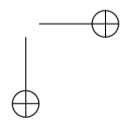
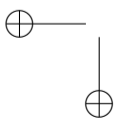
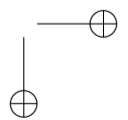
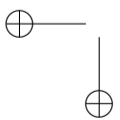
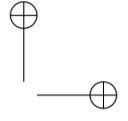
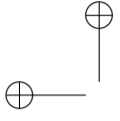
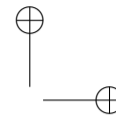
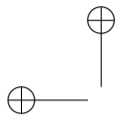


**O que são quarks, glúons, bósons de Higgs,  
buracos negros e outras coisas estranhas?**





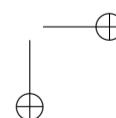
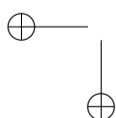


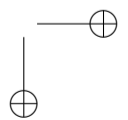
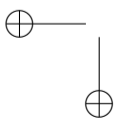
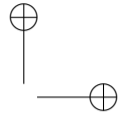
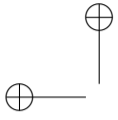
**O que são quarks, glúons, bósons de Higgs,  
buracos negros e outras coisas estranhas?**

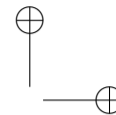
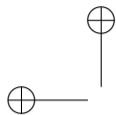
*Francisco Caruso, Vitor Oguri & Alberto Santoro*

Editores

**Livraria da Física**







**LISHEP 2009**

IV ESCOLA INTERNACIONAL DE FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS  
SESSÃO DEDICADA A PROFESSORES DE ENSINO MÉDIO,  
LICENCIANDOS E JORNALISTAS

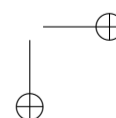
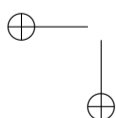
## **O que são quarks, glúons, bósons de Higgs, buracos negros e outras coisas estranhas?**

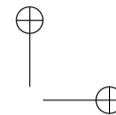
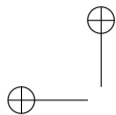
*Francisco Caruso, Vitor Oguri & Alberto Santoro*

Editores

Segunda edição corrigida

Rio de Janeiro, abril de 2012





Copyright © 2012 Editora Livraria da Física  
2a. Edição

Editor: José Roberto Marinho  
Assistente editorial: Victor Pereira Marinho  
Projeto gráfico e diagramação: Francisco Caruso & Vitor Oguri  
Capa: Artquantum - Antonio M.A. Moraes

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

O que são quarks, glúons, bósons de Higgs,  
buracos negros e outras coisas estranhas? /  
Francisco Caruso, Vitor Oguri e Alberto Santoro  
editores . - São Paulo : Editora Livraria da  
Física, 2012. - (Série LISHEP ; 4)

Vários autores  
ISBN 978-85-7861-154-5

1. Física – Estudo e ensino I. Caruso,  
Francisco. II. Oguri, Vitor. III. Santoro,  
Alberto. IV. Série.

11 - 13695

CDD-530.07

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Livro-texto : Estudo e ensino 530.07

**ISBN 978-85-7861-154-5**

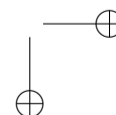
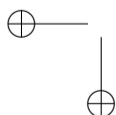
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Todo esforço foi feito no sentido de se evitarem erros. No entanto, utilize as informações apresentadas nessas notas apenas como guia. Não nos responsabilizamos por erros eventualmente cometidos na preparação desse manuscrito.

Impresso no Brasil  
*Printed in Brazil*



*Editora Livraria da Física*  
Tel./Fax: +55 11 3459-4327 / 3936-3413  
[www.livrariadafisica.com.br](http://www.livrariadafisica.com.br)



## PREFÁCIO À PRIMEIRA EDIÇÃO

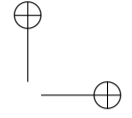
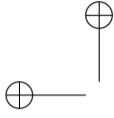
Continuamos firmes em nossa convicção acerca da importância de os pesquisadores se dedicarem também à tarefa de divulgar a Ciência que fazem. Alcançar os jovens e motivá-los para a Ciência é essencial para a renovação dos quadros de cientistas e, nesse processo, os professores de ensino médio devem ser grandes aliados. Foi com este espírito que criamos uma Sessão Especial da LISHEP e agora apresentamos ao público este quarto livro de uma série que teve início em 1993.

O material aqui coligido corresponde à maioria das palestras da Sessão A da LISHEP de 2009, realizada na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), de 12 a 16 de janeiro de 2009. Essa foi a quarta escola dedicada a professores de ensino médio, licenciandos e jornalistas que organizamos. Desta vez, incentivamos os palestrantes a prepararem suas aulas e seus textos com títulos que fossem perguntas, do tipo, "O que são os quarks?", "O que são os bósons de Higgs?", "O que é a matéria escura?" e assim por diante.

Procuramos escolher temas relacionados à curiosidade do nosso público alvo e, ao mesmo tempo, a partir dos textos, oferecer aos professores material útil para enriquecer suas aulas ou para permitir que possam melhor responder a questões sobre estes tópicos avançados de Física levantadas em sala de aula. Além disso, como nos outros livros, incluímos artigos que reflatam sobre a prática pedagógica relacionada ao ensino da Física Moderna.

Esperamos que esse livro, juntamente com os três anteriores – F. Caruso & A. Santoro (Eds.), *Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais*, Rio de Janeiro: CBPF, 2ª edição, 2000; G. Alves, F. Caruso, H. Motta & A. Santoro (Eds.), *O Mundo das Partículas de Hoje e de Ontem*, Rio de Janeiro: CBPF, 2000 e F. Caruso, V. Oguri & A. Santoro (Eds.), "Física de Partículas: 100 Anos de Descobertas", Manaus: EDUA –, possa se constituir em útil material de consulta não apenas para professores de ensino médio como também para estudantes de Física e jornalistas.

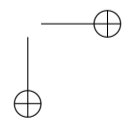
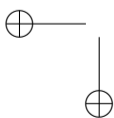
Gostaríamos de agradecer, em primeiro lugar, aos professores de ensino médio, que sistematicamente abrem mão de parte de suas férias para participarem da LISHEP. Nosso reconhecimento também a todos os nossos colegas (veja relação completa a seguir) que aceitaram nosso convite para contribuir com seus textos para este livro que agora apresentamos ao público e, principalmente, pelo esforço de tornarem claro o que nem sempre é fácil. Cabe notar que os conteúdos dos artigos são de responsabilidade de seus autores e não necessariamente refletem as posições dos editores.



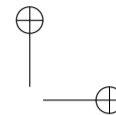
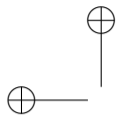
Alguns dos palestrantes não entregaram suas contribuições em tempo, o que nos levou a incluir alguns textos de outros autores que não necessariamente estiveram presentes à LISHEP 2009 para não desfalcar o livro de assuntos que não poderiam ficar de fora.

Por fim, agradecemos a todos aqueles que contribuíram para a organização da LISHEP 2009.

Os editores







## Autores

### **Alberto Santoro**

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)  
Instituto de Física  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
e-mail: Alberto.Santoro@cern.ch

### **Alfredo Marques**

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)  
e-mail: alf\_marques@ig.com.br

### **Carolina Costa Cavalcanti**

Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada da USP  
e-mail: carolinacavalcanti.ead@gmail.com

### **Cristina Silveira**

Secretaria de Educação de Duque de Caxias  
e-mail: mariacristinasilveira@gmail.com

### **Francisco Caruso**

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)  
&  
Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)  
Instituto de Física  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
e-mail: caruso@cbpf.br  
<http://www.cbpf.br/~caruso>

### **Gil da Costa Marques**

Instituto de Física  
Universidade de São Paulo (USP)  
e-mail: marques@if.usp.br

### **Ignacio Bediaga**

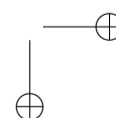
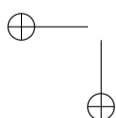
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)  
e-mail: bediaga@cern.ch

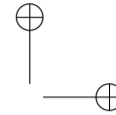
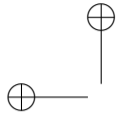
### **José Abdalla Helayël Neto**

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)  
e-mail: helayel@cbpf.br

### **José Maria Filardo Bassalo**

Academia Paraense de Ciências e Fundação Minerva  
e-mail: bassalo@amazon.com.br  
[www.amazon.com.br/bassalo](http://www.amazon.com.br/bassalo)





**Juliana Giordano**

Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada da USP  
e-mail: giordano@if.usp.br

**Marcia Begalli**

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)  
Instituto de Física  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
e-mail: begalli@uerj.br

**Maurício Pietrocola**

Faculdade de Educação  
Universidade de São Paulo (USP)  
e-mail: mpietro@usp.br

**Maxwell Siqueira**

Faculdade de Educação  
Universidade Estadual de Santa Cruz  
e-mail: maxwell.siqueira@hotmail.com

**Nelson Pinto Neto**

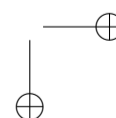
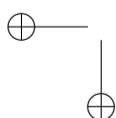
ICRA – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)  
e-mail: nelsonpn@cbpf.br

**Santiago Esteban Perez Bergliaffa**

Departamento de Física Teórica  
Instituto de Física  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
e-mail: sepbergliaffa@gmail.com

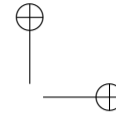
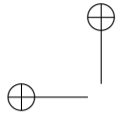
**Vitor Oguri**

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)  
Instituto de Física  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
e-mail: oguri@uerj.br



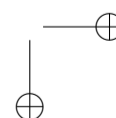
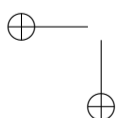
## Sumário

<b>Prefácio à primeira edição</b>	
Os Editores .....	7
<b>Lista de autores</b> .....	9
<b>O que significa dizer que uma partícula é elementar?</b>	
Francisco Caruso .....	13
<b>Quarks: como chegamos a eles?</b>	
Roberto Salmeron .....	17
<b>O que é a assimetria entre matéria e antimatéria do Universo?</b>	
Ignacio Bediaga .....	35
<b>O que são os raios cósmicos?</b>	
Alfredo Marques .....	45
<b>O que é a Supersimetria das Interações Fundamentais?</b>	
José Abdalla Helayël-Neto .....	61
<b>O que são os micro buracos negros em experimentos de Altas Energias?</b>	
Vitor Oguri .....	67
<b>O que são o Big Bang, a energia e a matéria escuras?</b>	
Nelson Pinto Neto .....	81
<b>O que a Física de Partículas tem a ver com a Cosmologia e a Astrofísica?</b>	
Santiago Esteban Perez Bergliaffa .....	93
<b>O que são os bósons de Higgs?</b>	
José Maria Filardo Bassalo, Francisco Caruso & Vitor Oguri .....	109



12

<b>O que os físicos brasileiros fizeram em Física de Partículas?</b> José Maria Filardo Bassalo .....	117
<b>O que é a Física de Altas Energias?</b> Alberto Santoro .....	141
<b>Há motivo para ter medo do LHC?</b> Francisco Caruso .....	161
<b>O que é o Masterclass?</b> Marcia Begalli .....	163
<b>Como construir material didático com tirinhas?</b> Francisco Caruso & Cristina Silveira .....	169
<b>Como ensinar e aprender de uma maneira diferente?</b> Gil Marques, Juliana Giordano & Carolina C. Cavalcanti .....	181
<b>Como a Física de Partículas Elementares pode contribuir no ensino básico?</b> Maxwell Siqueira & Maurício Pietrocola .....	195



# O que significa dizer que uma partícula é elementar?

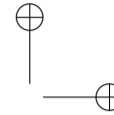
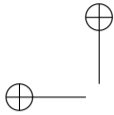
*Francisco Caruso*

A questão do caráter elementar das partículas havia sido tratada resumidamente na primeira LISHEP [Begalli, Caruso & Predazzi, 2000]. Nosso objetivo aqui é retomar esse tema com outro enfoque.

Por algum motivo, o homem parece ter a necessidade de encontrar padrões que possam se repetir na natureza e na representação que faz dela própria. Como exemplo, podemos citar alguns padrões geométricos que os humanos sempre utilizaram na milenar arte da tapeçaria. Estes, por sua vez, acabam sendo semelhantes, ou até mesmo idênticos, àqueles que estão por trás das estruturas cristalinas compreendidas pela Física do início do século XX, ou nas litografias e xilogravuras de Maurits Cornelis Escher.

Na escrita alfabética das línguas ocidentais também encontramos os “padrões que se repetem”, que podemos chamar de “blocos elementares” de um idioma: as vogais e as consoantes. Aliás, *ler*, cuja origem remonta ao verbo latino *lego -are*, significa originalmente colher. Assim, como se colhem as flores, o ato de ler pressupõe a capacidade de colher das frases estes caracteres fundamentais (as letras do alfabeto), juntando-os e atribuindo a esse conjunto um significado específico. Claro está que a estrada entre conhecer o total de letras de um alfabeto e a literatura de um povo é enorme. O conhecimento do alfabeto é necessário mas não é absolutamente suficiente. Na verdade, além de pouco mais de duas dezenas de símbolos, faz-se necessário conhecer uma série de regras gramaticais, que são *ad hoc*.

Essa mesma ideia nos remete ao conhecido jogo *Lego*. Com algumas poucas peças de tamanhos e cores variados, um jovem é estimulado a construir objetos complexos. Além de conhecer os tijolos, ele precisa conhecer as regras de “encaixe” dos mesmos. De novo, parte-se do pressuposto que o complexo pode ser construído a partir de “blocos”



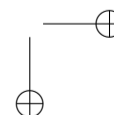
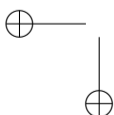
ou “tijolos” simples. No entanto, aqui, mais uma vez, o número de “blocos elementares” ainda parece ser muito grande. Experimente dizer a um pedreiro que, para fazer um muro, ele precisa de mais de 20 tipos diferentes de tijolos, além da argamassa. Esse profissional, que certamente se mostrará incrédulo com tal afirmativa, assim como os físicos, baseia-se em um certo princípio de economia. Por que fazer com muitos o que se pode fazer com poucos? – é a máxima de Guilherme de Ockham, cultuada por muitos cientistas. Por exemplo, ninguém põe em dúvida o caráter elementar das 3 cores básicas do sistema de televisão, azul, verde e vermelho, com as quais se obtém milhões e milhões de possibilidade na sua televisão ou na tela de um computador. Mas, por outro lado, cedo duvidou-se que seriam necessários mais de 60 átomos diferentes para descrever os elementos químicos da Tabela Periódica de Mendeleiev. A ideia do início do século XX segundo a qual os átomos seriam formados de apenas 3 partículas (elétron, próton e nêutron) parecia ser muito mais atraente, no fundo, por um argumento de simplicidade ou de economia de hipóteses.

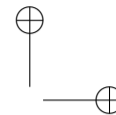
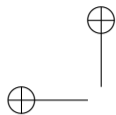
Nos dois exemplos anteriores, o alfabeto e o jogo Lego, os “blocos elementares” são dados *a priori*. Já na História da Física a coisa é bem diferente, pois se está interessado em compreender como estes “blocos” foram inventados.

Os gregos, no chamado período pré-socrático, se perguntaram como explicar a variedade de coisas e fenômenos a partir de uma ideia simples segundo a qual haveria uma substância fundamental, da qual tudo derivava. Logo perceberam que era preciso mais um ingrediente: um *princípio* ou um *agente transformador*. Diversos filósofos nesse período atribuíram a diferentes *substâncias* o *status* de primordial: a *água*, a *terra*, o *ar* e o *fogo*. Esses arquétipos relacionados à ideia de uma substância contínua primordial não foram os únicos. De fato, existem outros que se baseiam em uma visão granular da matéria.

Anaxágoras imaginava que todas as coisas eram formadas por um número infinito de *sementes*, contendo porções extremamente pequenas de tudo aquilo que existe no mundo visível, mesmo que se levasse a subdivisão da matéria até a menor escala possível. Tais sementes seriam dotadas de movimento. Um ponto a se destacar na filosofia de Anaxágoras é o fato de o “agente” que controla o movimento ser considerado como algo completamente separado da matéria sobre a qual ele atua, como defenderá Descartes, séculos mais tarde. Já para Newton, esse “agente” é a *força*, a qual ele define em termos da massa e, portanto, da matéria, ou vice-versa, se preferirmos.

Já Leucipo e Demócrito defendiam a existência de *átomos* que se movem por colisões mútuas no *vazio*. Entretanto, estes atomistas não procuraram justificar o movimento inicial dos átomos. Ao admitirem essa entidade abstrata como elemento primeiro, estavam negando a validade dos sentidos, uma vez que toda informação que se extrai sobre a matéria baseada nos sentidos humanos a evidencia como *contínua* e não *discreta*. No que se refere ao tema deste artigo, a indivisibilidade atribuída ao átomo era defendida de maneira diferente pelos atomistas. Leucipo, por exemplo, sustentava que tal propriedade é decorrente da pequenez dos átomos, enquanto para Demócrito, decorria do fato de



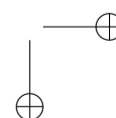
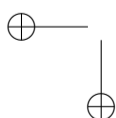


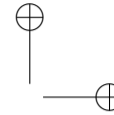
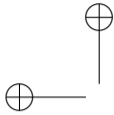
o átomo não conter vazio intrínseco. Por trás dessas ideias há uma analogia mecânica simples. Assim como picar um pedaço de papel com as mãos é um processo que logo se torna impossível dada a pequenez dos pedaços que vão resultando do processo de corte, não conseguiríamos “picar” a menor parte da matéria indefinidamente. Aceita-se, portanto, que o átomo seja filosoficamente indivisível.

O caminho percorrido para que o átomo adquirisse um *status* científico foi muito longo e não cabe discutí-lo aqui. Só para citar dois grande nomes da Física, tanto Galileu como Newton aceitaram a existência dos átomos. Newton, em especial, os aceita de uma maneira muito pragmática, afirmando que Deus criou-os em número, formas e tamanhos que achou necessário e isto vai ser tomado pelo físico inglês, ao construir sua filosofia mecânica, como um “ponto de partida” que não deve ser questionado. Não é na estrutura da matéria que Newton concentra seus esforços intelectuais voltados para a Física, mas sim em como a matéria interage entre si e se movimenta. Uma de suas maiores conquistas foi estabelecer a lei da gravitação universal, na qual a força *peso* tem um papel central. As ideias de Newton ultrapassaram as fronteiras da Física. Influenciaram, por exemplo, Antoine Lavoisier e John Dalton que deram contribuições fundamentais para a Química e ainda foram mais longe, alcançando a Filosofia com a gradativa afirmação de um determinismo absoluto de cunho mecanicista. Referindo-se ao impacto dos trabalhos de Newton, Lord Kelvin costuma dizer que entender um problema de Física significa ser capaz de fazer um modelo mecânico dele. E é exatamente isto que é feito por Dalton ao propor seu modelo atômico. Por outro lado, por influência de Lavoisier e do próprio Newton, estabeleceu-se um programa científico sistemático na Química do século XIX que era o de medir com precisão os pesos atômicos relativos. Este árduo trabalho foi essencial para que Mendeleiev pudesse chegar à sua famosa Tabela Periódica. Sua beleza estética sugere uma enorme regularidade na Natureza, que de alguma forma está relacionada aos átomos. Mas como? A resposta virá, aos poucos, da Física.

A descoberta do elétron por J.J. Thomson, em 1897, confirma algumas suspeitas do século XIX acerca de uma possível constituição dos átomos. Na verdade, desde a eletrólise de Faraday se podia antever que a eletricidade, ou melhor, o eletromagnetismo estaria por trás das ligações químicas e que, talvez, houvessem constituintes carregados no interior do átomo. Quanto a isso, o próprio Thomson, Ernest Rutherford e Niels Bohr deram importantes contribuições, mas nos basta aqui ressaltar que a descrição clássica desse novo átomo nuclear era problemática. Para salvar sua estabilidade, Bohr foi obrigado a lançar mão de estranhos postulados que se referiam às ideias de quantização da emissão de luz de Planck. De alguma maneira esses dois processos pareciam relacionados. A crise introduzida na Física clássica por Niels Bohr e, mais tarde, amplificada por Louis de Broglie, levaram, em última análise, a uma nova teoria, a *Mecânica Quântica*, para a qual contribuíram inicialmente Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger [Caruso & Oguri, 2006].

A Mecânica Quântica vai abalar uma série de conceitos clássicos como os de trajetória, localização das partículas e vai introduzir outros absolutamente novos, como o conceito de *spin*, o qual, em última análise, é a chave que faltava para a Física explicar a espetacular

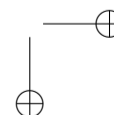
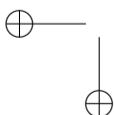




regularidade da Tabela Periódica em termos de átomos nucleares contendo elétrons orbitais. Mas estas estão longe de ser toda a novidade trazida pelos primeiros anos do século XX. Não se pode esquecer da Relatividade de Einstein, que também reformula vários conceitos básicos da Física, como os de massa, energia, espaço e tempo. A famosa fórmula de Einstein,  $E = mc^2$ , é um exemplo. Ela abre uma perspectiva espetacular e inédita na Física, ou seja, de se poder gerar massa a partir da energia ou vice-versa. Além disto, Dirac, ao tentar conciliar a Mecânica Quântica com a Relatividade Especial, percebeu que poderia haver no Universo anti-matéria. Ela poderia ser criada junto com a matéria a partir da energia, respeitando-se algumas regras de seleção. O processo mais conhecido nesse sentido é o processo de criação de pares, quando um fóton – o *quantum* da luz – pode dar origem a um par de elétron e anti-elétron (pósitron) na presença do campo eletromagnético de um núcleo. O processo elementar é denotado pela reação  $\gamma \rightarrow e^- e^+$ . Está claro, portanto, que aquela Mecânica Quântica que havia sido desenvolvida para descrever o átomo estável não seria suficiente para descrever novos fenômenos microscópicos nos quais o número de partículas elementares poderia variar. Na verdade, o próprio elétron atômico poderia emitir ou absorver fótons. Esse fato, baseado na observação de novos fenômenos, levou a progressos teóricos. A Física que descreve as partículas elementares passa a ser uma Teoria Quântica de Campos. Nessa nova teoria, partículas podem ser criadas ou aniquiladas, desde que certos princípios físicos possam ser satisfeitos, como a conservação da carga elétrica, por exemplo, além de satisfazerem a outros tipos de simetria compatíveis com o tipo de interação envolvida no processo físico. Então, o fato de um elétron poder ser criado ou aniquilado tira dele seu caráter elementar? Ele deve deixar de ser chamado de uma partícula elementar? A resposta é não. Nesse estágio, a Física já há muito abandonara a concepção mecanicista do Mundo. Como disse uma vez Steven Weinberg, “(...) da fusão da Relatividade com a Mecânica Quântica resultou em uma nova visão de mundo, na qual a matéria perdeu seu papel central. Esse papel foi usurpado por princípios de simetria, alguns deles ocultos à visão no presente estado do Universo”. É nesse novo Mundo que se reconstrói o conceito de “elementar”, que passa a ser utilizado referindo-se aos campos básicos que compõem uma determinada teoria quântica. A definição de “partícula elementar” depende, portanto, do referencial teórico de uma época.

#### Sugestões de leitura

1. M. Begalli, F. Caruso & E. Predazzi, “O Desenvolvimento da Física de Partículas”, in F. Caruso & A. Santoro (Eds.), *Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais*, Rio de Janeiro: CBPF, 2a. Edição, 2000, p. 59-70.
2. F. Caruso & V. Oguri, *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*, Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 2006, 1a. Reimpressão com correções, 2008.





# Quarks: como chegamos a eles?

*Roberto Aureliano Salmeron*

## 2.1 Tipos de interação entre partículas

Vamos ver como, partindo de conceitos abstratos desenvolvidos para se fazer uma classificação das partículas, sem nenhuma pretensão de profundidade, chegou-se à ideia de *quarks* e *antiquarks* como componentes fundamentais da matéria.<sup>1</sup>

Há 4 tipos de interação, isto é, de forças, entre partículas: forte, fraca, eletromagnética e gravitacional.

A **força forte** é a força nuclear, a mais intensa, a que se exerce entre prótons e nêutrons em todas as circunstâncias, liga-os dentro do núcleo atômico mantendo-o estável, mas também se exerce entre prótons e nêutrons livres. Por exemplo, a força que rege a interação entre dois prótons produzindo no estado final outras partículas, como um próton, um nêutron e um méson pi positivo é a força forte:

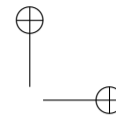
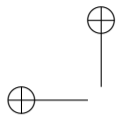
$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+ \quad (2.1)$$

A interação de um méson  $\pi$  negativo com um próton produzindo um  $\Lambda$  e um  $K^0$  é também uma interação forte:

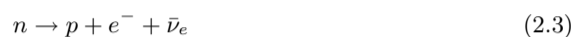
$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0 \quad (2.2)$$

A **interação fraca** é a que produz a desintegração das partículas. Por exemplo, a

<sup>1</sup>N.E. Devido a problemas pessoais, Prof. Salmeron não pode comparecer a esta Lishep. Para mantermos a coerência do conjunto de textos que integram o livro, decidimos reproduzir aqui seu artigo sobre os *quarks* enviado para a Lishep de 2002.

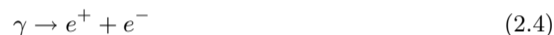


radioatividade beta, na qual um nêutron se desintegra num próton, um elétron e um antineutrino,



ocorre com uma interação fraca entre essas partículas.

A **interação eletromagnética** é devida à carga elétrica; é aquela regida pelas leis do eletromagnetismo. Ocorre com as partículas dentro dos átomos e com partículas livres. Ela tem função extremamente importante na constituição da matéria, porque é a força que permite a formação das moléculas. A força que une os átomos para formarem moléculas é a força eletromagnética entre os elétrons de um átomo e os elétrons dos outros. Ela é, portanto, tão importante para a constituição da matéria quanto a força nuclear. Um outro exemplo, um fóton pode se converter num par elétron-pósitron por uma interação eletromagnética,

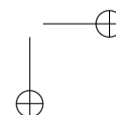
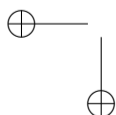


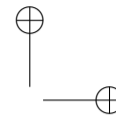
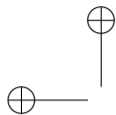
A **interação gravitacional** é a atração universal que existe entre todos os corpos.

**Intensidade relativa das forças** – A força forte é a mais intensa, a gravitacional a mais fraca. Se normalizarmos as forças em relação à força forte, isto é, se dermos à força forte o valor 1, a eletromagnética terá aproximadamente o valor  $10^{-2}$ , isto é, a intensidade da força eletromagnética é aproximadamente 1% da forte; a força fraca terá o valor  $10^{-14}$ , e a gravitacional  $10^{-40}$ . Todas as partículas têm interação gravitacional, mas ela é tão fraca que não pode ser detectada nos experimentos. Vamos então desprezar as interações gravitacionais e considerar somente as outras três.

## 2.2 Classificação das partículas

Todas as partículas que têm carga elétrica têm interação eletromagnética. Essa interação, sendo comum a todas, não pode ser utilizada para diferenciar as partículas. Distinguimos duas grandes classes de partículas pelas sua capacidade de ter interações forte e fraca. Chamamos **léptons** as partículas que não podem ter interação forte, podem ter somente interações fracas e eletromagnéticas. Chamamos **hádrons** as partículas que podem ter interações forte e fraca, além de eletromagnética. Há uma terceira classe de partículas, chamadas **bósons intermediários**, ou **bósons de calibre**, que definiremos a seguir.





## 2.3 Léptons e antiléptons

Há 6 léptons: 3 com carga elétrica negativa e 3 sem carga elétrica chamados neutrinos (Tabela 2.1).

elétron	$e^-$	0,511 MeV	neutrino do elétron	$\nu_e$
múon	$\mu^-$	106,66 MeV	neutrino do múon	$\nu_\mu$
tau	$\tau^-$	1776,99 MeV	neutrino do tau	$\nu_\tau$

**Tab. 2.1:** Os seis léptons e suas massas.

As massas do múon e do tau são respectivamente 209 e 3477 vezes maiores que a do elétron. Até recentemente pensava-se que a massa dos neutrinos era nula. Há quatro anos foi descoberto experimentalmente que os neutrinos têm massa; a do neutrino do elétron ( $\nu_e$ ) e a do neutrino do múon ( $\nu_\mu$ ) são muito pequenas, de alguns elétron-volts, para a do neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ) não temos dados precisos, ela pode ser maior.

Há três tipos de neutrino, cada qual diferente dos outros dois. Uma característica importante dos neutrinos é que eles são seletivos: cada neutrino aparece associado sempre ao mesmo lépton carregado, jamais aos outros. Assim, quando numa interação aparece o múon e um neutrino, esse é sempre o neutrino-múon. Por exemplo, o méson pi positivo se desintegra num múon positivo e um  $\nu_\mu$ , jamais em  $\nu_e$  ou  $\nu_\tau$ :

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.5)$$

jamais

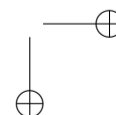
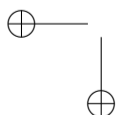
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_e \quad \text{ou} \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\tau$$

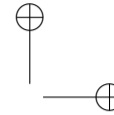
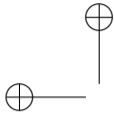
Na desintegração beta, dada na expressão (2.3), um nêutron se desintegra num próton, um elétron e um antineutrino-elétron.

**Prova da seletividade dos neutrinos** – Como se chegou à conclusão que cada tipo de neutrino é associado sempre ao mesmo lépton carregado? Com um experimento em duas etapas. Primeiro obtém-se  $\nu_\mu$  pela desintegração de  $\pi^+$ , como indicado na reação (2.5). Depois faz-se o  $\nu_\mu$  colidir com nêutron; observa-se no estado final um múon, jamais um elétron ou um tau, isto é, a reação é sempre

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^- \quad (2.6)$$

Jamais se observam as reações  $\nu_\mu + n \rightarrow p + e^-$  ou  $\nu_\mu + n \rightarrow p + \tau^-$  porque o  $\nu_\mu$  não se associa ao  $e^-$  nem ao  $\tau^-$ .





**Antiléptons** – Para cada lépton existe uma antipartícula, que tem a mesma massa e carga elétrica de sinal oposto, isto é, positiva para os carregados, nula para os antineutrinos.

pósitron	$e^+$	antineutrino do elétron	$\bar{\nu}_e$
múon positivo	$\mu^+$	antineutrino do múon	$\bar{\nu}_\mu$
tau positivo	$\tau^+$	antineutrino do tau	$\bar{\nu}_\tau$

As massas são as mesmas dadas na Tabela 2.1.

Relembremos que uma antipartícula é representada pela mesma letra que a partícula com uma barra acima.

**Número leptônico** – Atribui-se arbitrariamente aos léptons números leptônicos específicos:

$$\begin{aligned}
 l_e &= +1 \text{ para } e^-, \nu_e & l_e &= 0 \text{ para os outros léptons} \\
 l_\mu &= +1 \text{ para } \mu^-, \nu_\mu & l_\mu &= 0 \text{ para os outros léptons} \\
 l_\tau &= +1 \text{ para } \tau^-, \nu_\tau & l_\tau &= 0 \text{ para os outros léptons}
 \end{aligned}$$

Aos antiléptons atribuímos o número  $-1$ . As partículas que não são léptons têm número leptônico zero. Numa reação entre partículas:

- cada um dos números leptônicos  $l_e, l_\mu, l_\tau$  é somado algebricamente;
- os números leptônicos  $l_e, l_\mu, l_\tau$  totais se conservam.

Por exemplo, na desintegração beta o número  $l_e$  é zero nos dois membros da reação:

$$\begin{array}{ccccccc}
 n & \rightarrow & p & +e^- & +\bar{\nu}_e \\
 l_e & & 0 & +1 & -1
 \end{array}$$

Na interação de neutrino dada na equação (2.6) o número leptônico se conserva:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \nu_\mu & +n & \rightarrow & p & +\mu^- \\
 l_\mu & +1 & 0 & 0 & +1
 \end{array}$$

O múon positivo se desintegra em pósitron, antineutrino do múon e neutrino do elétron; os números  $l_\mu$  e  $l_e$  se conservam, pois

