

# Física do spin

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

[edisciplinas.if.usp.br](http://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

(Magnetismo e física quântica)

Parte II : formalismo ("EUF")

Espinores e matrizes de Pauli

Parte II : aplicações

Resonância magnética nuclear

# Plano do curso

- 17/02 aula 1: Partículas elementares e idéias da física quântica
- 02/03 aula 2: Átomo de Bohr, quantização do momento angular
- 09/03 aula 3: Momento de dipolo magnético, Stern - Gerlach
- 16/03 aula 4: Efeito Zeeman anômalo
- 23/03 1ª Prova Noturno                      25/03 1ª Prova Diurno
- 13/04 aula 5: Equações de autovalores, matrizes de Pauli
- 27/04 aula 6: Comutadores, medidas SG sequenciais
- 04/05 aula 7: Medidas e valores médios
- 11/05 aula 8: Precessão e adição de spins
- 18/05 aula 9: Adição de spins

25/05 2ª Prova Noturno

27/05 2ª Prova Diurno

01/06 aula 10: Princípio da exclusão de Pauli

08/06 aula 11: Interação hiperfina no hidrogênio

15/06 aula 12: Resonância paramagnética do elétron

22/06 aula 13: Resonância magnética nuclear

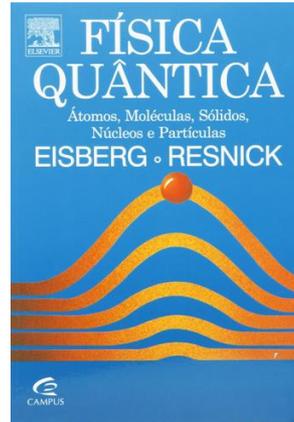
29/06 3ª Prova Noturno

01/07 3ª Prova Diurno

# Bibliografia

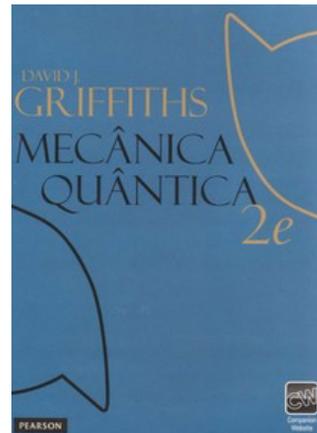
## Física Quântica

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 2018 Prof. Fernando Navarra. [edisciplinas.if.usp.br](http://edisciplinas.if.usp.br)

# Avaliação

Três provas : P1 P2 P3

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

Substitutiva fechada

Aula 1

## O que é spin ?

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

É um **vetor!**

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

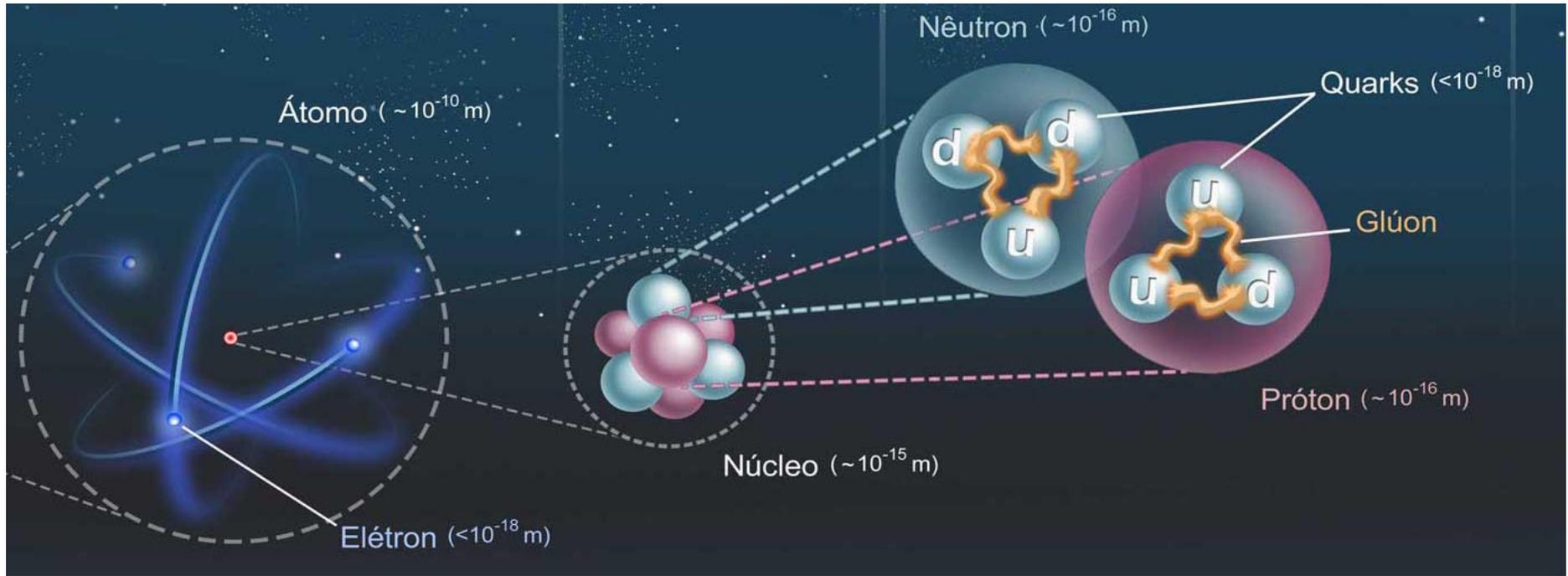
Momento angular intrínseco ?

## 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	$W^+$	$Z^0$	$W^-$
	Interação Forte	GLÚON		
	Interação Gravitacional	GRÁVITON		
QUARKS		u up	c charm	t top
		d down	s strange	b bottom
	LÉPTONS	$\nu_e$ neutrino e	$\nu_\mu$ neutrino $\mu$	$\nu_\tau$ neutrino $\tau$
		e elétron	$\mu$ múon	$\tau$ tau

Matéria:  
quarks e leptons

fermions

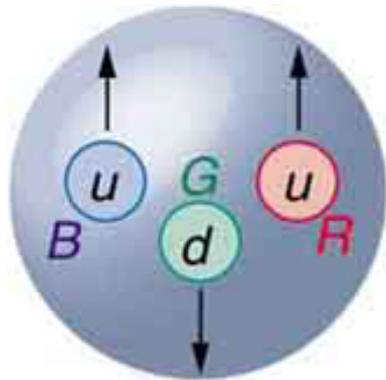
spin = 1/2

# Modelo Padrão das partículas elementares

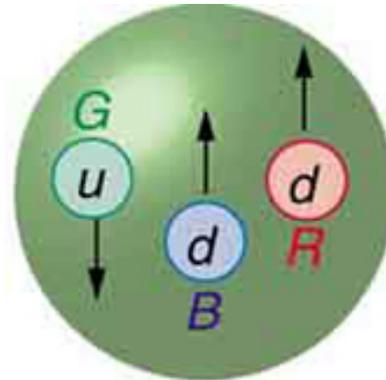
Quarks e antiquarks se combinam para formar hadrons

Barions :  $q + q + q$

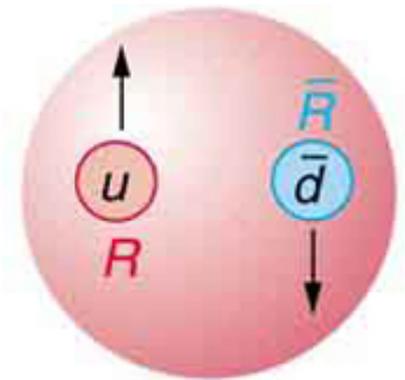
Mesons :  $q + \bar{q}$



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

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

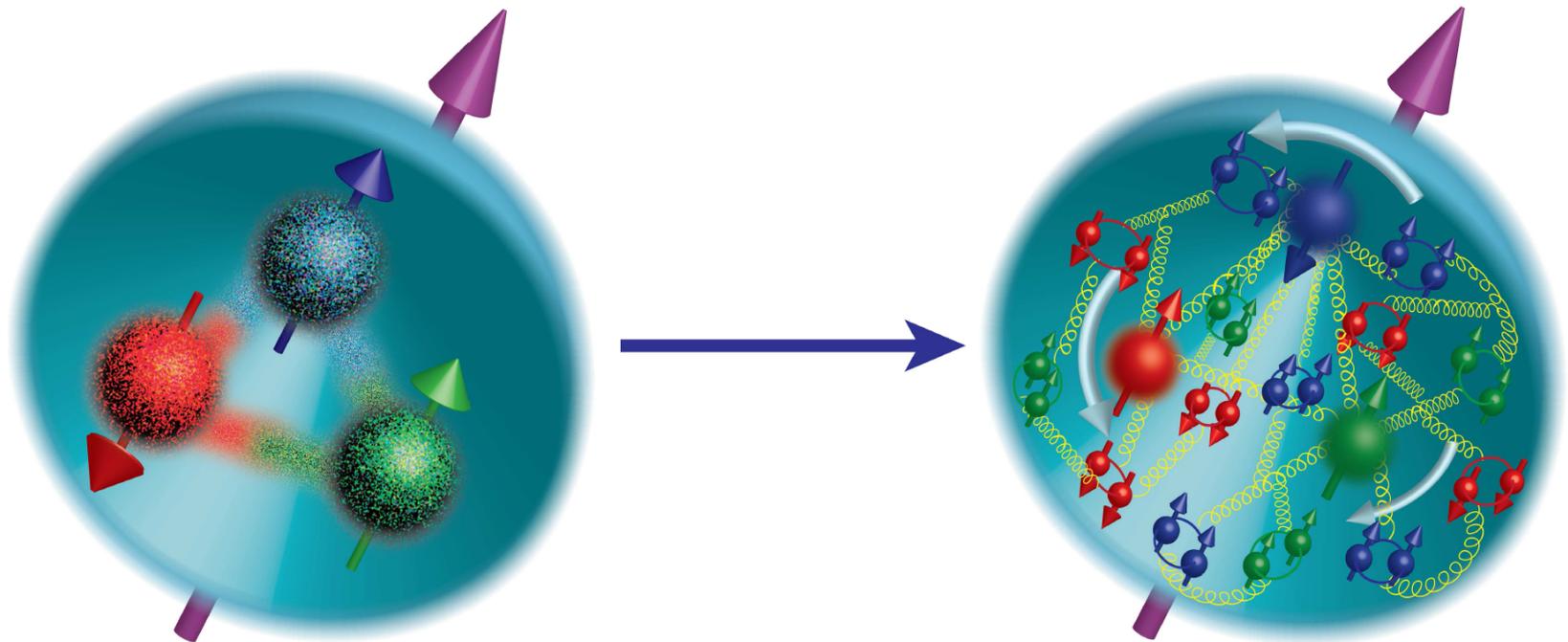
$$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

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

# Spin do Próton: estudo em andamento !

1964 - 2014: 50 anos de quarks !

Próton é muito mais complexo do que apenas três quarks



# Partículas elementares

Mundo microscópico : física quântica

$h$  = constante de Planck

Altas velocidades : relatividade

$c$  = velocidade da luz

Spin é quântico !

# Idéias da Física Quântica

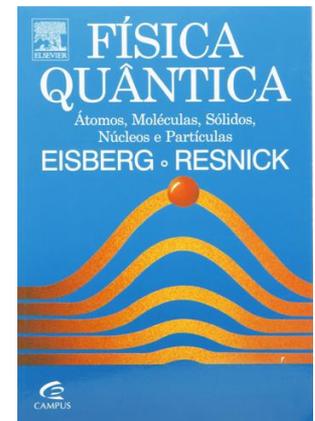
“Velha mecânica quântica” (1905 - 1925)

Idéias e observações ainda sem uma teoria

R. Eisberg e R. Resnick

Capítulo 3

(ER-3)



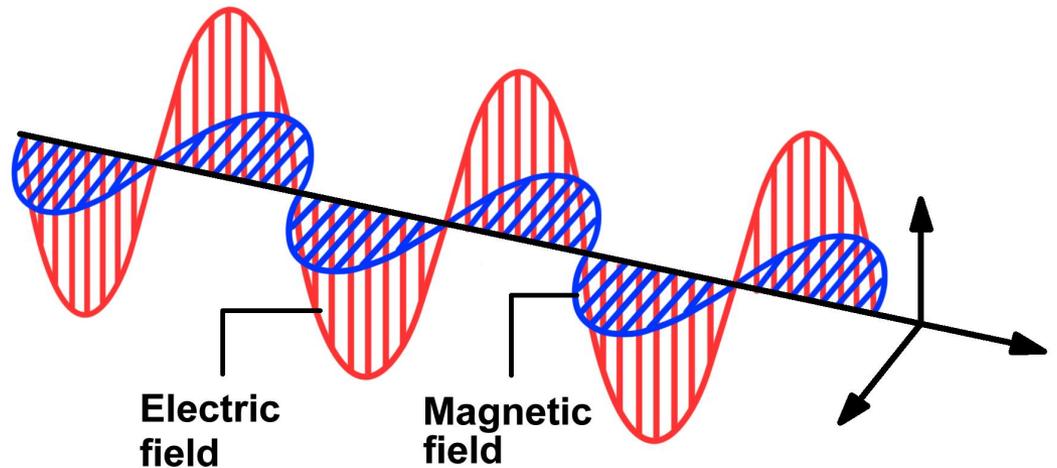
# Onda também é partícula

(ER-1)

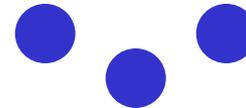
(ER-2)

Luz

Onda de campos E e B



Luz



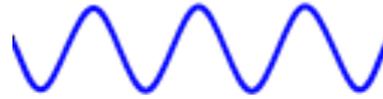
Fotons

$$E = h \nu$$

# Partícula também é onda

(ER-3)

elétron



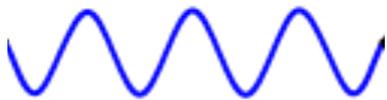
Onda do elétron

Comprimento de  
onda de de Broglie :

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

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

Constante de Planck



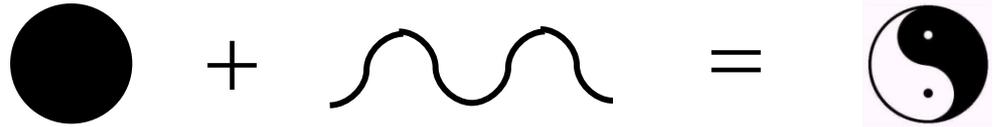
Função de onda  $\psi(x, t)$

$$\psi^*(x, t) \psi(x, t) = |\psi(x, t)|^2 \longrightarrow \text{Probabilidade de encontrar a partícula}$$

Elétron = Partícula e Onda

Puntiforme e Extenso

Como imaginar isso ?



Algumas experiências "enxergam" partículas

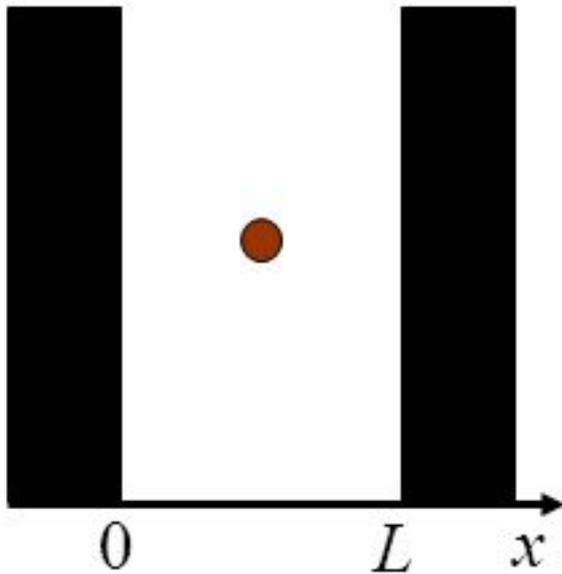
Outras experiências "enxergam" ondas

Não existe trajetória bem definida (princípio da incerteza)

Menos poder de previsão (probabilidades)

# Confinamento gera quantização !

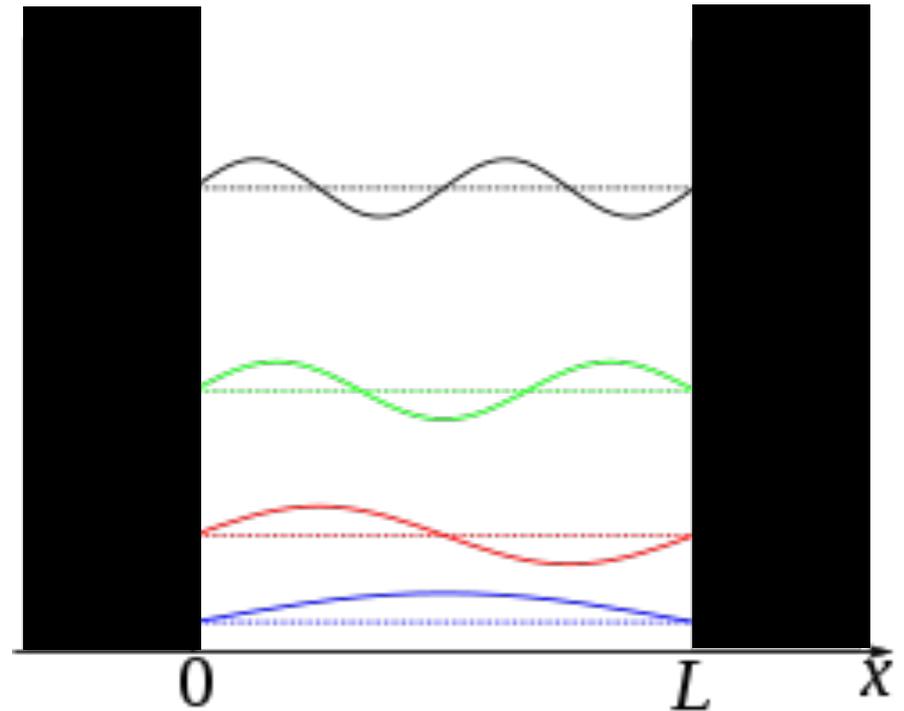
Partícula confinada  
numa caixa com  
paredes rígidas



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

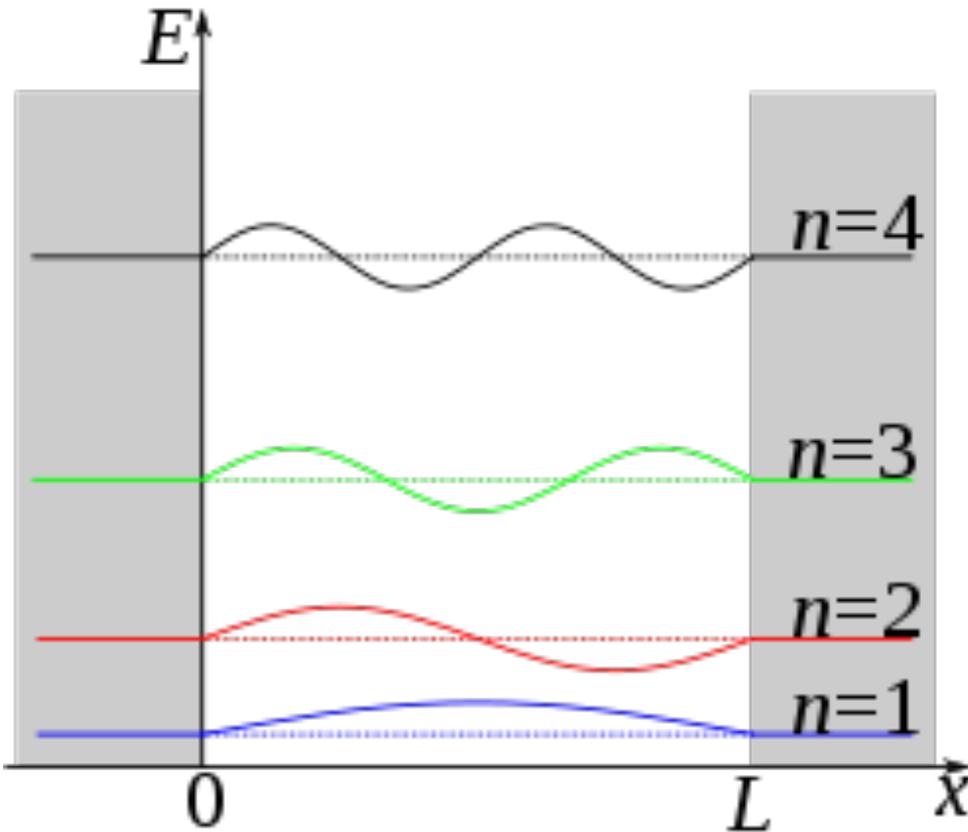
$$\psi(x) = 0$$

$$\psi(x) = 0$$



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

Só cabem alguns comprimentos de onda !



$$\lambda = 1/2 L$$

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

$$\lambda = 2/3 L$$

$$\lambda = L$$

$$\lambda = 2 L$$

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

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

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



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

Valores discretos: energia quantizada !

# Resumo

Partículas elementares possuem spin

Fermions (matéria) : spin = 1/2

Bosons (forças) : spin = 1

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



# Modelo Padrão das partículas elementares

FERMIONS					
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_L$ lightest neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	<b>u</b> up	0.002	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.005	-1/3
$\nu_M$ middle neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_H$ heaviest neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	<b>t</b> top	173	2/3
$\tau$ tau	1.777	-1	<b>b</b> bottom	4.2	-1/3

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