno

17/05 2ª Prova Noturno

23/05 aula 10: Aplicações a sistemas físicos

30/05 aula 11: Aplicações a sistemas físicos

06/06 aula 12: Aplicações a sistemas físicos

13/06 aula 13: Exercícios

20/06 aula 14: Revisão

27/06 3ª Prova Diurno

28/06 3ª Prova Noturno

Bibliografia

Física Quântica

R. Eisberg e R. Resnick
Ed. Elsevier / Campus

Capítulos 3, 4 , 7, 8, 9

Mecânica Quântica

D. Griffiths

Física do Spin

Curso ministrado em 2016
Profa. Marina Nielsen
edisciplinas.if.usp.br

Avaliação

Três provas : P1 P2 P3

Média das **duas** melhores : $P = (P_i + P_j)/2$

Três listas : L1 L2 L3

Média das listas : $L = (L1 + L2 + L3)/3$

Média final: $M = (2P + L)/3$

Aula 1

Partículas elementares

Spin como carga

Física quântica: ondas e partículas

O que é spin ?

"É uma propriedade **intrínseca** das partículas elementares"

Assim como a carga elétrica !

Tem valores **discretos**, como a carga elétrica !

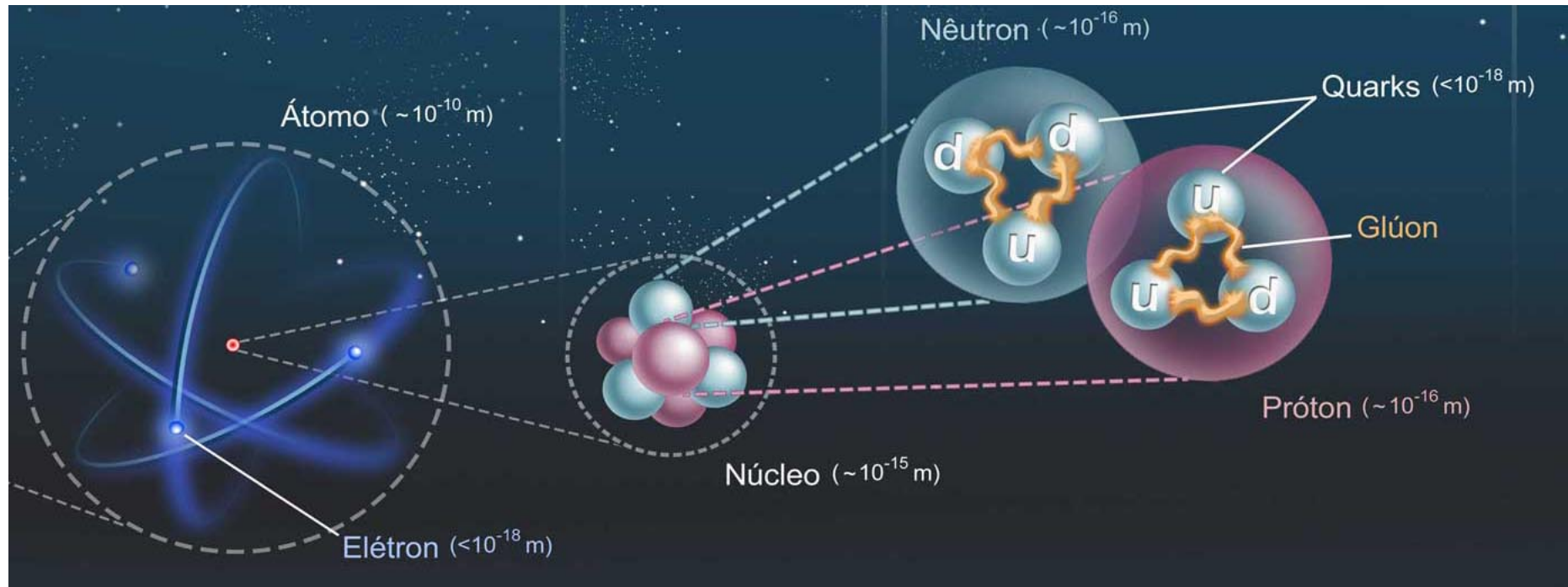
É um **vetor** !

O que são partículas elementares?

São os constituintes da matéria

São os "**tijolos**" com os quais tudo é feito

Modelo Padrão das partículas elementares



Portadores de força

bosons

spin = 0 ou 1

PARTÍCULAS MEDIADORAS	Interação Eletromagnética	FÓTON		
	Interação Fraca	W^+	Z^0	W^-
	Interação Forte	GLÚON		
	Interação Gravitacional	GRÁVITON		
QUARKS		u up	c charm	t top
		d down	s strange	b bottom
LÉPTONS		ν_e neutrino e	ν_μ neutrino μ	ν_τ neutrino τ
		e elétron	μ múon	τ tau

Matéria:
quarks e leptons

fermions

spin = 1/2

Modelo Padrão das partículas elementares

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

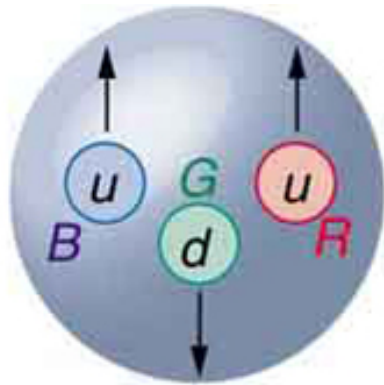
Anti-matéria: anti-fermions $\longrightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{anti-quarks} \\ \text{anti-leptons} \end{array} \right.$

Modelo Padrão das partículas elementares

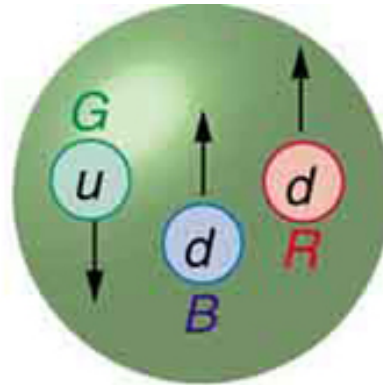
Quarks e antiquarks se combinam para formar hadrons

Barions : $q + q + q$

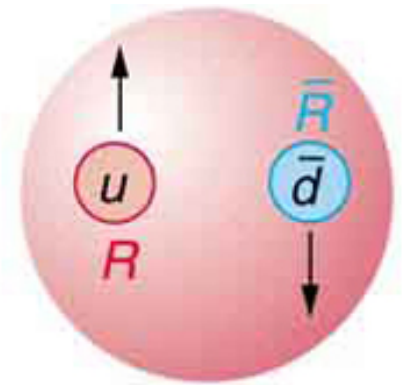
Mesons : $q + \bar{q}$



Proton



Neutron



π^+

spin

$$+\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

$$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

$$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

carga

$$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

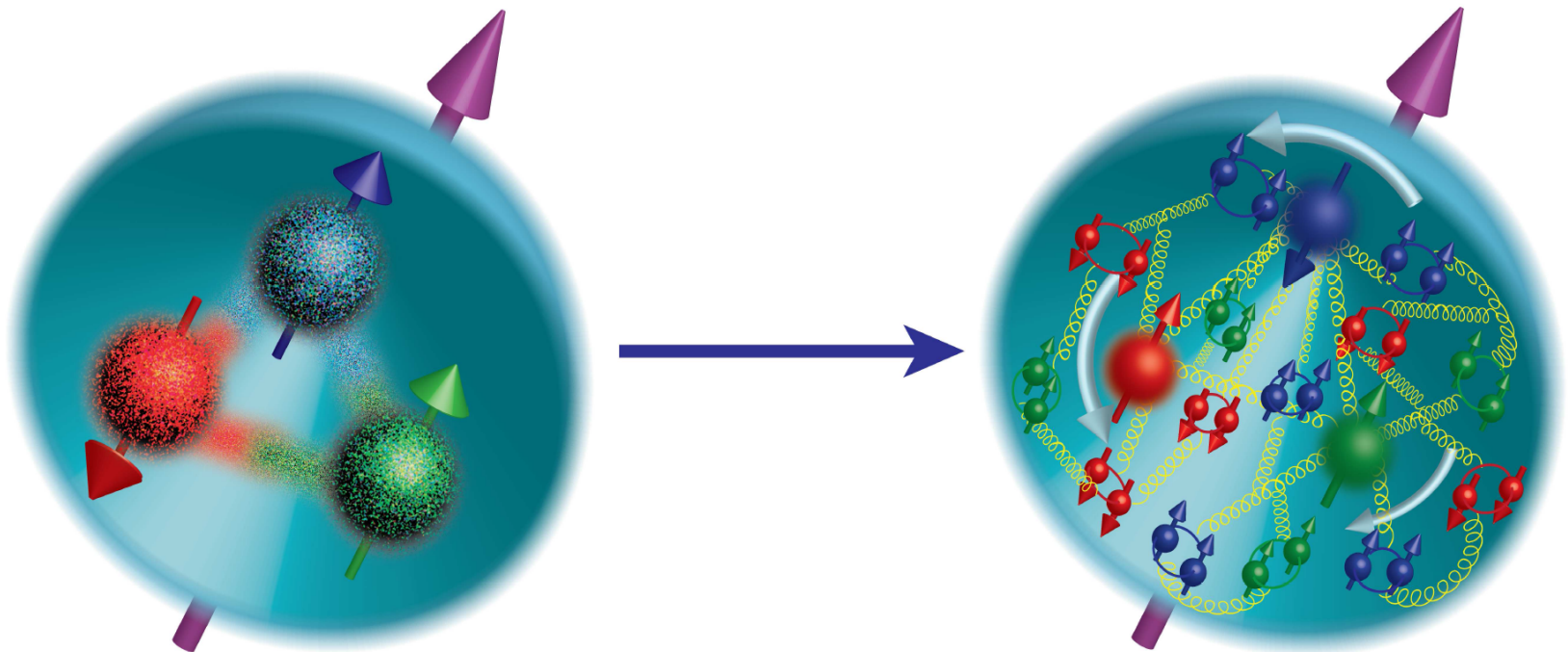
$$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

$$+\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$$

Spin do Próton: estudo em andamento !

1964 - 2014: 50 anos de quarks !

Próton é muito mais complexo do que apenas três quarks



Cargas geram forças

Força entre duas massas $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

Força entre duas cargas $F = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$

Força entre dois spins $F = \frac{\kappa}{m_1 m_2} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 e^{-r^2/a^2}$

Cai rápido com r : curtíssimo alcance !

Partículas elementares

Mundo microscópico : física quântica

h = constante de Planck

Altas velocidades : relatividade

c = velocidade da luz

Spin é quântico !

Idéias da Física Quântica

"Velha mecânica quântica" (1905 - 1925)

Idéias e observações ainda sem uma teoria

R. Eisberg e R. Resnick

Capítulo 3

(ER-3)

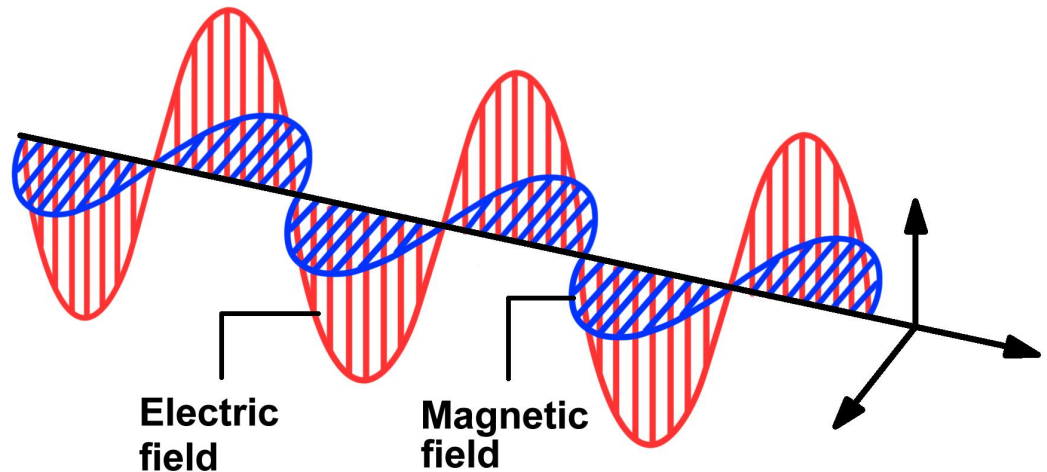
Onda também é partícula

(ER-1)

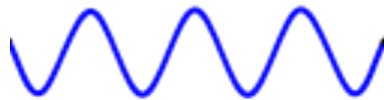
(ER-2)

Luz

Onda de campos
E e B



Luz



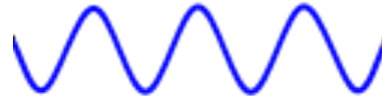
Fotons

$$E = h \nu$$

Partícula também é onda

(ER-3)

elétron



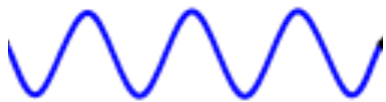
Onda do elétron

Comprimento de
onda de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Constante de Planck



Função de onda $\psi(x, t)$

$$\psi^*(x, t) \psi(x, t) = |\psi(x, t)|^2$$

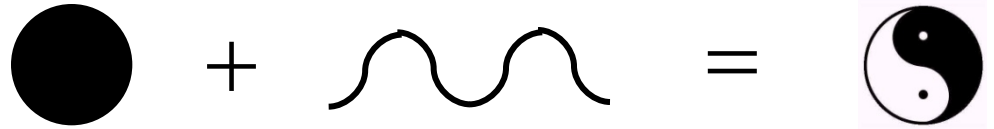


Probabilidade de
encontrar a partícula

Elétron = Partícula e Onda

Puntiforme e Extenso

Como imaginar isso ?



dualidade

Algumas experiências "enxergam" partículas

Outras experiências "enxergam" ondas

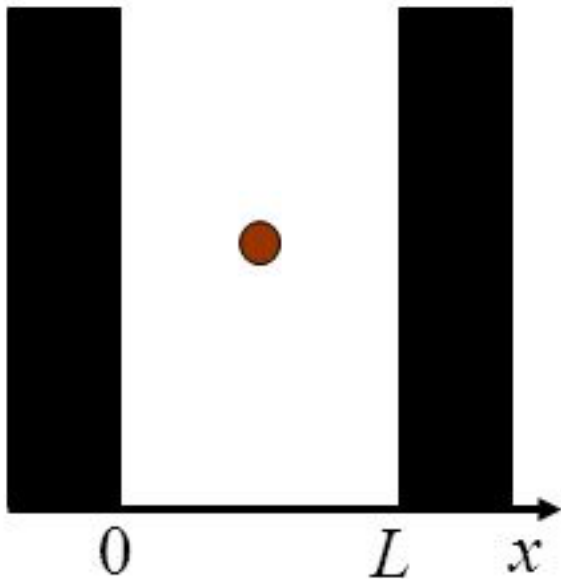
complementaridade

Não existe trajetória bem definida (princípio da incerteza)

Menos poder de previsão (probabilidades)

Confinamento gera quantização !

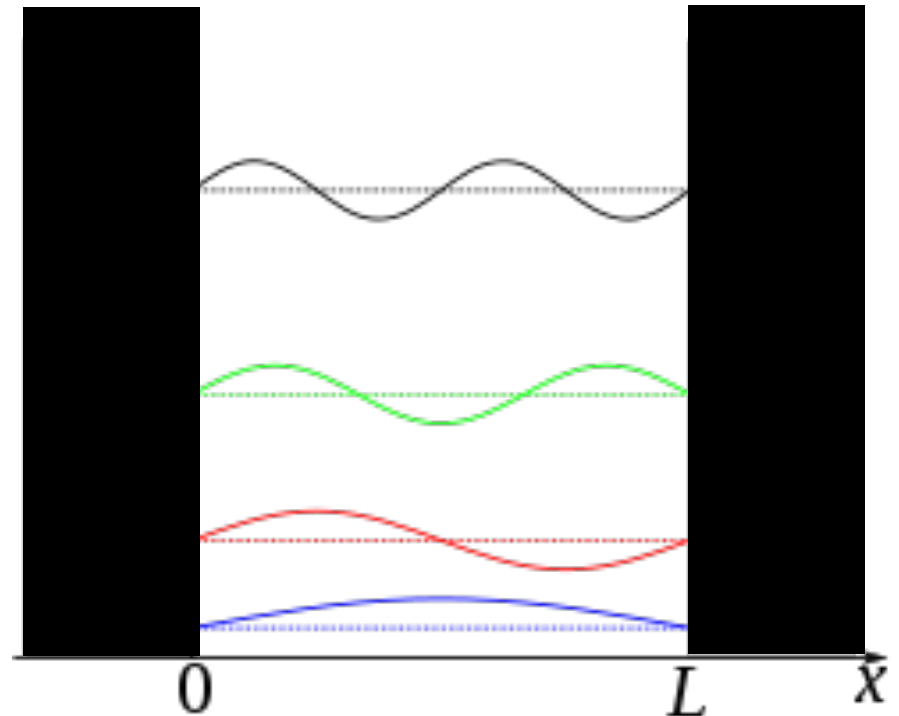
Partícula confinada
numa caixa com
paredes rígidas



$$E = \frac{p^2}{2m}$$

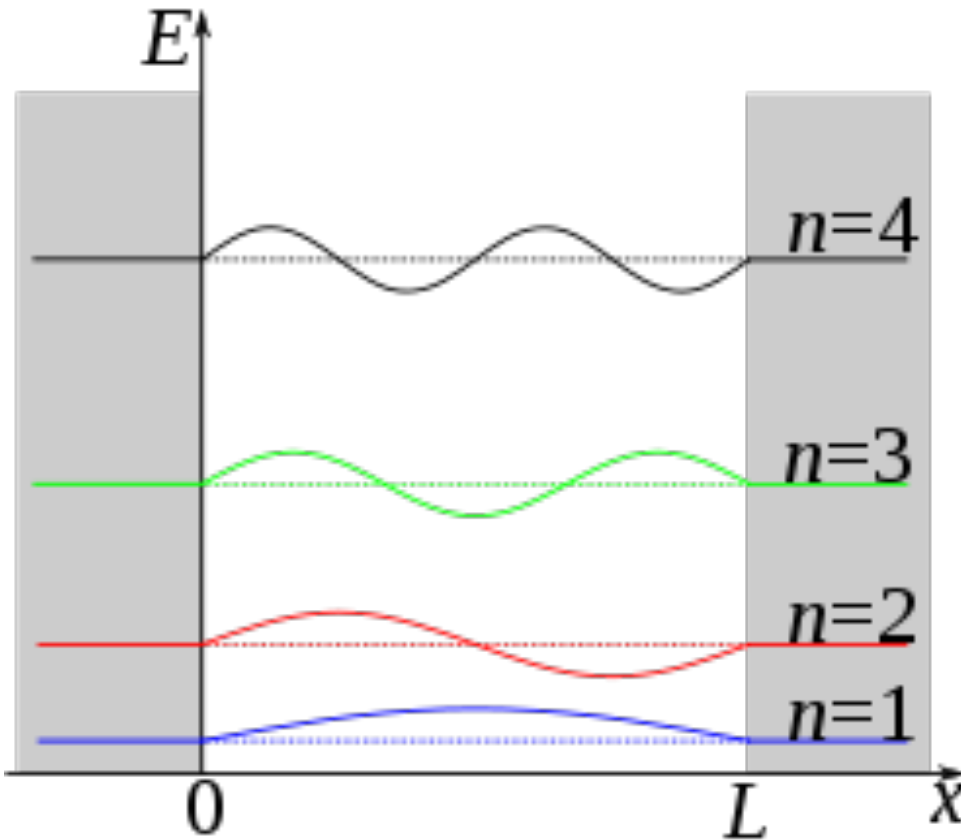
$$\psi(x) = 0$$

$$\psi(x) = 0$$



$$\psi(x) = \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

Só cabem alguns comprimentos de onda !



$$\lambda = 1/2 L$$

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = 2/3 L$$

$$\lambda = L$$

$$\lambda = 2 L$$

$$\lambda = \frac{2}{n} L$$

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h n}{2 L}$$



$$E = \frac{h^2 n^2}{8 m L^2}$$

Valores discretos: energia quantizada !

Perguntas feitas:

O que quer dizer o spin ser vetor ?

Como a gente sabe que o spin existe ?

Dois ftons com spin interagem ?

A interação do spin é fundamental ou uma manifestação da interação eletromagnética ?

E se a gente der mais energia para a partícula na caixa ?

Resumo

Spin gera forças e pode ser visto como uma carga

Spin é vetor !

Partículas elementares possuem spin

Fermions (matéria) : $\text{spin} = 1/2$

Bosons (forças) : $\text{spin} = 1$

Spin é quântico

"Partícula também é onda" (?)

Função de onda $\Psi(x,t)$