

Próximas descobertas na Física de Altas Energias

Próximas descobertas na Física de Altas Energias

Luciano Abreu, Vitor Oguri & Alberto Santoro

Editores



2018

Copyright © 2018 Editora Livraria da Física
1ª Edição

Direção editorial: José Roberto Marinho

Capa: Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

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

Próximas descobertas na física de altas energias / Luciano Abreu, Vitor Oguri e Alberto Santoro.
- São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018.

Vários autores.
ISBN 978-85-7861-572-7

1. Física - Experiências 2. Partículas (Físicanuclear) I. Abreu, Luciano. II. Oguri, Vitor. III. Santoro, Alberto.

18-22993

CDD-530

Índices para catálogo sistemático:

1. Física 530

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



Editora Livraria da Física
www.livrariadafisica.com.br

LISHEP-2018

VI ESCOLA INTERNACIONAL DE FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS
SESSÃO DEDICADA A PROFESSORES DE ENSINO MÉDIO,
LICENCIANDOS E JORNALISTAS
02-07 de setembro de 2018, Salvador, Bahia

Próximas descobertas na Física de Altas Energias

Luciano Abreu, Vitor Oguri & Alberto Santoro

Editores



2018

PREFÁCIO

Este livro reúne uma série de tópicos apresentados na Sessão A da Escola Internacional de Física de Altas Energias de 2018, LISHEP.¹ Seu conteúdo está dividido em duas partes: uma, introdutória, que informa sobre o início da Física Experimental de Altas Energias, ou Física de Partículas, no Brasil; a seguinte refere-se a temas de pesquisas atuais da área de Altas Energias, de interesse da comunidade científica.

O principal objetivo da Sessão A é transmitir informação a professores do ensino médio, a estudantes de diversas áreas e a jornalistas que desejem saber mais sobre essa área da ciência.

A decisão de realizar a escola na Bahia, na cidade maravilhosa que é Salvador, capital do Brasil até 1715, cumpre nosso desejo de levar a Física Experimental de Altas Energias às diversas regiões do Brasil, a exemplo da realizada em Manaus, em 2015.

Contamos, neste ano de 2018, com pouco mais de 100 participantes na Sessão A e outros tantos na sessão C. A descrição e resumo da história da LISHEP encontra-se em <http://www.lishep.uerj.br/>.

Para obter mais informação sobre a Física Experimental de Altas Energias, o leitor poderá consultar os volumes correspondentes às LISHEP realizadas anteriormente.²

Nessa sessão A, convidamos alguns professores da Universidade Federal da Bahia para falar sobre a vida profissional do físico Bautista Vidal, um dos responsáveis pelo projeto do álcool no Brasil, o qual trouxe imensos benefícios para a economia do país. Bautista foi um dos fundadores do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia, uma das mais antigas e tradicionais Universidades brasileiras.

¹ Lafx International School of High Energy Physics.

² Série editada pela Livraria da Física em 2012:

- Do átomo grego à Física das interações fundamentais, F. Caruso & A. Santoro (Eds.);
- O mundo das partículas de hoje e de ontem, G. Alves, F. Caruso, H. Motta & A. Santoro (Eds.);
- Partículas elementares: 100 anos de descobertas, F. Caruso, V. Oguri & A. Santoro (Eds.);
- O que são quarks, glúons, bósons de Higgs, buracos negros e outras coisas estranhas? F. Caruso, V. Oguri & A. Santoro (Eds.).

Gostaríamos de agradecer a todos os professores que participaram e ministraram palestras nesta LISHEP de 2018, desenvolvendo um esforço bastante grande para tornar possível sua realização. Também gostaríamos de agradecer o suporte oferecido pelo Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia, na pessoa do Professor Dr. Ricardo Carneiro, assim como aos demais professores desse Instituto. À Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), agradecemos o apoio dado aos professores palestrantes para participarem desse evento.

Agradecemos ainda à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro, que, apesar de pequeno, foi determinante para podermos realizar mais esta LISHEP, especialmente neste momento em que completa 25 anos.

Aos membros do comitê organizador, os nossos agradecimentos pelo trabalho desenvolvido no decorrer de todo um ano para alcançarmos o resultado obtido nesta LISHEP de 2018.

Os editores

Autores

Alberto Santoro

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)
Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
e-mail: alberto.santoro@cern.ch

Cássio Bruno Magalhães Pigozzo

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
e-mail: cpigozzo@ufba.br

Dilson de Jesus Damião

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

Eduardo Revoredo

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

Eliza Melo da Costa

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)
Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
e-mail: eliza.melo.da.costa@cern.ch

Helena Malbouisson

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)
Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
e-mail: helena.malbouisson@gmail.com

Helio da Motta

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

Helio Nogima

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

Ignácio de Bediaga Hickman

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

José Abdalla Helayël-Neto

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)
e-mail: josehelayel@gmail.com

Jussara Marques de Miranda

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

L. P. R. Ospedal

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

Marcia Begalli

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

Mario Novello

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

Newton Barros de Oliveira

Universidade Federal da Bahia (UFBA)
e-mail: newton@ufba.br

Sandro Fonseca de Souza

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)
Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
e-mail: sandro.fonseca.cern@gmail.com

Vitor Oguri

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

Wagner de Paula Carvalho

Departamento de Física Nuclear e Altas Energias (DFNAE)
Instituto de Física Armando Dias Tavares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
e-mail: carvalho.cern@gmail.com

Sumário

	Prefácio	7
	Lista de autores	9
1	Uma introdução à Física Experimental de Altas Energias	
	<i>Alberto Santoro</i>	13
2	A história da Física Experimental de Partículas no Brasil	
	<i>Alberto Santoro</i>	25
3	As aplicações de aceleradores e detectores de partículas	
	<i>Alberto Santoro</i>	37
4	A importância da análise de erros em experimentos de Física	
	<i>Vitor Oguri</i>	47
5	Uma breve história dos aceleradores de partículas	
	<i>Newton Barros de Oliveira</i>	61
6	Os detectores de partículas	
	<i>Dilson de Jesus Damião</i>	75
7	A Física de Partículas e as tecnologias associadas	
	<i>Helio Nogima</i>	87
8	Sabores elementares	
	<i>Sandro Fonseca de Souza</i>	107
9	IPPOG-Masterclasses – Aprendendo a trabalhar com os dados do LHC/CERN	
	<i>Marcia Begalli</i>	115
11	Os sabores pesados	
	<i>Eliza Melo da Costa</i>	135

11	Duas descobertas recentes: Top e Higgs	
	<i>Wagner de Paula Carvalho</i>	130
12	Matéria versus Antimatéria	
	<i>Ignácio de Bediaga Hickman</i>	159
13	A matéria escura	
	<i>Cassio Pigozzo</i>	169
14	Supersimetria e Partículas Supersimétricas	
	<i>José Abdalla Helayël-Neto e L. P. R. Ospedal</i>	189
15	Neutrinos: passado, presente e futuro	
	<i>Hélio da Motta</i>	197
16	Produção Central Exclusiva	
	<i>Helena Malbouisson</i>	221
17	Violação de CP no Modelo Padrão	
	<i>Jussara Marques de Miranda</i>	233
18	A influência cósmica sobre a microfísica	
	<i>Mario Novello</i>	243
19	Construção de um simulador eletromecânico de um acelerador de partículas	
	<i>Eduardo Revoredo e Alberto Santoro</i>	273

1

Uma introdução à Física Experimental de Partículas

*Alberto Santoro*¹

Apresentamos as primeiras informações necessárias para entender as pesquisas contemporâneas da Física Experimental de Partículas, as motivações e curiosidades que nos levaram a conhecer os primeiros tijolos com os quais podemos reconstruir todo o Universo, e suas interações fundamentais. Não é uma leitura para especialistas e sim para iniciantes; ou melhor, para curiosos.

1.1 Introdução

Essa é a primeira de uma série de palestras que organizamos para professores do ensino médio, na esperança de que possamos continuar em contato visando o aperfeiçoamento do ensino de ciências.

Nos grupos de Física de Partículas há várias iniciativas nesse sentido – o de aproximar pesquisadores e professores para partilhar o que vivemos na Física das Partículas. Esta e as outras palestras que vou apresentar serão uma preparação para todas as outras que espero que vocês assistam esta semana.

Logo no início do livro de Física Moderna² de Caruso e Oguri há uma citação que expressa uma visão bem popular da Natureza e seus mistérios: “*A natureza é*

¹ Professor Emérito da UERJ.

² Física Moderna – Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Eu aconselho fortemente a leitura deste livro, um dos melhores livros de Física Moderna que conheço.

partes sem um todo. Isto é talvez o tal mistério de que falamos".³ Após essa palestra abordarei também um pouco da História da Física de Altas Energias no Brasil e das Aplicações e Benefícios para a Sociedade da Física de Altas Energias.

A Física de Partículas surge como uma necessidade de ir além da Física Clássica, Molecular, Atômica, e mesmo da Física Quântica. Assim, à medida que se desenvolviam as técnicas e instrumentação, imediatamente atingia-se uma nova era de desenvolvimento. Da necessidade de se atingir dimensões cada vez menores inventaram-se instrumentos capazes de nos mostrar toda ou quase toda a beleza do microcosmos.

O que gera esse impulso da procura de explicações é simplesmente a curiosidade e mais nada. Assim, foram se estabelecendo novas leis da Física, e novos projetos para desenvolver cada vez mais o nosso conhecimento da natureza no que ela tem de mais fundamental.

1.2 Perguntas seculares

Perguntas seculares são aquelas perguntas que nos fazemos há muito tempo. Muitas foram respondidas, e outras fazem parte dos programas de pesquisas atuais.

- Quais são os constituintes de todas as coisas?
- O que mantém as estruturas atômicas?
- O que mantém prótons e nêutrons nos núcleos?
- O que é responsável pelos decaimentos radioativos?
- O que provoca as explosões solares?
- Como a matéria em geral é formada?

Algumas dessas perguntas têm a mesma resposta, mas aparecem regularmente quando fazemos uma palestra ou conversamos com qualquer curioso. Para responder de forma completa, vamos caminhar pela estrutura das partículas e formular novas perguntas, à luz da Física de Partículas. Nosso roteiro, basicamente, abordará os seguintes pontos:

³ Sentença atribuída a Alberto Caetano, heterônimo do grande poeta português Fernando Pessoa.

- O que é uma partícula?
- O que é Física de Partículas?
- Como procurar partículas? Com que instrumentação?
- Quais são as fontes de partículas?
- O que sabemos sobre a elementaridade?
- Os grandes aceleradores.
- O Modelo Padrão.

1.3 O que é uma partícula?

Na Ciência, sempre fazemos referência a fatos ou a fenômenos anteriores ao presente momento. Assim, recorreremos à hipótese de base da Mecânica Quântica na qual se apresentam duas importantes noções: o estado quântico e os números quânticos.

O estado de um sistema quantificado se caracteriza por um conjunto de valores atribuídos às suas principais propriedades. Esses valores são chamados de números quânticos. Como exemplo, os estados estacionários do elétron em um átomo são caracterizados por 4 números quânticos, n , ℓ , m e s , onde n , o número quântico principal, se relaciona com o nível de energia da camada, ou do orbital; ℓ , o número quântico secundário, caracteriza o momento angular orbital, $0 < \ell < n - 1$; m , o número quântico magnético, indica a orientação do plano do orbital do elétron quando submetido a um campo magnético, e $s = 1/2$ é o momento angular intrínseco (*spin*) do elétron.

Desse modo, dizemos que o conjunto $\{n, \ell, m, s, \dots, \text{massa, carga, } \dots\}$ caracteriza o objeto em estudo. E, assim, dizemos também que **partícula** é um conjunto de números quânticos bem definidos.

1.4 O que é Física de Partículas?

A Física de Partículas ou de Altas Energias é a ciência da natureza que procura compreender as interações entre as partículas fundamentais. Isto é, busca compreender os primeiros “tijolos” da natureza e suas interações. A Física de Partículas percorreu e continua a percorrer sua trajetória pelas estruturas possíveis de serem atingidas pela instrumentação existente no momento.

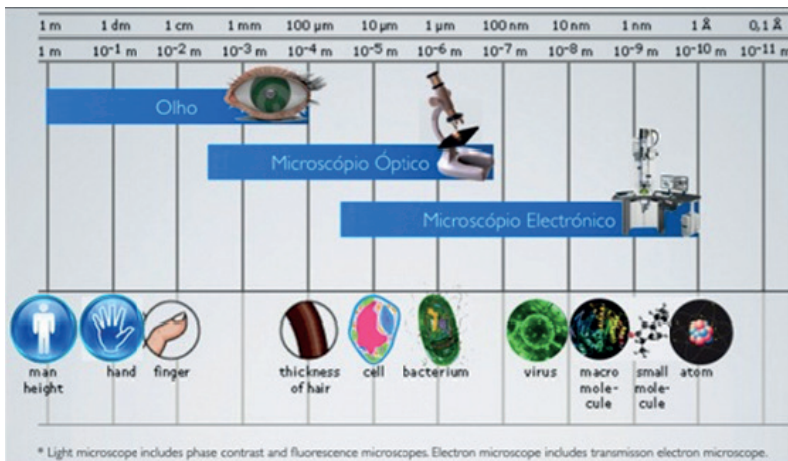


Fig. 1.1: As dimensões dos corpos, do homem ao átomo.

fonte: <http://micelectro.fc.ul.pt/page2/page2.html>

Para dar uma noção mais acurada por onde “andamos”, a Fig. 1.1 mostra as medidas das estruturas, desde das dimensões humanas, isto é, passa do homem para uma das mãos, para um dedo, até chegarmos ao átomo, e a Fig. 1.2 as etapas do átomo até os *quarks*.

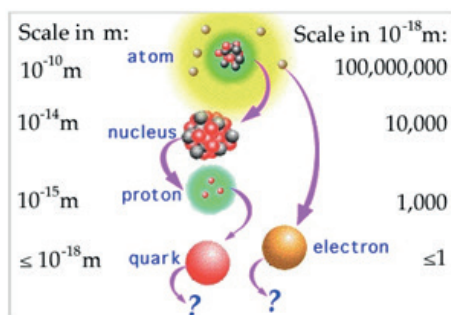


Fig. 1.2: Dimensões do átomo aos *quarks*. fonte: <http://www.historias efemerhas.com/2016/07/quarks-partículas-elementares.html>

O microscópio eletrônico avançou muito e proporcionou estudos preciosos de materiais e até mesmo de problemas ligados à saúde. E foi por este caminho que chegamos aos aceleradores.

Quando se coloca o problema de como medir essas estruturas, a Fig. 1.3 mostra que para cada dimensão é necessária uma tecnologia adequada.



Fig. 1.3: Os observáveis e a instrumentação para detecção ou medição.

As figuras 1, 2 e 3 sintetizam toda a evolução para chegarmos a medidas cada vez mais profundas, no sentido de saber o que acontece no interior do microcosmos. O acelerador é o nosso microscópio e os detectores do LHC são os olhos que gostaríamos de ter. A Física também é a história da natureza, daí uma série de particularidades. Seria muito estranho estudar Mecânica Quântica sem nunca ter visto a Mecânica Clássica. Assim, justificamos os cursos básicos sempre com a ideia de saber como foi a evolução desse conhecimento, e como chegamos a nossos dias.

1.5 Quais são as fontes de partículas?

As principais fontes de partículas podem ser caracterizadas pela escala de energia. Na escala do MeV (10^6 eV – elétron-volt) temos as fontes radiativas, e os raios cósmicos na escala do PeV (10^{15} eV). Nos aceleradores, as energias obtidas dependem do tipo de acelerador e das partículas aceleradas, e estão limitadas pelas tecnologias existentes.

1.6 O que sabemos sobre a elementaridade?

A curiosidade do homem é milenar. Desde o homem que habitava as cavernas procura-se o elemento mais fundamental. A Fig. 1.4 sugere a prática movida pela curiosidade: a procura do que existe dentro da pedra. Podemos atribuir a esse homem a curiosidade e a procura da elementaridade. É claro que essa é uma dedução baseada em dados que conseguimos obter sobre os homens de eras primitivas e de suas lutas pela sobrevivência na natureza, as descobertas e as surpresas que promoviam o seu próprio desenvolvimento e o conhecimento do mundo que viviam.



Fig. 1.4: O homem primitivo. Fonte: <http://verisfaculdareshistoriadasciencias.blogspot.ch/2010/03/historia-primitiva.html>

Há perguntas que ainda hoje nos fazemos: Qual a constituição da matéria? Do que tudo é feito? Quais os elementos fundamentais da matéria e como se combinam esses primeiros tijolos? E, finalmente, do que somos feitos?

Essa preocupação também fez parte dos estudos dos filósofos gregos. Podemos classificar, por razões didáticas, esses pensadores em Unicistas e Pluralistas. Os unicistas acreditavam que tudo era constituído de um só elemento. Por exemplo, Tales de Mileto (625 – 546 a.C.) dizia que a água fazia parte de tudo, enquanto para Anaxímenes de Mileto (550 – 480 a.C.) tudo seria feito de ar. Heráclito (540 – 480 a.C.) dizia que tudo seria feito de fogo. Os pluralistas, como Empédocles (493– 433 a.C.), achavam que tudo seria composto de terra, ar, fogo e água, o que representa um grande avanço no pensamento sobre a matéria.

Nesse caminho, o Universo seria construído com forças que atuariam sobre os elementos fundamentais. Essas forças foram denominadas de *amor* e *ódio* ou de *afinidade* e *antipatia*. O *amor* ou a *afinidade* uniria os corpos, enquanto o *ódio* ou a *antipatia* os separariam. Hoje, podemos dizer que era a primeira manifestação para explicitar as forças de atração e repulsão na natureza.

Um grande passo acontece quando Demócrito (460 – 370 a.C.) propõe o que seria a fundação do Atomismo: “*Todas as coisas seriam feitas de átomos*”. No entanto, Aristóteles (384 – 322 a.C.), mescla as ideias unicistas e pluralistas sobre as propriedades da matéria: “*Todos os corpos se compõem de uma mesma substância que tem várias propriedades: o frio, o calor, a umidade e a esterilidade*”. E dá exemplos de combinações possíveis:

*a substância seca e fria produziria a terra,
a substância seca e quente produziria o fogo,
a substância úmida e fria produziria a água,
a substância úmida e quente produziria o ar.*

A filosofia de Aristóteles foi a visão predominante por mais de um milênio de desenvolvimento do homem.

A partir de 1935 aprendemos que “tudo é feito de prótons, elétrons, nêutrons e vácuo”. Vejam que, para podermos compreender estruturas mais complexas, aparece agora o vácuo como parte dos elementos estruturais fundamentais.

Com a descoberta dos *quarks*, passamos a dizer que tudo seria composto de *quarks*, léptons e vácuo.

Para entendermos como eles se juntavam e interagiam entre si, a partir das quatro forças de interações fundamentais – eletromagnética, fraca, forte e gravitacional – acrescentamos então os elementos transportadores das forças de interação:

{fóton (γ), W^\pm , Z , glúon (g), gráviton}

sendo o fóton responsável pelas interações eletromagnéticas, os W^\pm e o Z pelas interações fracas, o glúon pelas fortes e o gráviton pelas gravitacionais.

1.7 Os grandes aceleradores

Todo conhecimento adquirido na Física Atômica, na Física Nuclear, e no estudo dos Raios Cósmicos, foram fundamentais para não só estabelecer uma origem segura da Física de Partículas como também para chegarmos à situação atual com os novos aceleradores e detectores de partículas.

É importante entender que sempre houve uma interação muito forte entre o desenvolvimento tecnológico, o desenvolvimento de teorias, e as novas descobertas nos grandes aceleradores de partículas. Os sucessos obtidos em cada experimento, nos mais variados laboratórios, sempre motivaram as inovações por novos aceleradores e detectores para as descobertas cada vez mais profundas no que diz respeito a sondagem no interior da matéria. Teoricamente, um grande motivador foi a relação

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad h \simeq 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s (constante de Planck)}$$

a qual estabelece que o comprimento de onda (λ) associado a uma partícula é inversamente proporcional ao *momentum* (p). Em altas energias, proporcional à própria energia.

A partir daí, começou então a construção de uma sucessão de aceleradores, uns baseados nos resultados dos outros, aproveitando os desenvolvimentos de tecnologias que permitiram ir cada vez mais na direção de energias mais altas do feixe de partículas aceleradas. O primeiro ciclotron, mostrado na Fig. 1.5, construído por E. O. Lawrence em 1930 na Universidade da Califórnia, em Berkeley, tinha as dimensões da mão de um homem. Essa máquina acelerou prótons até 80 KeV.



Fig. 1.5: O primeiro acelerador ciclotron.