

# Física do spin

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

Richard Terra (monitor)

richard.terra@usp.br

edisciplinas.if.usp.br

(buscar: física do spin)

# Plano do curso

Parte I : o que é spin e como sabemos que eles existe ?

Experiência de Stern - Gerlach

Efeito Zeeman anômalo

Parte II : formalismo ("EUF")

Espinores e matrizes de Pauli

Parte II : aplicações

Resonância magnética nuclear

# Plano do curso

- 13/03 aula 1: Partículas elementares e idéias da física quântica
- 20/03 aula 2: Átomo de Bohr, quantização do momento angular
- 27/03 aula 3: Momento de dipolo magnético, Stern - Gerlach
- 10/04 aula 4: Efeito Zeeman anômalo
- 17/04 1ª Prova
- 24/04 aula 5: Equações de autovalores, matrizes de Pauli
- 08/05 aula 6: Comutadores, medidas SG sequenciais
- 15/05 aula 7: Medidas e valores médios
- 22/05 aula 8: Precessão e adição de spins
- 29/05 aula 9: Adição de spins

05/06 2ª Prova

12/06 aula 10: Princípio da exclusão de Pauli

19/06 aula 11: Interação hiperfina no hidrogênio

26/06 aula 12: Resonância paramagnética do elétron

03/07 aula 13: Resonância magnética nuclear

10/07 3ª Prova

# Avaliação

Três provas : P1 P2 P3

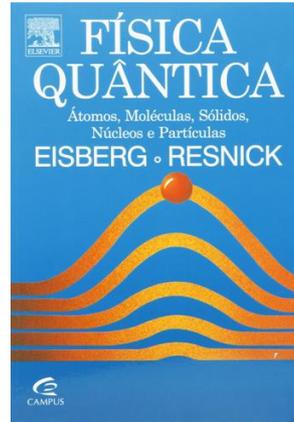
Média das **duas** melhores :  $P = (P_i + P_j) / 2$

Substitutiva fechada

# Bibliografia

## Física Quântica

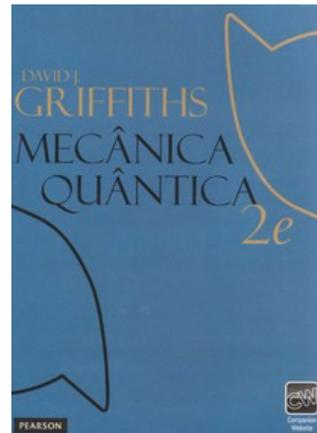
R. Eisberg e R. Resnick  
Ed. Elsevier / Campus



Capítulos  
1, 2, 3, 4, 7, 8, 9

## Mecânica Quântica

D. Griffiths



Capítulo 4

## Física do Spin

Curso de 2020 Prof. Fernando Navarra. [edisciplinas.if.usp.br](http://edisciplinas.if.usp.br)

Aula 1

# O que é spin ?

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

É um **vetor!**

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

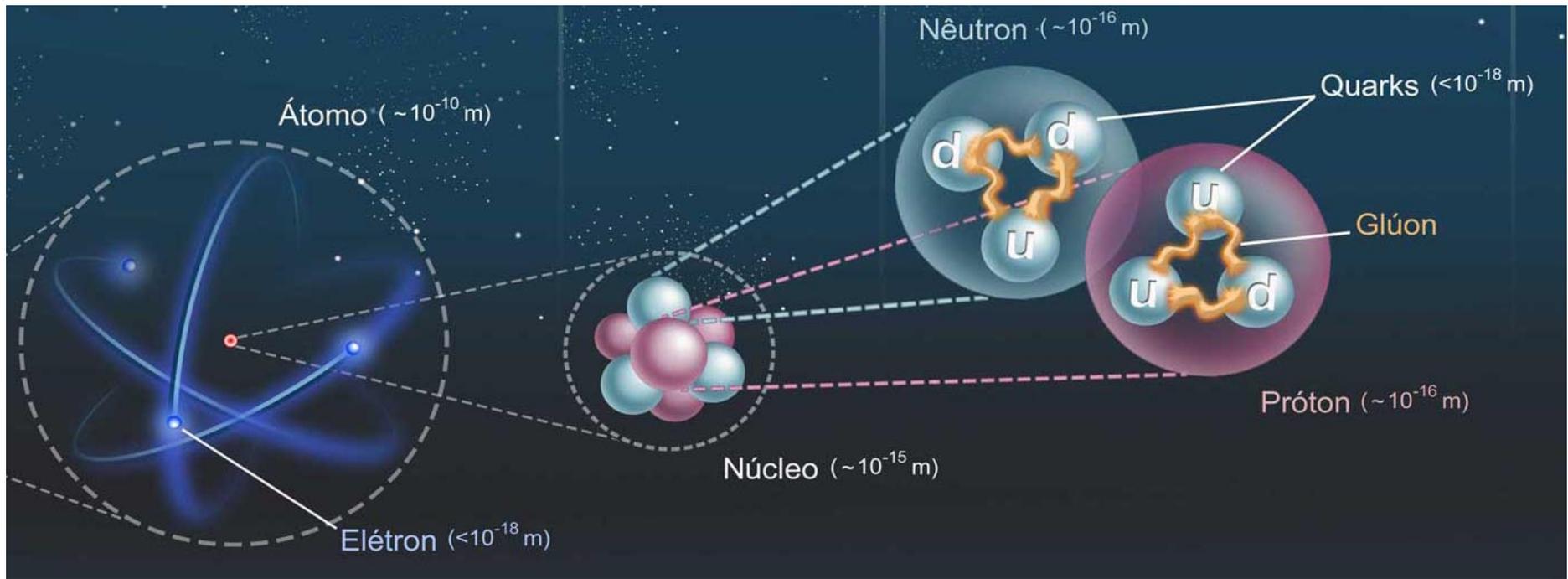
**Momento angular intrínseco ?**

## 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 <sup>+</sup>	Z <sup>0</sup>	W <sup>-</sup>
	Interação Forte	GLÚON		
	Interação Gravitacional	GRÁVITON		
QUARKS	u	c	t	
	up	charm	top	
	d	s	b	
	down	strange	bottom	
	ν <sub>e</sub>	ν <sub>μ</sub>	ν <sub>τ</sub>	
	neutrino e	neutrino μ	neutrino τ	
LÉPTONS	e	μ	τ	
	elétron	múon	tau	

Matéria:  
quarks e leptons

fermions

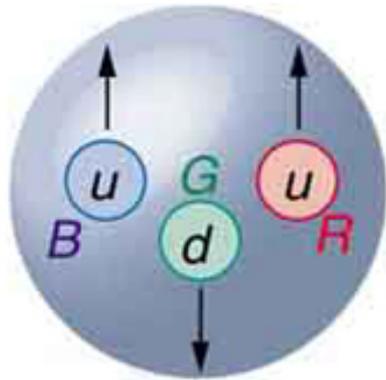
spin = 1/2

# Modelo Padrão das partículas elementares

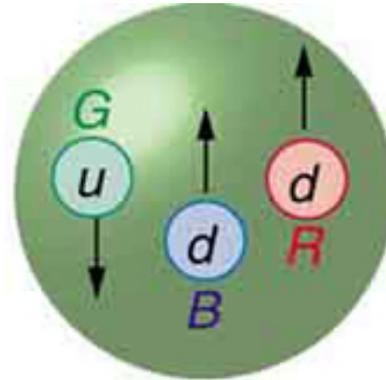
Quarks e antiquarks se combinam para formar hadrons

Barions :  $q + q + q$

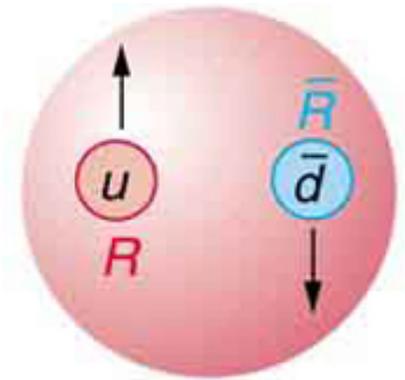
Mesons :  $q + \bar{q}$



Proton



Neutron



$\pi^+$

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

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

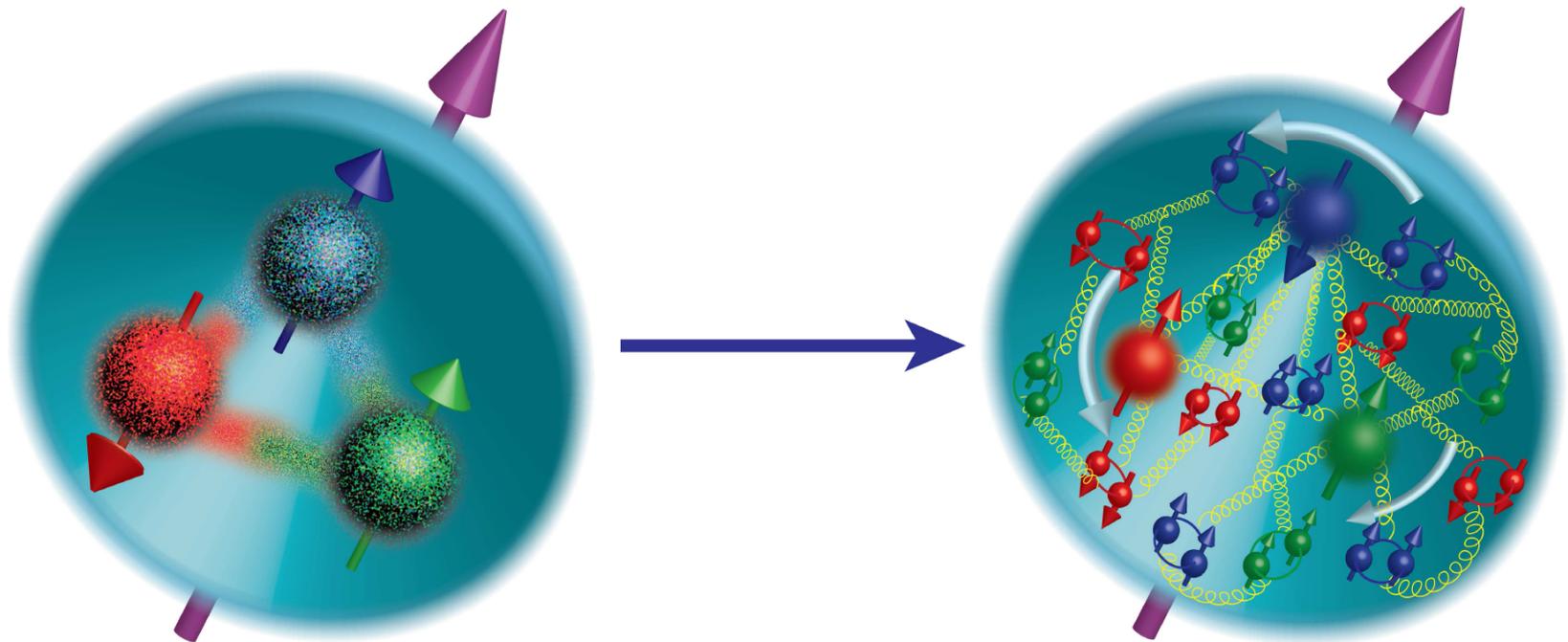
$$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

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

# Spin do Próton: estudo em andamento !

1964 - 2024: 60 anos de quarks !

Próton é muito mais complexo do que apenas três quarks



# Partículas elementares

Mundo microscópico : física quântica

Altas velocidades : relatividade

Spin é quântico !

# Idéias da Física Quântica

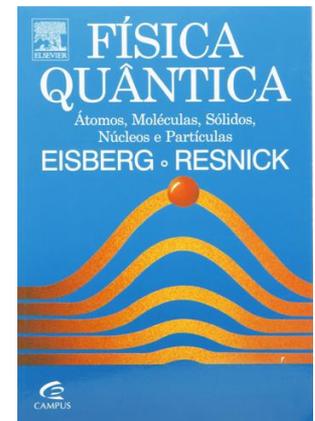
“Velha mecânica quântica” (1905 - 1925)

Idéias e observações ainda sem uma teoria

R. Eisberg e R. Resnick

Capítulo 3

(ER-3)



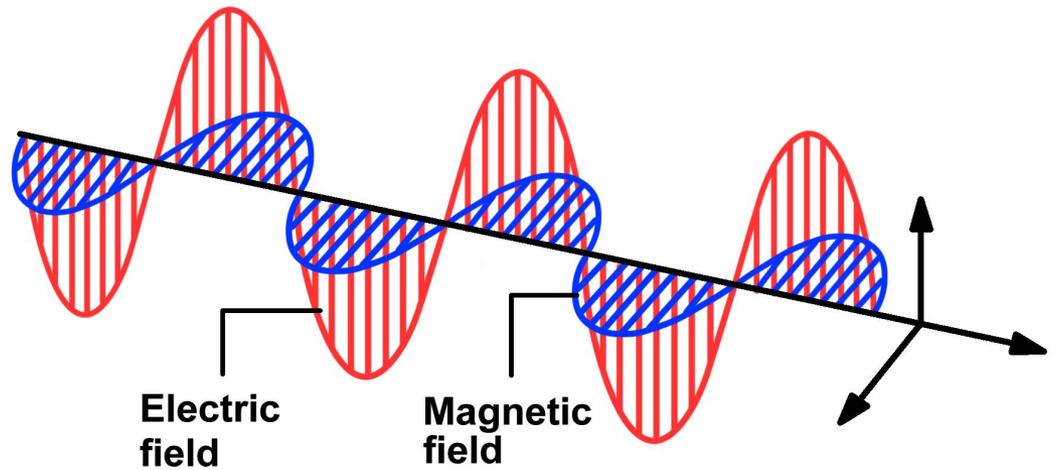
# Onda também é partícula

(ER-1)

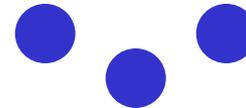
(ER-2)

Luz

Onda de campos E e B



Luz



Fotons

$$E = h \nu$$

# Partícula também é onda

(ER-3)

elétron



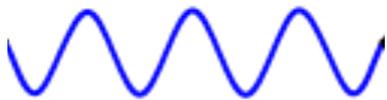
Onda do elétron

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  $\psi(x, t)$

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

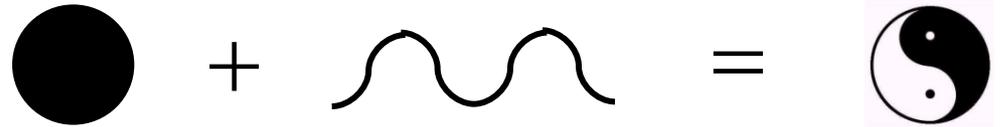


Probabilidade de  
encontrar a partícula

Elétron = Partícula e Onda

Puntiforme e Extenso

Como imaginar isso ?



Algumas experiências "enxergam" partículas

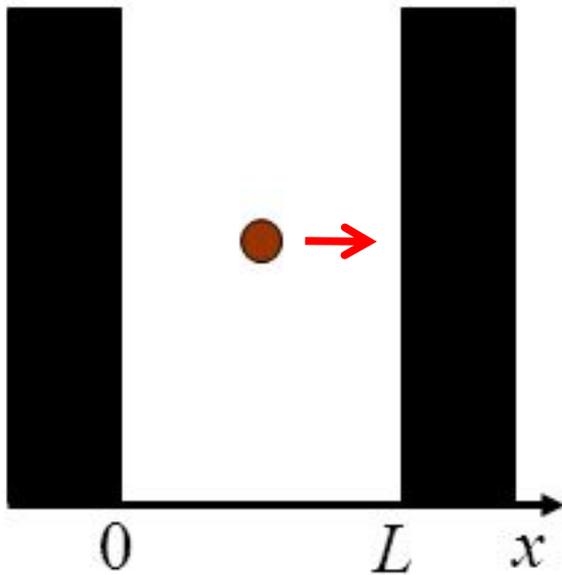
Outras experiências "enxergam" ondas

Não existe trajetória bem definida (princípio da incerteza)

Menos poder de previsão (probabilidades)

# Confinamento gera quantização !

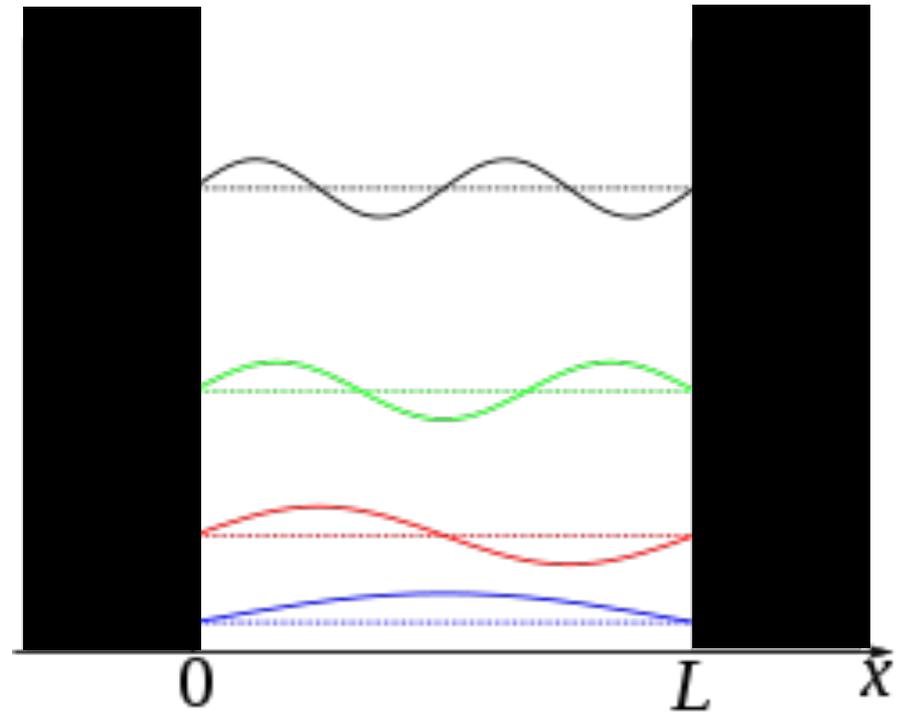
Partícula confinada dentro de uma "caixa" :



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

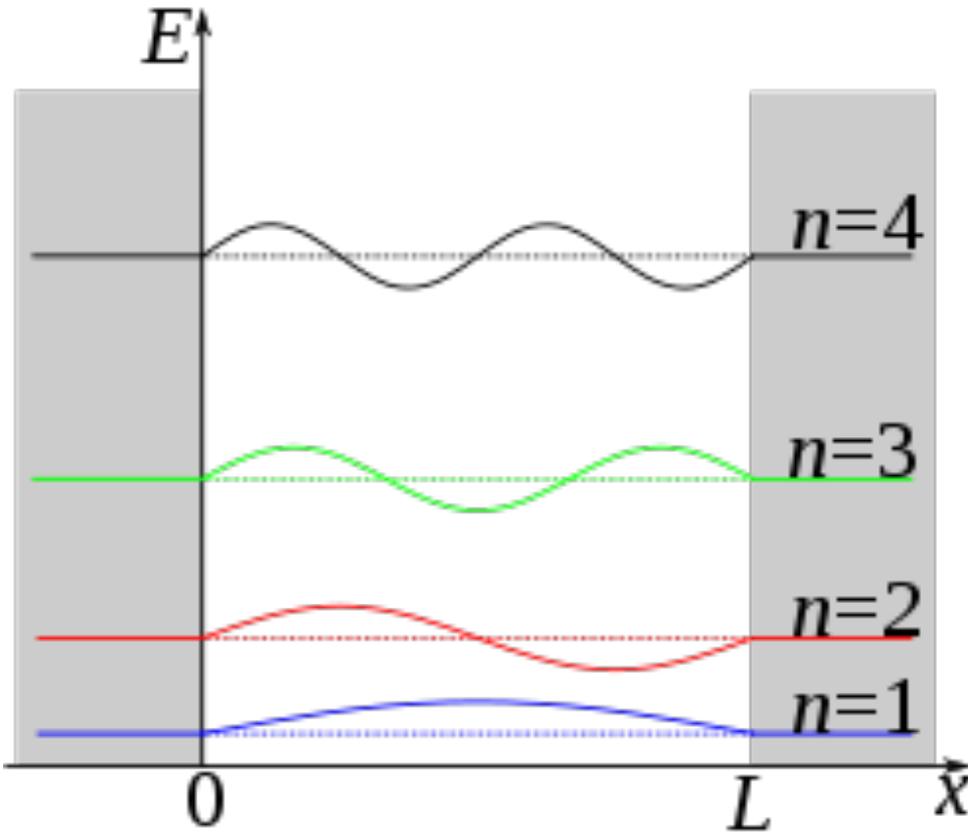
$$\psi(x) = 0$$

$$\psi(x) = 0$$



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

# Só cabem alguns comprimentos de onda !



$$\lambda = 1/2 L$$

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

$$\lambda = 2/3 L$$

$$\lambda = L$$

$$\lambda = 2 L$$

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

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

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



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

Valores discretos: energia quantizada !

# Resumo

Partículas elementares  
possuem spin :

{ Fermions (matéria) : spin = 1/2  
Bosons (forças) : spin = 1 ou 0

Spin é vetor

Spin é quântico

"Onda também é partícula"

"Partícula também é onda"

Função de onda  $\Psi(x,t)$

Dentro da caixa a energia cinética é quantizada

