

# Materiais Elétricos e Magnéticos para Engenharia

**Prof. Marcus V. Batistuta**  
**[batistuta@unb.br](mailto:batistuta@unb.br)**

**Lab-0**  
**“Introdução”**

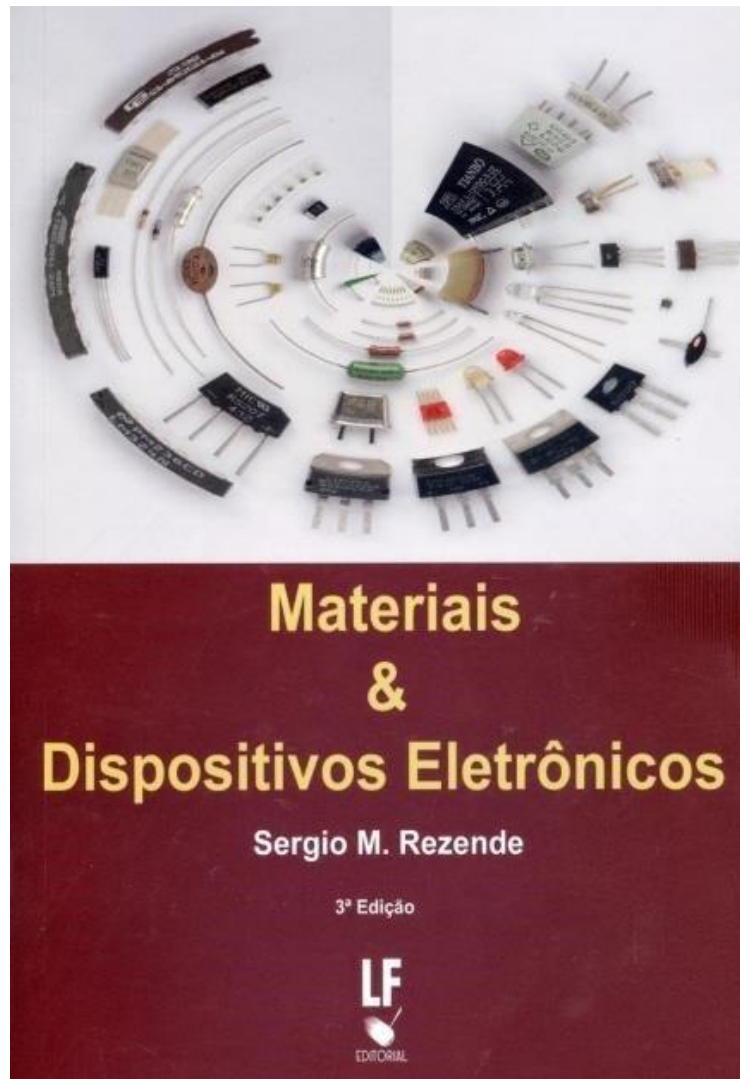
**FGA - Universidade de Brasília**

# Dormir é Importante!

- Passamos 1/3 da vida dormindo.
- Precisamos dormir:  
Para manter a saúde física e mental.  
Para aprender e memorizar.
- Planeje-se:  
Para ter um sono de boa qualidade.  
Para dormir ininterruptamente por pelo menos 8 horas por noite, regularmente.
- Dormir pouco resulta em doenças graves, irritabilidade, perda de memória, cansaço, reprovação.



# Livro Texto



Autor: Sérgio Machado Rezende

Editora: Livraria da Física

3ª Edição (2014)

<b>Prefácio</b>	<b>ix</b>
-----------------	-----------

<b>Capítulo 1. Materiais para Eletrônica</b>	<b>1</b>
--	----------

1.1 Eletrônica e Física do Estado Sólido	2
1.2 Ligações Atômicas	5
1.3 Materiais Cristalinos	8
1.4 Materiais para Dispositivos Eletrônicos	14

<b>Capítulo 2. Ondas e Partículas na Matéria</b>	<b>27</b>
--	-----------

2.1 Ondas Eletromagnéticas	28
2.2 Ondas Elásticas em Sólidos	34
2.3 Efeito Fotoelétrico - Ondas e Partículas	40
2.4 O Elétron como uma Onda - Princípio da Incerteza	46
2.5 Fônons e outras Excitações Elementares	50

<b>Capítulo 3. Mecânica Quântica: O Elétron no Átomo</b>	<b>55</b>
--	-----------

3.1 Os Postulados da Mecânica Quântica	56
3.2 A Equação de Schroedinger Independente do Tempo	60
3.3 Aplicações Simples da Mecânica Quântica	62
3.4 Elétron no Átomo de Hidrogênio	73
3.5 Átomos de Muitos Elétrons	84

<b>Capítulo 4. Elétrons em Cristais</b>	<b>91</b>
4.1 Bandas de Energia em Cristais	92
4.2 Condutores, Isolantes e Semicondutores	98
4.3 Massa Efetiva	101
4.4 Comportamento dos Elétrons em $T > 0$ - Distribuição de Fermi-Dirac	103
4.5 O Mecanismo da Corrente Elétrica em Metais	109
 <b>Capítulo 5. Materiais Semicondutores</b>	 <b>117</b>
5.1 Semicondutores	118
5.2 Elétrons e Buracos em Semicondutores Intrínsecos	122
5.3 Semicondutores Extrínsecos	135
5.4 Dinâmica de Elétrons e Buracos em Semicondutores	145
 <b>Capítulo 6. Dispositivos Semicondutores: Diodos</b>	 <b>167</b>
6.1 A Junção $p-n$	168
6.2 Corrente na Junção Polarizada	180
6.3 Heterojunções	186
6.4 Diodo de Junção	192
6.5 Diodo de Barreira Schottky	198
6.6 Ruptura na Polarização Reversa: Diodo Zener	200
6.7 Outros Tipos de Diodos	202

<b>Capítulo 7. Transistores e</b>	
<b>Outros Dispositivos Semicondutores</b>	<b>215</b>
7.1 O Transistor	217
7.2 O Transistor Bipolar	219
7.3 Correntes no Transistor Bipolar	225
7.4 Aplicações de Transistores	237
7.5 Transistores de Efeito de Campo	241
7.6 O Transistor MOSFET	251
7.7 Dispositivos de Controle de Potência: SCR e TRIAC	267
7.8 Circuitos Integrados	271
 <b>Capítulo 8. Materiais e Dispositivos Opto-Eletrônicos</b>	 <b>287</b>
8.1 Propriedades Ópticas dos Materiais	289
8.2 Interação da Radiação com a Matéria - Modelo Clássico	298
8.3 Teoria Quântica da Interação Radiação-Matéria	308
8.4 Fotodetetores	323
8.5 Diodo Emissor de Luz (LED)	342
8.6 Emissão Estimulada e Lasers	348
8.7 O Laser de Diodo Semicondutor	359
8.8 Aplicações dos Lasers de Diodo	372
 <b>Capítulo 9. Materiais e Dispositivos Magnéticos</b>	 <b>383</b>
9.1 Magnetismo e Materiais Magnéticos	385
9.2 Propriedades Magnéticas da Matéria	390
9.3 Materiais Magnéticos	400
9.4 Materiais para Aplicações Tradicionais	416
9.5 Gravação Magnética	425
9.6 Dispositivos de Ferrites para Microondas	442

<b><u>Capítulo 10. Outros Materiais Importantes para a Eletrônica</u></b>	<b>463</b>
10.1 Materiais Dielétricos	465
10.2 Materiais Dielétricos para Opto-Eletrônica	484
10.3 Materiais para Mostradores e Telas de Vídeo	493
10.4 Materiais Supercondutores	514
 Apêndice A. Teoria de Perturbação: Cálculo da Probabilidade de Transição	 535
Apêndice B. Constantes Físicas e Tabela de Conversão de Unidades Energia	539
Apêndice C. Tabela Periódica dos Elementos	540
<b><u>Índice Analítico</u></b>	<b>541</b>

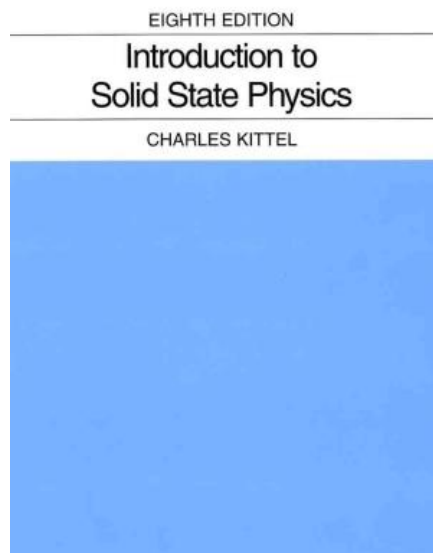
# Bibliografia Básica



Autor: Charles Kittel

Editora: LTC

8ª Edição (2006)



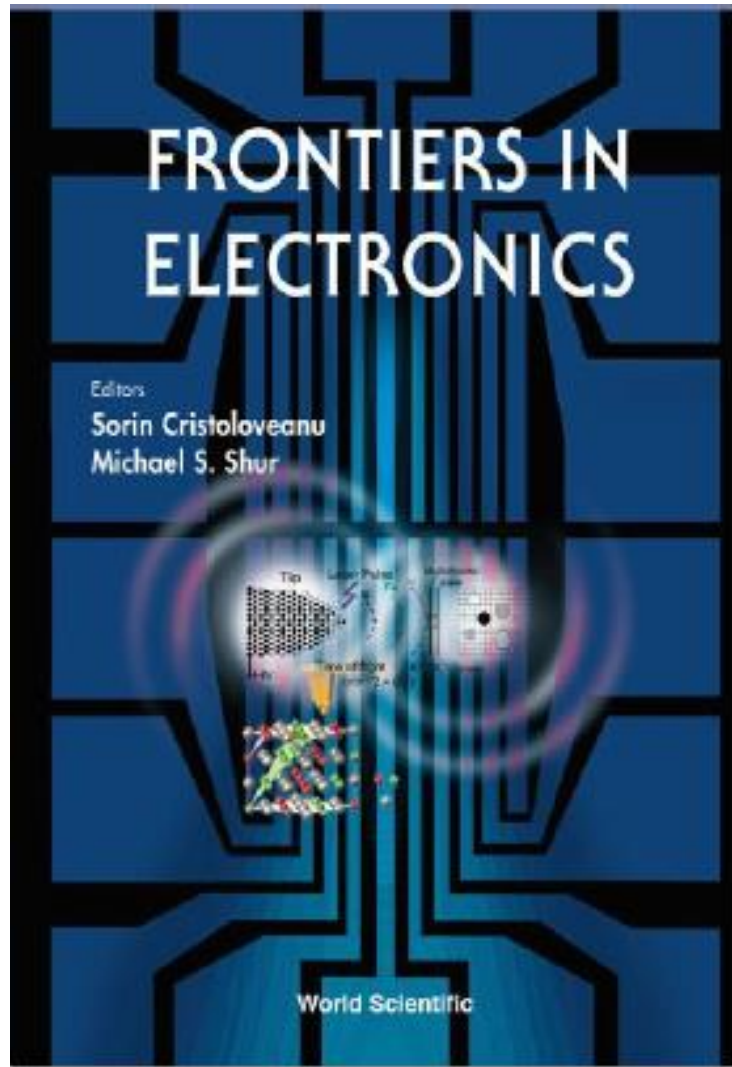
Autor: Charles Kittel

Editora: IE-Wiley

8ª Edição (2005)



# Bibliografia Básica



**Shur, M., Cristoloveanu, S.,**  
Frontiers in Electronics,  
World Scientific Publishing Co.,  
2009.

<http://www.ebrary.com/>

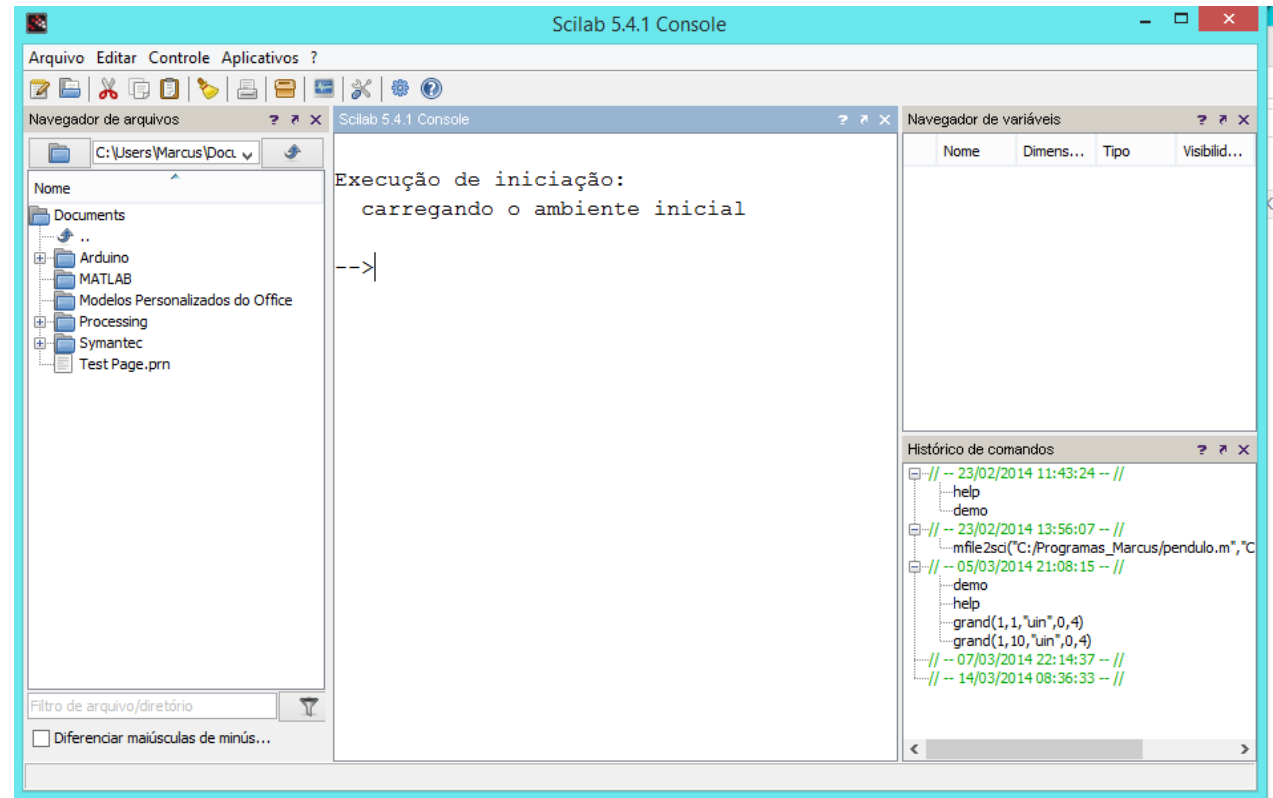
# Bibliografia Complementar



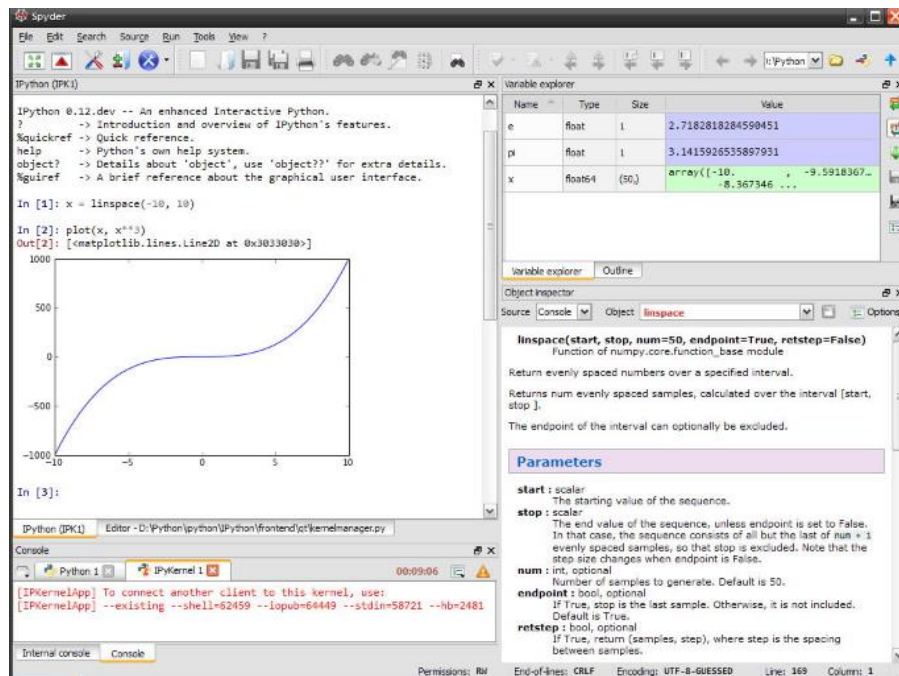
Autor: Jacobus Willibrordus Swart

Editora: UNICAMP

1ª Edição (2008)



<http://www.scilab.org/>

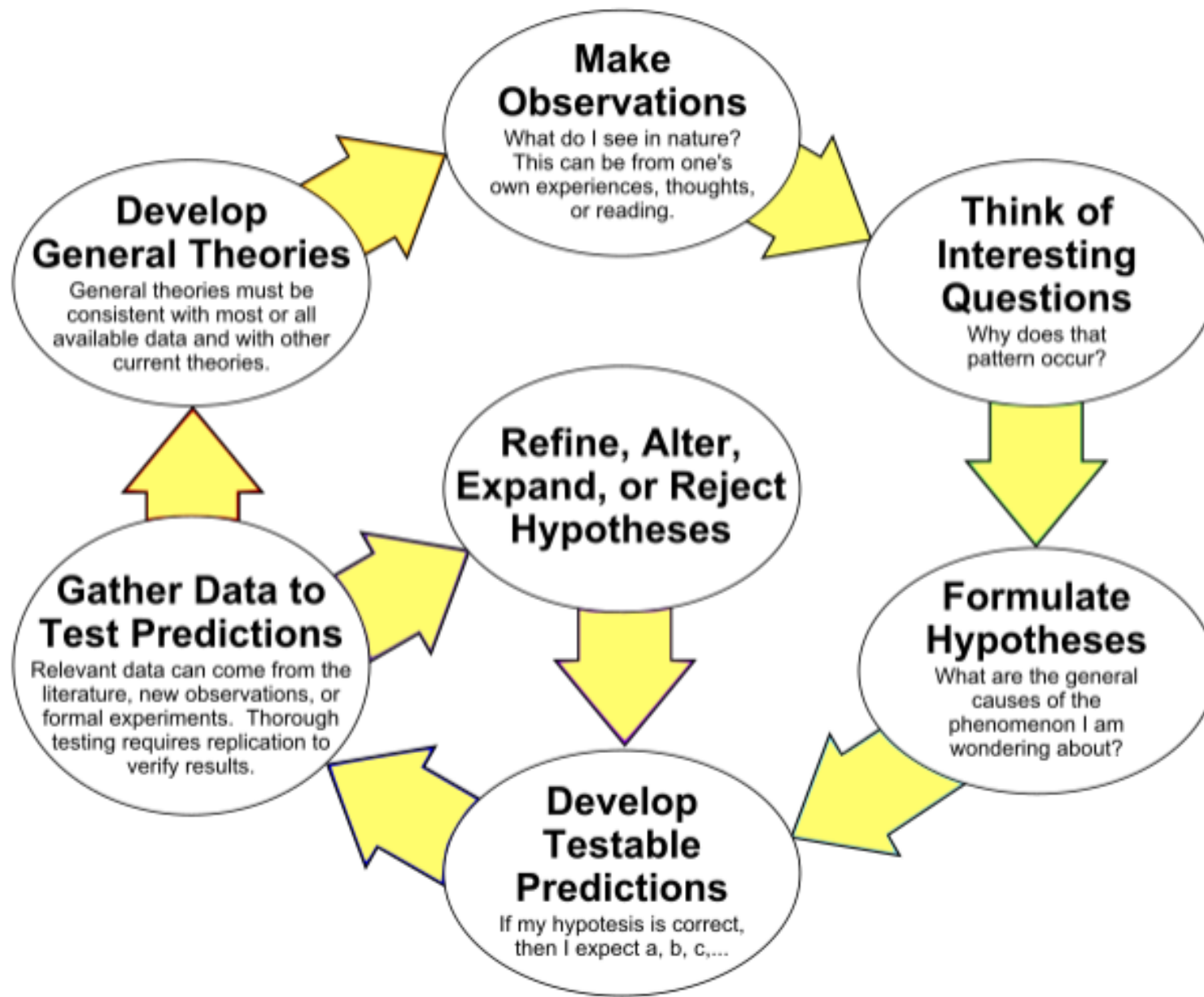


Spyder

```
# For loop on a list
>>> numbers = [2, 4, 6, 8]
>>> product = 1
>>> for number in numbers:
...     product = product * number
...
>>> print('The product is:', product)
The product is: 384
```

<https://www.python.org/>

# The Scientific Method as an Ongoing Process



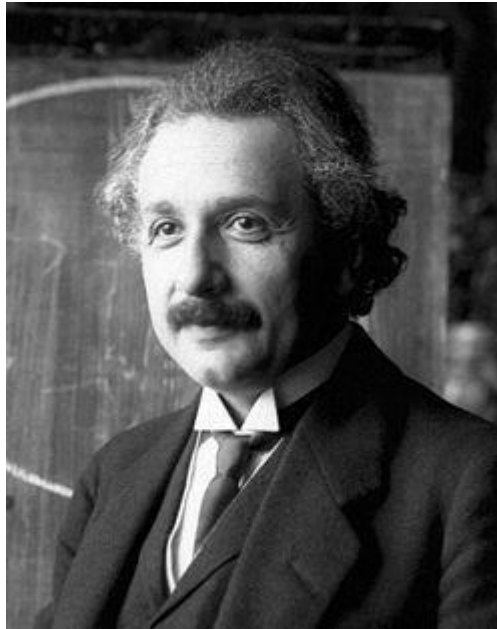
Garland, Jr., Theodore (2015). "The Scientific Method as an Ongoing Process". U. C. Riverside

# O Método Científico

Neil deGrasse Tyson  
**The Scientific Method**  
(Cosmos)

- Teste Ideias com Experimentos e Observações.
- Construa sobre as Ideias que passarem nos testes.
- Rejeite as ideias que falharem nos testes.
- Siga as evidências onde quer que elas levem.
- Questione tudo.

# Matéria e Energia



Albert Einstein

Relatividade Especial  
(1905)

$$E = mc^2$$

$$t' = \gamma(t - vx/c^2)$$

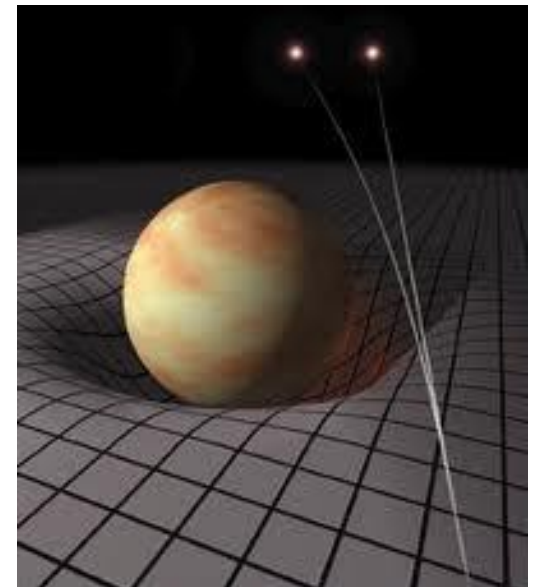
$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

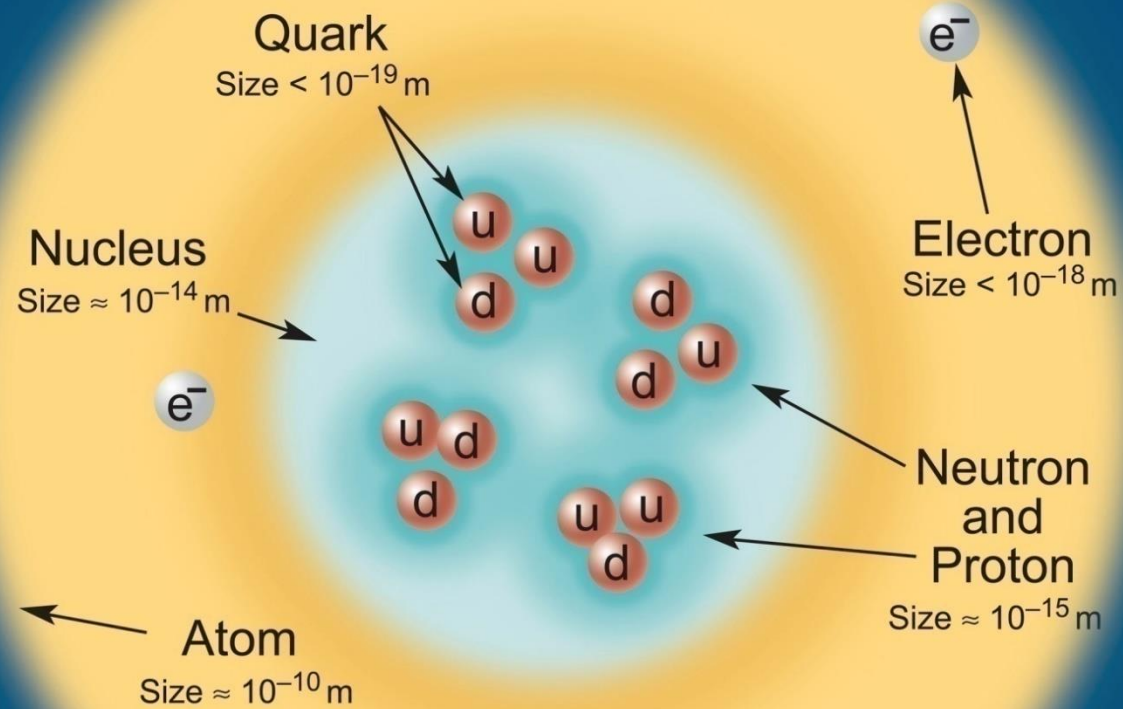
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Relatividade Geral  
(1915)





## Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.



# Hádrons

## Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.  
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

# Hádrons

<b>Mesons <math>q\bar{q}</math></b> Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

# Partículas Elementares do Modelo Padrão

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
					GAUGE BOSONS

17

PARTÍCULAS

# Partículas Elementares do Modelo Padrão

The 17 named fundamental particles of the Standard Model

12 fermions			5 bosons
up quark	charm quark	top quark	gluon
down quark	strange quark	bottom quark	photon
electron	muon	tau	W boson
electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z boson
			higgs boson

**17** PARTÍCULAS

## Férmions de Matéria (24)

Quarks come in 6 flavors and 3 colors, which gives us 18 unique quarks.

18 quarks		
red up quark	red charm quark	red top quark
green up quark	green charm quark	green top quark
blue up quark	blue charm quark	blue top quark
red down quark	red strange quark	red bottom quark
green down quark	green strange quark	green bottom quark
blue down quark	blue strange quark	blue bottom quark

The leptons come in 6 flavors, 3 of which are neutrinos, but none of which are colored. There is nothing to multiply here. Just add 6 leptons to the 18 quarks to get 24 matter fermions.

6 leptons		
electron	muon	tau
electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino



## Férmions de Antimatéria (24)

18 antiquarks		
antired antiup quark	antired anticharm quark	antired antitop quark
antigreen antiup quark	antigreen anticharm quark	antigreen antitop quark
antiblue antiup quark	antiblue anticharm quark	antiblue antitop quark
antired antidown quark	antired antistrange quark	antired antibottom quark
antigreen antidown quark	antigreen antistrange quark	antigreen antibottom quark
antiblue antidown quark	antiblue antistrange quark	antiblue antibottom quark
6 antileptons		
antielectron*	antimuon	antitau
electron antineutrino	muon antineutrino	tau antineutrino

\* also known as the positron

# Bósons (13)

Gluons come in 8 color combinations. Here's one way to write them out.

8 gluons		
$\frac{r\bar{b} + b\bar{r}}{\sqrt{2}}$	$\frac{-i(r\bar{b} - b\bar{r})}{\sqrt{2}}$	$\frac{r\bar{r} - b\bar{b}}{\sqrt{2}}$
$\frac{r\bar{g} + g\bar{r}}{\sqrt{2}}$	$\frac{-i(r\bar{g} - g\bar{r})}{\sqrt{2}}$	
$\frac{g\bar{b} + b\bar{g}}{\sqrt{2}}$	$\frac{-i(g\bar{b} - b\bar{g})}{\sqrt{2}}$	$\frac{r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}}{\sqrt{6}}$

4 electroweak bosons			
photon	$W^+$ boson	$W^-$ boson	$Z^0$ boson

1 higgs bosons
higgs boson

TOTAL: **61** PARTÍCULAS IDENTIFICADAS

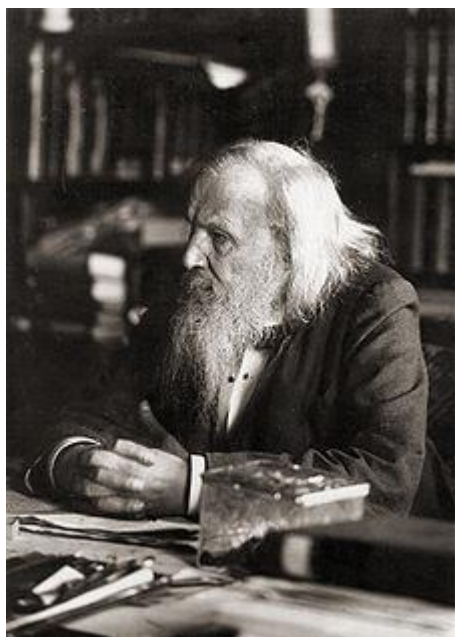
# As 4 Forças

## 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 (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 (not yet observed)	$W^+ \quad W^- \quad Z^0$	$\gamma$	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	$10^{-41}$	0.8	1	25
	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60





## Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834 – 1907)

Reihen	Gruppe I. — R'O	Gruppe II. — R'O	Gruppe III. — R'O <sup>3</sup>	Gruppe IV. RH <sup>4</sup> R'O <sup>4</sup>	Gruppe V. RH <sup>5</sup> R'O <sup>5</sup>	Gruppe VI. RH <sup>6</sup> R'O <sup>6</sup>	Gruppe VII. RH R'O <sup>7</sup>	Gruppe VIII. — R'O <sup>8</sup>
1	II=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Tabela Periódica - 1871

# Átomos

O diagrama apresenta a Tabela Periódica com as seguintes características:

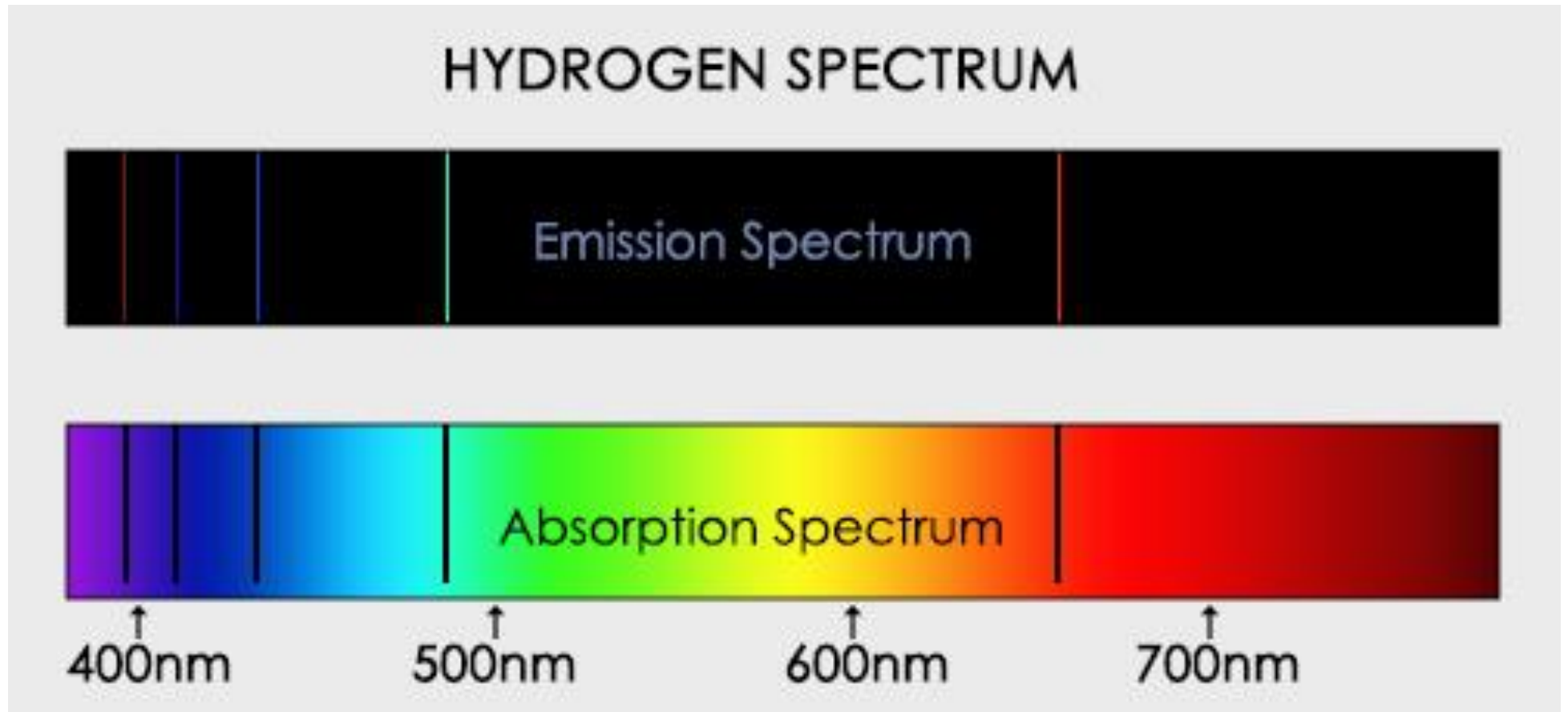
- Barra de Estado Físico:** Localizada no topo, com uma escala de temperatura de 0 a 300°C. As cores representam: Sólido (verde), Líquido (amarelo), Gasoso (laranja) e Desconhecido (roxo).
- Grupos e Estados:**
  - Sólido:** Metais alcalinos, Metais alcalino-terrosos, Metais de transição, Metais de pós-transição, Lantanídeos, Actinídeos.
  - Líquido:** Semimetais.
  - Gasoso:** Outros não-metais, Halogênios, Gases nobres.
  - Desconhecido:** Rf (Radioativos).
- Elementos Específicos:**
  - 1-18:** Hidrogênio (H), Hélio (He), Lítio (Li), Berílio (Be), Boro (B), Carbono (C), Nitrogênio (N), Oxigênio (O), Flúor (F), Neônio (Ne), Sódio (Na), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Argônio (Ar).
  - 19-36:** Potássio (K), Cálcio (Ca), Escândio (Sc), Titânio (Ti), Vanádio (V), Crômio (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Germânio (Ge), Arsênio (As), Selênio (Se), Bromo (Br), Criptônio (Kr).
  - 37-54:** Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Iúlio (Y), Zircônio (Zr), Níbio (Nb), Molibdênio (Mo), Tecnécio (Tc), Rutênio (Ru), Ródio (Rh), Paládio (Pd), Prata (Ag), Cádmio (Cd), Índio (In), Estanho (Sn), Antimônio (Sb), Telúrio (Te), Iodo (I), Xenônio (Xe).
  - 55-86:** Césio (Cs), Bário (Ba), Lantânio (La), Háfnio (Hf), Tântalo (Ta), Tungstênio (W), Rénio (Re), Ósmio (Os), Irídio (Ir), Platina (Pt), Ouro (Au), Mercúrio (Hg), Tálio (Tl), Chumbo (Pb), Bismuto (Bi), Polônio (Po), Astatina (At), Rádion (Rn).
  - 87-118:** Francium (Fr), Rádio (Ra), Actínio (Ac), Tório (Th), Protáctio (Pa), Urânio (U), Neptúncio (Np), Plútonio (Pu), Amélio (Am), Cúrio (Cm), Bérquílio (Bk), Califórnio (Cf), Eínsteínio (Es), Fermílio (Fm), Mendelívio (Md), Noélio (No), Lawrêncio (Lr), Rutherfordio (Rf), Dubnio (Db), Seabórgio (Sg), Bóhrio (Bh), Hassio (Hs), Meitnério (Mt), Darmatátio (Ds), Roentgênio (Rg), Copernício (Cn), Ununtrio (Uut), Ununquádio (Uuq), Ununpêntio (Uup), Ununhexio (Uuh), Ununseptio (Uus), Ununoctio (Uuo).

Para os elementos sem isótopos estáveis, o número de massa do isótopo com a meia-vida mais longa está entre parênteses.

Tabela Periódica Direitos autorais de design e interface © 1997 Michael Dayah. Ptable.com Última atualização 22 de Set de 2010

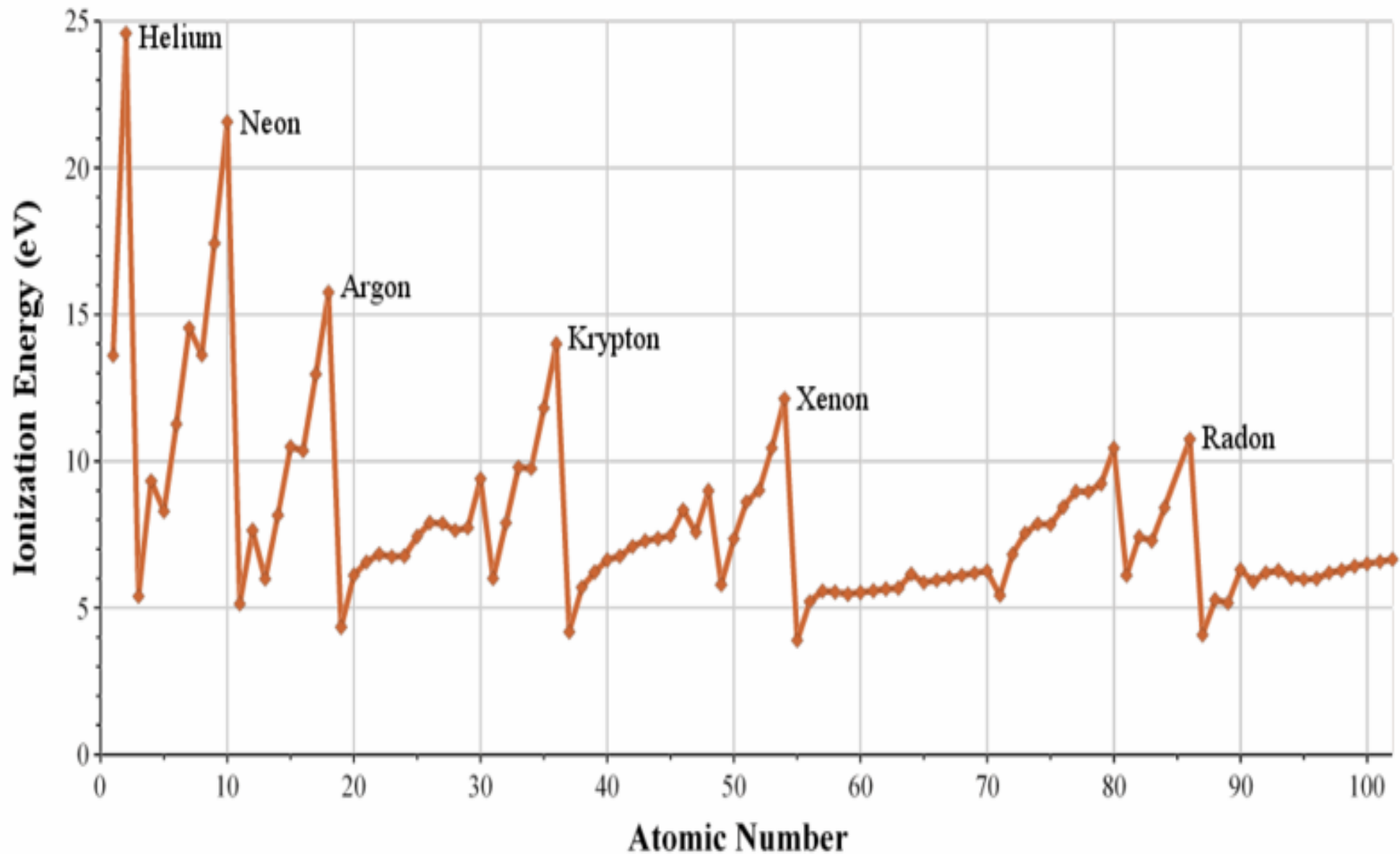
57 <b>La</b> Lantânio 138,90547	58 <b>Ce</b> Cério 140,116	59 <b>Pr</b> Praseodímio 140,90765	60 <b>Nd</b> Neodímio 144,242	61 <b>Pm</b> Promécio (145)	62 <b>Sm</b> Samário 150,36	63 <b>Eu</b> Európio 151,964	64 <b>Gd</b> Gadolínio 157,25	65 <b>Tb</b> Térbio 158,92535	66 <b>Dy</b> Disprósio 162,5	67 <b>Ho</b> Hólmio 164,93032	68 <b>Er</b> Erbio 167,259	69 <b>Tm</b> Túlio 168,93421	70 <b>Yb</b> Íterbio 173,054	71 <b>Lu</b> Lutécio 174,9668
89 <b>Ac</b> Actínio (227)	90 <b>Th</b> Tório 232,03806	91 <b>Pa</b> Protactínio 231,03588	92 <b>U</b> Urânio 238,02891	93 <b>Np</b> Neptúnio (237)	94 <b>Pu</b> Plutónio (244)	95 <b>Am</b> Americio (243)	96 <b>Cm</b> Cúrio (247)	97 <b>Bk</b> Berquélio (247)	98 <b>Cf</b> Califórnio (251)	99 <b>Es</b> Einsteinio (252)	100 <b>Fm</b> Férmio (257)	101 <b>Md</b> Mendelévio (262)	102 <b>No</b> Nobélio (262)	103 <b>Lr</b> Laurêncio (262)

# Espectro do Hidrogênio



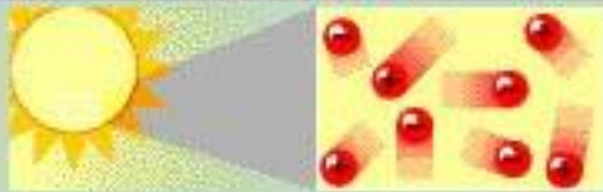


# Energia de Ionização



# Estados da Matéria

A existência de um quinto estado da matéria só foi comprovada em laboratório em 1995. Ele havia sido previsto em 1924 pelo físico alemão Albert Einstein e pelo matemático indiano Satyendra Nath Bose



## **ESTADO DE PLASMA**

A temperaturas altíssimas, da ordem de  $10.000^{\circ}\text{C}$ , os átomos possuem carga elétrica. Movem-se caoticamente, espalhando-se para todas as direções, a cerca de  $15.000\text{ km/h}$ . É o estado da matéria das estrelas



## **ESTADO GASOSO**

Abaixo de  $1.000^{\circ}\text{C}$ , as partículas começam a frear e a neutralizar sua carga elétrica. Num gás à temperatura ambiente, os átomos viajam com velocidade média de  $1.500\text{ km/h}$ , também em qualquer direção



## **ESTADO LÍQUIDO**

À temperatura ambiente, os átomos da maior parte das substâncias viajam ainda desordenadamente. Percorrem todo o volume que lhes é dado, como o de um copo. A velocidade média das partículas é bem menor:  $90\text{ km/h}$



## **ESTADO SÓLIDO**

Quando a temperatura cai mais, os átomos se unem firmemente. Mas ainda dançam. Na água, a  $0^{\circ}\text{C}$ , os átomos andam com a mesma velocidade de  $90\text{ km/h}$ , mas já não caminham por todo o volume. Apenas vibram em torno de um ponto

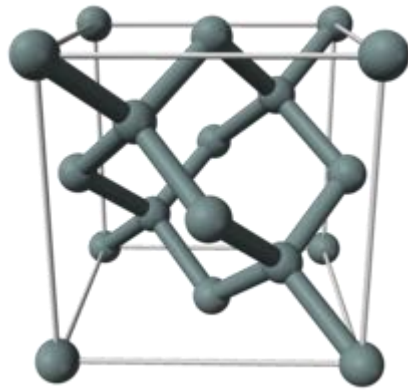
**NÃO EXISTE  
NA NATUREZA**



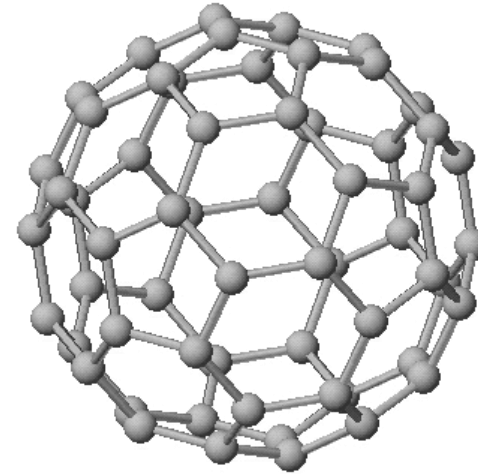
## **QUINTO ESTADO**

No condensado Bose-Einstein, os átomos estão a uma temperatura muito próxima do zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). As partículas vibram como um corpo único, numa velocidade tão baixa que é impossível medi-la em laboratório

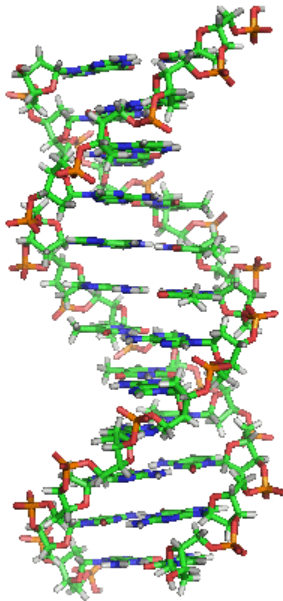
# Organização da Matéria Sólida



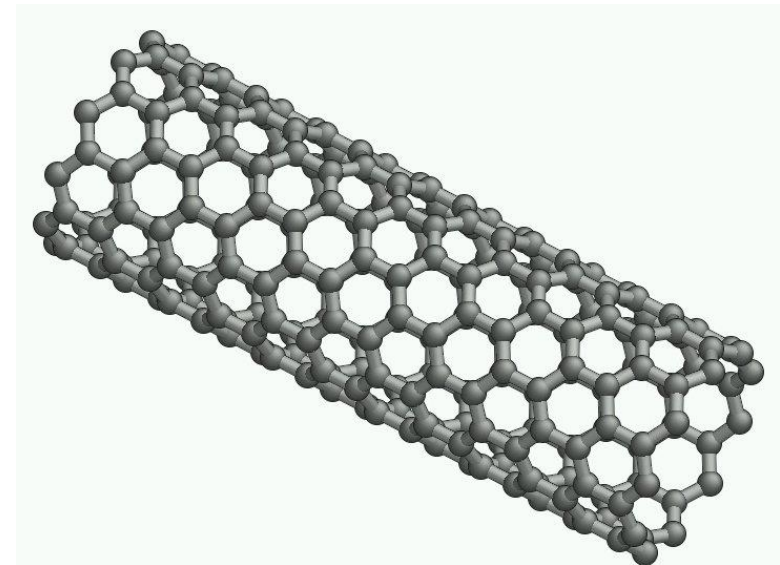
Célula Unitária – Diamante



BuckyBall – C60



DNA



Nanotubo de Carbono

# Campos Eletromagnéticos x Matéria

## Equações do Eletromagnetismo

$$\text{Gauss: } \begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad \left( \nabla^2 - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E} = 0$$

$$\text{Faraday: } \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \left( \nabla^2 - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{B} = 0$$

$$\text{Ampère: } \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

$$\text{Continuidade: } \nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$\text{Lorentz: } \vec{F} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]$$

# Campos Eletromagnéticos x Matéria

## Equações da Mecânica Quântica

Planck:  $E = h\nu = \hbar\omega$       Louis de Broglie:  $p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$

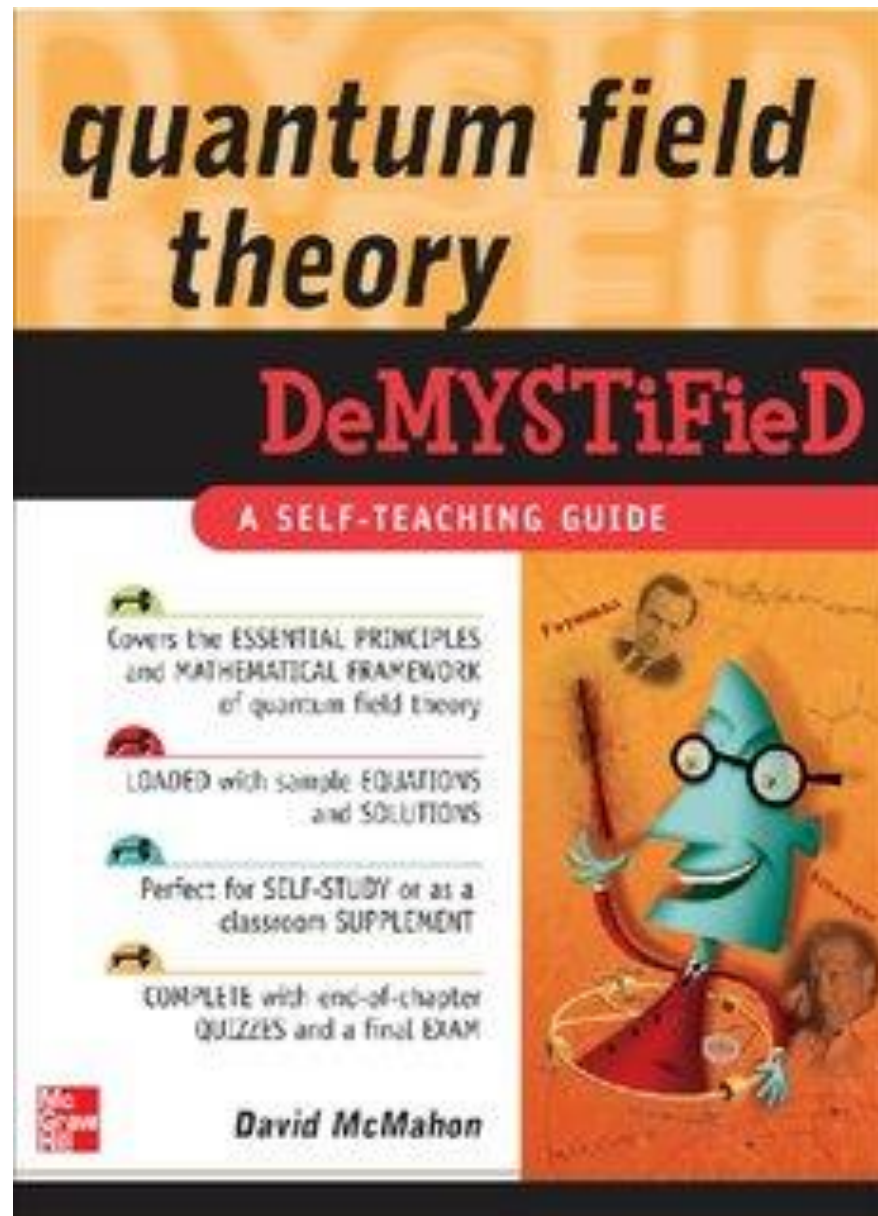
Schrödinger:  $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, y, z, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x, y, z, t) + V(x) \Psi(x, y, z, t)$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x_1, \dots, x_n, t) = \hbar^2 \left( -\frac{\nabla_1^2}{2m_1} - \frac{\nabla_2^2}{2m_2} \dots - \frac{\nabla_N^2}{2m_N} \right) \Psi(x_1, \dots, x_n, t) + V(x_1, \dots, x_n, t) \Psi(x_1, \dots, x_n, t)$$

Dirac:  $\left( \beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$

Klein-Gordon:  $-\frac{1}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi = -\nabla^2 \psi + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi$





## RELATIVIDADE ESPECIAL + MECÂNICA QUÂNTICA (Sem Gravidade!)

<https://www.pdfdrive.net/quantum-field-theory-demystified-cern-d2509446.html>

# Aplicações de Materiais E&M

