UM OLHAR PARA O FUTURO

Desafios da física para o século 21

EDITORES | JOÃO DOS ANJOS E CÁSSIO LEITE VIEIRA

Vieira & Lent
FAPERJ
VITAE

ANO MIRACULOSO DE EINSTEIN
Cem anos da publicação dos artigos que mudaram a física

PARTÍCULAS ELEMENTARES
A (des)construção da matéria pelo homem

NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA
Modelando o futuro átomo por átomo

SISTEMAS COMPLEXOS
A fronteira entre a ordem e o caos

RAIOS CÓSMICOS
Energias extremas no universo

COSMOLOGIA
A busca pela origem, evolução e estrutura do universo

INFORMAÇÃO QUÂNTICA
Do teleporte à última fronteira da computação

NEUTRINOS
As misteriosas partículas-fantasmas

BIOFÍSICA
Duas visões da vida

SUPERCORDAS
O sonho da unificação das quatro forças da natureza

LHC
O gigante criador de matéria

UM OLHAR PARA O FUTURO

Desafios da física para o século 21

UM OLHAR PARA O FUTURO

Desafios da física para o século 21

EDITORES

João dos Anjos

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Cássio Leite Vieira

INSTITUTO CIÊNCIA HOJE

Vieira & Lent

FAPERJ
Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro

VITAE
Apoio à Cultura, Educação e Promoção Social

Rio de Janeiro, 2008

© 2008 by João Carlos Costa dos Anjos

Direitos desta edição reservados a
vieira & lent casa editorial ltda.
Rua Senador Dantas, 118 | cj.407
20031-201 | Rio de Janeiro | RJ
Telefax | 21 2262 8314
editora@vieiralent.com.br
www.vieiralent.com.br

REDAÇÃO* **E EDIÇÃO DO ORIGINAL |** Cássio Leite Vieira
*(com exceção de Biofísica, Neutrinos, Supercordas, LHC)

PROJETO GRÁFICO, DIAGRAMAÇÃO E CAPA | Ampersand Comunicação Gráfica

REVISÃO | Maria Beatriz Branquinho da Costa

A Editora e os Organizadores (editores) procuraram registrar da forma mais completa possível a origem e a propriedade das imagens reproduzidas neste livro. Caso o leitor tenha alguma correção ou informação complementar, pedimos que nos comunique e agradecemos antecipadamente a colaboração, que será utilizada em futuras edições.

COLABORARAM NESTA PRIMEIRA EDIÇÃO |
Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro/FAPERJ, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/CBPF – Ministério da Ciência e Tecnologia/MCT e Vitae – Apoio à Cultura Educação e Promoção Social

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO-NA-FONTE
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

D484

Um olhar para o futuro – Desafios da física para o século 21
/ editores João Carlos Costa dos Anjos, Cássio Leite Vieira. - Rio de Janeiro : Vieira & Lent: FAPERJ, 2008.
192p. : il. color.

Inclui bibliografia
ISBN 978-85-88782-48-8

1. Física. I. Anjos, João dos. II. Vieira, Cassio Leite, 1960-.

08-0426. CDD: 530

CDU: 53

08.02.08 08.02.08
005173

1ª edição, novembro de 2008
© *vieira & lent* casa editorial ltda.

SUMÁRIO

11. | **APRESENTAÇÃO**

ANO MIRACULOSO DE EINSTEIN

EDITORES CIENTÍFICOS | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Ildeu de Castro Moreira (Instituto de Física/Universidade Federal do Rio de Janeiro)

16. | **A EFEMÉRIDE** | BERÇO, LIVRO E CHARUTO | ANO MIRACULOSO

17. | **O EFEITO FOTOELÉTRICO** | ELÉTRONS QUE SALTAM | PARTÍCULAS DE LUZ | IDÉIA MAIS REVOLUCIONÁRIA

19. | **A TESE** | O MAIS OBSCURO | AÇÚCAR COM ÁGUA | O MAIS CITADO

20. | **O MOVIMENTO BROWNIANO** | ZIGUEZAGUE ERRÁTICO | ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO | REALIDADE DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS

22. | **A RELATIVIDADE** | ASSOMBRADOS PELO ÉTER | DOIS POSTULADOS | REVISÃO RADICAL | $E=MC^2$ | RESTRITA

24. | **A VIDA** | A INFÂNCIA | A JUVENTUDE | EM BERNA | EM BERLIM | EM PRINCETON

27. | **O CONTEXTO** | CRIATIVIDADE E CAMINHOS | FAMA MUNDIAL

28. | **EINSTEIN HOJE** | LASER E ÁTOMO GIGANTE | BURACOS NEGROS E ONDAS GRAVITACIONAIS | DIMENSÕES EXTRAS | NO MUNDO NANO

PARTÍCULAS ELEMENTARES

EDITORES CIENTÍFICOS | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Adriano Antônio Natale (Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)

32. | **A NATUREZA DAS COISAS** | TERRA, FOGO, ÁGUA E AR | O NÃO DIVISÍVEL

34. | **FRAGMENTANDO O INDIVISÍVEL** | ATOMISMO | MISTERIOSA RADIAÇÃO

35. | **VIAGEM AO CENTRO DO ÁTOMO** | GRANDE VAZIO | RETRATO DO ÁTOMO QUANDO JOVEM

36. | **CRISE E ANTIMATÉRIA** | O SAGRADO E A HERESIA | SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS | A ANTIMATÉRIA

38. | **OS MÉSONS EM CENA** | FORÇA FORTE | QUEM ENCOMENDOU ISSO? | FINALMENTE, O PÍON

40. | **UM ZÔO SUBATÔMICO** | PARTÍCULAS ESTRANHAS | MULTA DE 10 MIL

41. | **VOLTA À SIMPLICIDADE** | SIMPLES E ELEGANTE | SEMPRE CONFINADOS | ACEITAÇÃO DE UM MODELO

43. | **MODELO PADRÃO** | LISTAGEM COMPLETA | PRECISÃO E SENSIBILIDADE | UNIFICANDO FENÔMENOS | AS QUATRO FORÇAS | BREVE CENÁRIO BRASILEIRO

46. | **O FUTURO** | OS LIMITES DO MODELO | O QUE FALTA DESCOBRIR | VOLTA ÀS ORIGENS

NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA

EDITORES CIENTÍFICOS | Ernesto Kemp (Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas) | Henrique Lins de Barros (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas) | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas) | Marcelo Knobel (Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas) | Sandra Murriello (Museu Exploratório de Ciências de Campinas/Universidade Estadual de Campinas)

50. | **DOMANDO A MATÉRIA** | ESCAVAÇÃO PROFUNDA | ESTRUTURA FRAGMENTADA | MAIS ESPAÇO LÁ EMBAIXO | VIAGEM FANTÁSTICA

52. | **O NANOUNIVERSO** | NA ESCALA DO BILIONÉSIMO | DO ÁTOMO AO VÍRUS | MAIS QUE MINIATURIZAR | MODELOS NA NATUREZA | NÃO SÓ IMITAR

54. | **FEITOS E PROMESSAS** | PRINCIPAL CANDIDATO | MARCO EXPERIMENTAL | LISTA DE PROMESSAS | EM LARGA ESCALA

56. | **NO MUNDO** | IMPACTO GLOBAL | NOVA EDUCAÇÃO

57. | **NO BRASIL** | MELHOR INFRA-ESTRUTURA | DIVERSIDADE DE TEMAS | EM REDE | CAPACIDADE BEM SÓLIDA | PRODUÇÃO NACIONAL

60. | **AVENTURA NANOSCÓPICA** | EXPOSIÇÃO INTERATIVA | JOGOS, VÍDEOS, EFEITOS, MÚSICA... | POR TODO O BRASIL

61. | **COMO SERÁ O FUTURO?** | A REVOLUÇÃO COMEÇOU

SISTEMAS COMPLEXOS

EDITOR CIENTÍFICO | Constantino Tsallis (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)

64. | **UMA FRONTEIRA SUTIL** | ENTRE A ORDEM E O CAOS

65. | **NO PRINCÍPIO... A ORDEM** | DE PEDRAS A COMETAS

66. | **E FEZ-SE... O CAOS** | TRÊS CORPOS | O QUE É O CAOS?

67. | **E O MUNDO FICOU... COMPLEXO** | O QUE É COMPLEXIDADE? | COMPLICADO É COMPLEXO? | SELVAGEM E CIVILIZADO

70. | **DO SABER INCOMPLETO** | DAS PARTES AO TODO | RELAÇÃO COM OS VIZINHOS | NÃO EXTENSIVOS | NOVA MECÂNICA ESTATÍSTICA | O GRAU DE ORGANIZAÇÃO

73. | **NÃO EXTENSIVA** | CAVALOS CEGOS E AEROPORTOS

RAIOS CÓSMICOS

EDITORES CIENTÍFICOS | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Ronald Cintra Shellard (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT).
AGRADECIMENTOS a João R. Torres de Mello Neto (IF/UFRJ)

76. | **INVASORES DE CORPOS** | BOMBARDEIO ESPACIAL | UM EVEREST A 200 MIL KM/H

78. | **ESTILHAÇOS DE MATÉRIA** | DOIS RUMOS | PRÓTONS E NÚCLEOS | ANTIMATÉRIA E ESTRANHAS

79. | **DA TORRE EIFFEL A BALÕES** | UM PADRE E UM BALONISTA | RAIOS OU CORPÚSCULOS? | CHUVEIRO EXTENSO

80. | **O MÉSON PI** | CHUVEIROS PENETRANTES | LATTES EM BRISTOL | NO ACELERADOR

82. | **DE ONDE VÊM?** | ESTRELAS MORIBUNDAS | NAS VIZINHANÇAS

83. | **QUANTOS CHEGAM?** | PIZZA QUILOMÉTRICA | UM POUCO DE FÍSICA | SOBEM DEZ, CAEM MIL

84. | **OS ZÉVATRONS CHEGARAM** | VOLCANO RANCH | NO CHÃO E NO AR | RECORDE NO OLHO DE MOSCA

86. | **GIGANTE HÍBRIDO DOS PAMPAS** | EM BUSCA DE RESPOSTAS | CONSÓRCIO INTERNACIONAL | TRÊS VEZES O RIO | MAIS RÁPIDO QUE A LUZ | CELULAR E GPS | NOITES CLARAS E SEM NUVENS

89. | **HIPÓTESES SOBRE A ORIGEM** | RESULTADOS DO AUGER | LISTA DE CANDIDATOS | MAIS FORTE E ENFRAQUECIDOS | QUESTÃO EM ABERTO | CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA | RAIOS CÓSMICOS

COSMOLOGIA

EDITORES CIENTÍFICOS | Martín Makler (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Thyrso Villela Neto (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/MCT)

96. | **COSMOGONIAS** | DE ONDE VIEMOS? | PEDRA FUNDAMENTAL

97. | **NASCIMENTO DA COSMOLOGIA** | PRIMEIRO MODELO | UM TERMO EXTRA

99. | **ALÉM DA VIA LÁCTEA** | EXPANSÃO E CONTRAÇÃO | DOIS PIONEIROS | PONTO INSIGNIFICANTE | COMO UM BALÃO DE FESTAS

101. | **MODELO DO BIG BANG** | ÁTOMO PRIMORDIAL | ESTRONDO COLOSSAL | DOIS SIGNIFICADOS

103. | **ECO PRIMORDIAL** | RUÍDO TÊNUE | RADIAÇÃO DE FUNDO

104. | **BREVE HISTÓRIA DO UNIVERSO** | TRÊS PILARES | TEORIAS ALTERNATIVAS | TEORIA DA INFLAÇÃO | ALGUNS MOMENTOS DA HISTÓRIA DO UNIVERSO

106. | **DESDOBRAMENTOS RECENTES** | DIMINUTAS PERTURBAÇÕES | REVOLUÇÃO CÓSMICA | MISTÉRIOS ESCUROS | DESTINO DO UNIVERSO | A PRIMEIRA GERAÇÃO | CONFLITOS, DÚVIDAS E CERTEZAS

INFORMAÇÃO QUÂNTICA

EDITOR CIENTÍFICO | Ivan S. Oliveira (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)

112. | **EXPERIÊNCIAS INDIVIDUAIS** | JOVEM PROMESSA | POR PRINCÍPIO... A INCERTEZA | PILAR DE SUSTENTAÇÃO

114. | **COMPUTADOR QUÂNTICO** | VEDETE DA ÁREA | LEI EMPÍRICA | UM BIT, UM ÁTOMO | ZERO E UM, AO MESMO TEMPO | MUNDO ESTRANHO | DESENVOLVIMENTOS IMPORTANTES | TESTE DA MOEDA | ALGORITMO DE SHOR | CRENÇA NO CÓDIGO | CANDIDATOS A Q-BITS | QUESTÃO DE ANOS

119. | **CRIPTOGRAFIA QUÂNTICA** | MÉTODO INVIOLÁVEL | AÇÃO FANTASMAGÓRICA? | PARTÍCULAS GÊMEAS

121. | **REALIDADE E PROMESSAS** | CONDENSADO GIGANTE | LASER DE ÁTOMOS | TELEPORTE | REALIDADE PRESENTE | CORPO MAGNÍFICO | NO BRASIL

NEUTRINOS

EDITOR CIENTÍFICO | Marcelo Moraes Guzzo
(Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas)

126. | **POR TODA PARTE** | CHUVA INVISÍVEL | A MAIS "ANTI-SOCIAL"

127. | **COMO TUDO COMEÇOU** | FILÃO PERDIDO | PILAR SAGRADO | SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS... | MUITO "GORDO" | PEQUENO NÊUTRON | TRÊS TIPOS

130. | **A PRINCIPAL FONTE** | 60 BILHÕES POR SEGUNDO | EFEITO URCA | CHANCES MÍNIMAS | DISPARIDADE CONFIRMADA | EXPLOSÃO CÓSMICA

133. | **O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES** | TEORIA *VERSUS* EXPERIMENTO | MUDANÇA DE SABOR | NO MEIO DOS REATORES | QUAL O MECANISMO?

135. | **REDES DE CAPTURA** | LUZ TÊNUE | GIGANTESCO COLAR DE PÉROLAS | CUBO DE GELO | ANGRA DOS REIS | MINOS

138. | **DESAFIOS** | PARCELA DA MATÉRIA ESCURA | MESMA PARTÍCULA? | AONDE FOI A ANTIMATÉRIA?

BIOFÍSICA

EDITORES CIENTÍFICOS | Henrique Lins de Barros (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / MCT) | Daniel Acosta Avalos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / MCT)

142. | **A BIOLOGIA E A FÍSICA** | ÉLAN VITAL | DOMÍNIO DA FÍSICA | DOIS ENFOQUES

144. | **ENTROPIA E VIDA** | TROCAS COM O MEIO | AINDA SEM DEFINIÇÃO | CONCEITO REVOLUCIONÁRIO | DESORDEM MÁXIMA | PRETO NO BRANCO | FLECHA DO TEMPO

147. | **EVOLUÇÃO POR SELEÇÃO NATURAL** | SEMELHANTE, MAS NÃO IGUAL | VIDA DIGITAL

148. | **ESCALAS DA BIOFÍSICA** | DO MOLECULAR AO COSMOLÓGICO | MICRO, MESO E MACRO | INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS

150. | **COMPLEXIDADE** | QUATRO ÁTOMOS DE FERRO | FERRAMENTAS PARA MACROMOLÉCULAS | CANAIS DE PASSAGEM

151. | **O DNA E O CÓDIGO GENÉTICO** | MOLÉCULA DA VIDA | QUATRO BASES | PONTES DE HIDROGÊNIO | HÉLICES IDÊNTICAS | SUTILEZAS DESCONHECIDAS

153. | **DETECTORES BIOLÓGICOS** | MIGRAR É PRECISO | PERGUNTAS SEM RESPOSTA | OTIMIZADOS PELA NATUREZA

155. | **NEURÔNIOS** | ESPALHADOS PELO CORPO | SUBSTÂNCIAS LIBERADAS | COMPUTADOR BIOLÓGICO

156. | **APLICAÇÕES** | TÉCNICAS, DROGAS E TERAPIAS

157. | **VIDA EXTRATERRESTRE** | ALÉM DA IMAGINAÇÃO | VIDA FORA DA TERRA?

SUPERCORDAS

EDITOR CIENTÍFICO | Nathan Berkovits
(Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)

160. | **CONFLITO ENTRE O MACRO E O MICRO** | INCONSISTENTES ENTRE SI | FORÇA INFINITA | AS OUTRAS FORÇAS | MODIFICAÇÃO CONSISTENTE

162. | **EINSTEIN E O SONHO DA UNIFICAÇÃO** | DIMENSÃO CIRCULAR | OBJETOS UNIDIMENSIONAIS

163. | **DIMENSÕES EXTRAS** | DE PERTO E DE LONGE | COMO PLANTAS E PEIXES

164. | **BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO** | SUGADOR DE LUZ E DE MATÉRIA | SUMIÇO DE ELEFANTES | SOLUÇÃO DO PARADOXO

166. | **PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO** | ESCAPAR OU NÃO | ÁREA DO HORIZONTE | SUPERFÍCIE BIDIMENSIONAL

167. | **O TEORIA DAS SUPERCORDAS** | CORDA FUNDAMENTAL | MODOS DE VIBRAÇÃO | TESTE DE PROPRIEDADES | COMPACTAÇÃO DAS DIMENSÕES

169. | **SUPERSIMETRIA** | BÓSONS E FÉRMIONS | PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO | SIMETRIAS ESTABELECIDAS | O GRANDE ACELERADOR

171. | **PESQUISA NO BRASIL** | ALTAS ENERGIAS

LHC

EDITOR CIENTÍFICO | Ignácio Bediaga (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas)

174. | **ERA DE UM COLOSSO** | GRANDE COLISOR | DIMENSÕES ÍNFIMAS | DUAS MISSÕES BÁSICAS

176. | **A MÁQUINA EM NÚMEROS** | NÚMEROS IMPRESSIONANTES | BATIDA DE FRENTE | 1,5 TONELADA | VÁCUO INTERPLANETÁRIO | TEMPERATURA INTERGALÁCTICA | DA TERRA AO SOL | $E = MC^2$

179. | **FÍSICA NO LHC** | QUESTÕES CENTRAIS | A PARTÍCULA DAS MASSAS | ONDE ESTÁ A ANTIMATÉRIA? | SOPA QUENTÍSSIMA

182. | **DETECTORES DO LHC** | CAPTURADORES DE FRAGMENTOS | ALICE | LHCB | ATLAS | CMS | PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA

186. | **GRADE DE COMPUTADORES** | WEB | 20 KM DE CDS | UTILIDADE PÚBLICA

188. | **RESPOSTAS PARA AS PERGUNTAS** | MUDANÇA DE PARADIGMA | ENQUETE NA TV | RAINHA DAS MÁQUINAS

190. | **BIBLIOGRAFIA**

UM OLHAR PARA O FUTURO:

Desafios da ciência e da física para o século 21

Aprendemos na escola a lidar com a mecânica, o eletromagnetismo e a óptica, ramos da física que fazem parte de nosso dia-a-dia, mas que foram desenvolvidos há mais de cem anos. Vez por outra, a imprensa noticia avanços tecnológicos e novas descobertas, e uma pergunta fica no ar para os leitores: quais são as fronteiras da ciência e da física hoje?

É com prazer que apresentamos neste livro alguns dos principais desafios que a física deverá enfrentar neste século que se inicia. A busca de respostas a essas questões será um trabalho não só de físicos, mas de uma parcela significativa da comunidade internacional de pesquisadores, dado o caráter cada vez mais interdisciplinar da atividade científica. O Brasil, como veremos, já desenvolve pesquisa na maioria desses tópicos.

A lista de temas abordados não se pretende exaustiva. A pesquisa atual em física vai muito além das questões que apresentamos aqui – daí a dificuldade em selecioná-las entre tantas outras perguntas interessantes ainda sem resposta.

O projeto "Desafios da Física para o Século 21", que deu origem a este livro, teve início em 2002, quando foi feito o primeiro dos *folders* da série para a reunião anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC). Com a excelente receptividade, decidimos dar continuidade ao projeto e, nos anos seguintes, fomos incorporando novos desafios. Cada tema tratado conta com um ou mais editores científicos, escolhidos entre especialistas da área em questão.

Agradecemos o apoio financeiro recebido da Faperj, que possibilitou a edição deste livro, bem como do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e de Vitae, associação civil voltada ao apoio à cultura, à educação e à promoção social. Ficam também os nossos agradecimentos ao Professor José Israel Vargas pelo incentivo em levar adiante esse projeto.

Com este livro, destinado ao grande público, esperamos também contribuir para despertar vocações, mostrando aos jovens estudantes que a carreira científica é uma profissão promissora e instigante, e que muitos desafios permanecem sem solução à espera de novos cientistas dispostos a enfrentá-los.

João dos Anjos
Coordenador do projeto
"Desafios da Física para o Século 21"

Rio de Janeiro, outubro de 2008

UM OLHAR PARA O FUTURO

Desafios da física para o século 21



Ano miraculoso de Einstein

Cem anos da publicação dos artigos que mudaram a física

2005 foi escolhido pela União Internacional de Física Pura e Aplicada como o Ano Mundial da Física – decisão, aliás, sancionada pela Organização das Nações Unidas a pedido do representante brasileiro nesse organismo.

A razão foi celebrar os 100 anos dos trabalhos feitos por Albert Einstein em 1905. Naquele ano, ele ajudou a mostrar, por exemplo, que a matéria é formada por átomos, que massa e energia são grandezas equivalentes – por meio de sua famosa fórmula $E = mc^2$ – e que a luz tem uma constituição corpuscular.

Tantos trabalhos importantes e revolucionários em um só ano merecem, sem dúvida, ser lembrados sempre. Assim, aproveitamos este neste capítulo para falar um pouco desses trabalhos que mudaram tão profundamente nossa visão do macro e microuniverso e da vida de Einstein, certamente um dos maiores cientistas de todos os tempos.

16. | **A EFEMÉRIDE** | BERÇO, LIVRO E CHARUTO | ANO MIRACULOSO

17. | **O EFEITO FOTOELÉTRICO** | ELÉTRONS QUE SALTAM | PARTÍCULAS DE LUZ | IDÉIA MAIS REVOLUCIONÁRIA

19. | **A TESE** | O MAIS OBSCURO | AÇÚCAR COM ÁGUA | O MAIS CITADO

20. | **O MOVIMENTO BROWNIANO** | ZIGUEZAGUE ERRÁTICO | ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO | REALIDADE DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS

22. | **A RELATIVIDADE** | ASSOMBRADOS PELO ÉTER | DOIS POSTULADOS | REVISÃO RADICAL | $E=MC^2$ | RESTRITA

24. | **A VIDA** | A INFÂNCIA | A JUVENTUDE | EM BERNA | EM BERLIM | EM PRINCETON

27. | **O CONTEXTO** | CRIATIVIDADE E CAMINHOS | FAMA MUNDIAL

28. | **EINSTEIN HOJE** | LASER E ÁTOMO GIGANTE | BURACOS NEGROS E ONDAS GRAVITACIONAIS | DIMENSÕES EXTRAS | NO MUNDO NANO

EDITORES CIENTÍFICOS | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Ildeu de Castro Moreira (Instituto de Física/Universidade Federal do Rio de Janeiro)

A EFEMÉRIDE

BERÇO, LIVRO E CHARUTO

Rua Kramgasse, 49, Berna, Suíça, 1905. No segundo andar, fica um apartamento modestamente decorado, reflexo do baixo poder aquisitivo de seus moradores. Um varal com roupas úmidas corta a sala. O inquilino, um técnico de 3ª classe do escritório de patentes da cidade, embala com uma mão o berço de seu filho e com a outra empunha um livro aberto. Na boca, um charuto de péssima qualidade, cuja fumaça se junta à fuligem que verte do fogão.

ANO MIRACULOSO

Certamente, um ambiente pouco propício à prática da ciência. Mas foi nele, há cem anos, que um jovem de 26 anos produziu – nas horas vagas e isolado da comunidade científica – cinco artigos e uma tese de doutorado. Todos trabalhos de altíssimo nível. Eles mudariam para sempre a face da física. Seu nome: Albert Einstein. Seu feito fez com que 1905 ficasse conhecido como Ano Miraculoso (*Annus Mirabilis*).

FOTO LUCIEN CHAVAN



Torre do relógio de Berna.

O EFEITO FOTOELÉTRICO

ELÉTRONS QUE SALTAM

Naquele início de século, o chamado efeito fotoelétrico – no qual a luz (radiação eletromagnética) arranca elétrons de certos metais – ainda intrigava os físicos. Abaixo de certa freqüência da luz incidente, por maior que fosse a intensidade luminosa, elétrons não conseguiam escapar do metal. Quando se aumentava a intensidade da radiação, esperava-se, como previa a teoria, que elétrons mais energéticos saltassem. Porém, notava-se apenas um aumento na quantidade de partículas ejetadas, todas dotadas da mesma energia. Ao se aumentar a freqüência da luz incidente – indo da luz visível para o ultravioleta, por exemplo –, os elétrons também se tornavam mais energéticos. A explicação para isso tudo escapava à física da época.

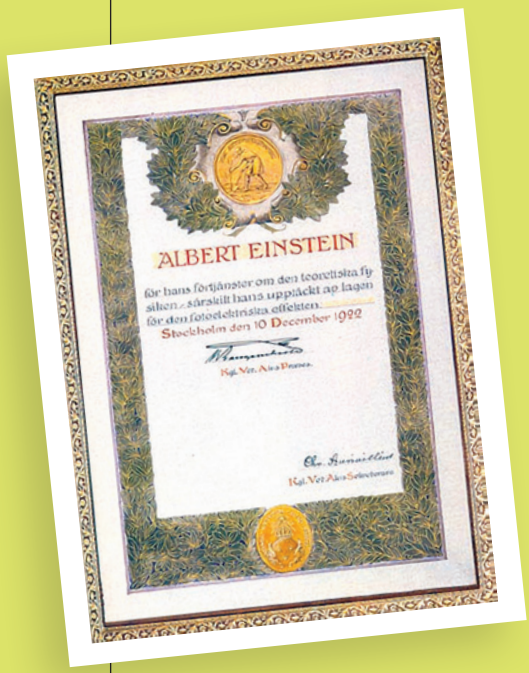
PARTÍCULAS DE LUZ

Tentativas teóricas já haviam sido feitas para solucionar a disparidade entre teoria e experimento. Mas foi o artigo "Sobre um ponto de vista heurístico relativo à produção e à transformação da luz", de 17 de março – portanto, o primeiro concluído naquele ano – que resolveu o problema. Nele, Einstein adotou uma hipótese aparentemente simples: a luz é formada por partículas (os quanta de luz, que passaram, em 1926, a ser chamados fótons). A energia da radiação vem, portanto, em pacotes (fótons). Com isso, o efeito fotoelétrico ganhou uma explicação que podia ser testada experimentalmente: aumentar a intensidade da luz significa apenas aumentar o número de

fótons de mesma energia que incidem sobre o metal. Aumentar a freqüência da luz torna os fótons mais energéticos, pois sua energia, pela proposta de Einstein, é proporcional à freqüência – e isso faz com que os elétrons ganhem mais energia nas colisões com os fótons que os ejetam.

IDÉIA MAIS REVOLUCIONÁRIA

A idéia de que a luz tem natureza corpuscular foi classificada por Einstein como a "mais revolucionária" de sua vida. Em 1915, o físico norte-americano Robert Millikan (1868-1953), ao contrário do que pretendia inicialmente, chegou a resultados que confirmavam a previsão de Einstein sobre o efeito fotoelétrico. Foi principalmente por essa previsão quantitativamente correta que Einstein ganhou o Nobel de 1921 – o prêmio não cita "quanta de luz", cuja realidade era ainda controversa. Porém, as dúvidas começaram a ser dizimadas em 1923, com a descoberta do efeito Compton – no qual a luz, ao se chocar contra um elétron, comporta-se como um corpúsculo, perdendo energia – e com os experimentos conduzidos, dois anos depois, pelos físicos alemães Hans Geiger (1882-1945) e Walther Bothe (1891-1957) e também com os resultados dos norte-americanos Arthur Compton (1892-1962) e Alfred Simon.



FUNDAÇÃO NOBEL

Diploma do prêmio Nobel de Einstein

A TESE

O MAIS OBSCURO

"Uma nova determinação das dimensões moleculares". Esse é o título do trabalho mais obscuro daquele ano, finalizado em 30 de abril. Com ele, Einstein obteve, em 15 de janeiro de 1906, o título de doutor pela Universidade de Zurique. Nessa tese, Einstein apresentou um novo método para determinar, entre outras grandezas, os raios de moléculas.

AÇÚCAR COM ÁGUA

Einstein usou como modelo o açúcar dissolvido na água e obteve boa concordância com os dados experimentais disponíveis na época. Ele formulou um modo indireto que permitia estimar as dimensões de moléculas dissolvidas em um líquido, bastando, para isso, conhecer a viscosidade do lí-

Membros fundadores
da Academia Olímpia



FOTO EINSTEIN ARCHIVES

quido – no caso, antes e depois da dissolução do açúcar – e como as moléculas nele imersas se "espalham" (difundem).

O MAIS CITADO

Ainda em 1901, Einstein havia enviado à Universidade de Zurique outra tese, mas retirou-a, no ano seguinte, depois de ser alertado de que o trabalho poderia ser rejeitado pela falta de dados experimentais que comprovassem seus resultados teóricos. A tese de 1905 se tornaria seu trabalho mais citado na literatura científica moderna. Razão: tem grande aplicação em outras áreas, da físico-química à construção civil, da indústria de alimentos à ecologia.

O MOVIMENTO BROWNIANO



ZIGUEZAGUE ERRÁTICO

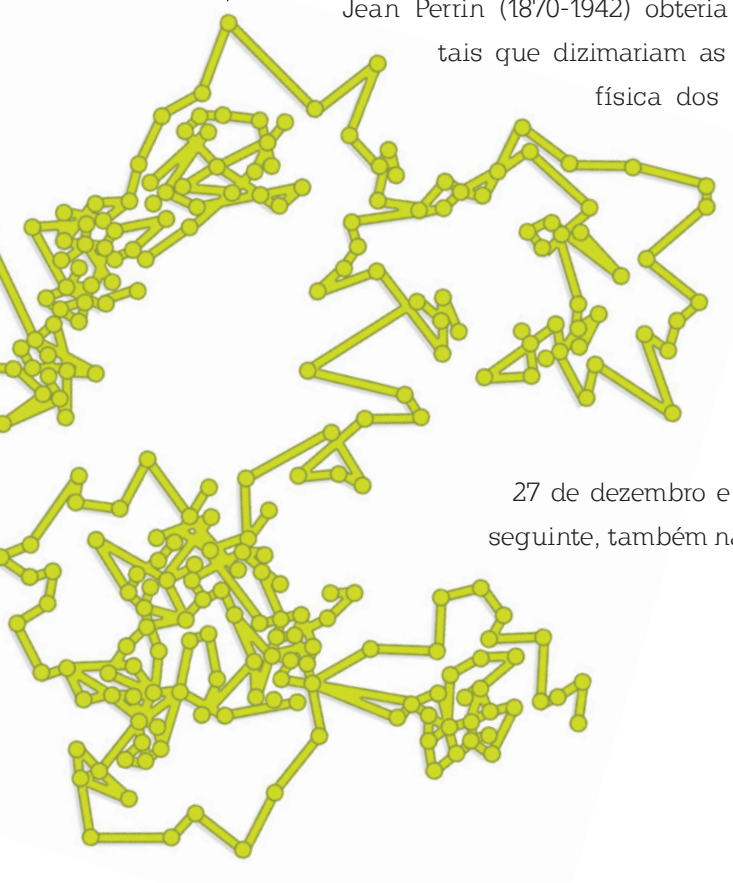
Em 1827, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) verificou que grãos de pólen na superfície da água, quando observados no microscópio, apresentavam um "ziguezague" errático. O fenômeno passou a ser conhecido como movimento browniano e, com Einstein, se tornou uma evidência experimental importante da existência de moléculas, assunto ainda controverso no início do século passado.

ATRAVÉS DE UM MICROSCÓPIO

O artigo "Movimento de partículas em suspensão em um fluido em repouso como conseqüência da teoria cinética molecular do calor" – ou, simplesmente, "Movimento Browniano", como é mais conhecido – é um desdobramento da tese. Foi recebido para publicação em 11 de maio de 1905. Nele, Einstein inferiu que essa movimentação desordenada era ocasionada pelos choques da partícula com as moléculas do fluido, invisíveis ao microscópio e agitadas em razão de sua energia térmica, que é medida pela temperatura. Einstein previu qual seria o deslocamento médio da posição de cada partícula, ocasionado pelas colisões com as moléculas de água. Isso poderia ser medido com a ajuda de um microscópio.

REALIDADE DE ÁTOMOS E MOLÉCULAS

Poucos anos depois, com base nesse artigo, o físico francês Jean Perrin (1870-1942) obteria os resultados experimentais que dizimariam as dúvidas sobre a realidade física dos átomos e das moléculas. Em 1913, Perrin declarou: "A teoria atômica triunfou." Einstein terminou um segundo artigo sobre o movimento browniano no final de 1905. Ele foi recebido para publicação em 27 de dezembro e só seria publicado no ano seguinte, também na *Annalen der Physik*.



A RELATIVIDADE

ASSOMBRADOS PELO ÉTER

O som é uma onda (mecânica) e, portanto, precisa de um meio (gasoso, líquido ou sólido) para se propagar. Raciocínio semelhante levou à hipótese de que era necessário um meio – que preencheria todo o espaço – para servir de suporte à propagação da luz e das outras ondas eletromagnéticas. No final do século 19, o chamado éter, no entanto, passou a assombrar os físicos, que não conseguiam determinar suas propriedades mecânicas e nem mesmo o movimento da Terra em relação a ele.

DOIS POSTULADOS

Recebido para publicação em 30 de junho de 1905, o artigo "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento" declararia a morte do éter com base em dois postulados: i) as leis da física são as mesmas para observadores inerciais, ou seja, que se movem sem aceleração (princípio da relatividade); e ii) a velocidade da luz no vácuo (cerca de 300 mil km/s) é sempre a mesma, independentemente de a fonte emissora estar parada ou em movimento, ou seja, a velocidade da luz é uma constante da natureza.

REVISÃO RADICAL

A adoção desses dois postulados levou a uma revisão radical das noções sobre o espaço e o tempo. Em termos simples e com base em fenômenos do cotidiano, pode-se dizer que: i) o relógio de um passageiro dentro de um vagão em movimento andará mais devagar quando comparado àquele da

estação – esta é a chamada dilatação temporal; ii) o comprimento de um vagão em movimento parecerá mais curto quando medido por alguém parado na plataforma – esta é a chamada contração espacial; e iii) o que parece simultâneo para um passageiro no vagão em movimento pode parecer não ter ocorrido ao mesmo tempo para uma pessoa na plataforma – este é o problema da simultaneidade. No entanto, esses fenômenos só são significativos – e podem ser medidos – quando nosso vagão imaginário se aproxima da velocidade da luz no vácuo. Nas velocidades a que estamos acostumados no dia-a-dia, esses efeitos são imperceptíveis.

$E=MC^2$

Em setembro de 1905, Einstein percebeu outras conseqüências dos dois postulados. Em um artigo de três páginas, "A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?", deduziu a fórmula mais famosa da ciência: $E = mc^2$. Ela indica que quantidades mínimas de massa (m) – no caso, multiplicada pela velocidade da luz ao quadrado (c^2) – podem gerar enormes quantidades de energia (E).

RESTRITA

Unidos, esses dois artigos passaram a ser denominados "teoria da relatividade restrita" – restrita, no caso, por lidar apenas com situações em que os observadores não estão acelerados. Por fim, é preciso dizer que o matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) e o físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928) já haviam deduzido muitas das expressões matemáticas contidas nos dois artigos e influenciaram fortemente o trabalho de Einstein.

A VIDA

A INFÂNCIA



Einstein nasceu em 14 de março de 1879, uma sexta-feira, às 11h30 da manhã, em Ülm (sul da Alemanha). Foi o primeiro filho de Hermann (1847-1902) e Pauline Einstein (1858-1920) – dois anos depois, nasceria Maja (Maria, 1881-1951), sua irmã e último filho do casal. Em 1880, a família mudou-se para Munique, e seu pai montou um pequeno negócio de produtos eletromecânicos. Einstein ingressou em uma escola católica da cidade, onde se mostrou um aluno tímido, porém aplicado. Mais tarde, foi estudar no Ginásio Luitpold, cujo método de ensino classificaria como "militar". Continuou a ser bom aluno, apesar de ter dificuldades com línguas, principalmente grego.

A JUVENTUDE

Em 1896, matriculou-se no curso de formação de professores de matemática e física da Escola Politécnica de Zurique – nessa época, renunciou à cidadania alemã. Na graduação, faltou a muitas aulas para estudar por conta própria e passou nos exames com ajuda das anotações de um colega de classe, Marcel Grossmann (1878-1936). Sua futura mulher, Mileva Maric (1875-1948), era sua colega de turma e parceira em discussões sobre física nesse período.

FOTO EINSTEIN ARCHIVES

EM BERNA

Depois de formado, Einstein deu aulas particulares para se manter, formando nesse período um grupo de discussão sobre filosofia e ciência, a Academia Olímpia, com dois colegas. Em 1902, arrumou um emprego como técnico de 3ª classe do Escritório de Patentes em Berna. No ano seguinte, casou-se com Mileva, com quem, pouco antes, havia tido uma filha, Lieserl, nascida no início de 1902 e cujo destino até hoje é desconhecido. O casal teria mais dois filhos: Hans Albert (1904-1973), que se tornaria um renomado engenheiro hidráulico e um dos maiores especialistas em sedimentos do século passado, e Eduard (1910-1965), que, esquizofrênico, morreria em uma clínica psiquiátrica na Suíça.

EM BERLIM

Em 1909, Einstein pediu demissão do Escritório de Patentes para se tornar professor de física teórica da Universidade de Zurique. Mais tarde – principalmente por questões financeiras –, transferiu-se para a Universidade Alemã de Praga para, pouco depois, voltar à Politécnica, onde um cargo de



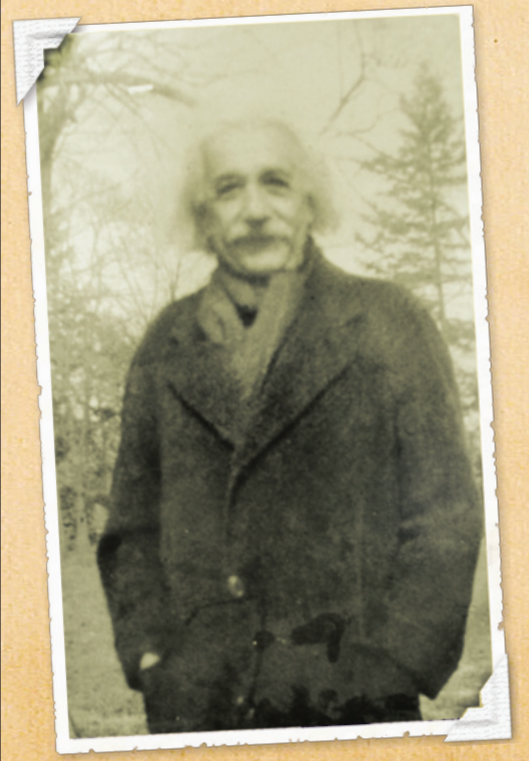
EINSTEIN ARCHIVES

Na página anterior, Einstein ainda criança. À direita, Mileva com os filhos, Eduard e Hans

assistente havia sido negado a ele em 1900. Em 1913, foi convidado a tornar-se membro da prestigiosa Academia Prussiana de Ciências e professor da Universidade de Berlim. Em 1915, terminou a relatividade geral, uma extensão dos trabalhos de 1905 que continha uma nova teoria da gravitação.

EM PRINCETON

Em 1932, aceitou proposta de trabalho no recém-fundado Instituto de Estudos Avançados, em Princeton (Estados Unidos). Deixou a Alemanha por causa da ascensão do nazismo – ao qual se opunha fortemente – e das perseguições aos judeus. Viveu em Princeton até sua morte, em 18 de abril de 1955, dividindo seus últimos anos de vida entre tentativas infrutíferas para construir uma teoria que permitisse uma descrição unificada dos fenômenos gravitacionais e eletromagnéticos e uma profunda dedicação a causas ligadas à paz e às liberdades civis.



Einstein em Princeton

FOTO LEITE LOPES/ACERVO CBPF

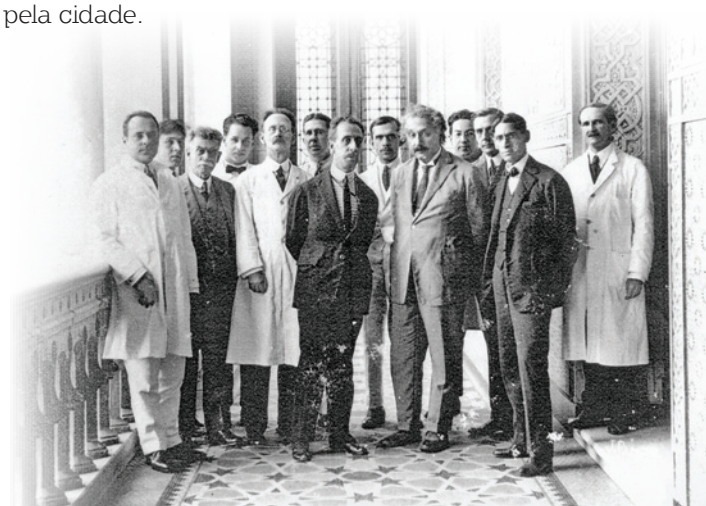
O CONTEXTO

CRIATIVIDADE E CAMINHOS

Como um só homem, trabalhando de forma aparentemente isolada da comunidade científica de sua época, pôde chegar a tamanha produção e de tão alto nível em um só ano? Explicar a criatividade de Einstein e os caminhos que o levaram àqueles artigos é uma tarefa complexa. É preciso considerar uma multitude de fatores pessoais e do contexto em que Einstein estava inserido.

FAMA MUNDIAL

Em 1919, Einstein ganhou fama mundial com a comprovação de uma das previsões da teoria da relatividade geral – o encurvamento da luz nas proximidades do Sol – em um eclipse solar observado em Sobral (Ceará) e na Ilha de Príncipe, na costa oeste africana. O momento – fim da Primeira Guerra Mundial, que havia assombrado o mundo – mostrou-se propício para que os trabalhos de Einstein se destacassem. Na década de 1920, Einstein, já famoso, fez grandes viagens pelo mundo. Em um delas, em 1925, visitou Argentina, Uruguai e passou uma semana no Rio de Janeiro, em maio, onde fez palestras e passeou pela cidade.



ACERVO HERMAN LENT

Einstein com cientistas no Instituto Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, maio de 1925

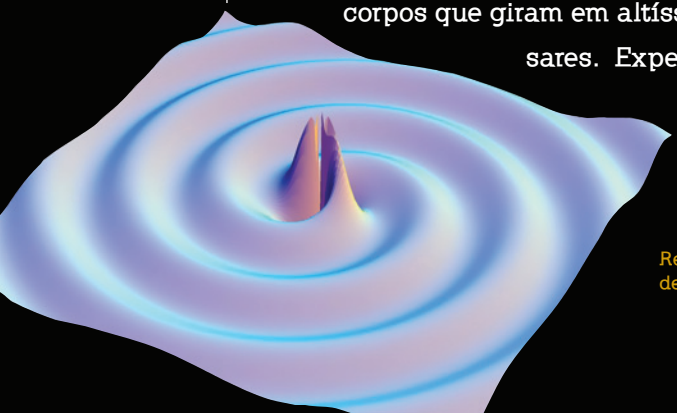
EINSTEIN HOJE

LASER E ÁTOMO GIGANTE

Os cerca de 300 trabalhos científicos de Einstein ajudaram a aprofundar o conhecimento sobre a natureza da radiação (luz, por exemplo) e da matéria. Alguns deles possibilitaram, a obtenção do laser, em 1960, e previram um fenômeno no qual um aglomerado de átomos, a baixíssimas temperaturas, se comporta como uma entidade única, como um "átomo gigante". O chamado condensado de Bose-Einstein foi obtido pela primeira vez em 1995.

BURACOS NEGROS E ONDAS GRAVITACIONAIS

Com base na teoria da relatividade geral, Einstein inaugurou, com um artigo de 1917, a cosmologia moderna. Quanto aos buracos negros – corpos cósmicos que sugam luz e matéria com voracidade –, ele desconfiou de sua existência, apesar de terem sido previstos pela mesma teoria. Hoje, com o acúmulo de evidências experimentais indiretas, acredita-se que esses "ralos cósmicos" existam. A realidade das ondas gravitacionais, outra das previsões dessa teoria, é também tida como certa. Supõe-se que sejam produzidas, por exemplo, em colisões de buracos negros, explosões de estrelas ou por corpos que giram em altíssima velocidade, como os pulsares. Experimentos já estão à caça de mais esse fenômeno previsto pela relatividade geral.



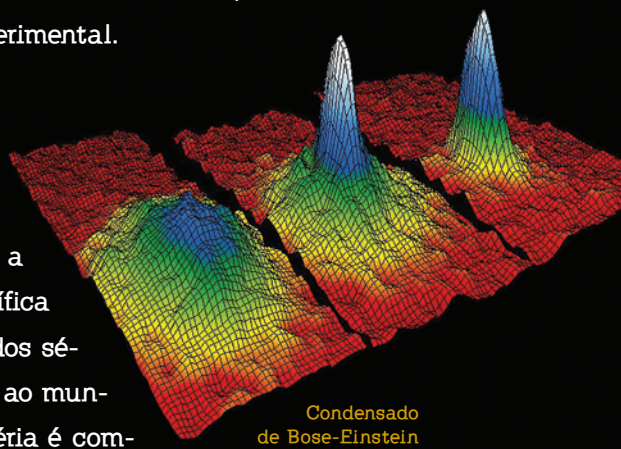
LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION

Representação de ondas gravitacionais

DIMENSÕES EXTRAS

Einstein nunca concordou com a maioria dos físicos que criaram a física quântica, pois estes viam as probabilidades e a incerteza como características intrínsecas e irremovíveis do mundo microscópico. Muitos consideram também que Einstein se equivocou ao dedicar as duas décadas finais de sua vida à tentativa de unificar o eletromagnetismo e a gravitação. Outros, porém, alegam que ele, mais uma vez à frente de seu tempo, estava adiantando um campo teórico que só ganharia notoriedade e prestígio nestes últimos anos: a busca de uma teoria unificada. Hoje, as supercordas, teoria em que as partículas elementares são tratadas como diminutas cordas vibrantes em vez de pontos sem dimensão, são a melhor candidata para unificar boa parte dos fenômenos da natureza. No entanto, as supercordas implicam dimensões espaciais extras e várias novas partículas elementares, ambas ainda sem comprovação experimental.

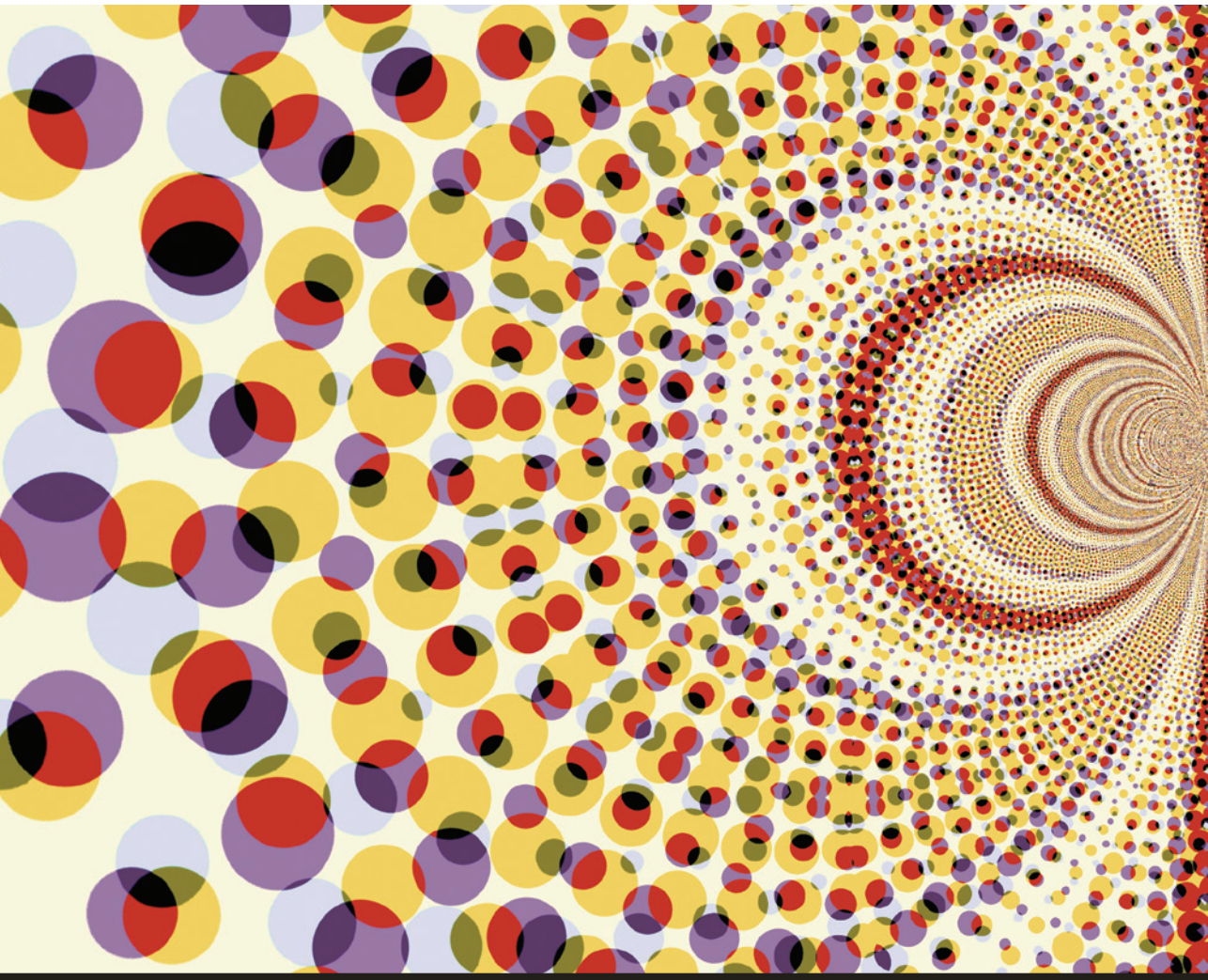
NO MUNDO NANO



Condensado de Bose-Einstein

Einstein tem também seu dedo no que talvez seja a maior contribuição científica que a física e a química dos séculos 19 e passado deram ao mundo: a prova de que a matéria é composta por átomos e moléculas. Hoje, esse conhecimento é a base, por exemplo, para a nanociência e a nanotecnologia, que englobam projetar, manipular, produzir e montar artefatos com dimensões atômicas e moleculares por meio da integração da física, da química, da biologia, da engenharia e da informática (ver, desta série, *Nanociência e Nanotecnologia – Modelando o futuro átomo por átomo*).

JILA/UNIVERSITY OF COLORADO



Partículas Elementares

A (des)construção da matéria pelo homem

Uma das características do homem é sua constante curiosidade sobre tudo o que nos cerca. Desde as cavernas, tentamos entender a natureza e a razão de nossa própria existência a partir de perguntas aparentemente simples – por quê, como, para quê, etc. –, mas extremamente penetrantes.

Um dos primeiros questionamentos foi "De que as coisas são feitas?" A resposta tem evoluído ao longo do tempo, segundo nossos conhecimentos acumulados e passados de geração em geração.

Aqui, apresentamos nosso entendimento atual sobre os blocos constituintes da matéria e as forças que regem os fenômenos da natureza. Será uma visão definitiva? Certamente, não. A cada dia, temos algo novo a acrescentar a esse quadro. Quem sabe, você, leitor, não nos ajudará a encontrar o lugar de uma peça neste imenso quebra-cabeça que é a natureza?

32. | **A NATUREZA DAS COISAS** | TERRA, FOGO, ÁGUA E AR | O NÃO DIVISÍVEL

34. | **FRAGMENTANDO O INDIVISÍVEL** | ATOMISMO | MISTERIOSA RADIAÇÃO

35. | **VIAGEM AO CENTRO DO ÁTOMO** | GRANDE VAZIO | RETRATO DO ÁTOMO QUANDO JOVEM

36. | **CRISE E ANTIMATÉRIA** | O SAGRADO E A HERESIA | SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS | A ANTIMATÉRIA

38. | **OS MÉSONS EM CENA** | FORÇA FORTE | QUEM ENCOMENDOU ISSO? | FINALMENTE, O PÍON

40. | **UM ZÔO SUBATÔMICO** | PARTÍCULAS ESTRANHAS | MULTA DE 10 MIL

41. | **VOLTA À SIMPLICIDADE** | SIMPLES E ELEGANTE | SEMPRE CONFINADOS | ACEITAÇÃO DE UM MODELO

43. | **MODELO PADRÃO** | LISTAGEM COMPLETA | PRECISÃO E SENSIBILIDADE | UNIFICANDO FENÔMENOS | AS QUATRO FORÇAS | BREVE CENÁRIO BRASILEIRO

46. | **O FUTURO** | OS LIMITES DO MODELO | O QUE FALTA DESCOBRIR | VOLTA ÀS ORIGENS

EDITORES CIENTÍFICOS | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Adriano Antônio Natale (Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)



FOTO JAN SIMS



FOTO RAINER BERG

A NATUREZA DAS COISAS

TERRA, FOGO, ÁGUA E AR

De que são feitas as coisas? Várias civilizações, em diferentes épocas, formularam respostas a essa pergunta. Para o filósofo grego Empédocles (490-430 a.C.), por exemplo, haveria quatro elementos eternos (terra, fogo, água e ar) e duas forças fundamentais: uma atrativa (o amor) e outra repulsiva (o ódio). Para



FOTO MICHAEL LEMANN



PARTÍCULAS ELEMENTARES

FOTO ALEX MARTIN

os antigos chineses e indianos, madeira, metal e espaço também seriam constituintes básicos da matéria.

O NÃO DIVISÍVEL

Por volta do século 5 a.C, os filósofos gregos Leucipo (480-420 a.C.) e Demócrito (460-370 a.C.) propuseram que a matéria era formada por corpúsculos diminutos, invisíveis, dotados de movimento veloz. Essas entidades foram denominadas átomos, cujo significado é "não" (a) "divisível"(tomo). As idéias da escola atomista sobreviveram no poema *De Rerum Natura* (Sobre a natureza das coisas), do romano Lucrécio (99-55 a.C.).

FRAGMENTANDO O INDIVISÍVEL

ATOMISMO

No século 17, o físico e matemático inglês Isaac Newton (1642 – 1727) retomou a concepção de que a matéria – inclusive a luz – era formada de corpúsculos. Mas a idéia se popularizou a partir de 1802, quando o químico John Dalton (1766-1844), seu conterrâneo, formalizou que tudo era feito de átomos. No final do século 19, em parte por influência desses dois cientistas, a realidade dos átomos se tornou um importante tema de debate, principalmente na Inglaterra.

MISTERIOSA RADIAÇÃO

Naquela época, as pesquisas sobre a eletricidade despertavam grande interesse entre os físicos. Vários se dedicavam, por exemplo, a decifrar a natureza de uma misteriosa radiação que brotava do pólo negativo (cátodo) de ampolas de vidro em cujo interior havia gases rarefeitos – aperfeiçoados, esses equipamentos deram origem aos tubos de TV. Experimentos desse tipo levaram o físico inglês Joseph Thomson (1856-1940) à conclusão de que os raios catódicos eram partículas subatômicas de carga negativa: os elétrons. O átomo havia sido fragmentado. E, para Thomson, ele se assemelhava a um pudim cuja massa (positiva) era recheada de ameixas (elétrons).



THE FRANKLIN INSTITUTE/ THE CASE FILES

VIAGEM AO CENTRO DO ÁTOMO

GRANDE VAZIO

Em 1909, o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) e dois auxiliares, o inglês Ernest Marsden (1889-1970) e o alemão Hans Geiger (1882-1945), bombardearam folhas de ouro finíssimas com partículas de carga positiva emitidas por uma fonte radioativa. O resultado causou profunda estranheza. Parte dessas partículas – denominadas radiação alfa – ricocheteavam bruscamente ao atingir a lâmina do metal. Dois anos depois, Rutherford, em letras trêmulas, descreveu sua conclusão: o átomo continha um caroço maciço, de carga elétrica positiva, no qual estava 99,99% de sua massa. "O átomo é um grande vazio", resumiu Rutherford. Em 1919, ele associaria a carga positiva nuclear a uma nova partícula: o próton, cerca de 2 mil vezes mais pesado que o elétron.

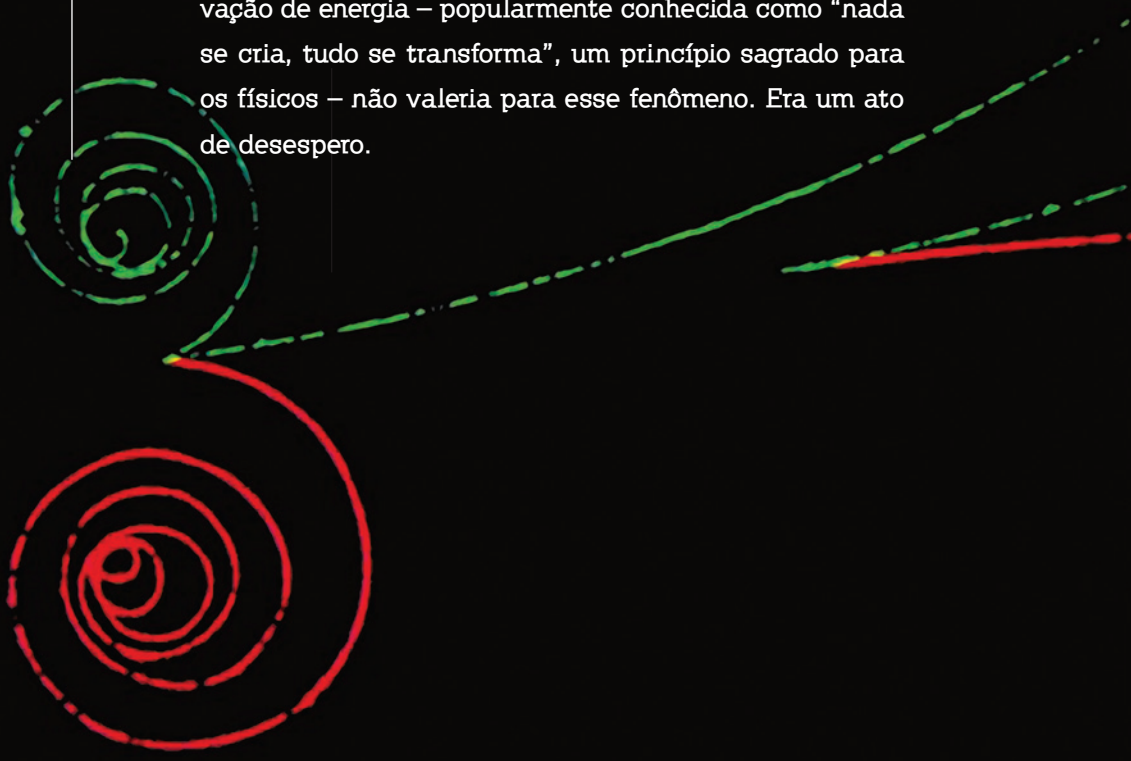
RETRATO DO ÁTOMO QUANDO JOVEM

Um esquema mais detalhado do núcleo atômico se completou em 1932, quando o físico inglês James Chadwick (1891-1974) mostrou que o próton dividia a desprezível dimensão do núcleo – cujo diâmetro é da ordem de 10^{-14} m – com uma partícula sem carga elétrica. Era o nêutron, levemente mais pesado que seu companheiro nuclear. O retrato do átomo parecia apresentar seu contorno final: um núcleo – formado por prótons e nêutrons – orbitado por elétrons. Além desses três, conheciam-se os fótons, as partículas de luz, cuja comprovação experimental havia ocorrido em meados da década de 1920. Porém, uma era nuclear cheia de surpresas estava por vir.

CRISE E ANTIMATÉRIA

O SAGRADO E A HERESIA

Pouco antes da descoberta do nêutron, uma crise entrou em cena. Motivo: o decaimento beta, processo em que um nêutron se transforma num próton e "cospe" um elétron do núcleo. Mas algo intrigava os físicos. As contas do balanço energético dessa forma de radioatividade não fechavam. Faltava um resquício – desprezível, é verdade – de energia que não era observado nos experimentos. Para explicar essa diferença, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) chegou a propor uma heresia: a conservação de energia – popularmente conhecida como "nada se cria, tudo se transforma", um princípio sagrado para os físicos – não valeria para esse fenômeno. Era um ato de desespero.



SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS

Em 1930, uma carta do físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) começava com "Senhoras e Senhores Radioativos". Nela, ele se desculpava por sua ausência num congresso e propunha a solução para o mistério: uma partícula sem carga, de massa possivelmente nula, responderia pela energia que faltava. A aceitação do neutrino – como foi batizado pelo físico italiano Enrico Fermi (1901-1954), que a empregou para dar a primeira teoria satisfatória do decaimento beta – foi surpreendente. Teóricos passaram a empregar essa partícula-fantasma com entusiasmo, mesmo que ela só tenha sido detectada em 1956.

A ANTIMATÉRIA

Em 1928, as equações nas quais o físico inglês Paul Dirac (1902-1984) trabalhava revelaram o inusitado: a existência de partículas de carga positiva com massa igual à do elétron. Era a primeira evidência de algo que os físicos hoje aceitam com naturalidade: a antimatéria. Esse elétron positivo – batizado pósitron – foi recebido com desconfiança. Mas, em 1932, ele foi detectado pelo norte-americano Carl Anderson (1905-1991). Pouco depois, percebeu-se que todas as partículas teriam sua correspondente antipartícula. Duas décadas depois, foram capturados o antipróton e o antinêutron. A antimatéria é parte da natureza, apesar de rara no universo atual.

OS MÉSONS EM CENA

FORÇA FORTE

Uma pergunta – aparentemente simples – ainda intrigava os físicos: o que mantém o núcleo coeso? Prótons, sendo positivos, deveriam se repelir, e nêutrons não sentem a força eletromagnética. No início da década de 1920, já se desconfiava de que uma força atrativa, muito intensa, impedisse a desintegração (desmantelamento) do núcleo. Em 1935, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) lançou uma idéia ousada: se a interação eletromagnética se dá pela troca de fótons entre as partículas com carga elétrica, por que algo semelhante não poderia ocorrer entre prótons e nêutrons? Surgia assim o méson – em grego, "médio", pois sua massa estaria entre a do próton e a do elétron.

QUEM ENCOMENDOU ISSO?

Dois anos depois, foi detectada uma partícula com as características do méson de Yukawa. Entretanto, em 1945, mostrou-se que ela praticamente não interagia com o núcleo atômico. Estranho, pois, caso ela fosse a responsável pela força forte, ela deveria, ao atravessar a matéria, ser "sugada" com voracidade por prótons ou nêutrons. Sua identidade acabou revelada: era o múon, um primo mais pesado do elétron, o que acabou embaralhando todo o "menu" de partículas da época. Com certa indignação e humor, o físico austríaco Isidor Rabi (1898-1988) resumiu o espanto dos físicos: "Quem encomendou essa partícula?"

FINALMENTE, O PÍON

O méson de Yukawa – hoje, conhecido como méson pi (ou píon) – só foi detectado em 1947, na observação de raios cósmicos por uma equipe da Universidade de Bristol (Inglaterra), liderada pelo inglês Cecil Powell (1903-1969) e com participação determinante do físico brasileiro César Lattes (1924-2005). No ano seguinte, Lattes e o norte-americano Eugene Gardner (1913-1950) detectaram píons produzidos artificialmente no acelerador de partículas da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos). Essa descoberta mostrou que a produção e a detecção de partículas podiam ser feitas de modo mais controlado com o desenvolvimento de aceleradores mais potentes e detectores mais precisos.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA/BERKELEY

Acelerador de partículas da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos)



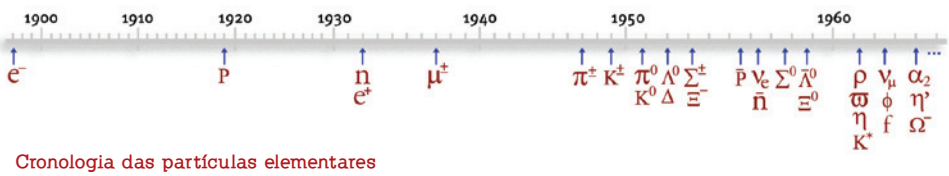
UM ZÔO SUBATÔMICO

PARTÍCULAS ESTRANHAS

Não bastasse o múon ser tratado como *persona non grata* no clube das partículas elementares, vieram outras surpresas inexplicáveis: começaram a ser detectadas partículas que se formavam em pares e que "viviam" muito mais tempo que o previsto. As "partículas estranhas" – mais tarde, reconhecidas como mésons K (ou káons) – eram apenas o prenúncio de uma torrente inesperada de novidades.

MULTA DE 10 MIL

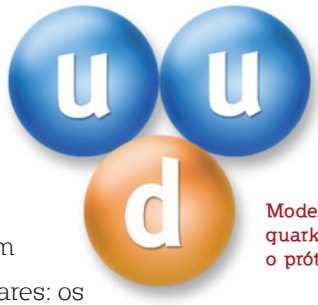
A partir da década da 1950, com o advento dos grandes aceleradores, formou-se um verdadeiro zoológico de novas partículas. Cada uma ganhou uma letra grega. Eram tantas que, nas palavras de um físico, temeu-se que o alfabeto grego não fosse suficiente. Em 1955, o físico norte-americano Willis Lamb Jr. descreveu o espanto de seus colegas: "[...] o descobridor de uma nova partícula elementar costumava ser agraciado com o prêmio Nobel, mas agora deveria ser punido com uma multa de $10 mil [dólares]". Abaixo, vê-se como o cardápio de partículas se avolumou na época.



Cronologia das partículas elementares

VOLTA À SIMPLICIDADE

SIMPLES E ELEGANTE



Modelo de quarks para o próton

Para dar alguma ordem e explicar as propriedades das partículas recém-descobertas, os físicos norte-americanos Murray Gell-Mann e George Zweig propuseram uma nova família de partículas subnucleares: os quarks. Inicialmente, ela conteria três membros: o up, o down e o strange. Segundo esse novo modelo, os mésons seriam formados por um par de quarks – na verdade, um quark e um antiquark –, e os bárions (prótons e nêutrons, por exemplo) conteriam um trio de quarks. Diferentes combinações desses quarks podiam explicar todos os mésons e bárions conhecidos. E o que manteria os quarks ligados para formar mésons e bárions? Entram em cena os glúons – o nome vem do inglês *glue*, que significa cola. Quarks permanecem ligados pela transferência mútua e frenética dos glúons, os verdadeiros "carregadores" da força forte nuclear.

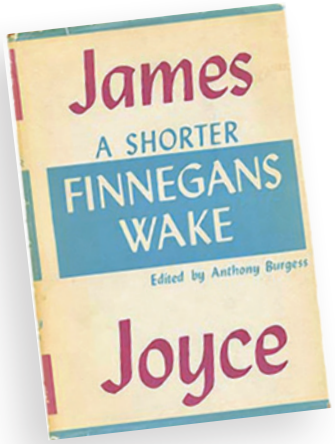
SEMPRE CONFINADOS


FOTO DE BRYAN POWELL/SXC

Diferentemente das forças gravitacional e eletromagnética, a força forte entre os quarks aumenta conforme aumenta a distância entre eles – pode-se imaginar que glúons agem como elásticos ligando os quarks. E isso tem uma implicação: quarks não são observados livres, vivendo, portanto, confinados dentro dos bárions e dos mésons.

ACEITAÇÃO DE UM MODELO

Mais uma peculiaridade dos quarks: eles têm cargas elétricas que são uma fração da carga do elétron ou do próton (+2/3 ou –1/3), pois só assim é possível explicar a carga elétrica dos bárions e dos mésons. Por exemplo, um próton é formado por dois quarks up (+2/3) e um down (-1/3). A soma total das cargas elétricas (2/3 + 2/3 - 1/3) é igual a 1. Por conta do confinamento e das cargas fracionárias, o modelo dos quarks foi recebido com ceticismo. No final da década de 1960, experimentos no acelerador de Stanford (Estados Unidos) – e conceitualmente similares ao experimento de Rutherford – deram fortes evidências de que prótons e nêutrons continham subestruturas. E o modelo de quarks – inicialmente encarado apenas como um artifício matemático – forneceu uma boa interpretação desses resultados, trazendo de volta simplicidade e certa elegância ao mundo das partículas elementares. Curiosidade: Gell-Mann tirou o nome quark de uma passagem – "Three quarks for Muster Mark" (Três quarks para o Senhor Mark) – do romance *Finnegans Wake*, do irlandês James Joyce (1882-1941).



MODELO PADRÃO

LISTAGEM COMPLETA

Em meados da década de 1970, os físicos já tinham uma listagem completa das partículas elementares da natureza, mesmo que muitas ainda estivessem por ser detectadas, pois precisavam ser criadas em colisões que reproduzissem os níveis de energia dos momentos iniciais do universo. Esse esquema teórico ganhou o nome de "modelo padrão de partículas e interações (ou forças) fundamentais". A tabela da página 45 mostra o atual quadro de partículas elementares.

PRECISÃO E SENSIBILIDADE

À medida que os aceleradores foram aumentando seu poder de acelerar partículas – bem como a precisão e a sensibilidade de detectores gigantes foram aprimoradas –, começaram a surgir os integrantes previstos pelo modelo padrão ou indicações indiretas da existência deles. Por exemplo: o quark charm (1974); o tau (1975), um primo mais pesado do elétron e do múon; o bottom (1977); os glúons (1979); as partículas W^+, W^- e Z^0 (1983), "carregadoras" da força fraca nuclear. E, finalmente, em 1995, o "último dos moicanos": o quark top. Uma lista das principais partículas conhecidas hoje pela física pode ser encontrada em www.cbpf.br/Publicacoes.

UNIFICANDO FENÔMENOS

A história da física pode ser contada pelo viés da unificação dos fenômenos. No século 17, Newton mostrou que a gravidade terrestre e a cósmica eram uma só. No século seguin-

te, o inglês Michael Faraday (1791-1867) uniu a eletricidade ao magnetismo. O eletromagnetismo, por sua vez, foi unificado com a óptica nas equações do escocês James Maxwell (1831-1879). Na área de partículas elementares, os norte-americanos Steven Weinberg, Sheldon Glashow e o paquistanês Abdus Salam (1926-1996) propuseram, na década de 1960, de forma independente, a teoria eletrofraca, que unificava as forças (ou interações) eletromagnética e fraca.

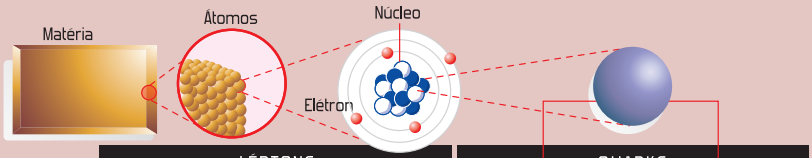
AS QUATRO FORÇAS

A seguir, está uma breve descrição das quatro interações (ou forças) fundamentais da natureza, bem como exemplos de fenômenos regidos por cada uma delas: ● a interação gravitacional, a qual se espera que ocorra pela troca de grávitons – partícula ainda não detectada –, age em todos os corpos com massa (ou energia), sendo responsável por atrair de volta à superfície um objeto lançado ao ar ou manter a Terra girando em torno do Sol; ● a interação eletromagnética – cuja partícula intermediária é o fóton – atua nos corpos dotados de carga elétrica, estando por trás de fenômenos como o atrito e a formação de moléculas; ● a interação fraca nuclear manifesta-se pela troca de três partículas (W^+, W^- e Z^0), agindo sobre léptons (partículas leves que não "sentem" a interação forte) e quarks e estando envolvida na radioatividade e na produção de energia nas estrelas; ● a interação forte, cuja partícula intermediária é o glúon, atua sobre uma propriedade que quarks e os próprios glúons têm – a chamada carga de cor, uma analogia com a carga elétrica nas interações eletromagnéticas –, sendo responsável por manter o núcleo atômico coeso e, em última instância, pela existência dos diferentes elementos da tabela periódica.

BREVE CENÁRIO BRASILEIRO

Desde a detecção do píon por Lattes em Bristol e Berkeley, o Brasil tem mantido uma longa tradição na área de física de partículas. Nas últimas décadas, o país vem participando dos principais projetos nos grandes aceleradores, como o Fermilab (Estados Unidos) e o CERN (Suíça). Físicos brasileiros, além de terem proposto a existência de novas partículas, como o Z^0, participaram de experimentos em que muitas delas – por exemplo, o méson sigma e o quark top – foram detectadas.

Tabela de partículas elementares



	LÉPTONS		QUARKS	
Partículas de massa Toda a matéria comum está neste grupo	**Elétron** Responsável pela eletricidade e reações químicas. Carga -1 (o pósitron tem carga +1).	**Neutrino do elétron** Não tem carga elétrica. Massa possivelmente muito pequena	**Up** carga + 2/3 Prótons têm 2 e nêutrons 1	**Down** carga -1/3 Prótons têm 1 e nêutrons têm 2
Partículas produzidas logo após o Big Bang. Hoje, são encontradas em raios cósmicos ou fabricadas em aceleradores	**Múon** Mais pesado que o elétron. Vive cerca de 2 milionésimos de segundo. Carga +/- 1	**Neutrino do múon** Não tem carga elétrica. Criado juntamente com múons quando certas partículas decaem	**Charm** Carga +2/3. Descoberto em 1974. Mais pesado que o up	**Strange** Carga -1/3. Descoberto em 1963. Mais pesado que o down
	Tau Ainda mais pesado. Extremamente instável. Descoberto em 1975. Carga +/-1	**Neutrino do tau** Não tem carga elétrica. Descoberto em 2000	**Top** Carga +2/3. Descoberto em 1995. Ainda mais pesado	**Botton** Carga -1/3. Descoberto em 1977. Ainda mais pesado
Partículas de forças Estas partículas transmitem as quatro interações fundamentais (grávitons ainda não foram descobertos)	Glúons: Portadores da força forte entre os quarks. Sentidos por quarks e glúons. A liberação explosiva de energia nuclear é resultado da força forte	Fótons: Partículas de luz portadoras da força eletromagnética. Sentidos por partículas carregadas. Eletricidade, magnetismo e química são resultados da força eletromagnética	Bósons vetoriais intermediários W^+ W^- Z^0: Portadores da força fraca. Sentidos por quarks e léptons. Algumas formas de radioatividade resultam da força fraca	Grávitons ?: Portadores da força gravitacional. Sentidos por todas as partículas. O peso que experimentamos é resultado da força gravitacional

Antimatéria: cada partícula tem sua antipartícula, com a mesma massa e carga elétrica oposta

O FUTURO

OS LIMITES DO MODELO

Até hoje, o modelo padrão – teoria na qual estão reunidas as forças eletromagnética, fraca e forte – passou com louvor nos testes a que foi submetido. Porém, ele tem limitações. Não indica, por exemplo, por que há três famílias (ou gerações) de léptons e quarks. Nem é capaz de explicar por que alguns léptons e quarks são tão mais pesados que seus companheiros. Experimentos recentes mostraram que os neutrinos têm massa, e isso cria para o modelo dificuldades que os físicos tentam agora driblar. Há muita expectativa em relação à detecção do chamado bóson de Higgs, uma partícula que seria a responsável pela geração das massas de todas as partículas, o que resolveria parte das limitações do modelo. Espera-se que isso ocorra com os experimentos no acelerador LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons), que entrou em funcionamento em 2008 no CERN.

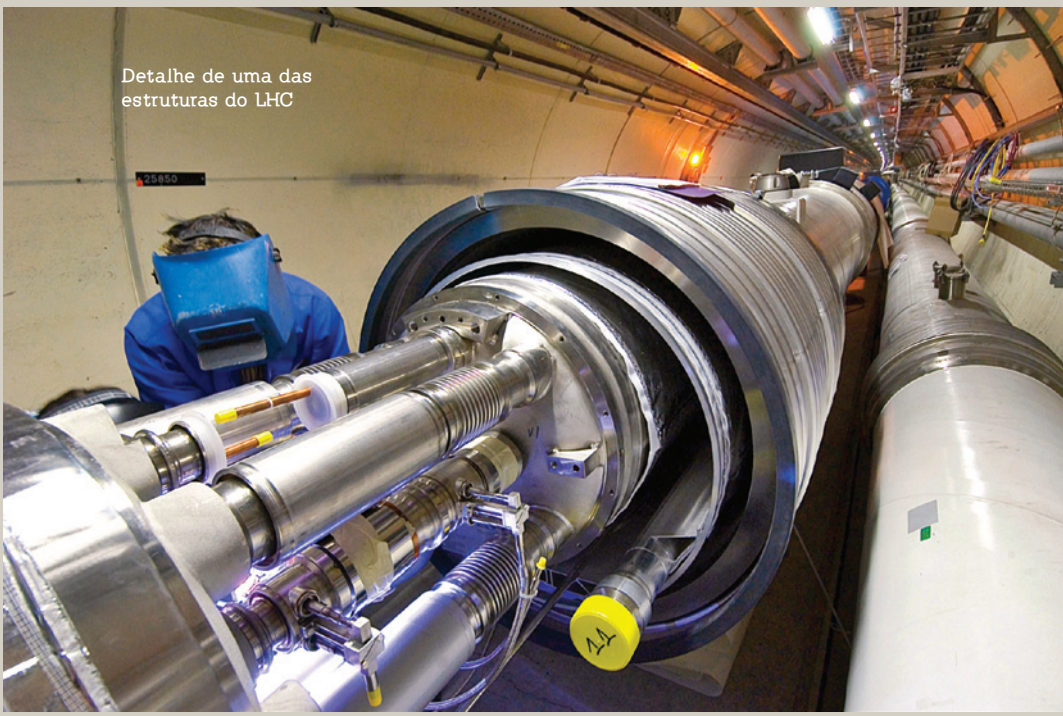
O QUE FALTA DESCOBRIR

Um século depois de a física incorrer no escândalo filológico de fraturar o átomo – na síntese perspicaz atribuída ao escritor argentino Jorge Luis Borges (1899-1986) –, unificar as quatro forças é ainda um sonho. O melhor candidato para isso é a chamada teoria de supercordas, que trata as partículas elementares não como pontos sem dimensão, mas como cordas diminutas. Cada modo de vibração dessas entidades representaria uma partícula elementar, assim como cada freqüência de vibração de uma corda de violino está associada a uma nota musical. O problema é que a teoria de supercordas

prevê não só um novo zoológico subatômico, as chamadas S-partículas, mas também dimensões espaciais extras, além das três conhecidas (altura, largura e comprimento). Se uma S-partícula for detectada nas colisões de altíssimas energias do LHC, uma nova revolução estará batendo à porta da física. Será uma evidência de que os físicos descobriram a trilha – ainda estreita e escura – rumo à unificação final. Acredita-se que o LHC também poderá testar se os quarks contêm subestruturas.

VOLTA ÀS ORIGENS

Talvez, 25 séculos depois dos primeiros questionamentos sobre a estrutura básica da matéria, os físicos cheguem a uma resposta definitiva. Ou, quem sabe, fenômenos e partículas inéditos surjam nas novas gerações de aceleradores. E aí uma nova era na física começará, forçando o homem novamente a se perguntar: "De que são feitas as coisas?".



Detalhe de uma das estruturas do LHC

LHC/CERN



Nanociência e Nanotecnologia

Modelando o futuro átomo por átomo

Uma nova revolução tecnológica está em curso. Trata-se da nanociência e da nanotecnologia, áreas com vasta gama de aplicações, que vão da produção de alimentos e fármacos capazes de melhorar a qualidade de vida das populações à criação de materiais com propriedades inusitadas e computadores ultravelozes baseados em fenômenos atômicos. Por essas razões, essas áreas são consideradas estratégicas para o desenvolvimento do país.

A nanociência e a nanotecnologia são intrinsecamente multidisciplinares. Os projetos nessas áreas são freqüentemente desenvolvidos por laboratórios e grupos de pesquisa estruturados em redes, o que estimula a integração das instituições e soma esforços e competências.

50. | **DOMANDO A MATÉRIA** | ESCAVAÇÃO PROFUNDA | ESTRUTURA FRAGMENTADA | MAIS ESPAÇO LÁ EMBAIXO | VIAGEM FANTÁSTICA

52. | **O NANOUNIVERSO** | NA ESCALA DO BILIONÉSIMO | DO ÁTOMO AO VÍRUS | MAIS QUE MINIATURIZAR | MODELOS NA NATUREZA | NÃO SÓ IMITAR

54. | **FEITOS E PROMESSAS** | PRINCIPAL CANDIDATO | MARCO EXPERIMENTAL | LISTA DE PROMESSAS | EM LARGA ESCALA

56. | **NO MUNDO** | IMPACTO GLOBAL | NOVA EDUCAÇÃO

57. | **NO BRASIL** | MELHOR INFRA-ESTRUTURA | DIVERSIDADE DE TEMAS | EM REDE | CAPACIDADE BEM SÓLIDA | PRODUÇÃO NACIONAL

60. | **AVENTURA NANOSCÓPICA** | EXPOSIÇÃO INTERATIVA | JOGOS, VÍDEOS, EFEITOS, MÚSICA... | POR TODO O BRASIL

61. | **COMO SERÁ O FUTURO?** | A REVOLUÇÃO COMEÇOU

EDITORES CIENTÍFICOS | Ernesto Kemp (Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas) | Henrique Lins de Barros (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas) | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas) | Marcelo Knobel (Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas) | Sandra Murriello (Museu Exploratório de Ciências de Campinas/Universidade Estadual de Campinas)

DOMANDO A MATÉRIA

ESCAVAÇÃO PROFUNDA

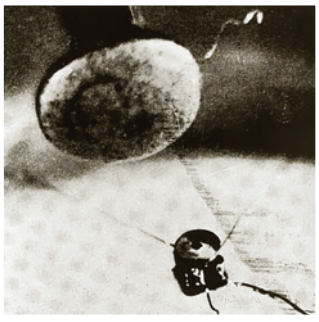
O homem subjugou a pedra, a argila, o ferro, o aço e, mais recentemente, o silício dos chips de computadores, transformando estas substâncias, entre tantas outras, em matérias-primas. Porém, só no século 19 ele iniciou sua escavação profunda rumo à escala atômica, quando extraiu da matéria sua primeira partícula elementar, o elétron.

ESTRUTURA FRAGMENTADA

No século passado, a matéria foi imensamente fragmentada, e os estilhaços foram capturados, estudados e batizados. Prótons, nêutrons, mésons, neutrinos, quarks e bósons integram uma lista que inclui centenas de partículas. Assim, o Homo sapiens, quase 200 mil anos depois de seu surgimento, aprofundou sua viagem rumo ao coração da matéria – e isso mesmo antes de conhecer detalhes do interior do planeta que o abriga.

MAIS ESPAÇO LÁ EMBAIXO

Ainda em 1959, o físico norte-americano Richard Feynman (1918-1988) – que, por sinal, havia trabalhado pouco antes no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro (RJ) –, propôs, por meio da palestra "Há muito mais espaço lá embaixo", uma nova relação do homem com a matéria: usar átomos e moléculas como ti-



CALTECH ARCHIVES

Motor miniaturizado comparado à cabeça de um alfinete

ACERVO CBPF

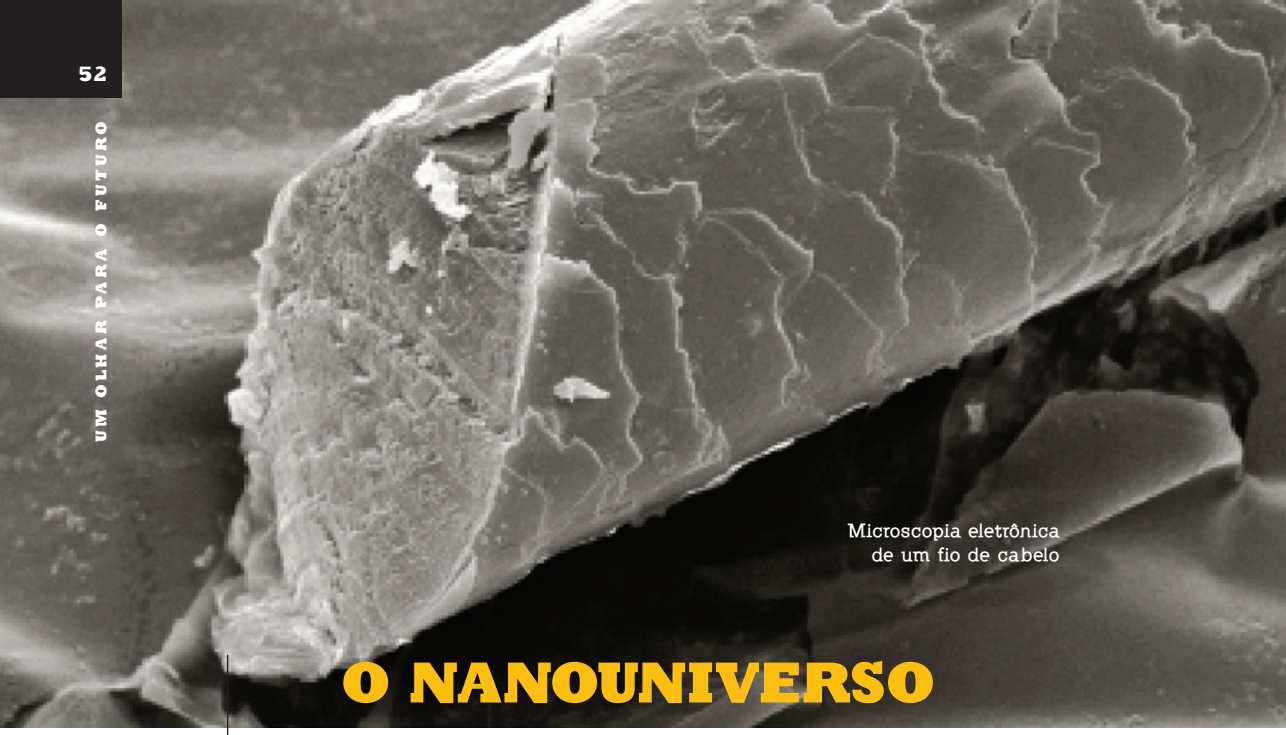


Almoço durante uma das visitas do físico norte-americano Richard Feynman ao Brasil. À esquerda da mesa, na ordem, Roberto Salmeron, Gabriel Fialho, Francisco Oliveira Costa, Gerard Hepp, Álvaro Diffini, César Lattes, Antonio José da Costa Nunes, Ugo Camerini, José Leite Lopes, Paulo Emidio Barbosa e Homero L. César. À direita, na ordem, Homero Brandão, Henry British Lins de Barros, Nelson Lins de Barros, Neusa Margem (depois Amato), Feynman, Elisa Frota-Pessôa, Guido Beck, Helmut Schwartz, Jayme Tiomno, Reinhard Oehme e George Rawitscher

jolos para a construção de diminutos artefatos. Hoje, essas idéias são tidas como o marco de fundação de duas áreas: a nanociência e a nanotecnologia.

VIAGEM FANTÁSTICA

Como resposta a um desafio proposto por Feynman, foi construído um motor com 0,38mm de diâmetro. Nessa época, a imaginação popular em relação às possibilidades da escala atômica começou a ser capturada com o lançamento do livro *Viagem fantástica*, de Isaac Asimov (1920-1992), em que uma nave e sua tripulação são miniaturizadas e injetadas no corpo de um cientista. Objetivo da missão: destruir um coágulo sangüíneo e salvar a vida do paciente. Essa obra tornou-se um clássico da ficção científica e fonte de inspiração para uma geração.



Microscopia eletrônica de um fio de cabelo

O NANOUNIVERSO

NA ESCALA DO BILIONÉSIMO

Há várias definições para nanociência e nanotecnologia, mas basicamente essas áreas lidam com o projeto, a manipulação, a produção e a montagem no nível atômico e molecular, ou seja, na escala do bilionésimo de metro (ou nanômetro). O conjunto de técnicas usadas para isso vem (e virá) da integração da física, da química, da biologia, das engenharias e da modelagem computacional.

DO ÁTOMO AO VÍRUS

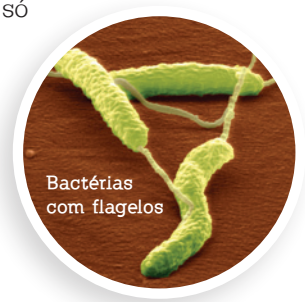
O bilionésimo é representado pelo prefixo nano ("anão", em grego) ou matematicamente por 10^{-9} (0,000000001). As dimensões típicas da nanociência e da nanotecnologia vão de 0,1 nanômetro (0,1nm) a 100 nanômetros (100nm), ou seja, do tamanho de um átomo até o de um vírus. Para se ter uma idéia de comparação, um fio de cabelo humano tem espessura de cerca de 30 mil nm.

MAIS QUE MINIATURIZAR

A nanociência e a nanotecnologia prometem tornar as coisas menores, mais rápidas, mais fortes e mais eficientes. Porém, isso não deve ser confundido com miniaturizar o que já foi inventado. O cerne dessas áreas está em entender e domar o comportamento da matéria na escala nanométrica, pois se sabe que as propriedades macroscópicas e nanoscópicas da matéria muitas vezes diferem diametralmente, a ponto de o comportamento nessas duas escalas ser oposto – por exemplo, o que repele passa a atrair.

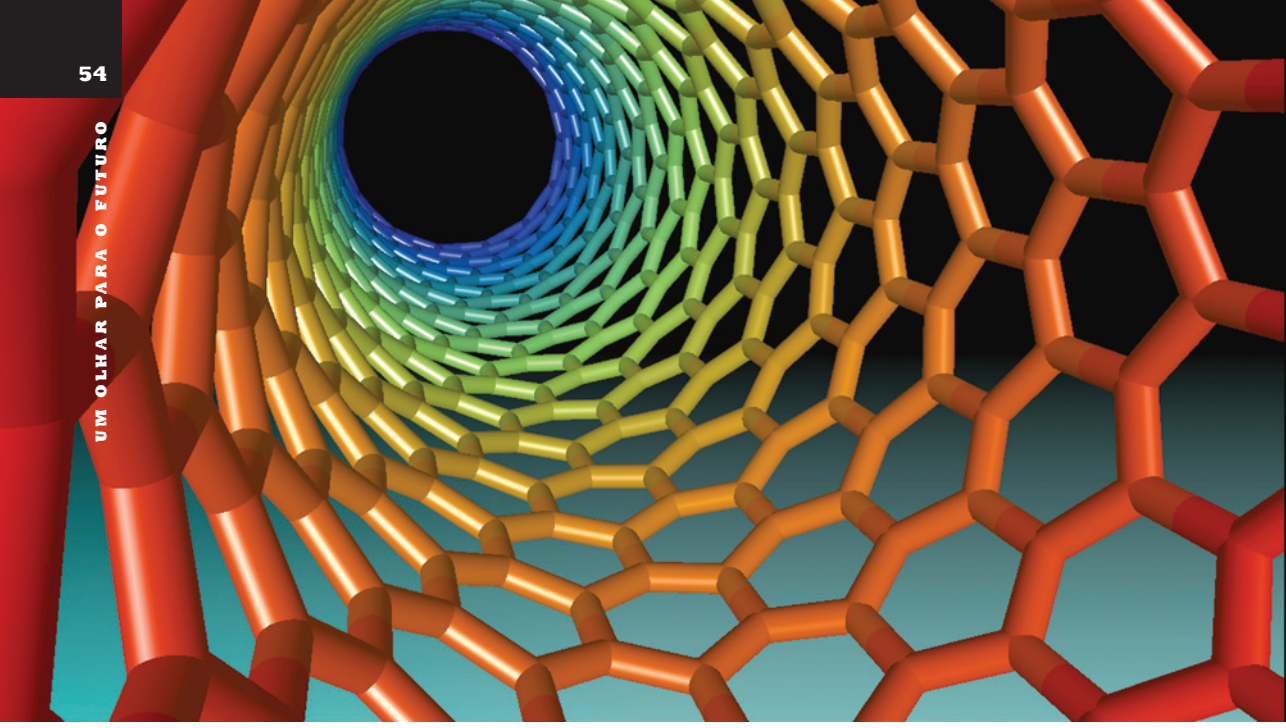
MODELOS NA NATUREZA

Os processos biológicos são fonte de inspiração para os pesquisadores da nanociência e da nanotecnologia. Razão: nos últimos milhões de anos, a evolução tem sido a grande nanoartesã, ao arrancar, capturar, colocar ou deslocar átomos com extrema precisão – técnica que o homem só aprendeu há poucas décadas, com o advento de microscópios especiais capazes de funcionar como guindastes para o mundo atômico.


Bactérias com flagelos

NÃO SÓ IMITAR

A natureza produz equipamentos de extrema engenhosidade. Por exemplo, flagelos de bactérias são nanomotores que funcionam alimentados com prótons. O DNA (material genético) é um "disco rígido" que armazena as informações de um indivíduo. Contudo, não se trata apenas de imitar esses feitos: em muitos casos, será necessário aperfeiçoar os mecanismos biológicos conhecidos, para dar novas funções aos inventos. Tarefa mais árdua ainda: desenvolver técnicas para reproduzir em escala industrial (ou seja, com precisão e controle de qualidade) o que for desenvolvido no laboratório.



PIOTR ROTKIEWICZ

FEITOS E PROMESSAS

PRINCIPAL CANDIDATO

Para muitos especialistas, a ciência e a tecnologia do bilionésimo de metro será a próxima revolução tecnológica da humanidade, tendo como candidato a principal matéria-prima o elemento químico carbono, que forma materiais tão díspares quanto o carvão e o diamante.

MARCO EXPERIMENTAL

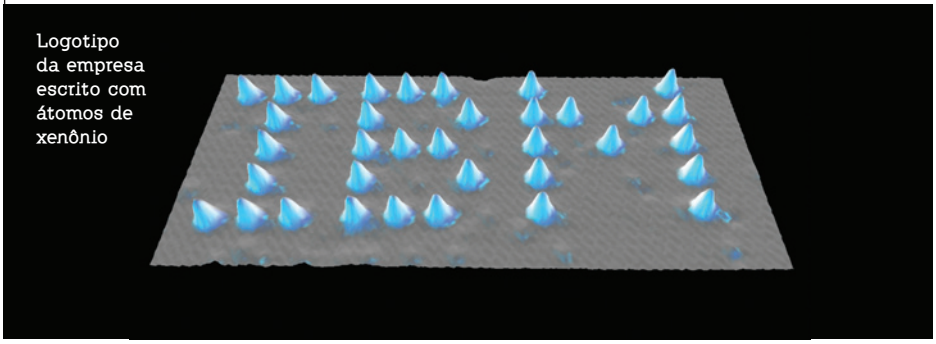
Em 1989, trinta anos depois da palestra de Feynman, a nanotecnologia obteve um grande feito experimental: cientistas da IBM escreveram o nome dessa empresa norte-americana sobre uma placa de níquel, usando 35 átomos de xenônio. De lá para cá, esse tipo de "Lego nanoscópico" tornou-se uma técnica comum, demonstrando que o mundo nanoscópico poderia ser (re)modelado.

LISTA DE PROMESSAS

É comum que toda jovem revolução tecnológica venha acompanhada tanto de entusiasmo quanto de uma lista de promessas. A nanotecnologia não é exceção. Alguns itens dessa lista: • computadores capazes de calcular, em segundos, tarefas que levariam bilhões de anos para a mais avançada dessas máquinas de hoje; • materiais mais leves e resistentes para a construção de casas, edifícios, navios, aviões e espaçonaves; • nanochips para monitorar as condições do interior do corpo humano; • anticorpos sintéticos capazes de atacar e destruir vírus, bactérias ou células cancerígenas; • nanoímãs que, guiados por um campo magnético externo, seriam levados a qualquer parte do corpo humano, carregando medicamentos; • componentes eletrônicos formados por uma única molécula; • telas de TV dobráveis; • tecidos para roupas que poderiam mudar de cor, endurecer ou se autoregenerar; • nanorrobôs para desobstruir vasos sangüíneos.

EM LARGA ESCALA

Hoje, em larga escala, estão sendo produzidas nanopartículas (empregadas na fabricação de cosméticos, tintas, revestimentos, aços, absorvedores de odores etc.) e nanotubos, usados em sensores para gases e substâncias tóxicas. Em 2003, havia algo em torno de 500 fábricas desses produtos no planeta.



Logotipo da empresa escrito com átomos de xenônio

IBM

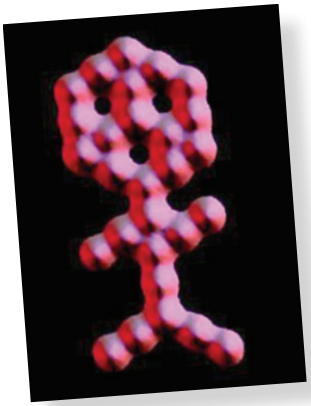
NO MUNDO

IMPACTO GLOBAL

Estima-se que, por volta de 2015, a produção industrial global em nanotecnologia atinja US$ 1 trilhão. O número de empregos nessa área chegaria a 2 milhões. Setores como a indústria de semicondutores passariam a ser totalmente dependentes de técnicas e produtos da nanotecnologia. O impacto dessas novas tecnologias seria elevado também no ramo químico e farmacêutico. Hoje, estima-se que o total de recursos governamentais e privados aplicados nessas áreas atinjam a casa dos US$ 5 bilhões por ano.

NOVA EDUCAÇÃO

Os Estados Unidos, a Comunidade Européia, a Coréia do Sul e o Canadá já lançaram programas educacionais para formar os nanocientistas e nanotecnólogos do futuro. Uma das ações é remodelar currículos, dos primeiros anos escolares às universidades. Revoluções tecnológicas trazem embutida uma regra: quem se adaptar primeiro sairá na frente e conquistará mais mercados.



PETER ZEPPENFELD E DONAL EIGLER/IBM

"Homem atômico"

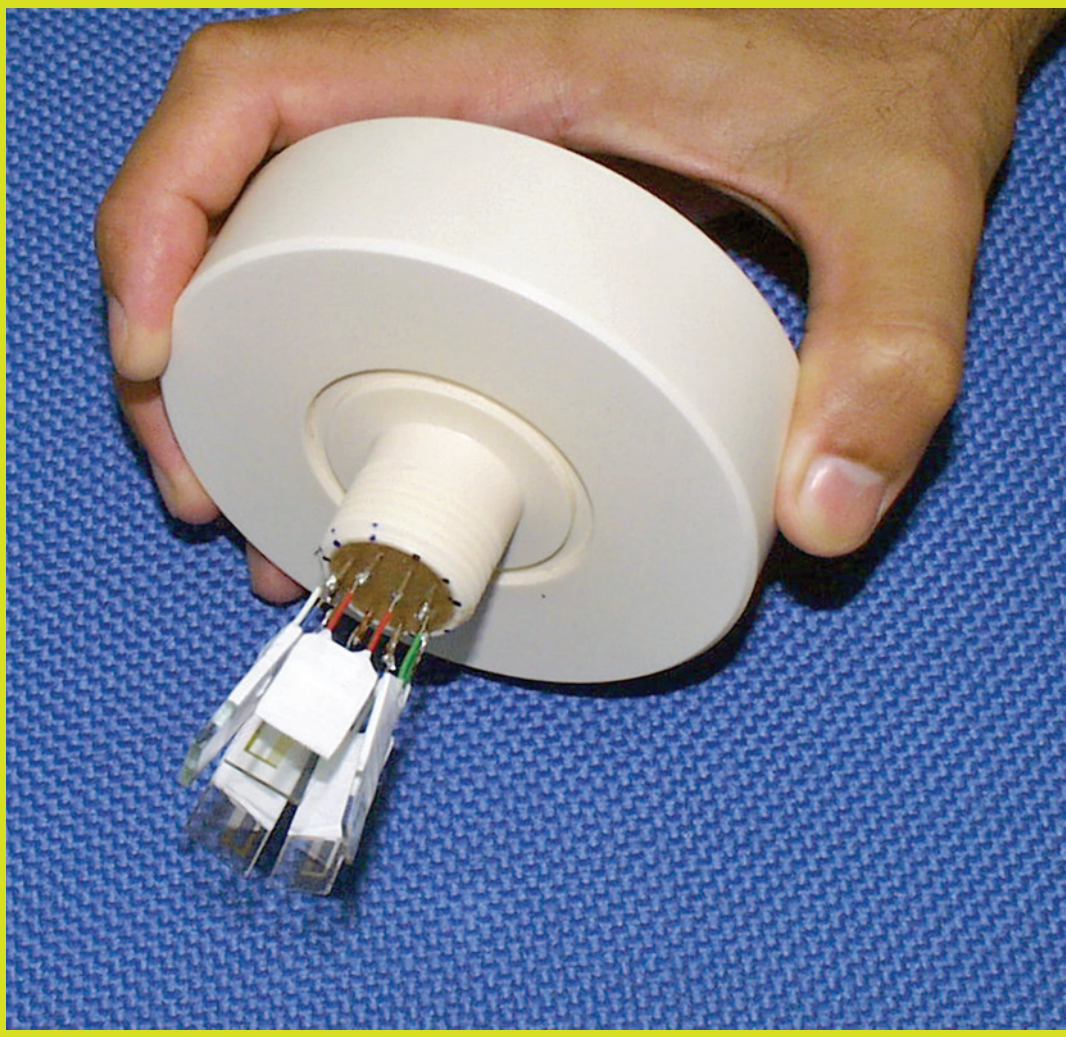
NO BRASIL

MELHOR INFRA-ESTRUTURA

A infra-estrutura do Brasil é a melhor da América Latina quando se trata de nanociência e nanotecnologia. Neste início de século 21, estima-se que haja cerca de mil pesquisadores trabalhando nessas áreas. E também há uma experiência educativa em andamento, na forma de uma exibição itinerante que aborda os conceitos básicos da nanociência e da nanotecnologia (ver "NanoAventura").

DIVERSIDADE DE TEMAS

As pesquisas em nanociência e nanotecnologia no Brasil englobam grande diversidade de temas: nanobiotecnologia, química supramolecular, nanomagnetismo, semicondutores, nanoobjetos (em particular, nanotubos de carbono), sensores, instrumentação e teoria. Essas pesquisas envolvem equipes multidisciplinares e a necessidade de colaboração entre elas. Há diversos pólos que se destacam nessas pesquisas: o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro (RJ), o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas (SP), a Universidade Estadual de Campinas (SP), a Universidade de São Paulo, a Universidade Federal de São Carlos (SP), a Universidade Federal de Minas Gerais, a Universidade Federal de Pernambuco, a Universidade Federal de Santa Catarina, a Universidade Federal do Rio de Janeiro e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA

EM REDE

As diversas áreas e instituições têm se organizado em redes temáticas para realizar pesquisas de ponta em nanociência e nanotecnologia: • Rede de Materiais Nanoestruturados; • Rede de Nanotecnologia Molecular e de Interfaces; • Rede de Pesquisa em Nanotecnologia; • Rede Cooperativa para a Pesquisa em Nanodispositivos Semicondutores e Materiais Nanoestruturados.

Na página ao lado,
"língua eletrônica",
desenvolvida pela Empresa Brasileira
de Pesquisa Agropecuária
e capaz de detectar sabores
(doce, salgado, amargo e azedo)

CAPACIDADE BEM SÓLIDA

Além dessas redes nacionais, há diversos grupos autônomos de pesquisa atuando nessas áreas, bem como projetos específicos (financiados pelas agências estaduais de fomento científico) e os de grande escala, como o Instituto do Milênio de Nanotecnologia. Aprovado em janeiro de 2002 e reunindo cerca cem pesquisadores de trinta instituições, esse instituto virtual tem como ênfase os chamados materiais nanoestruturados (ou seja, formados por camadas nanométricas de átomos ou moléculas). Há também projetos individuais e redes menores no âmbito de colaborações nacionais e internacionais. Em resumo: há uma capacidade científica bem sólida instalada no Brasil nessas duas áreas.

PRODUÇÃO NACIONAL

Produtos que empregam matérias-primas nanoscópicas já estão surgindo no Brasil. Dois exemplos: um dosímetro pessoal para a radiação ultravioleta solar, fabricado pela empresa Ponto Quântico, em Recife (PE), e a "língua eletrônica", desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e capaz de detectar sabores (doce, salgado, amargo e azedo).





FOTOS NANOAVENTURA

AVENTURA NANOSCÓPICA

EXPOSIÇÃO INTERATIVA

A NanoAventura (www.nanoaventura.org.br) é uma exposição interativa desenvolvida para atrair o interesse do público infantil e adolescente para a nanociência e a nanotecnologia. Trata-se da primeira exposição organizada pelo Museu Exploratório de Ciências da Universidade Estadual de Campinas, realizada em parceria com o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), com apoio da Fundação Vitae e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp).

Nas fotos acima, alunos participando do NanoAventura

JOGOS, VÍDEOS, EFEITOS, MÚSICA...

Noções básicas do nanomundo, como o conceito de escala e medida, bem como a observação e a manipulação de átomos e moléculas, são apresentadas por meio de diversas técnicas de comunicação e imersão. A proposta é que os visitantes da NanoAventura vivenciem uma experiência lúdica e educativa que integra elementos reais e virtuais e que combina jogos eletrônicos, vídeos, projeções 3D, performances, efei-tos especiais e músicas.

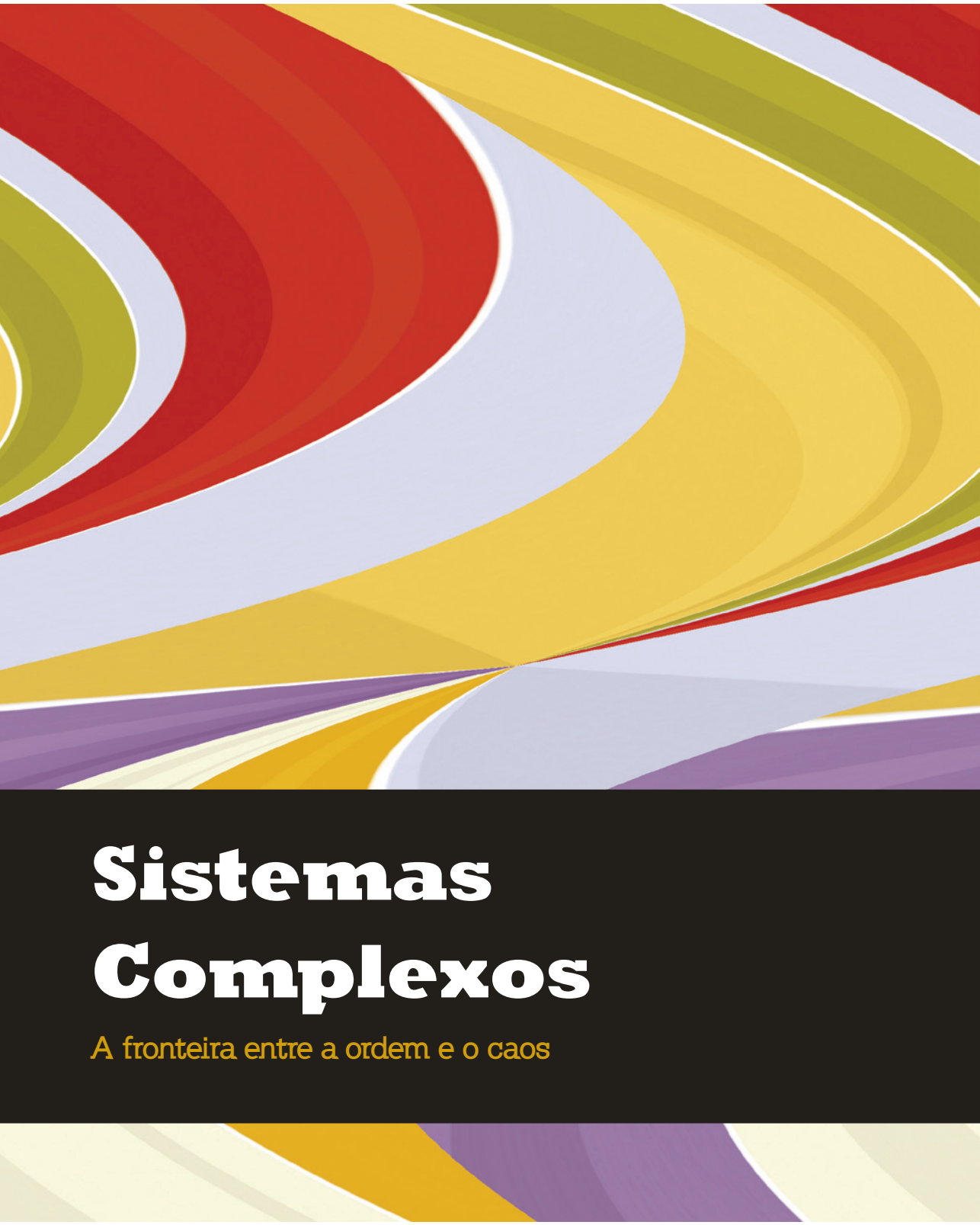
POR TODO O BRASIL

Preparada para ser itinerante, a NanoAventura foi inaugurada em abril de 2005 e já passou por vária cidades brasileiras, entre elas Campinas (SP), São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Porto Alegre (RS), sendo visitada por dezenas de milhares pessoas.

COMO SERÁ O FUTURO?

A REVOLUÇÃO COMEÇOU

Depois da agricultura, indústria e microeletrônica, a próxima revolução tecnológica já tem nome: nanotecnologia. E se espera que ela tenha um impacto social superior ao de suas antecessoras. Desde já, especialistas, empresas e organizações não governamentais discutem as implicações socioambientais – e mesmo éticas – dessa nova área. É arriscado falar sobre o futuro, mas tudo indica que a nanociência e a nanotecnologia serão parte dele. E essa revolução já começou.



Sistemas Complexos

A fronteira entre a ordem e o caos

Os sistemas complexos são uma área interdisciplinar que ganha cada vez mais importância na busca incessante da ciência pela expansão dos limites de nosso conhecimento e das leis que regem os fenômenos da natureza.

O estudo de sistemas complexos é um dos campos de pesquisa mais importantes na atualidade, tendo vários grupos de excelência dedicados ao assunto, inclusive no Brasil. Foi aqui que nasceu uma generalização da mecânica estatística que hoje é estudada em dezenas de países e aplicada com sucesso a sistemas complexos nos quais a tradicional estatística de Boltzmann-Gibbs perde sua aplicabilidade natural – como é o caso de sistemas em que há o fenômeno da turbulência.

64. | **UMA FRONTEIRA SUTIL** | ENTRE A ORDEM E O CAOS

65. | **NO PRINCÍPIO... A ORDEM** | DE PEDRAS A COMETAS

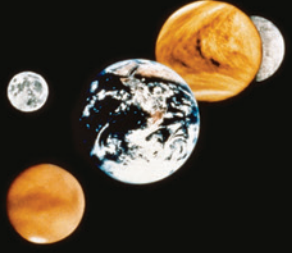
66. | **E FEZ-SE... O CAOS** | TRÊS CORPOS | O QUE É O CAOS?

67. | **E O MUNDO FICOU... COMPLEXO** | O QUE É COMPLEXIDADE? | COMPLICADO É COMPLEXO? | SELVAGEM E CIVILIZADO

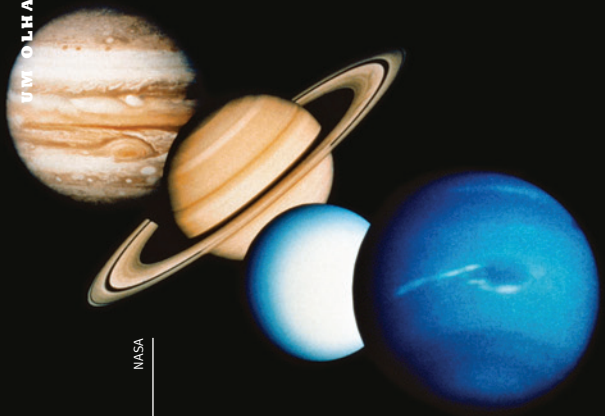
70. | **DO SABER INCOMPLETO** | DAS PARTES AO TODO | RELAÇÃO COM OS VIZINHOS | NÃO EXTENSIVOS | NOVA MECÂNICA ESTATÍSTICA | O GRAU DE ORGANIZAÇÃO

73. | **NÃO EXTENSIVA** | CAVALOS CEGOS E AEROPORTOS

EDITOR CIENTÍFICO | Constantino Tsallis (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)



UMA FRONTEIRA SUTIL



NASA

Da Antigüidade até o final do século 19, o homem enxergou uma natureza regulada pela ordem, da Terra à esfera celeste. Há cerca de cem anos, porém, espantou-se com a imprevisibilidade dos fenômenos caóticos. Supôs serem exceções num universo quase perfeito. Enganou-se. Eram a regra. E, aos poucos, a imagem de um universo exclusivamente determinístico se desvaneceu.

ENTRE A ORDEM E O CAOS

Da persistente monotonia da órbita de um planeta à pura erraticidade de bilhões e bilhões de partículas enfurecidas de um gás, praticamente todos os sistemas – caóticos ou não – aparentavam estar essencialmente sob controle – o homem aprendeu até a domar estruturas caóticas, utilizando vestígios de ordem que sobrevivem dentro delas. E, então, se apontou para uma fronteira sutil, até então uma penumbra entre a ordem e o caos. Lá estavam – posando como um novo desafio – os sistemas complexos. Para entendê-los – ainda que minimamente –, é preciso visitar os dois extremos dessa fronteira: a ordem e o caos.

NO PRINCÍPIO... A ORDEM

Depois de vencer criaturas gigantes, Zeus – o deus supremo do Olimpo – instaurou seu reinado de ordem. E, assim, se fez um cosmo subjugado por leis, belo e harmônico, regular e racional. No mundo dos homens – que atende por realidade –, acreditava-se que a natureza não era diferente: ela foi lida, ao longo dos vinte séculos da Era Cristã, como um livro escrito por Deus. E, portanto, obra perfeita.

DE PEDRAS A COMETAS



A crença no determinismo era representada pelas idéias do físico inglês Isaac Newton (1642-1727). Sua mecânica explicava da trajetória de uma pedra atirada para cima ao movimento de planetas e cometas. Pêndulos, cronômetros, máquinas a vapor: o homem reproduzia em suas criações o determinismo estrito. Para o matemático e astrônomo francês Simon de Laplace (1749-1827), o universo de hoje era o efeito daquele de ontem e a causa do que virá.

E FEZ-SE... O CAOS

Por quase três séculos, a hegemonia da mecânica newtoniana manteve-se suprema, inabalável. Não havia problemas sem solução, apenas aqueles que ainda não haviam sido resolvidos. Porém, o final do século 19 traria surpresas.

TRÊS CORPOS



Para comemorar os 60 anos do rei Oscar II (1829-1907), da Suécia e Dinamarca, foi oferecido um prêmio cujo tema era a estabilidade do sistema solar. O matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) encarou o desafio. Porém, ao perceber a dificuldade do problema, reduziu-o a apenas três corpos interagindo pela gravidade. Com esse trabalho, Poincaré não só ganhou o prêmio, em 1889, mas descortinou o caos. E este, arrastando consigo a imprevisibilidade, maculou uma natureza até então "bem-comportada".

O QUE É O CAOS?

Para que um sistema tenha comportamento imprevisível – ou caótico –, ele deve obedecer a pelo menos três regras: a) ser dinâmico, ou seja, se alterar à medida que o tempo passa – um carro se movendo numa estrada; b) ser não linear, isto é, sua resposta não é proporcional à perturbação – uma simples declaração pode causar uma revolução de estado; c) ser muito sensível a perturbações mínimas de seu estado, ou seja, uma alteração desprezível no presente pode causar, no longo prazo, uma mudança imprevisível – uma leve variação na trajetória de uma sonda espacial pode levá-la para longe de seu destino.

FOTO HENRI MANUEL/SMITHSONIAN INSTITUTION LIBRARIES



E O MUNDO FICOU... COMPLEXO

Até a década de 1980, cada campo do conhecimento, isoladamente, dava um tratamento específico a seus sistemas complexos. Isso valia da física à antropologia, da economia à biologia. Porém, de lá para cá, percebeu-se que todos os sistemas complexos tinham propriedades universais. Nasceu, assim, uma nova disciplina científica e, talvez, a mais interdisciplinar delas: os sistemas complexos, teoria que usa conceitos de áreas tão diversas quanto caos, termodinâmica (estudo do calor), autômatos celulares (estudo da vida artificial) e redes neurais (estudo das ligações entre as células nervosas cerebrais). Sua principal ferramenta será o computador.

O QUE É COMPLEXIDADE?

Ainda não há resposta definitiva para essa pergunta. Pode-se dizer que um sistema é tão mais complexo quanto maior for a quantidade de informação necessária para descrevê-lo. Porém, essa é uma entre muitas definições. Sabe-se que a complexidade só emerge em sistemas com muitos constituintes. Por exemplo, no cérebro humano, com 100 bilhões de células nervosas. Porém, um gás, com bilhões de constituintes, é um sistema simples. Por quê? Basta estudar uma pequena parte dele para entender o todo, o que é impossível em sistemas complexos.



FOTO ADRIANA MARTINS/SXC

COMPLICADO É COMPLEXO?

Não. Uma máquina sofisticada, com grande número de partes, é complicada, mas não complexa, pois terá comportamento previsível. De um avião, por exemplo, não vai emergir – ironicamente – nada semelhante ao sofisticado movimento que faz uma ave alçar vôo. Importante: a reunião de elementos complexos pode gerar um comportamento simples e previsível. Por exemplo, a Terra girando em torno do Sol.

SELVAGEM E CIVILIZADO

Sistemas caóticos e complexos têm um aspecto em comum: são não lineares. Mas, no caótico, a imprevisibilidade é "selvagem"; no complexo, "civilizada". Além disso, as propriedades abaixo podem estar presentes em sistemas complexos tão diversos quanto um ser vivo, um ecossistema ou a economia de um país: • partes que se relacionam entre si; • interação com o meio; adaptação ao meio; • tratamento da informação em vários níveis; • ordem emergente (criação espontânea de ordem a partir de estados desordenados); • propriedades coletivas emergentes (novos comportamentos causados pela interação entre as partes); • criticalidade auto-organizada (estado crítico, na fronteira entre a ordem e o caos, em que a mais leve perturbação pode causar uma reação em cadeia; por exemplo, um simples floco de neve desencadeando uma avalanche) • estrutura fractal (formatos que não se tornam mais simples quando observados em escalas cada vez menores).

DO SABER INCOMPLETO

Na segunda metade do século 19, o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e o austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) juntaram a mecânica newtoniana à estatística para estudar gases. Pouco depois, o norte-americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903) deu a essas idéias formulação mais abrangente. Nascia, assim, a mecânica estatística (ME).

DAS PARTES AO TODO

A ME de Boltzmann-Gibbs – como ficou conhecida – aplica-se a sistemas nos quais é impossível saber com precisão como cada um dos constituintes vai se comportar – nos gases, os átomos; no cérebro, os neurônios; nas galáxias, as estrelas etc. Por esse predicado, tornou-se uma ferramenta adequada ao estudo dos sistemas complexos.

RELAÇÃO COM OS VIZINHOS

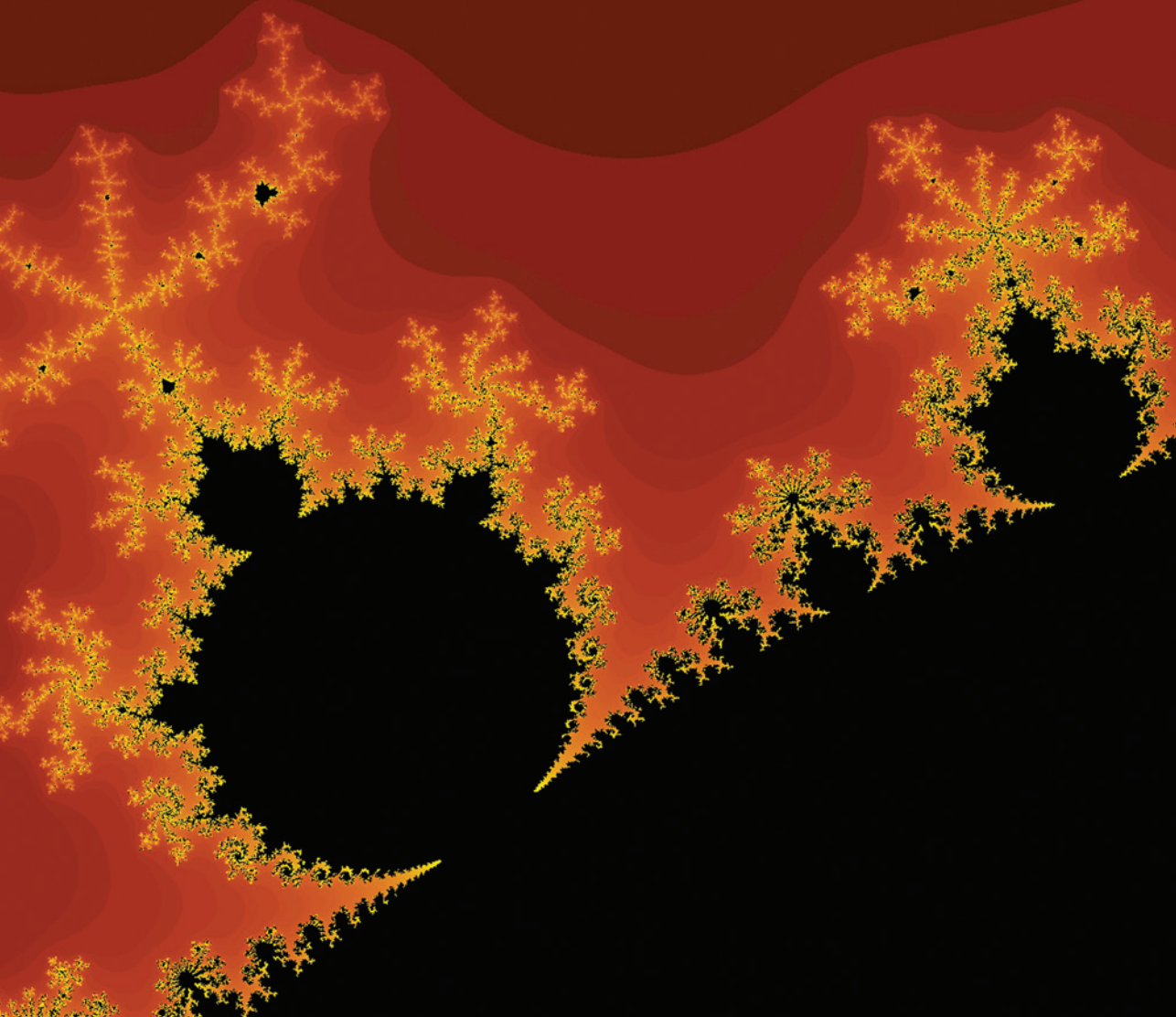
No entanto, a ME de Boltzmann-Gibbs tem suas limitações. É basicamente aplicada a sistemas que não trocam mais calor com o meio – estão, portanto, em equilíbrio térmico – e cujos constituintes se relacionam apenas com seus vizinhos (interação de curto alcance). São os sistemas extensivos.



Ludwig Boltzmann

NÃO EXTENSIVOS

Mas há vários sistemas com correlação de longo alcance (espacial ou temporal). Neles, o comportamento de uma parte depende de outra distante no espaço e no tempo. Exemplo: um ciclone, no qual volumes de ar, mesmo distantes, precisam estar correlacionados – caso contrário, não atingiriam o grau de organização suficiente para gerar aquele cone de ar que rodopia no espaço. Esses são sistemas não extensivos.



NOVA MECÂNICA ESTATÍSTICA

Em 1988, uma nova ME foi idealizada pelo físico Constantino Tsallis, do CBPF. Ela vem sendo usada com sucesso para explicar o comportamento de sistemas complexos não extensivos, como materiais magnéticos e vítreos, galáxias, choque de partículas, processamento de imagens, grandes moléculas como o DNA, bolsa de valores e até aspectos da lingüística. Denominada mecânica estatística não extensiva – ou, por vezes, estatística de Tsallis –, ela generaliza a ME de Boltzmann-Gibbs, abrangendo assim fenônemos não extensivos e fora do equilíbrio.

O GRAU DE ORGANIZAÇÃO

Na ME, um conceito fundamental é o de entropia, comumente designado pela letra S. A partir dele, é possível caracterizar o nível de organização de um sistema e, com isso, deduzir propriedades importantes como pressão, volume e temperatura em um gás, ou analisar a freqüência de disparo de impulsos elétricos entre as células nervosas do cérebro de um mamífero. No entanto, a entropia utilizada na ME de Boltzmann-Gibbs ($S_{BG} = k \ln W$, onde k é uma constante e W o número de microestados do sistema) se aplica basicamente a sistemas em equilíbrio térmico. Já a chamada entropia de Tsallis ($S_q = k W^{1-q} - 1/(1 - q)$, onde q é o índice de não extensividade) vale para situações de metaequilíbrio. Ou seja, nas quais os sistemas estão rumando ao equilíbrio, tal como um ser vivo envelhecendo, sendo a morte a situação de equilíbrio com o meio.

NÃO EXTENSIVA

Em 1991, outro trabalho ampliou as idéias da ME não extensiva e se tornou o artigo da física brasileira mais citado mundialmente na década de 1990. Hoje, são cerca de 700 pesquisadores, em 45 países, trabalhando com a ME não extensiva. Mais de mil artigos já foram publicados, e ocorreram vários encontros sobre o tema no Brasil e exterior.

CAVALOS CEGOS E AEROPORTOS

A ME não extensiva carrega em seu bojo o fator "q" (índice de não extensividade), que guarda muito da essência dessa nova estatística. Mas o que ele significa? É a isso que seu criador se dedica no momento. E ele já tem uma idéia, que pode ser retratada em analogias. Imagine uma criança que foi fadada a um destino cruel: passar a vida montada em um cavalo cego vagando pelo Brasil. Depois de décadas e décadas nessa árdua empreitada, ela, já adulta, terá praticamente passado o mesmo número de vezes por cada cidade do território brasileiro – sistemas com esse comportamento, gases, por exemplo, são ditos altamente caóticos. Agora, outro cenário: essa criança vai viajar o resto da vida por uma grande companhia aérea. É muito provável que ela passe muitas vezes pelo aeroporto de São Paulo e poucas pelo de Rio Branco, no Acre – um sistema fracamente caótico. Guardada as limitações dessas analogias, suspeita-se que o índice de não extensividade (q) tenha a ver com um comportamento semelhante de sistemas complexos que preferem certos estados a outros.

FOTO ZECA GUIMARÃES/ACERVO CBPF



Uma das torres do edifício do CBPF, no Rio de Janeiro (RJ)



Raios Cósmicos

Energias extremas no universo

Os raios cósmicos são essas estranhas partículas que nos chegam de todos os cantos do universo. Importante para o surgimento da física de partículas elementares – que estuda os constituintes últimos da matéria e que teve um desenvolvimento prodigioso na segunda metade do século passado –, a descoberta do méson pi, da qual participou o físico brasileiro César Lattes (1924-2005), teve também influência decisiva na criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e no desenvolvimento da física no Brasil.

Nas últimas decadas, aceleradores de partículas cada vez mais poderosos dominaram o panorama da física experimental de partículas. No entanto, novos desafios científicos renovaram recentemente o interesse e a importância do estudo de raios cósmicos, em particular daqueles de energias altíssimas.

A construção de um observatório nos pampas argentinos – ocupando um espaço superior a três vezes a área da cidade do Rio de Janeiro – já possibilitou resolver parte dos enigmas que aqui apresentamos.

76. | **INVASORES DE CORPOS** | BOMBARDEIO ESPACIAL | UM EVEREST A 200 MIL KM/H

78. | **ESTILHAÇOS DE MATÉRIA** | DOIS RUMOS | PRÓTONS E NÚCLEOS | ANTIMATÉRIA E ESTRANHAS

79. | **DA TORRE EIFFEL A BALÕES** | UM PADRE E UM BALONISTA | RAIOS OU CORPÚSCULOS? | CHUVEIRO EXTENSO

80. | **O MÉSON PI** | CHUVEIROS PENETRANTES | LATTES EM BRISTOL | NO ACELERADOR

82. | **DE ONDE VÊM?** | ESTRELAS MORIBUNDAS | NAS VIZINHANÇAS

83. | **QUANTOS CHEGAM?** | PIZZA QUILOMÉTRICA | UM POUCO DE FÍSICA | SOBEM DEZ, CAEM MIL

84. | **OS ZÉVATRONS CHEGARAM** | VOLCANO RANCH | NO CHÃO E NO AR | RECORDE NO OLHO DE MOSCA

86. | **GIGANTE HÍBRIDO DOS PAMPAS** | EM BUSCA DE RESPOSTAS | CONSÓRCIO INTERNACIONAL | TRÊS VEZES O RIO | MAIS RÁPIDO QUE A LUZ | CELULAR E GPS | NOITES CLARAS E SEM NUVENS

89. | **HIPÓTESES SOBRE A ORIGEM** | RESULTADOS DO AUGER | LISTA DE CANDIDATOS | MAIS FORTE E ENFRAQUECIDOS | QUESTÃO EM ABERTO | CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA | RAIOS CÓSMICOS

EDITORES CIENTÍFICOS | João dos Anjos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Ronald Cintra Shellard (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT).
AGRADECIMENTOS a João R. Torres de Mello Neto (IF/UFRJ)

INVASORES DE CORPOS

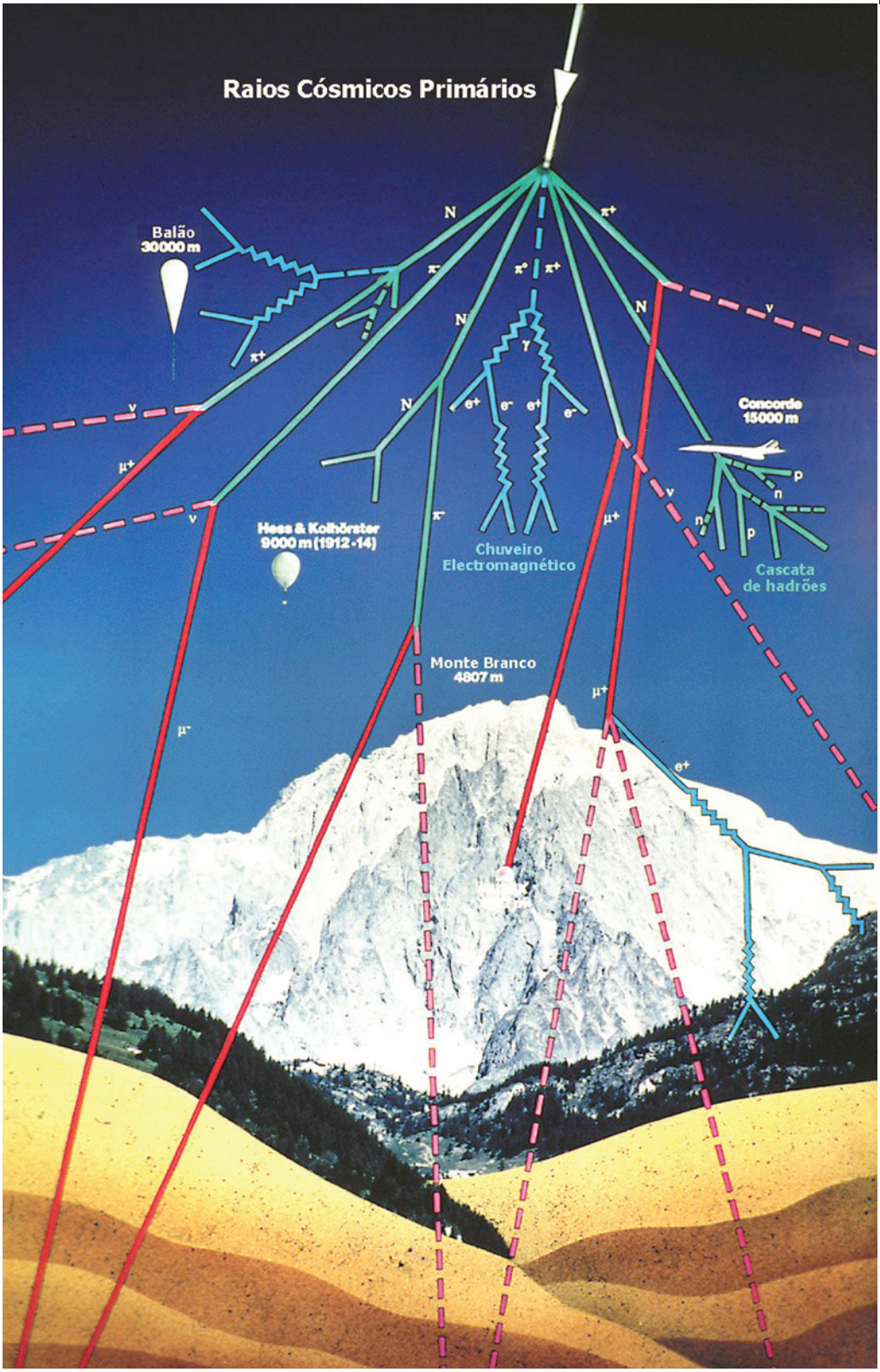
BOMBARDEIO ESPACIAL

Neste exato instante, você está sendo bombardeado. A cada segundo, dezenas de invasores do espaço atravessam seu corpo. Eles são subproduto dos raios cósmicos, partículas extremamente energéticas que, ao penetrarem a atmosfera da Terra, chocam-se contra núcleos atômicos e produzem uma impressionante cascata de partículas e radiação. Essa "chuveirada" pode chegar ao solo contendo centenas de bilhões de partículas.

UM EVEREST A 200 MIL KM/H

A energia de um raio cósmico pode variar em até 100 bilhões de vezes. Há os mais "fracos" e comuns. E aqueles raros e ultra-energéticos. Se um micrograma desse último tipo atingisse a Terra, o choque seria equivalente ao de um asteróide com a massa do monte Everest, o mais alto pico do mundo, viajando a 200 mil km/h. De onde eles vêm? O que lhes imprime tamanha energia? Esses são apenas dois dos mistérios que tornam o estudo dos raios cósmicos uma das áreas mais instigantes da física deste início de século.

Na página seguinte,
concepção artística
de um chuveiro de raios cósmicos


Raios Cósmicos Primários
Balão
30000 m
Hess & Kolhörster
9000 m (1912-14)
Monte Branco
4807 m
Chuveiro
Electromagnético
Concorde
15000 m
Cascata
de hadrões
N
π+
π-
γ
e+
e-
μ+
μ-
ν
p
n

ESTILHAÇOS DE MATÉRIA

DOIS RUMOS

A partir da década de 1930, o estudo dos raios cósmicos tomou dois rumos distintos: a) descobrir o que eram e a origem dessas partículas; b) usar as altas energias que elas carregam para estilhaçar e descobrir a constituição básica da matéria.

PRÓTONS E NÚCLEOS

A resposta para a natureza dos raios cósmicos só veio no final da década de 1940, quando emulsões fotográficas levadas a grandes altitudes por balões não tripulados permitiram revelar sua composição. Eram basicamente núcleos atômicos, como os de hidrogênio (prótons) e outros mais pesados. Quanto à origem, ainda hoje permanecem dúvidas.

ANTIMATÉRIA E ESTRANHAS

A segunda linha permitiu, quase de imediato, a descoberta de novas partículas. A primeira delas foi o pósitron (a antimatéria do elétron) em 1932. Pouco depois, a vez do múon (um "primo mais pesado" do elétron). No final da década de 1940, os choques de raios cósmicos contra a matéria revelaram as partículas estranhas, assim denominadas por "viverem" muito mais tempo que outras partículas instáveis.

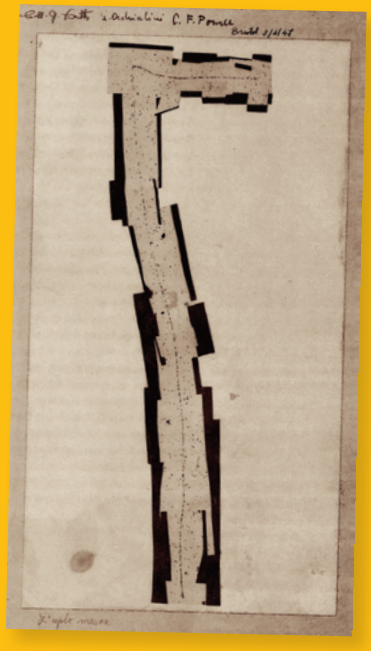


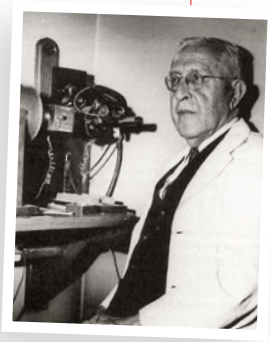
Foto micrográfica de um decaimento do méson pi em múon

FOTO DE ALFREDO MARQUES/CBPF

DA TORRE EIFFEL A BALÕES

UM PADRE E UM BALONISTA

Em 1910, o padre jesuíta e físico holandês Theodor Wulf (1868-1946) levou um único detector de radiação (eletroscópio) ao alto da torre Eiffel, a 300m de altura. Notou que a radiação era mais intensa que no solo. Mas não foi além em suas conclusões. Entre 1911 e 1913, o balonista e físico austríaco Victor Hess (1883-1964) se arriscou em dez vôos, levando detectores a quilômetros de altura. Notou, por exemplo, que a 5km de altitude o nível de radiação era 16 vezes maior que no solo. Fez um dos vôos durante um eclipse solar. Os resultados se repetiram. Sua conclusão: a "radiação etérea" vinha do espaço, porém não do Sol. Em 1936, Hess ganhou o Nobel de física pela descoberta dos raios cósmicos, como foram batizados em meados da década de 1920.



DIVULGAÇÃO

RAIOS OU CORPÚSCULOS?

Em 1927, o físico holandês Jacob Clay (1882-1955) concluiu que os raios cósmicos eram partículas com carga elétrica e não radiação muito energética. A prova final a favor dessa conclusão veio com o físico norte-americano Arthur Compton (1892-1962) no início da década de 1930 em experimentos que envolveram dezenas de instituições ao redor do mundo.

CHUVEIRO EXTENSO

Em 1938, o físico francês Pierre Auger (1899-1993) descobriu que o impacto inicial de um raio cósmico contra um núcleo atmosférico gera uma cascata de partículas, que ele captou a partir de detectores no solo dos Alpes. Batizou o fenômeno "chuveiros aéreos extensos".

O MÉSON PI

CHUVEIROS PENETRANTES

No Brasil, a pesquisa em raios cósmicos se iniciou no Instituto Nacional de Tecnologia, com a chegada em 1933 do físico alemão Bernhard Gross (1905-2002). Em 1939, em São Paulo, o físico ítalo-russo Gleb Wathagin (1899-1986) e os brasileiros Marcello Damy e Paulus Pompéia (1910-1993) detectaram os chamados chuveiros penetrantes – mais tarde, descobriu-se que essas partículas com alto poder de penetração na matéria eram múons. Os resultados foram publicados no exterior.

LATTES EM BRISTOL

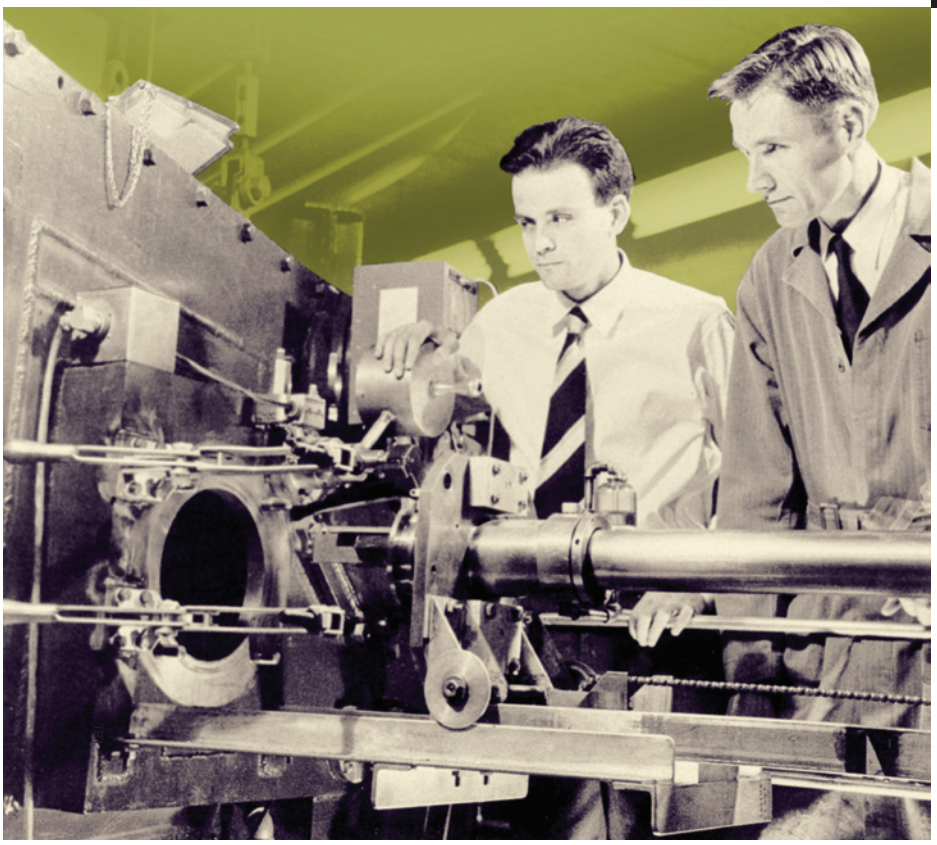
Porém, foi em 1947 que os raios cósmicos levaram a um dos resultados de maior repercussão internacional nessa área: a detecção do méson pi. Essa partícula – como proposta teoricamente pelo físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) em 1935 responsável por manter o núcleo atômico coeso – foi detectada em emulsões fotográficas expostas nos Pirineus pela equipe liderada pelo inglês Cecil Powell (1903-1969),

FOTO DE ÉDISON SHIBUYA/FGW/UNICAMP

Estrada em direção ao laboratório de raios cósmicos no monte Chacaltaya, Bolívia, a 5.200m de altitude



LBL

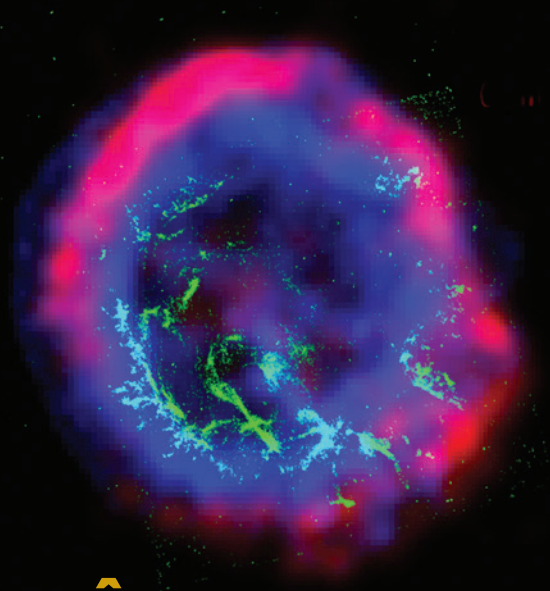


Lattes (esq.) e Gardner

com ampla participação do brasileiro Cesar Lattes, que, em seguida, viajou para a Bolívia para confirmar a existência dessas partículas em experimentos feitos no monte Chacaltaya, a 5,2 km de altitude.

NO ACELERADOR

No ano seguinte, Lattes e o norte-americano Eugene Gardner (1913-1950) detectaram mésons pi nos choques entre partículas que ocorriam no acelerador da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos). Essas duas detecções – a natural e a artificial – deram prestígio internacional a Lattes e alavancaram a fundação do CBPF, no Rio de Janeiro, em 1949. Mais tarde, ele estabeleceu um grupo para estudos de raios cósmicos em Chacaltaya, que está em atividade até hoje.



NASA

DE ONDE VÊM?

ESTRELAS MORIBUNDAS

Suspeita-se que, até 10^{16} eV, o mecanismo de aceleração seja a explosão de estrelas no final da vida, fenômeno denominado supernova. Acima desse patamar, o cenário é nebuloso. As hipóteses sobre que fontes imprimem tamanha energia a um núcleo atômico aumentam na mesma proporção em que faltam evidências experimentais.

NAS VIZINHANÇAS

Cálculos teóricos indicam que raios cósmicos que chegam à atmosfera terrestre com energia acima de 5×10^{18} eV devem vir "de perto", não mais do que 150 milhões de anos-luz – cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km. Parece muito, mas, em termos astronômicos, é mais ou menos como se fosse a vizinhança da Terra. Porém, nesse raio, não se conhece mecanismo no aglomerado local de galáxias – ao qual pertence a Via Láctea – capaz de imprimir tanta energia a um próton ou um núcleo atômico mais pesado.

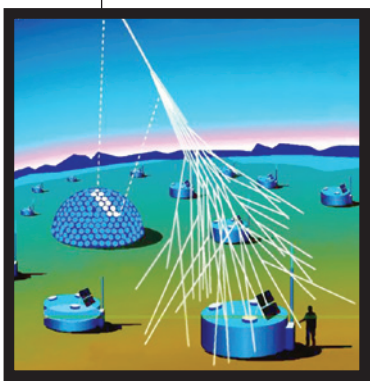
QUANTOS CHEGAM?

PIZZA QUILOMÉTRICA

O chuveiro aéreo de partículas pode ter dezenas ou centenas de km^2 de área e conter centenas de bilhões de partículas. Essa "pizza" viaja praticamente à velocidade da luz (cerca de 300 mil km/s) em direção ao solo, trazendo consigo mésons pi, radiação gama, elétrons, pósitrons, múons e neutrinos – estes últimos podem atravessar a Terra sem praticamente interagir com um único fragmento de matéria. São eles e os múons – também muito penetrantes – que chegam em maior número ao chão.

UM POUCO DE FÍSICA

Os físicos usam a unidade elétron-volt (eV) para medir a energia das partículas subatômicas. Comparado com as energias a que estamos acostumados no cotidiano, o eV é insignificante. Um próton "parado" tem a energia de 10^9 eV (ou 1.000.000.000 eV). É mais ou menos nessa ordem de grandeza que começam as energias dos raios cósmicos. Os ultra-energéticos, porém, chegam a ter energias macroscópicas, do dia-a-dia. Nada mal para algo que é bilhões de vezes menor que um grão de areia. Para se ter uma idéia, um próton com energia 10^{20} eV atinge 99,999999999999999999% da velocidade da luz.



Esquema dos detectores do Laboratório Auger

SOBEM DEZ, CAEM MIL

Para cada fator dez de aumento na energia, há uma diminuição de mil no fluxo de raios cósmicos que atinge a Terra. Ou seja: quanto mais energéticos, mais raros. Os menos energéticos (até 10^9 eV) chegam numa proporção de 10 mil por m^2 a cada segundo. Para os de energia por volta de 10^{16} eV, essa quantidade cai para algo em torno de dez. Quando se chega a 10^{19} eV, detecta-se, em média, um para cada km^2 por ano.



John Linsley checando se há cobras em seus detectores em Volcano Ranch, no Novo México

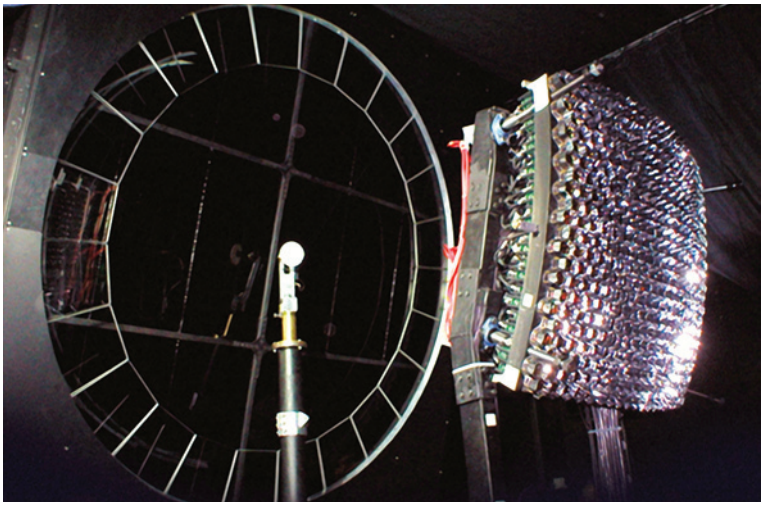
FOTO ACERVO JOHN LINSLEY

OS ZÉVATRONS CHEGARAM

VOLCANO RANCH

Manhã de 7 agosto de 1962. Volcano Ranch, fazenda perto de Albuquerque, no Novo México (Estados Unidos). Vinte detectores, espalhados por $40km^2$, recebem o impacto de uma chuveirada de centenas de bilhões de partículas. O primeiro raio cósmico ultra-energético da história havia sido capturado pela equipe do físico norte-americano John Linsley (1925-2002). Valor energético estimado do zévatron: $0,14 \times 10^{21}$ eV.

COLABORAÇÃO PIERRE AUGER



Olho de mosca do telescópio de fluorescência do Laboratório Auger

NO CHÃO E NO AR

O petardo cósmico capturado por Linsley incentivou a comunidade a saber mais sobre partículas com tamanha energia. Nos anos seguintes, surgiram vários experimentos para detectar raios cósmicos. Alguns, como Agasa (Japão), Haverah Park (Reino Unidos) e Yakutsk (Sibéria), também usavam detectores terrestres. Outros, a partir da década de 1980, buscavam captar uma luz fluorescente (ultravioleta) que resulta da interação das partículas do chuveiro com os átomos da atmosfera, principalmente os de nitrogênio.

RECORDE NO OLHO DE MOSCA

Em 1991, o recorde de Volcano Ranch seria batido por um zévatron capturado pelo Fly"s Eye – Olho de Mosca, pois a geometria dos detectores de fluorescência lembram o olho de um inseto. O experimento, em Utah (Estados Unidos), capturou um zévatron de $0{,}32 \times 10^{21}$ eV. Essa é mais ou menos a energia de um tijolo atirado com a mão contra um muro com toda força. Vale lembrar que o "objeto" que carregava essa energia era bilhões de vezes menor que um mero milímetro.



Foto de satélite da rede de detectores

GIGANTE HÍBRIDO DOS PAMPAS

COLABORAÇÃO PIERRE AUGER

EM BUSCA DE RESPOSTAS

No caso dos raios cósmicos ultra-energéticos, a ciência parece ficção. E as dúvidas imperam, o que faz dessa área de pesquisa uma das mais instigantes da atualidade. Porém, em breve, por meio do Observatório Pierre Auger, a ciência poderá ter respostas definitivas para as duas principais perguntas sobre os zévatrons: "de onde eles vêm?" e "como são acelerados?"

CONSÓRCIO INTERNACIONAL

O Observatório Pierre Auger – homenagem ao descobridor dos chuveiros aéreos extensos – foi proposto, no início da década de 1990, pelo físico norte-americano James Cronin, Nobel de Física de 1980, e por seu colega escocês Alan Watson. O Brasil aderiu ao projeto em 1995, ano da formação do consórcio internacional. Hoje, participam 17 países, setenta instituições – oito delas no Brasil – e cerca de 350 pesquisadores – entre eles, cerca de vinte brasileiros.

TRÊS VEZES O RIO

A Argentina foi escolhida como local de instalação no hemisfério Sul. Lá, nas planícies, a 400km ao sul da cidade de Mendoza, nos pampas argentinos, no oeste do país, o Observatório Auger ocupa uma área de 3 mil km^2 – algo como três vezes o município do Rio de Janeiro. Nessa vasta planície, estão distribuídos 1,6 mil detectores. Está prevista a construção de estrutura, três vezes maior, no Colorado (Estados Unidos), o que permitirá uma cobertura de todo o céu.

MAIS RÁPIDO QUE A LUZ

Cada detector é formado por um tanque plástico com 1,5m de altura, diâmetro de quase 3,5m, contendo 12t de água esterilizada, para evitar o crescimento de bactérias que poderiam turvá-la. Dentro de cada um deles, três fotomultiplicadoras captam e amplificam a tênue luz emitida por partículas do chuveiro que penetram o tanque viajando com velocidade superior à da luz na água. Esse é o chamado efeito Cerenkov.

COLABORAÇÃO PIERRE AUGER

Sede do Laboratório Auger

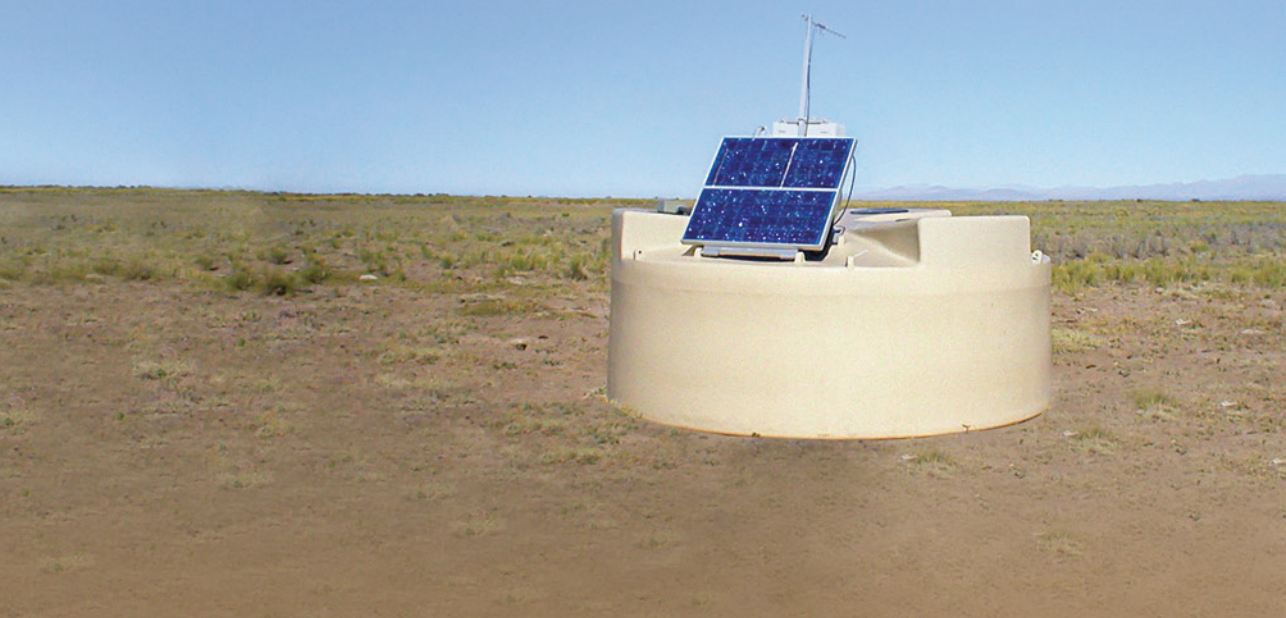


CELULAR E GPS

Todos os tanques estão ligados por sistema semelhante ao de telefonia celular. A energia vem de baterias especiais, alimentadas por painéis solares. A posição e o momento exatos da chegada do chuveiro aéreo são dados pelo Sistema de Posicionamento Global – mais conhecido como GPS. Com essas tecnologias, é possível medir o ângulo de entrada do chuveiro em relação ao solo com precisão de um grau e seu tempo de duração em bilionésimos de segundo.

NOITES CLARAS E SEM NUVENS

O Auger também emprega quatro telescópios "olhos de mosca" – daí ser chamado observatório híbrido –, instalados na periferia da rede. Cada "olho" é formado por um espelho esférico – com diâmetro de 3,7m – que converge para 440 fotomultiplicadoras a fluorescência gerada pela passagem do chuveiro. Esse equipamento – capaz de detectar a luz de uma lâmpada de 4 watts a cerca de 15km de distância – só funciona em noites claras e sem nuvens.



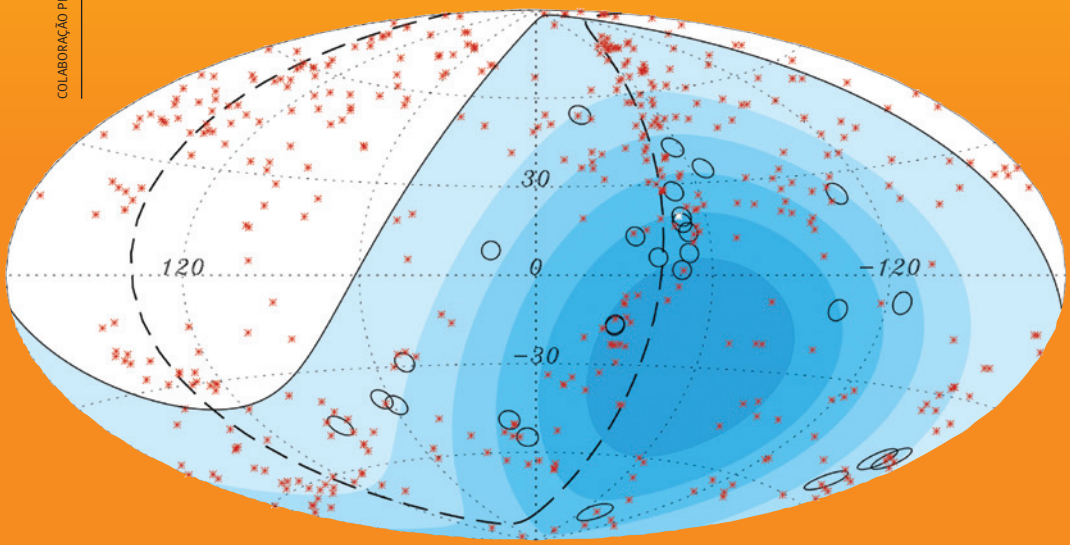
COLABORAÇÃO PIERRE AUGER

HIPÓTESES SOBRE A ORIGEM

RESULTADOS DO AUGER

Dados sobre os 27 zévatrons mais energéticos detectados pelo Observatório Pierre Auger até outubro de 2007 mostram que há uma forte associação entre a direção no céu de onde eles vêm e corpos celestes denominados núcleos ativos de galáxias (AGNs). Os dados relevantes no mapa celeste abaixo são: os zévatrons estão representados por pequenos círculos pretos, e os asteriscos vermelhos são as posições dos 472 AGNs que se encontram nas "proximidades" de nossa galáxia. Com o observatório Auger no Colorado, a cobertura do céu será completa, e o futuro mapa celeste não conterá as áreas brancas.

COLABORAÇÃO PIERRE AUGER



LISTA DE CANDIDATOS

Ao longo das últimas décadas, várias hipóteses se candidataram para explicar a origem dos zévatrons. Elas estão listadas abaixo, e muitas saem enfraquecidas com os resultados recentes do Auger, largamente divulgados na mídia mundial.

i) Núcleos ativos de galáxias – Geralmente, esses corpos celestes escondem em seu interior um buraco negro supermaciço, que suga matéria de estrelas destruídas pela gravitação intensa em sua vizinhança, produzindo radiação e jatos de matéria que se estendem por centenas de milhares de anos-luz;

ii) Explosões de raios gama – São os eventos mais luminosos do universo e provavelmente causados pelo nascimento de buracos negros nos núcleos de estrelas de grande massa ou pelo "agrupamento" de estrelas de nêutrons binárias ou de buracos negros;

iii) Objetos da Via Láctea – Como o nome diz, são objetos em nossa galáxia, como estrelas de nêutrons jovens, pulsares ou até mesmo o buraco negro que, tudo indica, habita o centro da Via Láctea;

iv) Defeitos topológicos – Algo que pode ser comparado a um diminuto volume de "espaço" que não "explodiu" no início do universo;

v) Partículas superpesadas – Formadas pela ainda enigmática matéria escura, responsável por quase um quarto da composição atual do universo, essas partículas se transformariam (decairiam, no jargão dos físicos) em zévatrons.

MAIS FORTE E ENFRAQUECIDOS

O item (i) surge como o candidato mais forte para explicar a origem dos zévatrons, dando uma provável resposta para uma questão que começou há quase um século, quando os raios cósmicos foram descobertos. O item (iii) fica muito desfavorecido, pois é muito improvável que os zévatrons sejam produzidos em nossa galáxia. Os defeitos topológicos (iv) ainda estão no páreo, mas terão que mostrar que se distribuem no céu de forma semelhante à dos AGNs (ou seja, não homogeneamente). De certa forma, o mesmo vale para as partículas superpesadas (v). Quanto ao item (ii), continua uma possibilidade interessante, pois as fontes prováveis dessas explosões se distribuem de forma parecida às dos AGNs.

QUESTÃO EM ABERTO

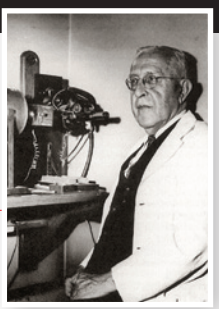
Se os dados do Auger continuarem mostrando a forte associação entre os AGNs e os zévatrons, os físicos terão, então, muito trabalho pela frente, pois fica em aberto a seguinte questão: que mecanismo físico nesses corpos cósmicos seria capaz de imprimir energias tão altas a núcleos atômicos?

CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA

O Brasil participou ativamente da construção e da tomada de dados do Laboratório Auger. Entre principais contribuições para a montagem, estão: i) a fabricação dos tanques de resina para os detectores de superfície; ii) o fornecimento das baterias especiais para os painéis solares; iii) o projeto de mecânica fina para os telescópios de fluorescência; iv) a fabricação das lentes especiais que permitem a focalização precisa da imagem dos telescópios; v) importantes contribuições na análise dos dados. Ao todo, cerca de vinte pesquisadores brasileiros, além de estudantes de doutorado e engenheiros.

RAIOS CÓSMICOS • Energias

1911-1912. Descoberta da existência de uma radiação penetrante, com origem fora da Terra, pelo físico austríaco Victor Hess em vôo de balão


(a)

1924. Nasce Cesar Lattes, em Curitiba (PR), no dia 11 de julho.

1928. Os físicos alemães H. Geiger e W. Muller desenvolvem o chamado contador Geiger, que registra a passagem de partículas ionizantes

1932. Descoberta do pósitron, a antipartícula do elétron, por C. Anderson e, independentemente, por P. Blackett e Giuseppe Occhialini

1933. O físico alemão Bernhard Gross chega ao Rio de Janeiro; pouco tempo depois, ingressa no Instituto Nacional de Tecnologia

1934. O físico ítalo-russo Gleb Wataghin assume a sua cátedra de física na USP

1935. O físico japonês Hideki Yukawa propõe a existência de uma partícula (o atual méson pi) responsável pela coesão do núcleo atômico

1937. Descoberta do múon por S. Neddermeyer e C. Anderson

1938. Pierre Auger prova que os raios cósmicos, ao se chocarem com moléculas da atmosfera, causam o surgimento de chuveiros aéreos extensos de partículas


(b)

1940. Descoberta dos chuveiros de partículas penetrantes por Wataghin, Marcelo Damy de Sousa Santos e Paulus Aulus Pompéia

1941. Realização no Rio de Janeiro do Simpósio sobre Raios Cósmicos; o físico norte-americano Arthur H. Compton participou deste encontro e de missão científica no interior do Estado de São Paulo


(c)

1943. Lattes conclui seu bacharelado em Física pela USP

1946. Lattes, recomendado por Occhialini, parte para Bristol para trabalhar no laboratório de Cecil Powell

1947. Descoberta do méson pi por Powell, Lattes e Occhialini



(d)

(a) DIVULGAÇÃO; (b) e (f) COLABORAÇÃO PIERRE AUGER; (c) ALFREDO MARQUES/CBPF; (d) EDISON SHIBUYA/IFGW/UNICAMP; (e) CBPF

extremas no universo

1948. Produção artificial do méson pi por Lattes e Eugene Gardner

1949. Fundação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Lattes é o seu primeiro diretor científico. Além disso, assume a cátedra de Física Nuclear na antiga Faculdade Nacional de Filosofia da Universidade do Brasil (atual UFRJ)

1955. Lattes deixa a direção do CBPF e vai para a Universidade de Chicago

1957. Lattes atua na Universidade de Minnesota; no seu retorno ao Brasil, passa a trabalhar na USP, a convite de Mário Schenberg e Marcelo Damy de Sousa Santos

1962. Início da colaboração Brasil-Japão para o estudo de Raios Cósmicos no monte Chacaltaya

1963-1971. Lattes anuncia em diferentes conferências internacionais a observação de eventos relacionados às bolas-de-fogo, resultantes da interação de raios cósmicos com núcleos da atmosfera

1967. Lattes transfere-se para a UNICAMP, onde organiza um laboratório de Raios Cósmicos

Década de 1970.
A colaboração Brasil-Japão descobre a existência de eventos exóticos denominados Centauros

1979-1980.
Lattes envolve-se em polêmica pública por discordar de um dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein: a velocidade da luz não seria constante

1986.
Lattes aposenta-se na UNICAMP; colabora com a Universidade Federal do Mato Grosso


(e)

1994.
Lattes (acima à esquerda), ao lado de José Leite Lopes, é homenageado no CBPF por ocasião dos seus 70 anos

2000. Início da construção do Observatório Pierre Auger para o estudo de raios cósmicos milhares de vezes mais energéticos que o mais potente acelerador em uso

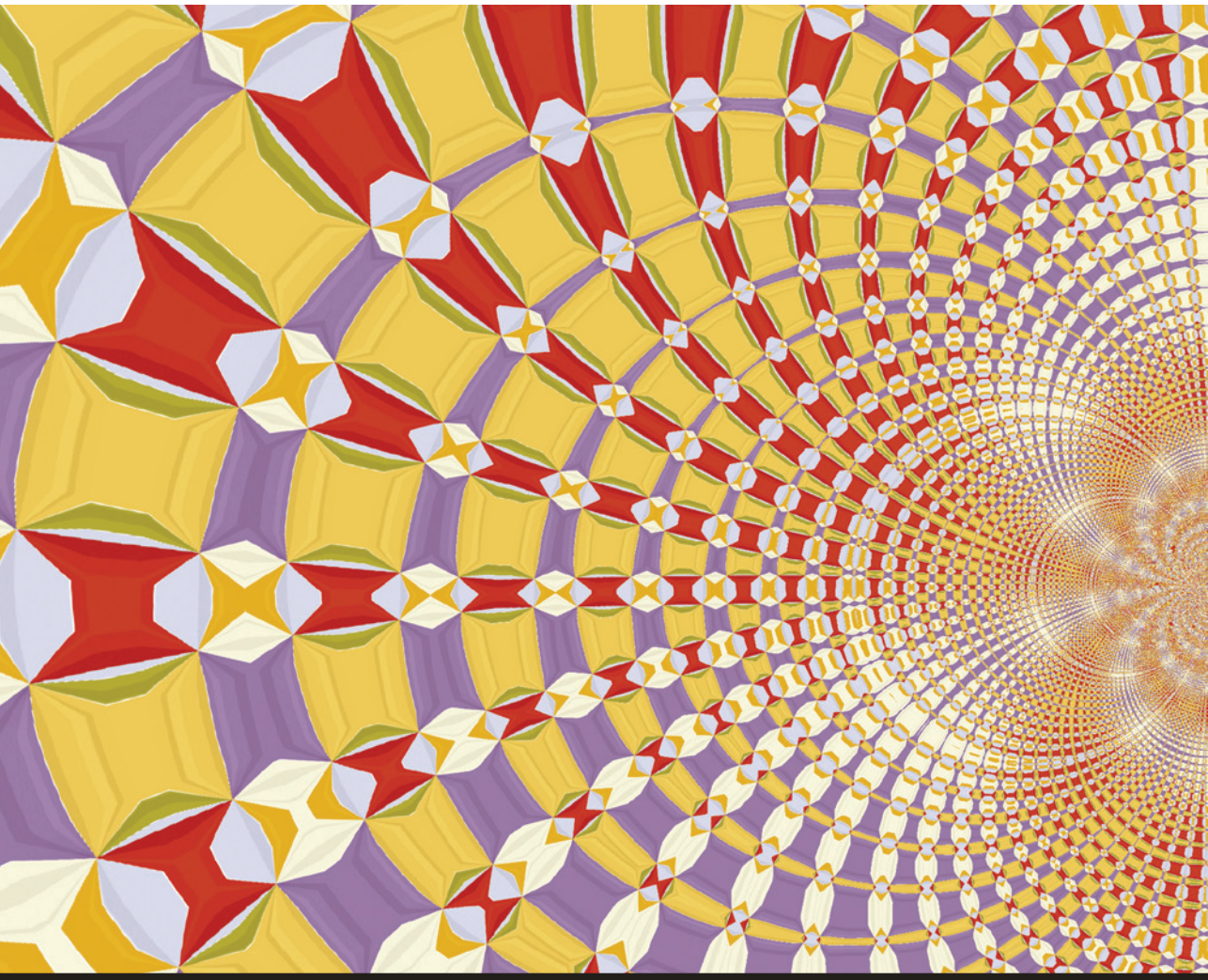
2005.
Comemoração do Ano Internacional da Física. A descoberta de Lattes se destaca como um dos mais importantes feitos da ciência brasileira

2007.
Primeiros resultados do Observatório Pierre Auger, publicados na revista *Science*


(f)







Cosmologia

A busca pela origem, evolução e estrutura do universo

Freqüentemente, os grandes avanços da ciência estão ligados ao desenvolvimento de novas técnicas experimentais de observação. A astronomia, por exemplo, muito se desenvolveu com a invenção dos telescópios, que possibilitaram enxergar melhor, mais longe, perscrutar a abóbada celeste e, assim, encontrar novos planetas, satélites e galáxias. Essas descobertas mudaram nossa imagem do universo, possibilitando-nos passar de uma visão divina para uma visão científica.

Coisa semelhante se dá hoje com a cosmologia, uma das áreas da ciência que mais se desenvolvem neste início de século. Esse avanço está sendo possível, em grande parte, com o desenvolvimento de potentes telescópios e sondas espaciais, especialmente construídos para examinar sinais vindos de todas as partes do universo, não somente na faixa da luz visível, mas também do infravermelho, das ondas de rádio e dos raios X.

Esses novos instrumentos de observação do universo estão permitindo testar modelos cosmológicos com precisão inédita. E, com isso, mostrar que a cosmologia é uma ciência possível de verificação experimental em muitos de seus aspectos.

96. | **COSMOGONIAS** | DE ONDE VIEMOS? | PEDRA FUNDAMENTAL

97. | **NASCIMENTO DA COSMOLOGIA** | PRIMEIRO MODELO | UM TERMO EXTRA

99. | **ALÉM DA VIA LÁCTEA** | EXPANSÃO E CONTRAÇÃO | DOIS PIONEIROS | PONTO INSIGNIFICANTE | COMO UM BALÃO DE FESTAS

101. | **MODELO DO BIG BANG** | ÁTOMO PRIMORDIAL | ESTRONDO COLOSSAL | DOIS SIGNIFICADOS

103. | **ECO PRIMORDIAL** | RUÍDO TÊNUE | RADIAÇÃO DE FUNDO

104. | **BREVE HISTÓRIA DO UNIVERSO** | TRÊS PILARES | TEORIAS ALTERNATIVAS | TEORIA DA INFLAÇÃO | ALGUNS MOMENTOS DA HISTÓRIA DO UNIVERSO

106. | **DESDOBRAMENTOS RECENTES** | DIMINUTAS PERTURBAÇÕES | REVOLUÇÃO CÓSMICA | MISTÉRIOS ESCUROS | DESTINO DO UNIVERSO | A PRIMEIRA GERAÇÃO | CONFLITOS, DÚVIDAS E CERTEZAS

EDITORES CIENTÍFICOS | Martín Makler (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT) | Thyrso Villela Neto (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/MCT)



COSMOGONIAS

DE ONDE VIEMOS?

Não se sabe quando o homem iniciou seus questionamentos sobre o cosmo. Mas praticamente todos os povos e culturas têm suas versões para a origem do universo. Em algumas dessas cosmogonias, ele é criado por entidades sobre-humanas ou seres divinos. De certo modo, todas são respostas à talvez mais penetrante pergunta filosófica que o homem já fez a si mesmo: "De onde viemos?"

PEDRA FUNDAMENTAL

Apesar de a busca por respostas sobre o cosmo ter permeado praticamente toda a história do homem moderno, a cosmologia – definida como o estudo da origem, da evolução, do conteúdo e da estrutura do universo – é uma ciência recente, com pouco menos de 100 anos. Até o século 19, ela se entrelaçava, de modo quase indissociável, com a filosofia, a metafísica e a religião. Só conseguiu se desvencilhar dessas áreas e ganhar autonomia como um ramo da ciência em 1917. É aí que reside, para muitos historiadores da ciência, sua pedra fundamental.

NASCIMENTO DA COSMOLOGIA

PRIMEIRO MODELO

Em 1917, o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) apresentou ao mundo o primeiro modelo cosmológico com base científica. Foi resultado da aplicação, ao universo como um todo, de sua teoria da relatividade geral, de 1915, que substituiria a gravitação do inglês Isaac Newton (1642-1727), ainda válida, para muitos propósitos, para velocidades bem menores que a da luz no vácuo (300 mil km/s) e campos gravitacionais fracos, como o da Terra. Na relatividade geral, as três dimensões espaciais (comprimento, altura e largura) formam um uno indissociável com a quarta dimensão, o tempo. Além disso, o chamado espaço-tempo pode ser comparado a um "tecido" elástico que se deforma na presença de corpos com massa ou, de forma mais genérica, na presença de energia. Essa noção geométrica substituiu o conceito newtoniano de uma força gravitacional que age a distância entre os corpos.

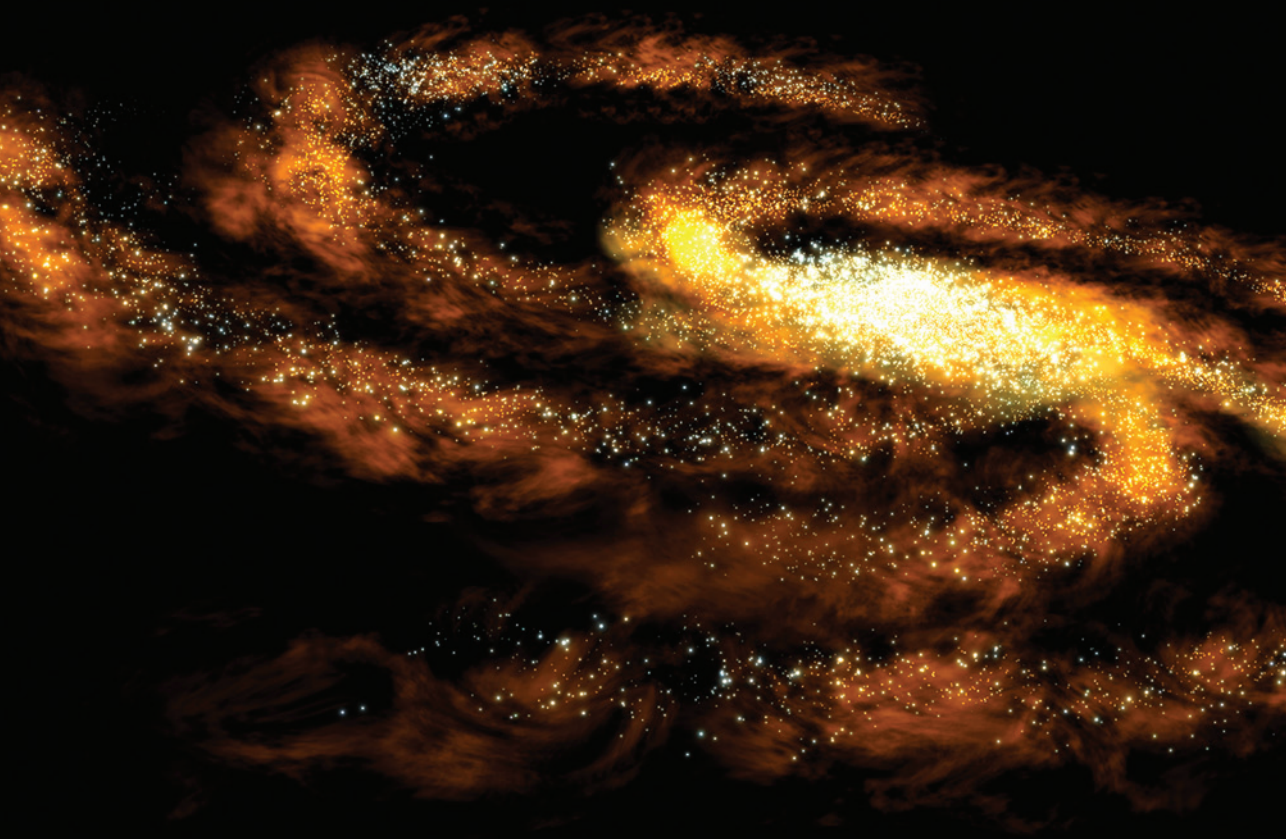


EINSTEIN ARCHIVES

UM TERMO EXTRA

Einstein, partindo de uma idéia bela e matematicamente tratável – a de um universo finito ("esférico") e ilimitado –, se viu forçado a "frear" o universo que brotava de seus cálculos, pois ele apresentava um comportamento dinâmico – por exemplo, expandia-se com o passar

do tempo. Na época, isso conflitava com a noção de universo, para o qual não havia evidências de mudança no tempo nem mesmo uma medida do tamanho. Para muitos, o cosmo então se reduzia ao que hoje sabemos ser a Via Láctea (galáxia que abriga o Sistema Solar). Para tornar o universo estático, Einstein incluiu em suas equações um termo extra cuja função era evitar que o universo colapsasse sob a ação da gravidade. A constante cosmológica, como o termo é hoje conhecido, pode ser comparada a uma antigravidade.

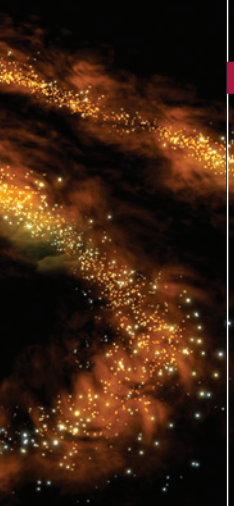


NASA

ALÉM DA VIA LÁCTEA

EXPANSÃO E CONTRAÇÃO

Foi só em 1922 e em 1924 que modelos de universo não estáticos chamaram a atenção da ainda incipiente comunidade de cosmólogos. Naqueles anos, o matemático russo Aleksandr Friedmann (1888-1925) apresentou universos que se expandiam ou se contraíam. Einstein, inicialmente, não gostou desses resultados. E chegou a escrever uma nota para uma revista científica alegando que Friedmann havia se enganado nos cálculos. Posteriormente, percebeu o próprio erro, aceitando os modelos.



DOIS PIONEIROS

Quando se fala de um universo em expansão, é preciso se lembrar dos trabalhos de pelo menos dois pioneiros: os norte-americanos Henrietta Leavitt (1868-1921) e Vesto Slipher (1875-1969). Em 1912, Leavitt, uma das primeiras mulheres astrônomas, mostrou que a variação periódica do brilho das estrelas cefeídas podia ser um método para medir distâncias acima de centenas de anos-luz (cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km). Já Slipher, ainda em 1915, dispunha de dados que mostravam que galáxias – apesar de esses objetos celestes não serem então reconhecidos como tais – estavam se afastando da Terra com velocidades que variavam de 300km/s a 1.100km/s, o que indicava que elas poderiam ser objetos além da Via Láctea.

PONTO INSIGNIFICANTE

Em meados da década de 1920, o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) empregou a luminosidade das cefeídas para medir a distância de uma classe de nebulosas. Ele chegou a uma conclusão surpreendente: essas "nuvens" estavam fora da Via Láctea. Com isso, as fronteiras do universo se alargaram. A Via Láctea, com seus bilhões de estrelas, não ocupava uma posição privilegiada nesse novo cenário cósmico. Éramos um ponto insignificante num vasto universo.

COMO UM BALÃO DE FESTAS

Em 1929, Hubble obteve a distância de dezenas de galáxias utilizando como padrão estrelas cefeídas e, com base em dados observacionais de Slipher, mostrou que a velocidade com que as galáxias se afastavam umas das outras era proporcional à distância entre elas, o que ocorre justamente num universo em expansão. A analogia mais usual para descrever esse fenômeno é a de um balão de festas sendo inflado, com as galáxias representando pontinhos pintados na superfície, porém é preciso lembrar que o universo, nesse caso, se restringiria apenas à superfície de borracha do balão. Assim, Hubble, talvez sem ter consciência do fato, descobriu a expansão do universo. Segundo o russo George Gamow (1904-1968), Einstein teria dito que a constante cosmológica havia sido o maior erro científico de sua vida. Mas a história, meio século depois, mostraria que esse termo ainda teria um papel a desempenhar na cosmologia.

O MODELO DO BIG BANG

ÁTOMO PRIMORDIAL

Em 1927 – e independentemente de Friedmann –, o astrônomo e padre belga Georges Lemaître (1894-1966) chegou a resultados teóricos que mostravam um universo que se expandia. Porém, foi além. Alegou que, se as galáxias hoje se afastam, isso significa que, no passado, estiveram mais próximas. Lemaître conjecturou que toda a massa do universo esteve reunida num único ponto. Em 1933, ele deu a isso o nome de átomo primordial, que, para criar o universo, teria se partido em inúmeros pedaços.

ESTRONDO COLOSSAL

A idéia de um universo que evoluiu de um estado impensavelmente condensado e quente da matéria não agradou a todos. Pejorativamente, o modelo foi denominado Big Bang (grande estrondo), em 1949, por um de seus mais ferrenhos opositores, o cosmólogo britânico Fred Hoyle (1915-2001), numa entrevista para uma rádio. Ironicamente, o nome se tornou popular, passando, desde então, a se referir ao modelo.

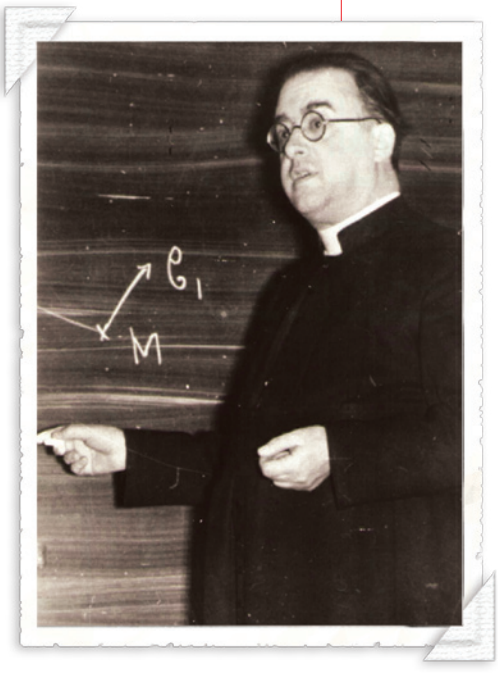
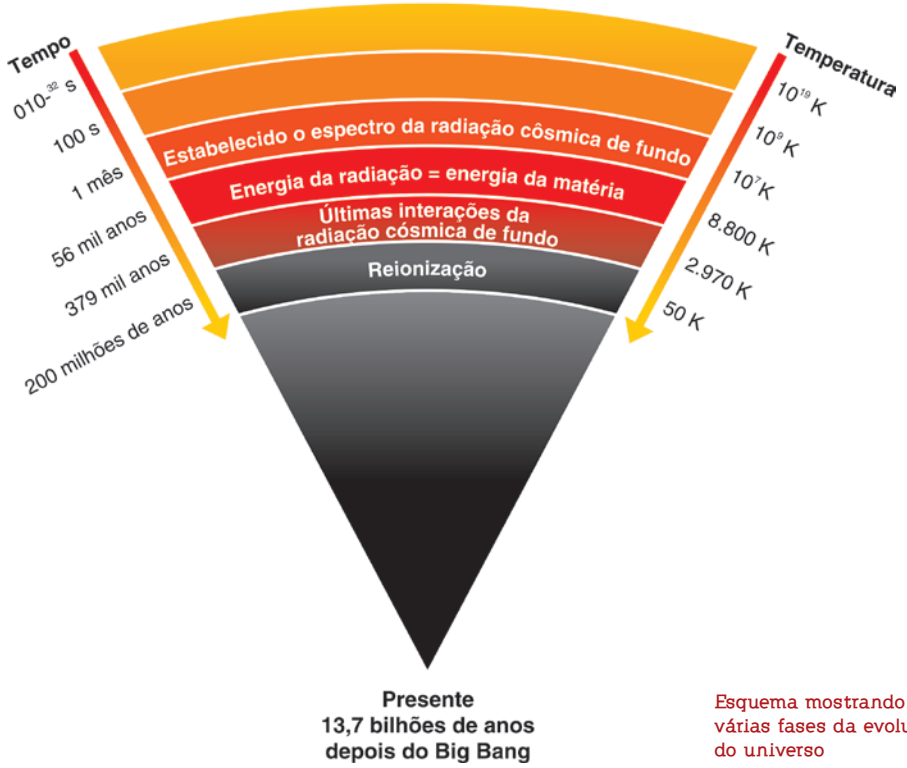


FOTO DOS ARQUIVOS DA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE LEUVEN

DOIS SIGNIFICADOS

Quando se fala de Big Bang, é preciso distinguir entre dois significados para o termo. No primeiro, aceito pela ampla maioria dos cosmólogos e sustentado em sólidas bases observacionais, o universo está em expansão e passou por uma fase extremamente quente no passado. Esse modelo é baseado na relatividade geral, bem como no que se conhece hoje sobre a interação entre as partículas subatômicas, ambas teorias bastante testadas. No segundo, o universo teve um início bem definido no tempo, e houve uma "singularidade" (concentração infinita de matéria), onde a física perde o seu sentido. Nesse modelo, juntamente com o nascimento do universo, teriam surgido o espaço e o tempo. Como é baseado numa extrapolação da física conhecida para escalas de energia totalmente inatingíveis neste momento, ele não tem uma base firme e ainda é assunto de intenso debate.



Esquema mostrando as várias fases da evolução do universo

ECO PRIMORDIAL

RUÍDO TÊNUE

O modelo do Big Bang chegou à década de 1960 sob críticas severas. Faltava ainda a ele uma comprovação observacional de peso. E isso se deu em 1964, quando, por acaso, os físicos norte-americanos Arno Penzias e Robert Wilson, pesquisadores dos Laboratórios Bell (Estados Unidos), detectaram, com o auxílio de uma antena de rádio, um "ruído" extremamente tênue, porém persistente, em todas as direções do céu. Quatro outros físicos norte-americanos, Robert Dicke (1916-1997), James Peebles, Peter Roll e David Wilkinson (1935-2002), que se preparavam para tentar medir a mesma radiação, logo perceberam do que se tratava: um "eco" do Big Bang.

RADIAÇÃO DE FUNDO

A radiação cósmica de fundo havia sido prevista ainda em 1948 por Gamow, Ralph Alpher e Robert Herman (1914-1997) como um resquício de uma fase extremamente quente pela qual passou o universo, um "eco" de uma época em que as partículas de luz (fótons) passaram a viajar livremente, sem interagir com a matéria. Essa radiação fóssil tem hoje a temperatura de 2,725 kelvin (cerca de 270 graus celsius negativos) e é um "retrato" do universo 380 mil anos depois do Big Bang. Penzias e Wilson ganharam o Nobel de física de 1978 pela descoberta, mas o prêmio injustamente esqueceu a primazia das idéias de Gamow, Alpher e Herman.

BREVE HISTÓRIA DO UNIVERSO

TRÊS PILARES

A descoberta da radiação cósmica de fundo deu extremo vigor científico ao modelo do Big Bang, que já contava com mais dois pilares a seu favor: explicava tanto a expansão do universo quanto a abundância atual dos elementos químicos leves (hidrogênio, deutério, hélio e lítio). Porém, mesmo sustentado por três colunas robustas, o modelo não estava isento de problemas.

TEORIAS ALTERNATIVAS

Várias teorias alternativas ao Big Bang foram propostas. A que ganhou mais repercussão foi a chamada teoria do estado estacionário, segundo a qual o universo não teve início ou fim, mas sempre existiu no tempo, daí o nome do modelo. Para explicar a expansão do universo, seus três idealizadores – Hoyle e os austríacos Thomas Gold (1920-2004) e Herman Bondi (1919-2005) – alegavam que havia criação contínua de matéria no universo. Há hoje outros modelos propostos e estudados por cosmólogos e que podem ser divididos em duas classes: aqueles em que há um início bem definido para o universo e os sem início, em que o universo é eterno.

TEORIA DA INFLAÇÃO

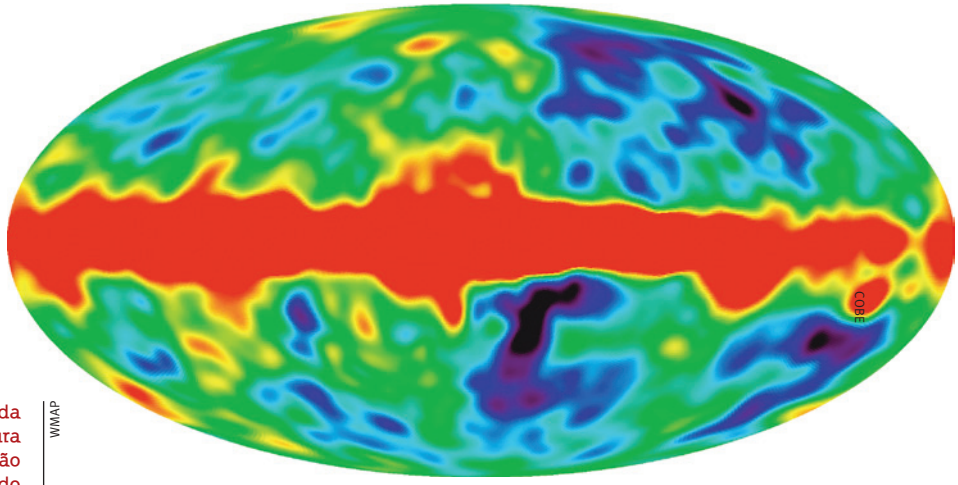
Um dos problemas com o modelo do Big Bang era explicar por que a temperatura da radiação de fundo é praticamente a mesma em qualquer direção do espaço. Uma maneira de

justificar essa homogeneidade é imaginar que o universo, ainda muito quente e denso, tenha se expandido violentamente por um curtíssimo período de sua história. Essa é basicamente a propriedade que norteia a chamada teoria inflacionária, idealizada por pesquisadores russos e norte-americanos na década de 1970. Segundo ela, entre 10^{-35} s e 10^{-32} s de vida, o universo se expandiu exponencialmente. Esse mecanismo inflacionário fez com que regiões do céu hoje muito separadas tivessem estado em contato no passado, o que teria permitido que tivessem trocado calor e igualado suas temperaturas. Além disso, um dos grandes sucessos da teoria da inflação foi prever, por exemplo, a geometria do espaço como quase plana e as propriedades das diminutas flutuações na temperatura da radiação cósmica de fundo. Essas previsões foram recentemente confirmadas por dados coletados por experimentos a bordo de sondas espaciais, em balões e no solo.

ALGUNS MOMENTOS DA HISTÓRIA DO UNIVERSO

Há hoje vários modelos para o que ocorreu nos primórdios do universo. Porém, o modelo do Big Bang, acoplado ao cenário inflacionário, tem obtido excelente respaldo observacional. Com base nesse modelo, é possível contar – com alguns números que ainda carregam grandes incertezas – alguns dos principais momentos da história de 13,7 bilhões de anos do universo (ver quadro abaixo).

Evidências indiretas e cenário baseado em física desconhecida	• 10^{-43} s: era de Planck • 10^{-35} s: universo se expande violentamente (era da inflação) • 10^{-32} s: fim da inflação.
Evidências indiretas, mas cenário baseado em física conhecida	• 10^{10} s: o universo se torna uma sopa quentíssima de radiação e partículas elementares (quarks, glúons, elétrons, fótons, neutrinos etc.) • 10^{-4} s: formam-se mésons (um quark e um antiquark) e bárions (três quarks)
Evidências observacionais mais diretas	• 10^{2} s: prótons e nêutrons, ambos bárions, formam núcleos de átomos leves • 380 mil anos: formam-se os primeiros átomos (núcleo mais elétrons), e os fótons da radiação cósmica de fundo passam a caminhar livremente, tornando o universo transparente • 200 milhões de anos: formam-se as primeiras estrelas e galáxias • 9 bilhões de anos: formação do Sistema Solar • 10 bilhões de anos depois do Big Bang: início da vida na Terra.



Mapa da temperatura da radiação de fundo obtido pelo COBE

WMAP

DESDOBRAMENTOS RECENTES

DIMINUTAS PERTURBAÇÕES

O satélite COBE (sigla, em inglês, para Explorador do Ruído Cósmico) é considerado por muitos o mais importante experimento da cosmologia. Seus dados, divulgados no início da década de 1990, ajudaram a determinar com precisão a temperatura da radiação cósmica de fundo e a detectar, pela primeira vez, a existência de diminutas perturbações – da ordem de centésimos de milésimos de kelvin (10^{-5} kelvin) – na temperatura dessa radiação. Essas flutuações foram essenciais para se compreender como ocorreu o processo de formação das grandes estruturas no universo (aglomerados de galáxias, grandes filamentos, paredes e vazios).

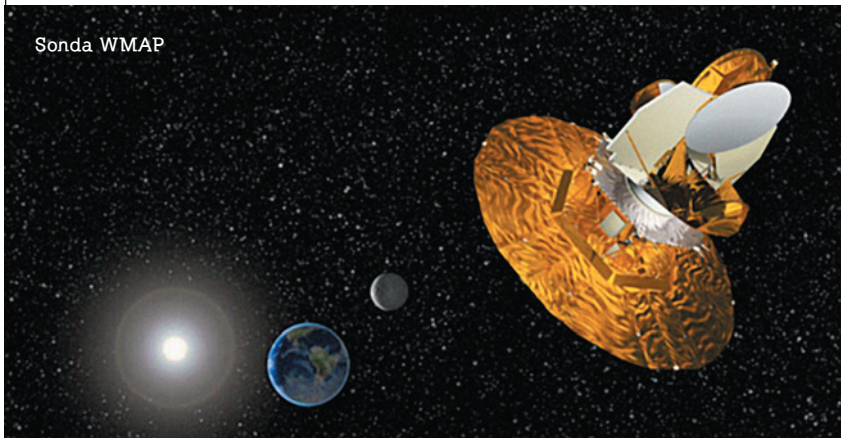
REVOLUÇÃO CÓSMICA

Em 1998, ocorreu uma das descobertas mais marcantes da cosmologia do século passado. Dados coletados sobre a luminosidade de supernovas (estrelas que explodem ao final de suas vidas) permitiram concluir que o universo não só se

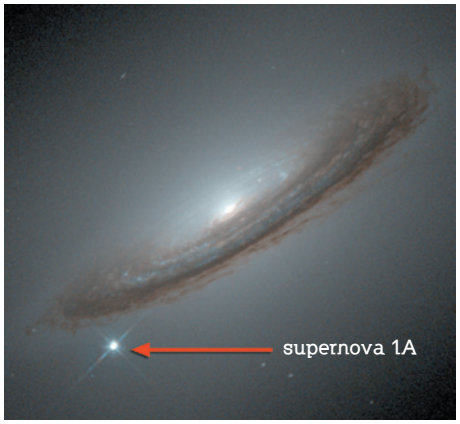
expande, mas faz isso de forma acelerada. A descoberta foi classificada como uma revolução. Porém, o que estaria causando essa aceleração inesperada? O candidato mais cotado para explicá-la é a constante cosmológica, de Einstein, que age como uma antigravidade. Outro muito popular é a chamada energia escura, cujo posto está sendo disputado, entre outros concorrentes, pela própria constante cosmológica – pois ela pode ser pensada como mais um tipo de matéria que forma o universo – ou pela quintessência, uma forma exótica de energia com ação gravitacional repulsiva, cuja densidade varia com o tempo. Porém, um problema: se a constante cosmológica estiver associada à energia do vácuo – como muitos físicos acreditam –, há uma tremenda discrepância entre a previsão teórica de sua densidade e aquela observada no universo. Para se ter uma idéia, essa diferença é da ordem de 10^{120} (1 seguido de 120 zeros!), considerada a maior entre teoria e observação da história da ciência.

MISTÉRIOS ESCUROS

Em 2003, a WMAP (sigla, em inglês, para Sonda Wilkinson de Anisotropia em Microondas) obteve mapas do céu com definição 45 vezes superior à do COBE e possibilitou, com a ajuda de dados de outros experimentos, o cálculo da idade



WMAP



NASA

do universo (13,7 bilhões de anos) e sua composição atual: cerca de 73% de energia escura, 23% de matéria escura e apenas 4% de matéria normal ("bariônica"). Desconhece-se a natureza dos dois primeiros e principais ingredientes, apesar de a matéria escura já ter sido apontada como um componente dos aglomerados de galáxias ainda em 1932 pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974).

DESTINO DO UNIVERSO

Na maioria dos modelos atuais, é a energia escura que dita o destino do universo. Numa visão moderna, há três destinos para o universo: i) ele cessa a expansão, pára e passa a colapsar, fenômeno denominado Big Crunch (Grande Esmagamento); ii) caso a energia escura seja mais ou menos constante, ele continua a se acelerar para sempre, tendo um fim gelado e escuro; e iii) sofre uma expansão acelerada tão violenta que "rasgaria" até os átomos, cenário denominado Big Rip (Grande Rasgo).

A PRIMEIRA GERAÇÃO

Somos a primeira geração a ter um modelo científico do universo. E, por isso, devemos nos sentir privilegiados. O modelo padrão da cosmologia (Big Bang mais inflação) tem sido verificado com precisão cada vez maior pelas observações astronômicas, graças aos novos telescópios e sondas – por sinal, o desenvolvimento desses e de outros equipamentos ligados à pesquisa em cosmologia aprimorou, por exemplo, sistemas atuais de comunicações por microondas. O Big

Bang tem fragilidades e lacunas fundamentais, mas é testável – daí vem sua força – e tem descrito bastante bem o universo observado. Dados astronômicos parecem corroborar a teoria dos dias de hoje até 380 mil anos depois do "nascimento" do universo. Para tempos anteriores, extrapolações nos permitem ter idéia de vários cenários possíveis.

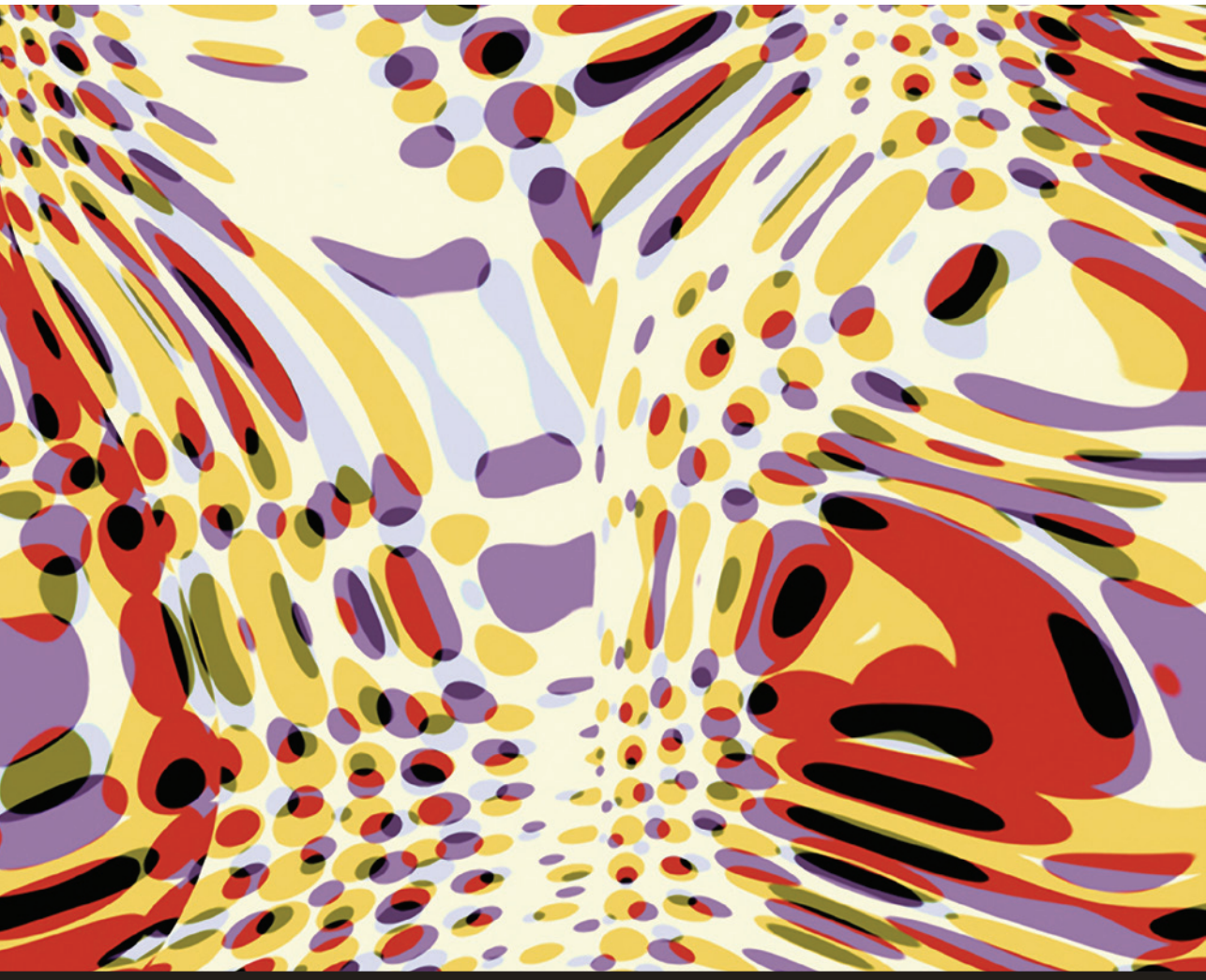
CONFLITOS, DÚVIDAS E CERTEZAS

A física por volta da época da inflação é ainda desconhecida. Para entender o universo primordial, os físicos buscam a unificação dos fenômenos gravitacionais, regidos pela teoria da relatividade geral, e daqueles do microuniverso dos átomos e suas partículas, domínio da teoria quântica. É uma tarefa difícil. Além dos questionamentos sobre os primórdios do universo, a descoberta da expansão acelerada levantou perguntas extremamente excitantes e que deram novo fôlego à cosmologia. Será que esses desafios do macrocosmo nos levarão a uma nova física? São tempos de conflitos e dúvidas, mas também de várias certezas. São tempos de extremo entusiasmo para os cosmólogos e também para a humanidade. Ou, afinal, o leitor consegue pensar em perguntas mais instigantes e profundas do que "De onde viemos? Para onde vamos?"



O telescópio SOAR

SOAR



Informação Quântica

Do teleporte à última fronteira da computação



Os computadores foram, sem dúvida, uma das maiores invenções do século passado. Com seu uso diversificado, eles passaram a integrar nosso dia-a-dia, por meio de editores de texto (que aposentaram as máquinas de escrever), dos jogos para crianças e adultos, do correio eletrônico e, mais recentemente, da telefonia e das videoconferências. Hoje, é possível ter acesso, pela internet (a rede mundial de computadores), a informação em larga escala, armazenada em diferentes pontos do planeta. O fenômeno da globalização da informação é inegável.

Os primeiros computadores, na década de 1940, eram enormes, ocupavam andares inteiros e eram dedicados exclusivamente a cálculos complicadíssimos. Com a tecnologia dos semicondutores e a substituição das válvulas por transistores, veio a miniaturização dos componentes. E, com ela, os computadores se tornaram cada vez menores, mais velozes e potentes.

Mas a miniaturização não pode continuar indefinidamente e está limitada, em última instância, ao tamanho do átomo. Quando chegarmos aí, a partir da nanotecnologia, uma nova revolução acontecerá, pois entrarão em jogo as estranhas propriedades quânticas da matéria, que permitirão uma nova era na computação e na rapidez dos cálculos.

Os computadores quânticos usarão essas propriedades para resolver, em minutos ou em segundos, problemas que levariam milhares ou até milhões de anos para o mais veloz dos computadores deste início de século. Este capítulo se propõe a explicar e a descrever essa nova era, a chamada Era da Informação Quântica.

Prepare-se para essa revolução, que já começou!

112. | **EXPERIÊNCIAS INDIVIDUAIS** | JOVEM PROMESSA | POR PRINCÍPIO... A INCERTEZA | PILAR DE SUSTENTAÇÃO

114. | **COMPUTADOR QUÂNTICO** | VEDETE DA ÁREA | LEI EMPÍRICA | UM BIT, UM ÁTOMO | ZERO E UM, AO MESMO TEMPO | MUNDO ESTRANHO | DESENVOLVIMENTOS IMPORTANTES | TESTE DA MOEDA | ALGORITMO DE SHOR | CRENÇA NO CÓDIGO | CANDIDATOS A Q-BITS | QUESTÃO DE ANOS

119. | **CRIPTOGRAFIA QUÂNTICA** | MÉTODO INVIOLÁVEL | AÇÃO FANTASMAGÓRICA? | PARTÍCULAS GÊMEAS

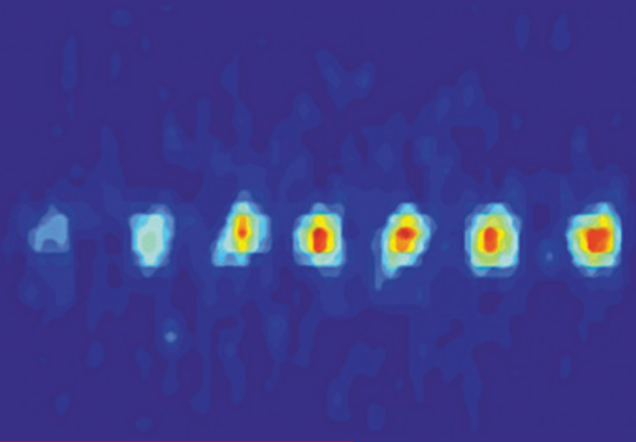
121. | **REALIDADE E PROMESSAS** | CONDENSADO GIGANTE | LASER DE ÁTOMOS | TELEPORTE | REALIDADE PRESENTE | CORPO MAGNÍFICO | NO BRASIL

EDITOR CIENTÍFICO | Ivan S. Oliveira (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/MCT)

EXPERIÊNCIAS INDIVIDUAIS

JOVEM PROMESSA

Há cinqüenta anos, qualquer proposta de fazer experiências com átomos, moléculas ou fótons (partículas de luz) individuais seria certamente tachada como pura ficção científica. Mas, neste início de século, isso não só é realidade, mas também objeto de pesquisa da chamada informação quântica, área que se tornou um tipo de jovem promessa da física. Hoje, de forma quase prosaica, laboratórios no mundo isolam um único fóton do contato com o universo, arrastam apenas um átomo com a ajuda de microscópios especiais, criam correntes elétricas de um só elétron ou aprisionam íons em campos magnéticos.



POR PRINCÍPIO... A INCERTEZA

No mundo macroscópico, basta saber a posição e o momento (o produto da massa pela velocidade) de um objeto qualquer para determinar seu estado e, a partir dele, prever, em qualquer instante, os resultados de medidas efetuadas sobre esse objeto. Porém, o estado de uma única

entidade quântica (molécula, átomo, elétron, fóton etc.) não pode ser medido com precisão. Em função das dimensões com que passamos a lidar, qualquer tentativa nesse sentido altera o estado do objeto que se quer medir. Assim, quando se consegue medir a posição de um elétron, por exemplo, a incerteza em relação à velocidade dessa partícula cresce vertiginosamente. E vice-versa. Essa é a essência do chamado princípio da incerteza, uma lei que se estende, por exemplo, a outros pares de grandezas, como energia e tempo.

PILAR DE SUSTENTAÇÃO

O estado quântico completo de uma única partícula não pode ser medido. Isso não só é fato, mas lei. Porém, surpreendentemente, percebeu-se que esse mesmo estado, apesar de desconhecido, poderia ser transmitido. E aí está, talvez, o principal pilar da informação quântica. Sustentado por ele, novos fenômenos foram propostos e outros obtidos em laboratório. Com isso, pode-se definir a área de informação quântica como o estudo de métodos para caracterizar, transmitir, armazenar, compactar e usar a informação contida em estados quânticos.

COMPUTADOR QUÂNTICO

VEDETE DA ÁREA

De um vasto menu de resultados experimentais surpreendentes e promessas teóricas instigantes, público e mídia parecem já ter escolhido a vedete da informação quântica: o computador quântico, que se tornou a mais popular faceta aplicada da área. Essa máquina, que já começa a sair do plano teórico, teria a capacidade de resolver em segundos ou poucos minutos problemas que dariam milhares ou milhões de anos de trabalho para o mais moderno computador deste início de século.

LEI EMPÍRICA

A primeira motivação – ainda que indireta – para o computador quântico surgiu ainda em 1965, quando Gordon Moore, fundador da Intel, uma das gigantes mundiais do ramo de informática, notou que, a cada 18 meses, os microprocessadores (chips com memória) dobravam tanto o número de transistores embutidos neles quanto a velocidade de processamento de informação. E, com isso, a representação física (número de átomos) de uma unidade (bit) de informação também diminuía significativamente. Essa observação tornou-se uma lei empírica, válida até hoje. Porém, esse não é o final da história.



INTEL



UM BIT, UM ÁTOMO

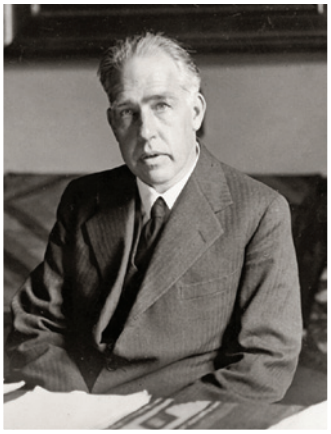
Hoje, cada bit de informação dentro dos computadores é representado por alguns bilhões de átomos. Porém, com base na lei de Moore, cada bit de informação, por volta de 2020, estará resumido a um único átomo, o que irá impor um limite físico ao desenvolvimento dos computadores. E, nessa escala de comprimento, não há saída: esse é o domínio da física quântica, teoria que nasceu no primeiro quarto do século passado e lida com os fenômenos na dimensão molecular, atômica e subatômica. Se a lei de Moore cumprir seu fatídico desígnio – e tudo indica que irá –, será necessário um novo paradigma computacional. É aí que entra o computador quântico.

ZERO E UM, AO MESMO TEMPO

Em um computador dos dias de hoje – denominado clássico pelos físicos –, um bit de informação pode assumir dois valores: zero ou um. Mas, na versão quântica desse equipamento, um bit pode representar, ao mesmo tempo, esses dois valores, graças a um fenômeno denominado superposição de estados. No mundo macroscópico, seria como se a face de uma moeda fosse, simultaneamente, cara e coroa, até que alguém decidisse observá-la ou efetuar uma medida sobre ela. Aí essa superposição se desfaria, e nossa moeda apresentaria ou cara ou coroa.

MUNDO ESTRANHO

O mundo quântico não parece estranho. Ele, certamente, é. A superposição é apenas um dos fenômenos que vão contra o senso comum. No nanouniverso, entidades podem se comportar ora como ondas, ora como corpúsculos. Podem até mesmo ocupar dois lugares ao mesmo tempo. Ou, de forma mais intrigante, manter um tipo de "comunicação telepática". Nada disso tem um correspondente em nosso dia-a-dia. O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) certa vez disse que aquele que não fica espantado diante da física quântica é porque não a entendeu. Outro grande físico do século passado, Richard Feynman (1918-1988) foi mais enfático. Para ele, quem afirmasse ter entendido a mecânica quântica estaria mentindo.



INSTITUTO NIELS BOHR

DESENVOLVIMENTOS IMPORTANTES

A lei de Moore indicou que a tecnologia do silício estaria com seus dias contados. O computador quântico ganhou algum fôlego apenas nas décadas seguintes, impulsionado por desenvolvimentos importantes. Em 1973, Charles Bennett, da empresa IBM, mostrou que seria possível fazer um computador no qual a informação que entra poderia ser recuperada a partir daquela que sai, algo que, em certos casos, é impossível para os computadores clássicos. Nove anos depois, Paul Benioff, do Laboratório Nacional Argonne (Estados Unidos), mostrou que a física quântica era o cenário natural para a máquina imaginada por Bennett, pois essa reversibilidade é uma característica natural dessa teoria.

TESTE DA MOEDA

Em 1985, David Deutsch idealizou o primeiro procedimento matemático (algoritmo) para a resolução de um problema em um computador quântico. Com isso, o físico da Universidade de Oxford (Inglaterra) mostrou que, num computador quântico, o número de etapas para resolver um problema seria bem menor que aquele num computador clássico. Para entender o que Deutsch propôs, imagine um teste: se uma moeda tiver cara e coroa, será considerada verdadeira. Em qualquer outra situação, falsa. Para testar a moeda, um computador clássico precisaria de dois passos: checar um lado e depois outro. Num computador quântico, os dois lados da moeda poderiam ser verificados simultaneamente, numa só etapa.

ALGORITMO DE SHOR

Mas foi em 1994 que se injetou uma dose maior de realidade nos computadores quânticos. Peter Shor, então pesquisador dos Laboratórios Bell (Estados Unidos), apresentou um algoritmo quântico para fatorar números muito grandes. O candidato natural para o teste era o RSA, um procedimento para criar códigos secretos com base na multiplicação de números primos. Esses códigos são tidos como invioláveis e, por isso, empregados hoje para proteger dados cujo conteúdo deve ser sigiloso.

CRENÇA NO CÓDIGO

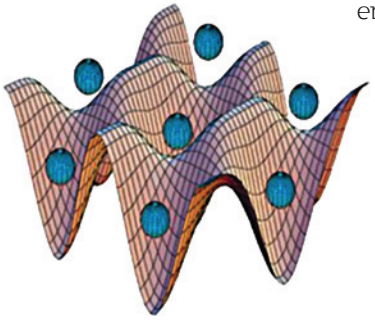
Toda a crença na inviolabilidade da transmissão sigilosa de dados (senhas bancárias, números de cartão de crédito etc.) baseia-se no fato de um código gerado pelo RSA – que leva as iniciais de seus idealizadores, Ron Rivest, Adi Shamir e Len Adleman – ser praticamente inviolável, pois computadores modernos levariam muito tempo para chegar à informação que foi codificada. Porém, recentemente, computa-

dores em rede, conectados pela internet, "quebraram" um código RSA. Isso mostrou que era só uma questão de força bruta computacional. Contudo, para um computador quântico rodando o algoritmo de Shor, isso seria uma tarefa para lá de trivial: o processamento levaria segundos ou, no pior cenário, alguns poucos minutos.

CANDIDATOS A Q-BITS

Num computador clássico, um bit é representado fisicamente por um componente eletrônico dentro do chip. Para um q-bit (do inglês, quantum bit), já há uma lista de candidatos: íons aprisionados em armadilhas magnéticas; átomos e fótons armazenados em cavidades supercondutoras de eletricidade; átomos ocupando "vales" de uma rede cristalina óptica ("superfície" que lembra uma caixa de ovos formada por ondas eletromagnéticas estacionárias); pontos quânticos (conjunto de elétrons confinados a dimensões nanométricas). Porém, o candidato mais promissor é uma propriedade dos núcleos atômicos conhecida como spin nuclear, que pode ser grosseiramente comparada com a rotação de um objeto macroscópico. A diferença com o mundo macroscópico é que um spin nuclear, graças ao fenômeno da superposição de estados, pode "girar" nos dois sentidos, horário e anti-horário, o que, como se sabe, é impossível para um pião, por exemplo. A manipulação da informação contida nos q-bits seria feita por ressonância magnética nuclear, a mesma técnica empregada em exames médicos e conhecida há cerca de cinqüenta anos.

C. MONROE-NATURE 21-08-97, NEWS AND VIEWS, PP. 719-720



Átomos ocupando "vales" de uma rede cristalina óptica

QUESTÃO DE ANOS

Em 2001, pesquisadores da IBM conseguiram fazer uma demonstração experimental do algoritmo de Shor ao realizar a fatoração do número 15 em fatores primos (15=3x5). O papel de computador quântico foi desempenhado por moléculas de $C_{11}H_5F_5O_2Fe$, cuja estrutura continha sete q-bits. Nada muito instigante do ponto de vista da capacidade computacional, mas um feito que reforçou a crença de que os computadores quânticos, em questão de anos, já serão realidade, com q-bits robustos e baseados num sistema físico que permita a geração, manipulação e leitura de estados quânticos estáveis.



CRIPTOGRAFIA QUÂNTICA

MÉTODO INVIOLÁVEL

Um desdobramento que certamente terá uma aplicação tão vasta quanto a dos computadores quânticos é a chamada criptografia quântica, um processo dito inviolável para a transmissão segura de dados confidenciais.

AÇÃO FANTASMAGÓRICA?

Para entender por que a criptografia quântica é dita 100% segura, é preciso recorrer a um dos fenômenos mais bizarros da natureza: o emaranhamento de partículas. Nele, duas partículas – fótons, por exemplo – são criadas em condições especiais e passam, a partir daí, a se comportar como se esti-

vessem sempre conectadas uma a outra, independentemente da distância entre elas, como em um tipo de telepatia. Qualquer alteração do estado quântico de uma implica a mudança instantânea do estado da segunda, mesmo que o par esteja separado por milhares ou milhões de km de distância. O físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) achava tão esquisita essa propriedade que a batizou "fantasmagórica ação a distância". Outro físico, o austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), a classificou como "a" propriedade mais importante da física quântica.

PARTÍCULAS GÊMEAS

O processo da criptografia quântica se dá mais ou menos assim: criam-se pares de partículas gêmeas (ou emaranhadas) – isso pode ser feito com qualquer partícula, até mesmo com átomos. O integrante de cada par é enviado para um receptor, por meio de um meio (fibra óptica, no caso de fótons), carregando a mensagem, na forma de informação quântica, que se quer transmitir. Agora, vamos imaginar que uma pessoa mal-intencionada resolva interceptar uma ou mais dessas partículas para tentar arrancar delas a mensagem sigilosa. Ao fazer isso, alterará o estado quântico de cada uma delas. Ao final do processo, o emissor comparará o estado quântico de suas partículas com o daquelas em posse do destinatário. Caso haja alguma diferença entre os dois conjuntos, ambos ficam sabendo que houve uma tentativa de interceptação da mensagem e, com isso, podem tomar as medidas necessárias.

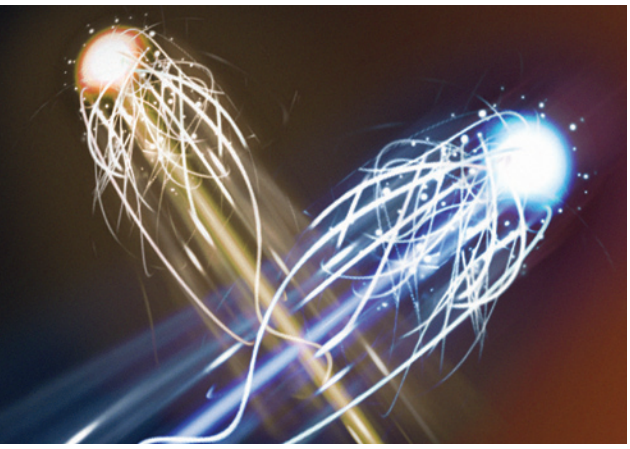
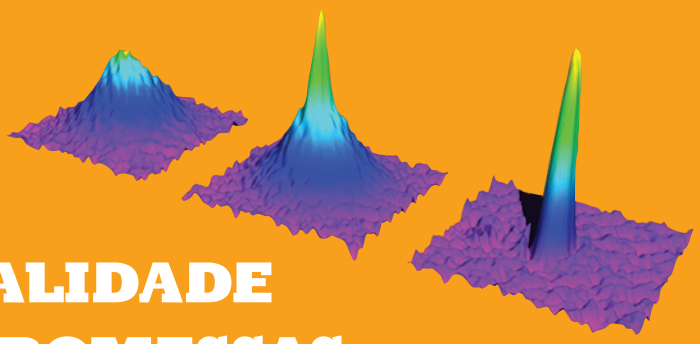


ILUSTRAÇÃO LUIZ BALTAR



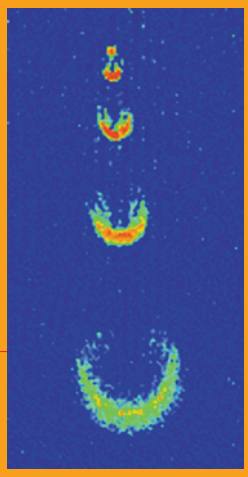
REALIDADE E PROMESSAS

CONDENSADO GIGANTE

A área da informação quântica se estende além da computação e criptografia. Ela engloba e prevê vários outros fenômenos. Um deles é o condensado de Bose-Einstein, uma referência ao físico indiano Satyendra Bose (1894-1974) e ao físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955). Previsto em meados da década de 1920, esse fenômeno é representado por um aglomerado de partículas, mantido a temperaturas baixíssimas, que se comporta coletivamente, como se fosse um "átomo gigante", o que permite estudar macroscopicamente detalhes do mundo quântico.

LASER DE ÁTOMOS

Demonstrado experimentalmente há cerca de uma década, a novidade sobre os condensados de Bose-Einstein é que a incidência de ondas de rádio sobre esse aglomerado possibilita extrair dele uma "fila" ordenada de partículas que vem sendo denominada "laser" de átomos, dada sua semelhança com o fenômeno óptico. Já se vislumbra que esse tipo de laser poderia servir de base



WOLFGANG KETTERLE/MIT (EUA)

para o desenvolvimento de instrumentos capazes tanto de aumentar a resolução dos intricados desenhos que formam os chips quando medir diminutas variações do campo gravitacional e, com isso, detectar campos de petróleo, por exemplo.

TELEPORTE

Entre as diversas promessas experimentais da área de informação quântica está o chamado teleporte, descoberto em 1993 por Bennett e colegas. Quando foi obtido experimentalmente em 1997, pela equipe de Dik Bouwmeester, da Universidade de Oxford, o fenômeno ganhou a mídia mundial e foi logo associado (erroneamente) ao teletransporte da série *Jornada nas Estrelas*, por meio do qual tripulantes eram transportados da nave Enterprise para a superfície dos planetas e de lá resgatados. A diferença é que nesse equipamento fictício havia transporte de matéria. No teleporte, há apenas a transmissão da impalpável informação quântica de uma partícula (fóton, átomo etc.) para seu par gêmeo, feita com base no fenômeno do emanharamento.

REALIDADE PRESENTE

Arthur Eckert, também de Oxford, disse que, assim que o primeiro computador quântico entrar em funcionamento, todos os sistemas de transmissão de informação deixarão de ser seguros. E isso parece ser consenso entre seus colegas. O computador quântico ainda está longe dos mil q-bits com os quais, acredita-se, começará a provar seu potencial, mas muitos acreditam que o primeiro chip quântico será apresentado ao mundo antes da data-limite imposta pela lei de Moore. O emaranhamento já é bem-sucedido com aglomerados de trilhões (10^{12}) partículas, e a criptografia quântica

já está sendo empregada, em escala piloto, para transações bancárias na Europa e em redes de comunicação unindo universidade e empresas nos Estados Unidos. Empresa dedicadas exclusivamente à computação quântica já estão funcionando. O futuro parece ser quântico.

CORPO MAGNÍFICO

A área de informação quântica nasceu dos esforços dos físicos em compreender as sutilezas teóricas e experimentais da física quântica e poderá criar ferramentas poderosas para tornar mais transparente esse magnífico corpo teórico. Como disse Feynman, ainda na década de 1980, sistemas físicos quânticos só podem ser simulados com eficiência em computadores quânticos. A área de informação quântica é a prova cabal de que a ciência básica, desinteressada, ainda é a base de sustentação do progresso tecnológico e a principal promotora do bem-estar humano.


CALTECH

NO BRASIL

Em 2001, foi estabelecido no Brasil o Instituto do Milênio de Informação Quântica (IMIQ), para coordenar a pesquisa dos vários grupos que atuam nessa área no país. Alguns temas de pesquisa realizada por aqui: átomos aprisionados em cavidades supercondutoras; criação e estudo de fótons emaranhados; pinças ópticas; pontos quânticos e ressonância magnética nuclear aplicada à computação quântica.



Neutrinos

As misteriosas partículas-fantasma

Dos 12 diferentes tipos de constituintes elementares da matéria, o neutrino é, sem dúvida, o mais intrigante e enigmático. Como não tem carga elétrica e é também indiferente à força que une os núcleos atômicos, praticamente não interage com a matéria, atravessando tudo que passa por sua frente e viajando pelo espaço sem ser incomodado.

O neutrino foi proposto em 1930 para conservar o balanço de energia (que estava faltando) numa reação. Mas, por muito tempo, pensou-se que seria impossível comprovar sua existência, tão fugidio que é. Entretanto, como é produzido em grande quantidade em reações nucleares (como as que ocorrem nas estrelas), o truque usado para detectá-lo foi fazer uma experiência próxima a um potente reator nuclear, pois neutrinos são produzidos em grande número em processos de fissão de núcleos atômicos e, vez por outra, um acaba interagindo com a matéria do detector.

Mais tarde, descobriu-se que existem três diferentes tipos de neutrinos, o último deles tendo sido descoberto em 2000. Inicialmente previstos como partículas sem massa, os neutrinos nos surpreenderam mais uma vez, quando ficou evidente que não só tinham massa, mas também se transformavam uns nos outros, mudando de "aparência" como um camaleão. Mas a estranheza dessa partícula não acaba por aí. Desconfia-se agora que os neutrinos possam ter algo a ver com o sumiço da antimatéria do universo.

Com tantas questões em aberto sobre os neutrinos, parece que o estudo dessa partícula será um dos temas mais importantes da física neste início de século.

126. | **POR TODA PARTE** | CHUVA INVISÍVEL | A MAIS "ANTI-SOCIAL"

127. | **COMO TUDO COMEÇOU** | FILÃO PERDIDO | PILAR SAGRADO | SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS... | MUITO "GORDO" | PEQUENO NÊUTRON | TRÊS TIPOS

130. | **A PRINCIPAL FONTE** | 60 BILHÕES POR SEGUNDO | EFEITO URCA | CHANCES MÍNIMAS | DISPARIDADE CONFIRMADA | EXPLOSÃO CÓSMICA

133. | **O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES** | TEORIA *VERSUS* EXPERIMENTO | MUDANÇA DE SABOR | NO MEIO DOS REATORES | QUAL O MECANISMO?

135. | **REDES DE CAPTURA** | LUZ TÊNUE | GIGANTESCO COLAR DE PÉROLAS | CUBO DE GELO | ANGRA DOS REIS | MINOS

138. | **DESAFIOS** | PARCELA DA MATÉRIA ESCURA | MESMA PARTÍCULA? | AONDE FOI A ANTIMATÉRIA?

EDITOR CIENTÍFICO | Marcelo Moraes Guzzo
(Instituto de Física Gleb Wataghin/Universidade Estadual de Campinas)

POR TODA PARTE

CHUVA INVISÍVEL

Até o final da leitura deste capítulo, cada um de nós terá emitido cerca de 10 milhões de neutrinos, devido a 20mg de um elemento radioativo, o potássio 40 ($^{40}_{19}K$), presente em nossos organismos. Além disso, num único segundo, estamos sendo atravessados por 50 bilhões dessas partículas provenientes da radioatividade natural da Terra e por outros 10 bilhões a 100 bilhões gerados em reatores nucleares pelo mundo. Completam essa chuva invisível mais cerca de 300 trilhões de neutrinos vindos do Sol.

A MAIS "ANTI-SOCIAL"

Felizmente, para nossa saúde, os neutrinos interagem muito pouco com a matéria. Por exemplo, um neutrino com energia moderada pode atravessar nosso corpo, passar incólume por todo o planeta e, de modo mais impressionante ainda, viajar através de uma parede de chumbo com 9,5 trilhões de quilômetros de espessura sem se "chocar" (ou interagir) com nada. Caso houvesse um "clube" das partículas subatômicas, certamente o neutrino seria classificado como a mais "anti-social" delas. E, por isso, "capturá-los" para estudo é tarefa árdua para os cientistas.

COMO TUDO COMEÇOU

FILÃO PERDIDO

Desde 1914, os físicos que estudavam as propriedades atômicas se deparavam com um problema relacionado ao decaimento beta, um tipo de radioatividade emitida por certos núcleos atômicos. Notava-se algo de estranho nesse fenômeno, no qual (como se observava na época) um elétron era emitido pelo núcleo. Porém, as contas do balanço energético não fechavam, ou seja, quando se somava a energia da partícula expelida com a do núcleo recém-criado, obtinha-se menos energia que aquela contida no núcleo inicial. Faltava um filão (diminuto, é verdade) de energia.

PILAR SAGRADO

Ao longo da década de 1920, esse fenômeno resistiu a todas as tentativas de explicação. Primeiramente, achou-se que um raio gama (partícula de luz energética) estava sendo emitido juntamente com o elétron. Mas experimentos feitos em 1927 e em 1930 desbancaram essa hipótese. Frente a esse problema, grandes físicos da época reagiram de modo muito diferente. Niels Bohr (1885-1962), num ato de desespero, se mostrou pronto a abandonar a lei da conservação da energia, um pilar sagrado da física. Quando soube da proposta de seu colega dinamarquês, o inglês Paul Dirac (1902-1984) respondeu: "Somente por cima do meu cadáver [a lei da conservação da energia será abandonada"].

SENHORAS E SENHORES RADIOATIVOS...

Em 4 de dezembro de 1930, o físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) escreveu, de Zurique (Suíça), uma carta para sua colega e compatriota Lisa Meitner (1878-1968). Aquela uma página, que deveria ser lida para os participantes de uma conferência em Tübingen (Alemanha), começava assim: "Caros senhoras e senhores radioativos...". Nos parágrafos seguintes, escreveu Pauli, "uma nova partícula pode estar sendo emitida juntamente com o elétron, carregando a energia que falta". Batizada provisoriamente por Pauli de partícula X, ela seria neutra (sem carga elétrica), possivelmente sem massa e responsável pelo filão de energia faltante no decaimento beta.



CERN

MUITO "GORDO"

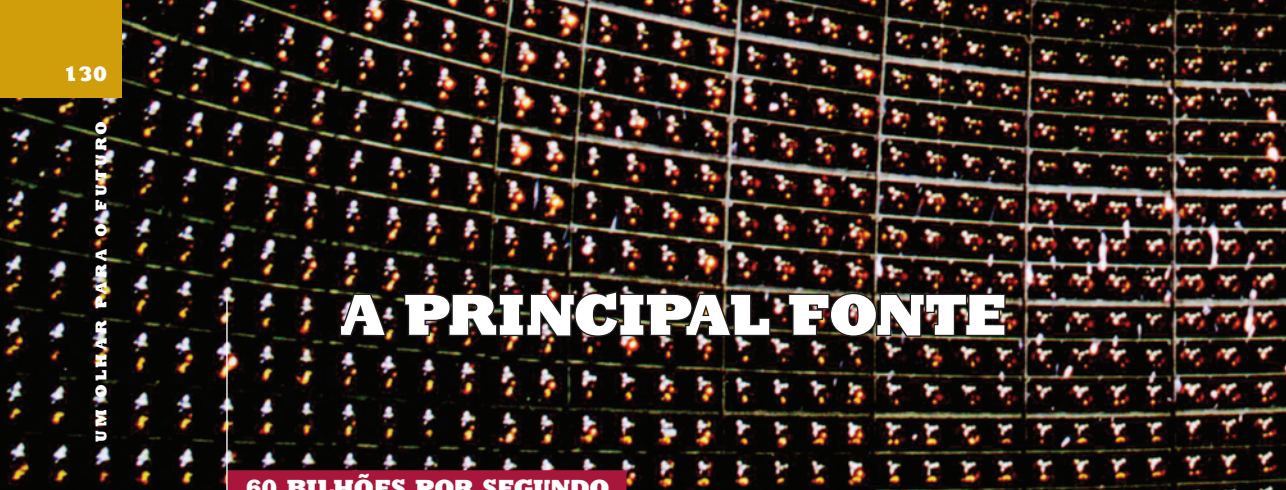
Dois anos depois, o físico inglês James Chadwick (1891-1974) – por sinal, um dos primeiros a desconfiar de que havia algo de estranho com o decaimento beta – descobriu o nêutron (também sem carga e companheiro do próton no núcleo atômico). Inicialmente, achou-se que se tratava da nova partícula, mas logo se percebeu que sua massa era "enorme", praticamente igual à do próton. Enfim, o nêutron era muito "gordo" para desempenhar o papel atribuído por Pauli à misteriosa partícula X.

PEQUENO NÊUTRON

Em 1933, o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) incorporou o neutrino (por sinal, nome dado por ele, para designar, em italiano, o "pequeno nêutron") a uma teoria elegante, desenvolvida por ele, para explicar o decaimento beta, que passou a ser o seguinte: um nêutron decai (se transforma) em próton dentro do núcleo, emitindo um elétron e um neutrino (na verdade, um antineutrino), sendo que este carrega a misteriosa energia que faltava. Assim, um novo núcleo é formado. Nele, há um próton a mais e, portanto, o número atômico (Z) fica aumentado de uma unidade. Exemplos de decaimento beta: potássio decaindo em cálcio ($^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca + e + anti\text{-}\nu$); cobre, em zinco ($^{64}Cu \rightarrow {}^{64}Zn + e^{-} + anti\text{-}\nu$); trítio em hélio ($^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + e^{-} + anti\text{-}\nu$).

TRÊS TIPOS

Sabe-se atualmente que existem três tipos de neutrinos, associados a outros integrantes da família dos léptons, que inclui, além do elétron, outros dois parentes deste, porém mais pesados: o múon (μ) e o tau (τ). Em 1956, foi detectado o primeiro tipo, o chamado neutrino do elétron (ν_e), pelos norte-americanos Clyde Cowan (1919-1974) e Frederick Reines (1918-1998). Em 1962, os físicos norte-americanos Melvin Schwartz, Leon Lederman e Jack Steinberger descobriram o neutrino do múon (ν_μ). Finalmente, em 2000, uma colaboração internacional, a Donut (sigla, em inglês, para Observação Direta do Neutrino do Tau), cujos experimentos foram realizados no acelerador de partículas Fermilab (Estados Unidos), apresentou ao mundo evidências do último deles: o neutrino do tau (ν_τ).



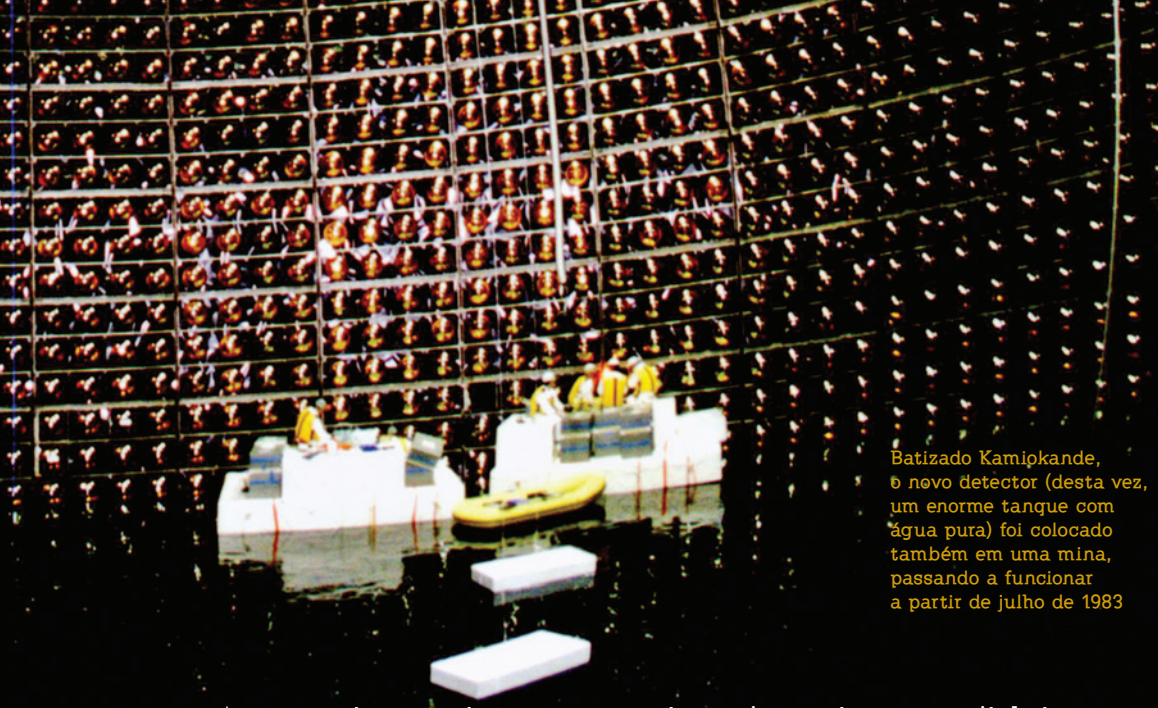
A PRINCIPAL FONTE

60 BILHÕES POR SEGUNDO

A maior parte dos neutrinos que nos atinge provém do Sol. A reação nuclear que produz esses neutrinos é a mesma que produz luz e calor nas estrelas, baseada principalmente na fusão de núcleos de hidrogênio para gerar os de hélio. Para cada dois neutrinos produzidos no Sol, uma diminuta parcela de energia (cerca de 25 milhões de elétrons-volt, sendo o elétron-volt uma unidade de energia muito pequena) é liberada. Lembrando que a distância da Terra ao Sol é da ordem de 150 milhões de quilômetros, pode-se estimar o fluxo de neutrinos solares que chega à Terra: cada centímetro quadrado da atmosfera terrestre é perfurado, por segundo, por cerca de 60 bilhões de neutrinos solares.

EFEITO URCA

Por interagir muito pouco com a matéria, os neutrinos escapam rapidamente do interior das estrelas, drenando parte da energia produzida nas reações nucleares. Uma das formas de perda de energia pelas estrelas por meio da produção de neutrinos foi proposta na década de 1940 numa colaboração entre o físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) e o russo George Gamow (1904-1968). Eles propuseram que núcleos do interior de estrelas supermassiva absorveriam elétrons e, com isso, gerariam neutrinos. Em seguida, esses núcleos "cuspiriam" de volta a partícula absorvida, juntamente com um antineutrino. Esse processo acabou ganhando o nome efeito Urca, porque os neu-



Batizado Kamiokande, o novo detector (desta vez, um enorme tanque com água pura) foi colocado também em uma mina, passando a funcionar a partir de julho de 1983

KAMIOKANDE

trinos sumiam com a energia estelar, assim como o dinheiro sumia, na época, das mãos dos apostadores no famoso cassino da Urca, na cidade do Rio de Janeiro.

CHANCES MÍNIMAS

Observações pioneiras de neutrinos solares receberam o prêmio Nobel de Física 2002, dado ao norte-americano Raymond Davis Jr. e ao japonês Masatoshi Koshiba. O primeiro deles idealizou e construiu o experimento Homestake, que funcionou, entre 1970 e 2000, numa mina no estado de Dakota do Sul (Estados Unidos). Davis usou um tanque gigantesco, contendo 615t de moléculas cuja composição continha cloro (C_2Cl_4). Ao todo, no tanque, havia 10^{30} (o número 1 seguido de 30 zeros!) átomos de cloro. Com o choque de um neutrino energético, um desses átomos de cloro se transforma em argônio radioativo, que, com muito esforço e sutileza técnica, poderia ser detectado. As chances de ocorrerem essas reações eram mínimas, mas não nulas. Foi nisso que Davis apostou. Ao longo dos trinta anos que o experimento funcionou, Davis capturou cerca de 2 mil átomos de argônio. Pelas suas contas, deveriam ser, pelo menos, sete mil. O que estaria acontecendo?

DISPARIDADE CONFIRMADA

No Japão, experimento semelhante foi construído por Koshiba e equipe. Batizado Kamiokande, o novo detector (desta vez, um enorme tanque com água pura) foi colocado também em uma mina, passando a funcionar a partir de julho de 1983. Caso um elétron desse tanque de água fosse atingido por um neutrino, ele produziria uma luz tênue, que seria captada por fotomultiplicadoras (sensores de luz que lembram lâmpadas caseiras no formato, mas com dimensões maiores). Koshiba pôde comprovar os resultados de Davis: havia uma disparidade entre o número previsto e o capturado de neutrinos solares. O Kamiokande, que era sensível à direção de chegada dessas partículas, mostrou, pela primeira vez, que os neutrinos vinham realmente do Sol.

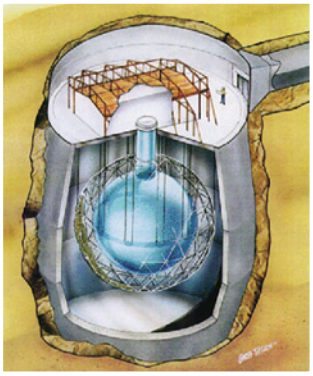
EXPLOSÃO CÓSMICA

O Kamiokande (sigla, em inglês, para Experimento Kamioka de Decaimento de Núcleons) inesperadamente conseguiu um feito espetacular. Em 23 de fevereiro de 1987, capturou os neutrinos emitidos pela explosão de uma estrela maciça que chegou ao final da vida (essa explosão cósmica é denominada supernova). Estima-se que a supernova 1987A, que explodiu numa galáxia vizinha, a Grande Nuvem de Magalhães, a cerca de 170 mil anos-luz da Terra (cada ano-luz equivale a 9,5 trilhões de km), tenha emitido um número astronômico de neutrinos (10^{58}, ou seja, 1 seguido de 58 zeros), sendo que 10 mil trilhões (10^{16}) deles passaram pelo tanque de água do experimento. Total de neutrinos capturados: 12, o que dá uma idéia de quão fugidia é essa partícula, merecidamente denominada fantasma.

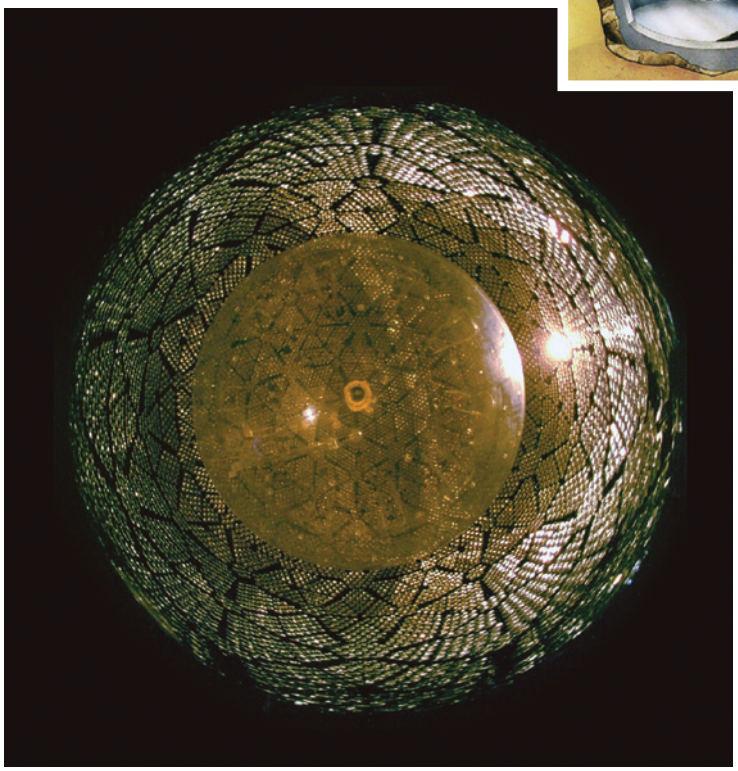
O PROBLEMA DOS NEUTRINOS SOLARES

TEORIA *VERSUS* EXPERIMENTO

Cálculos indicavam quantos neutrinos deveriam chegar à Terra vindos do Sol. Mas, por cerca de trinta anos, resultados de experimentos indicavam que apenas cerca da metade deles era capturada, em franco desacordo com a teoria. A resposta para esse intrigante mistério só veio há poucos anos, principalmente com o resultado de um experimento: o SNO (sigla, em inglês, para Observatório de Neutrino de Sudbury), no Canadá.



SNO



Vista inferior do detector do SNO. No destaque, concepção artística do experimento

MUDANÇA DE SABOR

Experimentos anteriores só haviam captado predominantemente neutrinos do elétron. Porém, em 2002, o SNO comprovou uma hipótese que havia sido apresentada no final da década de 1960 pelo físico italiano Bruno Pontecorvo (1913-1993), então trabalhando na União Soviética: os neutrinos podem mudar de tipo, ou seja, um neutrino do elétron, por exemplo, em seu caminho do Sol à Terra, pode se transformar em um dos outros dois tipos, fenômeno que os físicos denominam mudança (ou oscilação) de sabor.

NO MEIO DOS REATORES

O SNO mostrou que realmente os neutrinos solares mudavam de sabor, mas restava descobrir que misterioso mecanismo possibilitava essa conversão. A resposta veio com os resultados do experimento KamLAND (sigla, em inglês, para Detector Kamioka de Antineutrinos à base de Cintilador Líquido). O experimento está localizado estrategicamente no centro da ilha de Honshu, a principal do Japão, recebendo um fluxo de neutrinos produzidos nas reações que ocorrem em cerca de vinte reatores nucleares a aproximadamente 180km de distância.

QUAL O MECANISMO?

Várias hipóteses concorriam para explicar a mudança de sabor. A mais forte delas era uma implicação direta desse fenômeno: os neutrinos, tidos até então como partículas sem massa, deveriam ser maciços. Porém, havia ainda a possibilidade de a conversão de sabor estar ocorrendo i) pela interação de propriedades do neutrino com campos magnéticos intensos; ii) por alguma interação do neutrino ainda desconhecida; e iii) pelo efeito de campos gravitacionais também intensos. O KamLAND descartou todas estas três, deixando apenas a possibilidade de as oscilações de um tipo em outro ocorrerem porque os neutrinos são maciços.

REDES DE CAPTURA

LUZ TÊNUE

Juntamente com as partículas de luz (fótons), os neutrinos são os fragmentos de matéria mais abundantes do universo: há cerca de 100 deles por centímetro cúbico do espaço interestelar (para os fótons, esse número é de aproximadamente 400). Parte desses neutrinos pode ser detectada. E a física por trás desses experimentos é basicamente essa: um neutrino interage com uma partícula, gerando outro neutrino, bem como uma luz muito tênue, que, quando captada por sensores (fotomultiplicadoras, cintiladores etc.), revela que reação descrita ocorreu.

GIGANTESCO COLAR DE PÉROLAS

Alguns neutrinos com altas energias que chegam à Terra estão sendo observados em detectores como o Amanda (sigla, em inglês, para Rede de Detectores de Múons e Neutrinos da Antártida). Como o nome indica, esse experimento opera no pólo Sul e detecta neutrinos que provêm do hemisfério Norte celeste, depois de terem atravessado a Terra. Ele é formado por 19 cabos com comprimento entre 1,5km e 2km, cada um contendo 700 fotomultiplicadoras, como se formassem um gigantesco colar de pérolas. Cada sensor está acondicionado num invólucro plástico transparente, para agüentar a pressão das profundidades geladas.



AMANDA

Amanda (sigla, em inglês, para Rede de Detectores de Múons e Neutrinos da Antártida)

CUBO DE GELO

O sucessor do Amanda será o IceCube (Cubo de Gelo), cujas dimensões impressionam. Previsto para entrar em operação em 2010, será formado por oitenta cabos com cerca de sessenta sensores cada. Total: 4,8 mil fotomultiplicadoras enterradas no gelo, ocupando um volume subterrâneo de um quilômetro cúbico. Para os próximos anos, mais outros experimentos do gênero devem entrar em funcionamento: o Nestor e o Antares. Porém, dessa vez, os sensores estarão submersos nas águas da costa da Grécia e da França, respectivamente.

ANGRA DOS REIS

Se os neutrinos oscilam, necessariamente eles apresentam propriedades que ainda precisam ser investigadas. Em particular, não se conhecem ainda detalhes sobre como os neutrinos do elétron se transformam em neutrinos do tau. Essa dúvida poderá ser esclarecida por um experimento proposto para ser executado em Angra dos Reis (RJ), utilizando os neutrinos eletrônicos (na verdade, antineutrinos) produzidos nos reatores das usinas nucleares de Angra I e Angra II. O projeto Angra ν (lê-se "Angra Ni") vai medir o fluxo de neutrinos nas proximidades dos reatores e compará-lo com o fluxo a cerca de 1,5km de distância dali, num grande detector construído embaixo da serra do Mar. Uma diferença entre o fluxo medido e o fluxo calculado com base na teoria permitirá determinar em que proporção os neutrinos do elétron mudam de sabor. Esse experimento colocaria o Brasil na



FOTO JOÃO DOS ANJOS

Usina nuclear em Angra dos Reis (RJ)



aventura da descoberta das propriedades dessa partícula fascinante. Assim como o Angra ν, três experimentos semelhantes estão sendo projetados e construídos ao redor do mundo (França, China e Coréia do Sul) .

MINOS

O Brasil também tem participação no Minos (sigla, em inglês, para Busca pela Oscilação de Neutrinos com o Injetor Principal), cujo objetivo é também estudar as oscilações dos neutrinos do múon. A diferença, nesse caso, é que a fonte dessas partículas é o acelerador (mais especificamente, o injetor principal) do Fermilab. O Minos trabalha com o feixe mais intenso de neutrinos criado pelo homem. Os detectores são formados por cerca de 6 mil toneladas de ferro e sensores (cintiladores). O primeiro deles fica a 290 metros da saída do feixe. O segundo está localizado numa velha mina de ferro em Soudan, no norte do estado de Minnesota, a 730 km dali. O K2K, no Japão, usou recurso semelhante. Em 4,5 anos de funcionamento, detectou 107 neutrinos, 44 a menos do que o esperado caso não houvesse a oscilação de sabor.

DESAFIOS

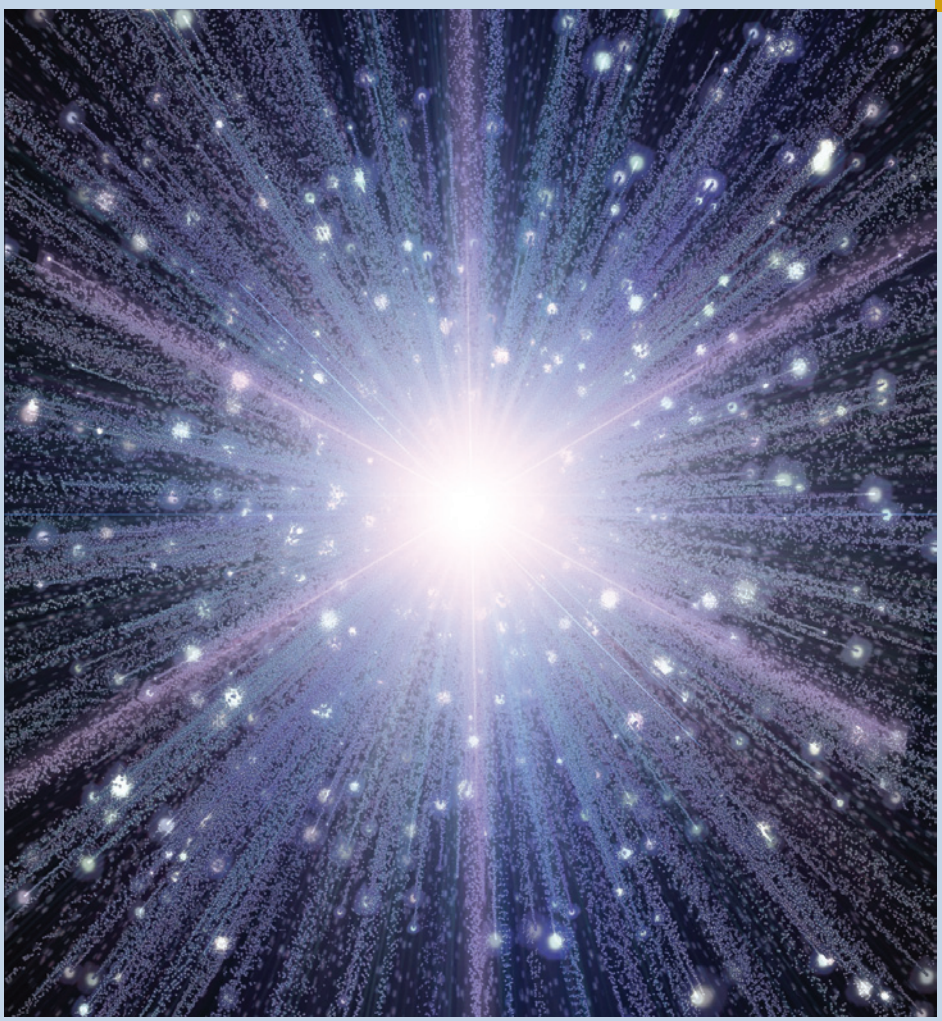
PARCELA DA MATÉRIA ESCURA

Descobrir que os neutrinos têm massa representa apenas a resolução de uma das propriedades das partículas-fantasma. Porém, há outras questões sem resposta. Não se sabe ainda o valor exato da massa dos neutrinos, e isso já é objeto de novas pesquisas. O fato de os neutrinos terem massa tem também implicações profundas para a composição e o destino do universo. Acredita-se que essas partículas devam compor uma pequena parcela da chamada matéria escura, que só pode ser detectada por sua ação gravitacional e representa cerca de 25% da composição atual do universo.

MESMA PARTÍCULA?

Além disso, não se sabe até hoje se os neutrinos e suas antipartículas, os antineutrinos, são ou não a mesma partícula. Por exemplo, um nêutron pode ser diferenciado de um antinêutron. Já um fóton, também sem carga elétrica, é sua própria antipartícula, ou seja, não é possível nem faz sentido distingui-los. Em 1937, pouco antes de desaparecer misteriosamente, o físico italiano Ettore Majorana (1906-1938) propôs que neutrinos e antineutrinos seriam a mesma partícula, ou seja, seria impossível diferenciar um do outro. Experimentos tecnicamente complicados tentam hoje testar essa hipótese. Se ela for verdadeira, os físicos terão que tornar ainda mais complexa a teoria que vêm empregando desde a década 1970 para estudar o mundo subatômico. E aí uma nova era estaria começando para a física das partículas elementares.





AONDE FOI A ANTIMATÉRIA?

Pesquisas com os neutrinos solares e com aqueles produzidos pela colisão de raios cósmicos contra núcleos atmosféricos revelaram detalhes importantes sobre a oscilação dessas partículas. Agora, o estudo dos neutrinos produzidos em aceleradores e daqueles gerados em reatores nucleares poderá completar esse conhecimento. Além disso, experimentos como o Angra ν e o Minos poderão indiretamente ajudar a responder um dos maiores mistérios da ciência: por que a antimatéria é tão rara no universo, já que, acredita-se, ela foi criada na mesma proporção que a matéria no Big Bang?



Biofísica

Duas visões da vida

Quem nunca se perguntou a razão de existirmos? Afinal, se a tendência é sempre aumentar a entropia ou a desordem no universo, como justificar o aparecimento de sistemas ordenados e altamente complexos, que levaram à criação de formas de vida tão diversas? Para muitos, isso só pode ser explicado pela existência de uma força divina, acima da natureza e que tudo teria criado. Não cabe à ciência discutir essa questão, mas tentar entender a natureza, os mecanismos e os processos envolvidos na evolução do universo.

Nos últimos cinqüenta anos, um grande progresso foi realizado no estudo dos seres vivos, graças a técnicas que permitiram examinar os sistemas biológicos na escala atômica e molecular, possibilitando entender os processos químicos e físicos que governam as trocas dos sistemas biológicos com o mundo exterior. Desse cenário, surgiu uma nova ciência, a biofísica, que atua na fronteira entre a biologia e a física.

142. | **A BIOLOGIA E A FÍSICA** | ÉLAN VITAL | DOMÍNIO DA FÍSICA | DOIS ENFOQUES

144. | **ENTROPIA E VIDA** | TROCAS COM O MEIO | AINDA SEM DEFINIÇÃO | CONCEITO REVOLUCIONÁRIO | DESORDEM MÁXIMA | PRETO NO BRANCO | FLECHA DO TEMPO

147. | **EVOLUÇÃO POR SELEÇÃO NATURAL** | SEMELHANTE, MAS NÃO IGUAL | VIDA DIGITAL

148. | **ESCALAS DA BIOFÍSICA** | DO MOLECULAR AO COSMOLÓGICO | MICRO, MESO E MACRO | INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS

150. | **COMPLEXIDADE** | QUATRO ÁTOMOS DE FERRO | FERRAMENTAS PARA MACROMOLÉCULAS | CANAIS DE PASSAGEM

151. | **O DNA E O CÓDIGO GENÉTICO** | MOLÉCULA DA VIDA | QUATRO BASES | PONTES DE HIDROGÊNIO | HÉLICES IDÊNTICAS | SUTILEZAS DESCONHECIDAS

153. | **DETECTORES BIOLÓGICOS** | MIGRAR É PRECISO | PERGUNTAS SEM RESPOSTA | OTIMIZADOS PELA NATUREZA

155. | **NEURÔNIOS** | ESPALHADOS PELO CORPO | SUBSTÂNCIAS LIBERADAS | COMPUTADOR BIOLÓGICO

156. | **APLICAÇÕES** | TÉCNICAS, DROGAS E TERAPIAS

157. | **VIDA EXTRATERRESTRE** | ALÉM DA IMAGINAÇÃO | VIDA FORA DA TERRA?

EDITORES CIENTÍFICOS | Henrique Lins de Barros (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / MCT) | Daniel Acosta Avalos (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas / MCT)



A BIOLOGIA E A FÍSICA

ÉLAN VITAL

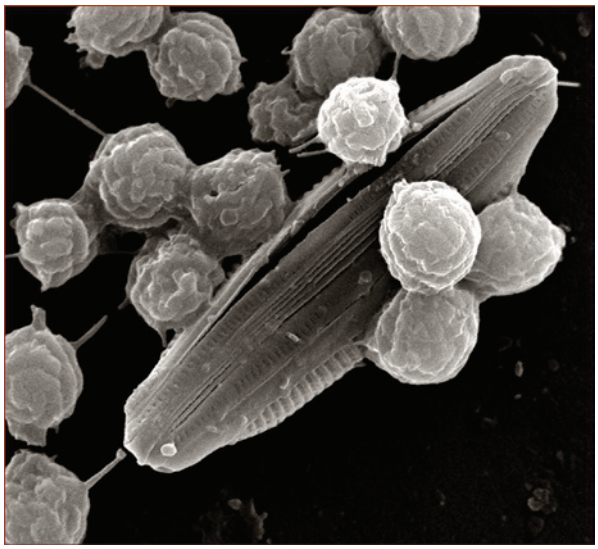
Uma das mais importantes descobertas da ciência moderna tem um aparente sabor de negação que, no entanto, introduziu um novo desafio diante da perplexidade que a natureza oferece: não há substância vital ou elemento primário que sejam particulares à vida. A procura desse élan vital, que mobilizou muitos alquimistas, mostrou-se infrutífera. A vida é uma manifestação de uma forma sutil de organização de elementos encontrados no mundo inorgânico.

DOMÍNIO DA FÍSICA

A vida é, portanto, organização que possibilita processos de transformação (metabólicos) e de reprodução. E, nesse sentido, ela é um assunto a ser tratado na escala microscópica. Esse é, porém, o domínio da física, pois os fenômenos que acontecem nesse âmbito são dominados por interações que fogem à nossa experiência cotidiana. Aí entra em cena a mecânica quântica, teoria que descreve a natureza nas dimensões moleculares, atômicas e subatômicas. No entanto, o fenômeno conhecido como vida continua sem explicação.

DOIS ENFOQUES

Ao analisar um organismo, o biólogo estará interessado em descrever sua estrutura, fisiologia e suas partes, bem como qual a função de cada uma delas. Já o físico tentará entender como é a interação das forças em cada uma dessas partes, para que o organismo consiga realizar suas funções. E, num nível mais profundo, quais forças motivam o funcionamento fisiológico e anatômico do organismo.



DANIEL ACOSTA AVALOS

Magnetoglobus multicellularis junto a uma diatomácia



ENTROPIA E VIDA

TROCAS COM O MEIO

A vida é um fenômeno que ocorre em sistemas abertos. Portanto, todos os seres vivos mantêm uma intensa atividade de troca de energia, matéria e informação com o meio externo, o que torna difícil definir uma fronteira clara. Uma das mais interessantes características dos seres vivos é sua complexidade. Desde as bactérias, com apenas alguns micrômetros de diâmetro (cerca de um milésimo de milímetro), até seres complexos, como o *Homo sapiens*, todos os seres vivos são compostos por moléculas de alto grau de complexidade. Forma e função caminham juntas, e parece que essa estreita relação é uma exigência que garante a manutenção da vida.



AINDA SEM DEFINIÇÃO

Os seres vivos se caracterizam pela capacidade de manter suas funções, apesar de estarem em constante troca com o meio em volta deles. Átomos são trocados permanentemente, de forma que um indivíduo não é uma coleção constante deles, nem de moléculas. Há um fluxo permanente de energia e informação. Com isso, o organismo consegue manter sua organização e, em troca, desorganiza o meio em que vive. Mesmo sem entender o que é a vida, podemos estudar os seres vivos.

CONCEITO REVOLUCIONÁRIO

A termodinâmica estuda as características macroscópicas (volume, pressão, temperatura etc.) de um sistema, sem se importar com o comportamento das partes que o compõem. Quando estas são levadas em consideração, essa área da física tem que ser estudada a partir da mecânica estatística. E é

aqui que surge um dos conceitos mais revolucionários da física: o da entropia.

DESORDEM MÁXIMA

Todo sistema físico sempre evolui, espontaneamente, para situações de máxima entropia. Essa é conhecida como a segunda lei da termodinâmica. Porém, ela só é válida para sistemas fechados, ou seja, que não trocam energia, matéria e informação com o meio.

PRETO NO BRANCO

Todo sistema natural, quando deixado livre, evolui para um estado de máxima desordem, correspondente a uma entropia máxima. Desordem, porém, é entendida aqui como a falta de localização espacial. Por exemplo, abra uma lata de tinta branca e pingue sobre ela uma gota de tinta preta. Inicialmente, é possível localizar espacialmente a gota, ou seja, apontar com precisão onde ela está, pois o sistema ainda está organizado (ou com baixo grau de desordem). Passado muito tempo, a gota terá se espalhado de modo que fica impossível localizá-la ou mesmo reconhecer que ela esteve ali. Aumentou a desordem (ou a entropia) do sistema.

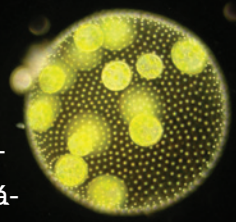
FLECHA DO TEMPO

O conceito de entropia contribui para a compreensão de um dos maiores mistérios do universo: o tempo nunca volta ao passado. E isso está relacionado como o fato de a entropia sempre crescer em um sistema fechado. Assim, em um processo qualquer, se a entropia de uma das partes do sistema diminuir, necessariamente haverá aumento dela em outras partes. Esse fato (ou seja, o sistema sempre evoluir rumo a um grau maior de desordem) nos define o sentido da flecha do tempo.

EVOLUÇÃO POR SELEÇÃO NATURAL

SEMELHANTE, MAS NÃO IGUAL

Os seres vivos têm a capacidade de se reproduzir. Bactérias, por exemplo, após certo tempo, dividem-se, originando duas novas bactérias semelhantes, mas não completamente idênticas à "mãe". Em organismos mais complexos, como animais ou plantas, a reprodução é um processo mais elaborado. O importante é compreender que o novo indivíduo é semelhante ao que lhe deu origem, mas nunca exatamente igual. Essa pequena diferença é que permite a adaptação ao novo meio, alterado pela presença de organismos que viveram anteriormente nele. É esse mecanismo que permite uma evolução por seleção natural, pois, a cada geração, novos organismos surgem, e aqueles que têm maior capacidade de adaptação poderão se proliferar.



VIDA DIGITAL

Atualmente, há uma área fortemente interdisciplinar conhecida como bioinformática, na qual "organismos" virtuais são criados em programas de computador que têm a capacidade de gerar cópias deles mesmos, como fazem os vírus de computador, porém de forma controlada. Com isso, é possível observar o que pode acontecer quando mutações são introduzidas no programa-fonte do "organismo" e, assim, acompanhar o desenvolvimento de populações em que foi introduzida essa "alteração genética". Essa forma de vida é conhecida como vida digital, que usa como ferramenta a mecânica estatística.

ESCALAS DA BIOFÍSICA

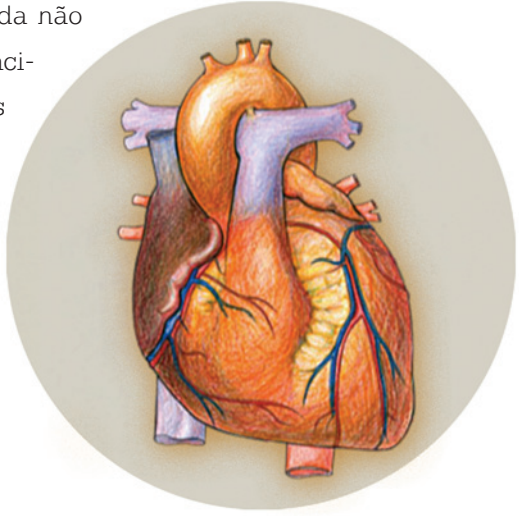
DO MOLECULAR AO COSMOLÓGICO

Os sistemas que a biologia estuda têm diferentes níveis (ou escalas).

i) na escala molecular (da ordem de 10^{-10} m, ou seja, algo menor que um milionésimo de milímetro), a biofísica estuda como as moléculas se organizam e como a composição delas permite o funcionamento de estruturas ou seres vivos;

ii) nas escalas de 10^{-8} m a 10^{-6} m (objetos menores que um milésimo do milímetro), a biofísica estuda o comportamento de aglomerados organizados de diferentes moléculas, apresentando o que se pode chamar de vida, como no caso dos vírus ou das bactérias e dos protozoários;

iii) aumentando a escala, na ordem de 10^{-4} m a 10^{-2} m (de décimos de milímetro a centímetros), são estudadas as estruturas formadas por células com igual funcionamento (órgãos) ou aglomerados de microrganismos, num nível de organização ainda não compreendido; iv) na escala acima de 10^{-1} m (10 cm), diferentes formas de vida são estudadas, suas inter-relações com o





meio e as interações com outras formas de vida. Mesmo nas escalas cosmológicas (maiores que 10^6 m ou mil km), a biofísica tenta entender como seria a vida se ela existisse fora da Terra, bem como a influência de fatores planetários no desenvolvimento e na adaptação da vida terrestre.

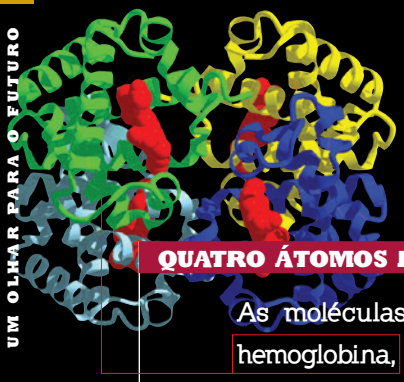
MICRO, MESO E MACRO

Para cada escala, há modelos que permitem analisar a interação entre as estruturas e os sistemas. Diferentes modelos podem ser usados para entender o que acontece nas diferentes escalas: nas escalas microscópicas, sabemos que estamos na região da mecânica quântica; nas escalas intermediárias, é preciso empregar uma teoria que contenha tanto elementos da mecânica quântica quanto da física dos fenômenos macroscópicos (a mecânica clássica ou newtoniana); nas escalas macroscópicas, estamos nos domínios da mecânica clássica.



INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS

Os diferentes equipamentos desenvolvidos para estudar sistemas físicos têm sido aplicados ao estudo daqueles na biologia. Exemplos desses equipamentos: os microscópios eletrônicos, que nos possibilitam ver a matéria em escalas diminutas; a ressonância magnética nuclear, que também é largamente empregada como aparelho de diagnóstico na medicina; os magnetômetros Squid, detectores extremamente sensíveis; os difratômetros de raios X, uma das mais poderosas ferramentas para a análise de materiais.



COMPLEXIDADE

QUATRO ÁTOMOS DE FERRO

As moléculas que participam da vida são complexas. A hemoglobina, por exemplo, é uma proteína presente nas células vermelhas do sangue de animais e tem mais de 8 mil átomos. Nela, encontram-se só quatro átomos de ferro, localizados em posições estratégicas e que são capazes de capturar oxigênio nos pulmões e liberá-lo para o tecido, mantendo as células vivas. Os mecanismos de captura e liberação são extremamente complexos, e verifica-se que há uma cooperação entre os átomos de ferro da hemoglobina. Essa propriedade está associada à geometria da molécula que, em última análise, é definida pelos tipos de ligações atômicas.

FERRAMENTAS PARA MACROMOLÉCULAS

O estudo da estrutura de uma macromolécula, como a das proteínas, baseia-se nas leis da mecânica quântica, do eletromagnetismo e da mecânica clássica. As ferramentas usadas para estudar esse tipo de biomolécula (como a difração de raios X, a ressonância magnética nuclear e a ressonância paramagnética eletrônica) foram desenvolvidas pela física.

CANAIS DE PASSAGEM

As células que formam um organismo são limitadas por uma membrana na qual se encontram proteínas que formam canais que permitem a passagem de determinados elementos e bloqueiam a entrada de outros. As membranas são compostas por uma camada dupla de moléculas bipolares, nas quais uma das extremidades se afasta da água, ou seja, é hidrofóbica. O estudo das ligações moleculares que permitem manter estável a membrana é um dos temas importantes da biofísica.

O DNA E O CÓDIGO GENÉTICO



MOLÉCULA DA VIDA

Todos os seres vivos têm uma molécula, o ácido desoxirribonucléico (DNA), muito extensa (pode atingir, se esticada, mais de 1m de comprimento), composta por duas fitas que se juntam formando uma dupla hélice. Podemos imaginá-la também com o formato de uma escada retorcida. Essa estrutura complexa é fundamental para a perpetuação da vida.

QUATRO BASES

Cada uma das duas fitas do DNA é constituída por quatro bases: adenina (A), timina (T), guanina (G) e citosina (C). Essas bases nitrogenadas (assim chamadas por conterem nitrogênio em sua composição) se ligam a uma molécula de açúcar (desoxirribose) e a um grupo de átomos que contém o elemento químico fósforo, formando o chamado nucleotídeo. Caso imaginemos a molécula de DNA como uma escada, as laterais dela seriam formadas pela desoxirribose e pelo grupo fosfato. Já os degraus seriam feitos pela ligação entre duas bases nitrogenadas.

PONTES DE HIDROGÊNIO

A ligação entre os nucleotídeos de uma fita é extremamente forte, enquanto a ligação entre as bases de duas fitas é fraca, feita por meio das chamadas pontes de hidrogênio, a mesma ligação química responsável por manter unidas as moléculas de água no estado líquido e sólido. Só é possível a ligação entre determinadas bases: A liga-se à base T, enquanto a G só pode se ligar à C. Ligações entre as bases A e T, por exemplo, não ocorrem.

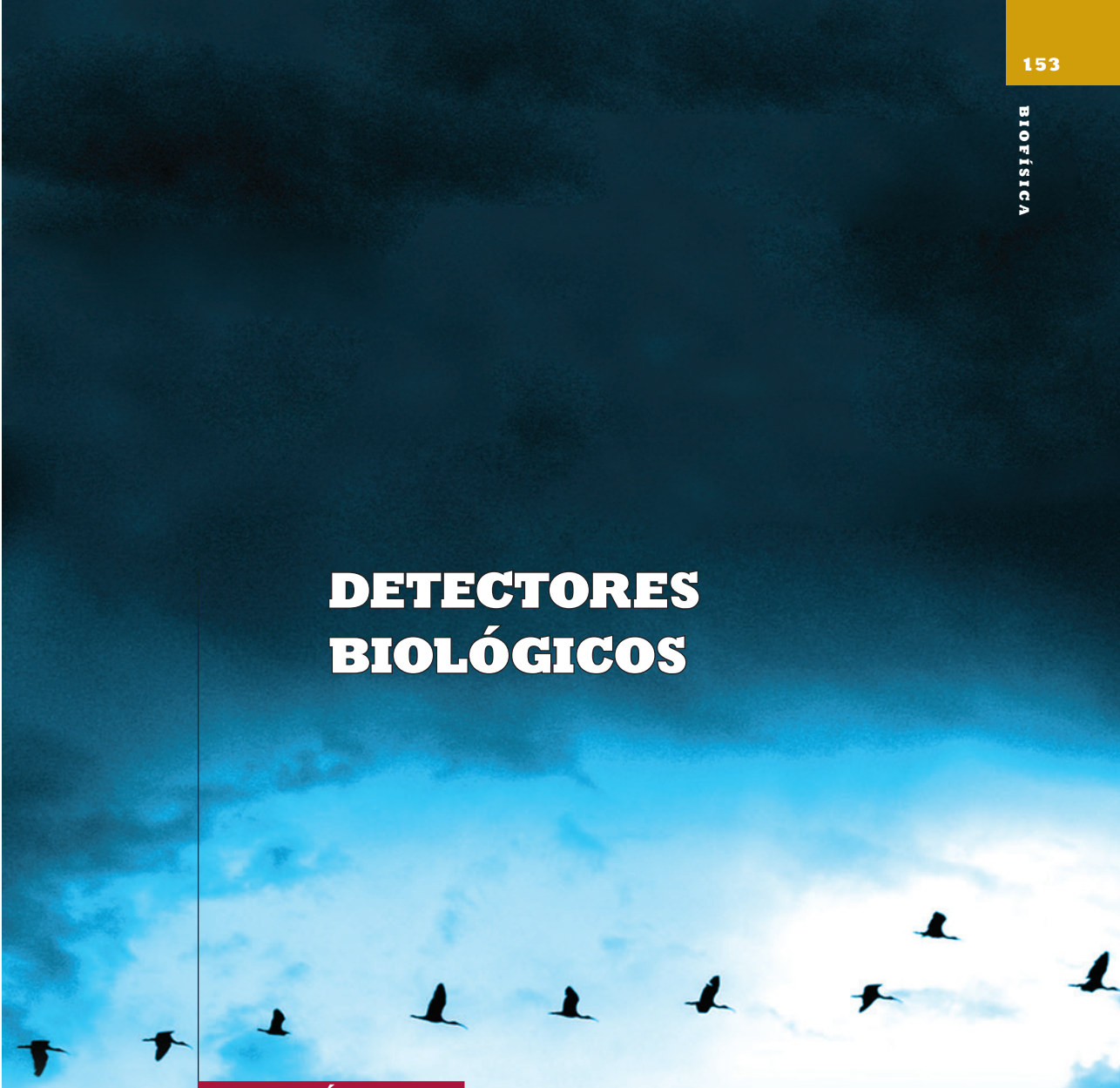
HÉLICES IDÊNTICAS

Durante o ciclo de vida de uma célula, o DNA passa por uma divisão. As ligações entre as fitas são desfeitas (como se os degraus da escada fossem cerrados ao meio) a partir da participação de outras moléculas (enzimas extremamente especializadas) que ajudam na divisão e se recombinam de forma a produzir duas hélices duplas idênticas à original. Esse processo é de uma complexidade extrema, e pouco se conhece sobre os diversos mecanismos envolvidos.

SUTILEZAS DESCONHECIDAS

O DNA tem um código que fornece à célula a informação necessária para a fabricação de proteínas e de outras moléculas essenciais para o metabolismo. Essa informação deve ser preservada no novo organismo para garantir sua sobrevivência. O processo é elaborado e exige a participação de várias outras moléculas – RNA, RNAm, enzimas, proteínas etc. – que "aceleram" (catalisam) as reações e facilitam a reprodução. Mas o processo em si permanece desconhecido.

DETECTORES BIOLÓGICOS



MIGRAR É PRECISO

Todos os seres vivos estão em permanente contato com o meio externo (ou seja, com todo o espaço além da membrana) e são capazes de perceber pequenas mudanças desse ambiente, uma vez que eles mesmos são parte dele. Muitos animais mudam periodicamente seus locais de moradia, num processo conhecido como migração. Assim, por exemplo, as andorinhas, os salmões, os macacos, as formigas, as borboletas, os albatrozes migram, às vezes, milhares de quilômetros. A migração é fundamental para a preservação da espécie.

PERGUNTAS SEM RESPOSTA

Como, porém, os indivíduos sabem a hora de iniciar a jornada ou a rota? O Sol, a Lua, as estrelas, o campo magnético terrestre desempenham papel importante. A polarização da luz (ou seja, o plano em que ela vibra) também é um fator usado para a orientação. Enfim, os fatores físicos do meio são elementos essenciais para a preservação de espécies. Como esses organismos conseguem detectar e elaborar a informação desses fatores? Como funciona o relógio biológico? São perguntas ainda sem resposta.

OTIMIZADOS PELA NATUREZA

A física tem desenvolvido sistemas de detecção que nos permitem compreender o funcionamento daqueles que a própria natureza já se encarregou de fabricar em diversos seres vivos. Assim, animais têm detectores de luz mais sofisticados que os construídos pelo homem, bem como detectores de substâncias químicas mais sensíveis que os mais modernos equipamentos de análise de materiais. Os peixes da família dos elasmobrânquios, como o tubarão e a raia, são capazes de detectar campos magnéticos. Tubarões brancos podem sentir um campo elétrico até 20 mil vezes menor que 1 volt, equivalente ao da batida do coração de um peixe. E, assim, há outros exemplos de detectores que têm analogia com aparelhos já desenvolvidos pela ciência, porém com dimensões e sensibilidade otimizadas pela natureza.

NEURÔNIOS

ESPALHADOS PELO CORPO

Um dos desafios mais intrigantes na biofísica é a questão da memória. Sabemos que temos vários bilhões de neurônios, além de outras células localizadas no cérebro (as células gliais, por exemplo). Os neurônios, por sua vez, estão espalhados pelo corpo (com maior concentração no cérebro) e são responsáveis, pelo menos em parte, pela transmissão de um sinal.

SUBSTÂNCIAS LIBERADAS

Um neurônio é constituído por um corpo celular, dendritos ("ramificações" que parte desse corpo) e uma "cauda" (extensão), o axônio. Quando estimulado, ele produz uma diferença de potencial que gera uma tênue corrente elétrica. Esse estímulo elétrico se propaga e permite que ele libere substâncias específicas (neurotransmissores) que fazem o contato dele com neurônios vizinhos, formando sinapses. Esse conjunto de células interligadas forma uma rede que mantém semelhança com redes de sistemas físicos.

COMPUTADOR BIOLÓGICO

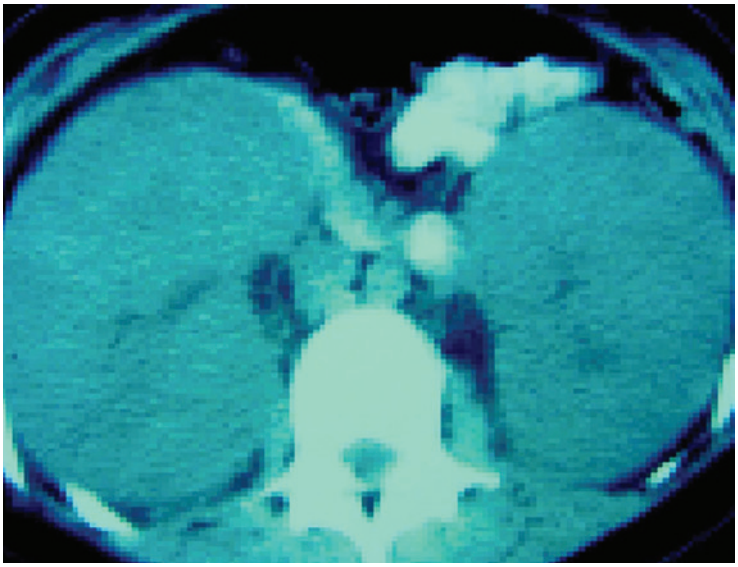
Não se sabe como, mas a rede de neurônios tem a capacidade de gerar informação. Temos lembranças graças a esse complexo sistema de células. O estudo do cérebro e de suas redes (redes neurais) tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas de informação que podem levar a um computador biológico.

APLICAÇÕES

TÉCNICAS, DROGAS E TERAPIAS

A biofísica tem levado ao desenvolvimento de técnicas de diagnóstico como a tomografia ou a ressonância magnética nuclear, bem como à produção de drogas para tratamento ou à descoberta de substâncias que podem ser assimiladas pelo organismo, auxiliando na cura de doenças. Novas terapias, como a hipertermia magnética (aumento da temperatura corporal com a ajuda da aplicação no paciente de campo e compostos magnéticos) ou a deposição de drogas com o auxílio de nanopartículas magnéticas, têm se mostrado eficientes.

Tomografia





NASA

VIDA EXTRATERRESTRE

ALÉM DA IMAGINAÇÃO

A enorme extensão de nossa galáxia, a Via Láctea, com mais de 100 mil anos-luz de diâmetro e mais de um bilhão de estrelas, pode abrigar outros sistemas planetários em que a estrela é semelhante ao Sol e onde há possibilidade de existir vida em diferentes formas.

VIDA FORA DA TERRA?

Como dizer que não exista vida fora da Terra? Mesmo que ela tenha se desenvolvido em sistemas semelhantes ao nosso, talvez o *Homo sapiens* esteja condenado a desconhecê-la. As dimensões que nos separam de qualquer outro desses possíveis sistemas planetários são tão grandes que a informação levaria mais tempo para chegar a nós do aquele destinado à nossa permanência na Terra. Eis aí, portanto, outro dos grandes desafios da física na biologia: a procura de vida extraterrestre.



Supercordas

O sonho da unificação das quatro forças da natureza

Pouca gente sabe que só existem quatro tipos de forças na natureza: a gravitacional, responsável pela atração entre os corpos celestes e por estarmos presos ao chão; a força forte, que mantém coeso o núcleo dos átomos; a força fraca, que está por trás de certos tipos de radioatividade, bem como da produção de luz e energia nas estrelas; e a força eletromagnética, que atua entre cargas elétricas e causa o atrito entre os corpos.

No século passado, o desenvolvimento da teoria da relatividade geral e da mecânica quântica deu o arcabouço teórico para a formulação e o entendimento dessas quatro forças (ou interações) fundamentais. A mecânica quântica descreve fenômenos na escala subatômica. A relatividade mostrou que espaço e tempo são dimensões intimamente ligadas e podem, em certas circunstâncias, se dilatar ou se contrair.

Mas será que a relatividade funciona quando efeitos quânticos se tornam importantes? Parece que não. Uma unificação dessas quatro forças, no entanto, parece exigir a existência de dimensões espaciais extras. Será que vivemos em um mundo de dez dimensões? Por que só sentimos quatro delas (comprimento, largura, altura e tempo)? Onde estão as outras? Será que um dia poderemos provar a existência delas?

160. | **CONFLITO ENTRE O MACRO E O MICRO** | INCONSISTENTES ENTRE SI | FORÇA INFINITA | AS OUTRAS FORÇAS | MODIFICAÇÃO CONSISTENTE

162. | **EINSTEIN E O SONHO DA UNIFICAÇÃO** | DIMENSÃO CIRCULAR | OBJETOS UNIDIMENSIONAIS

163. | **DIMENSÕES EXTRAS** | DE PERTO E DE LONGE | COMO PLANTAS E PEIXES

164. | **BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO** | SUGADOR DE LUZ E DE MATÉRIA | SUMIÇO DE ELEFANTES | SOLUÇÃO DO PARADOXO

166. | **PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO** | ESCAPAR OU NÃO | ÁREA DO HORIZONTE | SUPERFÍCIE BIDIMENSIONAL

167. | **TEORIA DAS SUPERCORDAS** | CORDA FUNDAMENTAL | MODOS DE VIBRAÇÃO | TESTE DE PROPRIEDADES | COMPACTAÇÃO DAS DIMENSÕES

169. | **SUPERSIMETRIA** | BÓSONS E FÉRMIONS | PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO | SIMETRIAS ESTABELECIDAS | O GRANDE ACELERADOR

171. | **PESQUISA NO BRASIL** | ALTAS ENERGIAS

EDITOR CIENTÍFICO | Nathan Berkovits
(Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista)

CONFLITO ENTRE O MACRO E O MICRO







INCONSISTENTES ENTRE SI

A mecânica quântica, teoria que lida com o microuniverso atômico e subatômico, e a relatividade geral, que trata dos fenômenos gravitacionais, foram postuladas no começo do século passado e talvez sejam as duas teorias mais bem-sucedidas de toda a física. Mas há um conflito entre elas. Embora a relatividade geral, finalizada em 1915 pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), tenha sua precisão checada para distâncias interplanetárias, a verificação dela ainda não foi feita para distâncias subatômicas. De fato, há razões teóricas para acreditar que as duas teorias, que são as colunas de sustentação da física contemporânea, sejam inconsistentes entre si.

FORÇA INFINITA

A força gravitacional aumenta à medida que os corpos se aproximam. Se, por acaso, a distância entre a Terra e a Lua caísse para a metade, a força gravitacional entre nosso planeta e seu satélite aumentaria quatro vezes. Se passasse a ser um quarto do que é, a força seria 16 vezes maior. E assim por diante. No entanto, na teoria da relatividade geral, as partículas elementares (elétrons, fótons, quarks etc.) são corpos pontuais, ou seja, sem dimensão. Nesse caso, fica fácil imaginar o que aconteceria com a força gravitacional na colisão entre duas dessas partículas: a força gravitacional entre elas seria infinita, pois a distância entre elas se tornaria nula. Eis aí a causa da inconsistência entre a relatividade geral e a mecânica quântica.



AS OUTRAS FORÇAS

O modelo atual para descrever a força eletromagnética, a força forte e a força fraca (estas duas últimas atuam somente no âmbito do núcleo atômico) é chamado modelo padrão. Embora nele as partículas elementares também sejam corpos pontuais, essas forças são perfeitamente consistentes com a mecânica quântica (vale lembrar que ele foi aprovado em vários experimentos envolvendo distâncias subatômicas). No modelo padrão, a eliminação dos infinitos que surgem quando duas partículas com cargas opostas se aproximam é possível graças a um processo chamado "renormalização". Porém, a renormalização não funciona na teoria da relatividade geral, porque a força gravitacional entre duas partículas é proporcional às massas delas e não às suas cargas. Uma maneira de entender por que massas e cargas são diferentes é lembrar que a massa é sempre positiva, enquanto a carga pode ser ou positiva (como no próton), ou negativa (como no elétron).

MODIFICAÇÃO CONSISTENTE

As inconsistências quânticas na relatividade geral se tornam apreciáveis quando as distâncias são da ordem de 10^{-30} cm, que está muito longe da precisão obtida hoje nos experimentos. Mesmo diante dessa impossibilidade prática, há razões para tentar resolver essa inconsistência da relatividade geral. Uma delas é que entender o comportamento dessa teoria a distâncias muito pequenas é essencial para o estudo, por exemplo, dos buracos negros e do universo primordial (perto do Big Bang). Outra razão: a resolução de inconsistências da relatividade geral pode levar a idéias que ajudem a entender fenômenos além daqueles governados pela gravitação. E, finalmente, se quisermos concretizar o sonho de Einstein e construir uma teoria que unifique a força gravitacional com as outras três forças da natureza (a eletromagnética, a forte e a fraca), teremos que achar uma modificação da relatividade geral que seja consistente com a mecânica quântica.

EINSTEIN E O SONHO DA UNIFICAÇÃO

DIMENSÃO CIRCULAR



Depois de formular a teoria da relatividade geral, Einstein dedicou praticamente suas últimas três décadas de vida à tentativa de unificar, numa só teoria, a força eletromagnética e a força gravitacional. Uma proposta a que Einstein se dedicou foi a teoria idealizada, independentemente, pelo físico alemão Theodor Kaluza (1885-1954) e o sueco Oskar Klein (1894-1997). Nela, além das três dimensões usuais de altura, largura e comprimento, o espaço teria uma dimensão a mais. Mas, diferentemente das três dimensões em que vivemos, cujos tamanhos são infinitos, a dimensão extra da teoria de Kaluza e Klein teria a forma de um círculo com raio muito pequeno. Partículas andando no sentido horário do círculo teriam carga elétrica negativa (como o elétron), enquanto aquelas se movimentando no sentido anti-horário seriam positivas (como o pósitron). Partículas paradas em relação a essa quarta dimensão espacial teriam carga elétrica zero (como o neutrino).



OBJETOS UNIDIMENSIONAIS

Embora a teoria de Kaluza e Klein unificasse a força gravitacional com a força eletromagnética, ela ainda era inconsistente com a mecânica quântica. Essa inconsistência só seria resolvida cinqüenta anos mais tarde, com o surgimento de uma nova teoria na qual o conceito de partícula como um ponto sem dimensão seria substituído pelo de objetos unidimensionais.

DIMENSÕES EXTRAS

DE PERTO E DE LONGE

Se o nosso universo tem mais que três dimensões espaciais, por que não as vemos? Uma possível explicação é que as dimensões extras são círculos com raio tão pequeno que seria necessária luz com energias altíssimas para observá-las, bilhões de vezes mais intensas que a energia da luz visível. Por exemplo, um fio de aço visto de longe parece ter somente uma dimensão, ou seja, comprimento. Mas, se olharmos de perto, percebemos que o fio também tem uma segunda dimensão, que é um círculo pequeno, descrevendo sua circunferência. Então, nesse modelo de dimensões extras, as três dimensões infinitas (altura, comprimento e largura) seriam dimensões como o comprimento de nosso fio, enquanto as outras dimensões seriam circulares, como a circunferência dele.

COMO PLANTAS E PEIXES

Outra possível explicação para não observarmos as dimensões extras: nosso universo observável é uma superfície tridimensional dentro de um volume com quatro ou mais dimensões espaciais. Nessa possibilidade, chamada "brane-world" (ou mundo-brana), partículas como os elétrons e os fótons estariam confinados à superfície tridimensional. Apenas o gráviton, o transmissor da força gravitacional, estaria livre para perambular no volume inteiro. Então, nesse modelo, os elétrons e os fótons seriam como plantas destinadas a boiar na superfície de um lago, enquanto os grávitons seriam como peixes que nadariam livremente dentro dele. Como a luz é composta de fótons, sempre confinados à superfície tridimensional, somente as três dimensões usuais seriam observadas diretamente.

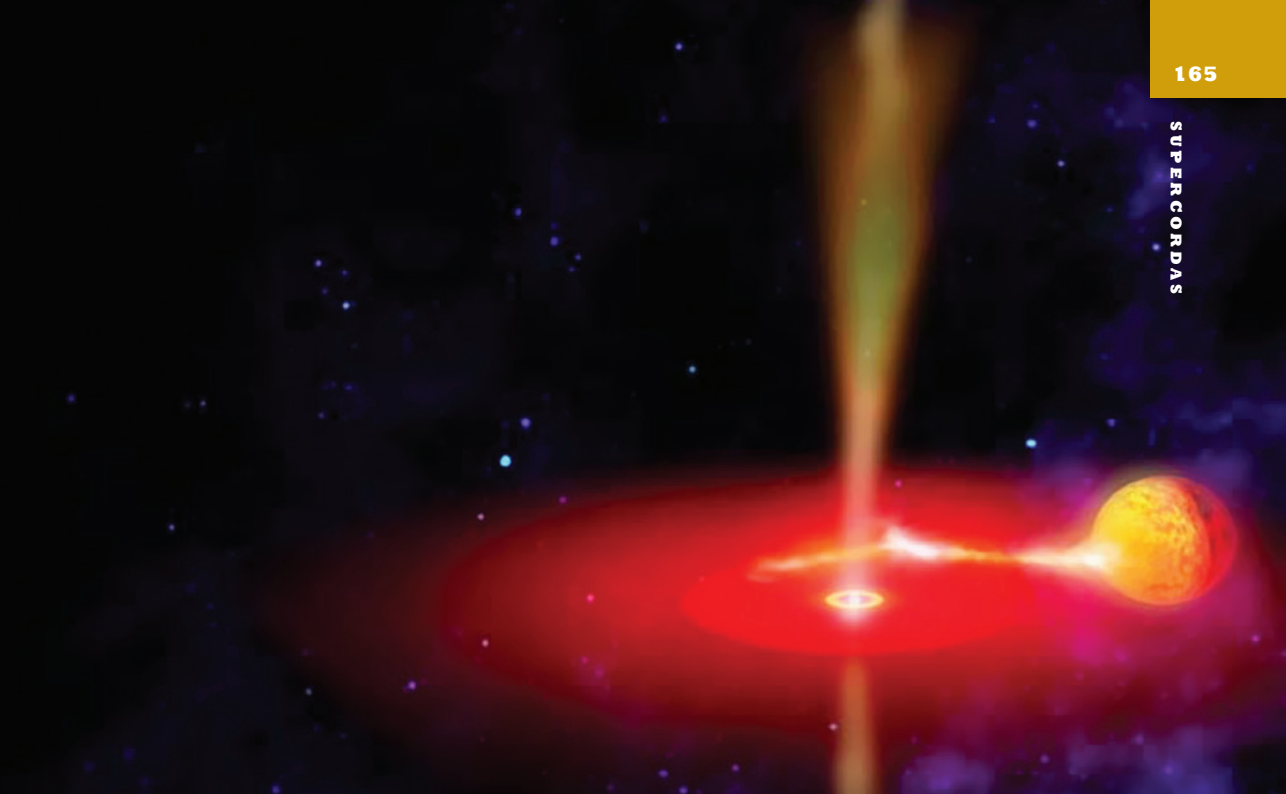
BURACOS NEGROS E A PERDA DE INFORMAÇÃO

SUGADOR DE LUZ E DE MATÉRIA

Quando uma estrela colapsa, depois de chegar ao final de sua vida, ela pode formar um objeto cósmico ultramaciço, tão denso que qualquer corpo que se aproxima dele é puxado para o seu interior pela força gravitacional. Nem mesmo as partículas de luz (fótons) escapam de serem sugadas por ele. Daí a denominação buraco negro para esses "ralos" cósmicos. Como um buraco negro cria forças gravitacionais enormes, e seu tamanho é muito pequeno, efeitos quânticos passam a ser relevantes, fazendo do mais bizarro corpo celeste um laboratório para estudar a união da gravidade com a mecânica quântica, a chamada gravitação quântica.

SUMIÇO DE ELEFANTES

Uma das conseqüências dos efeitos quânticos sobre os buracos negros é que esses corpos cósmicos podem evaporar. Um paradoxo relacionado com esse fenômeno se expressa através da seguinte pergunta: o que acontece com a informação contida num buraco negro depois que ele evapora totalmente? Por exemplo, se um elefante cai num buraco negro, o que acontece com essa informação depois que o buraco negro desaparecer por evaporação? É perdida para sempre? A resposta parece ser não, pois a



NASA

Concepção artística de um buraco negro

mecânica quântica prediz que a informação é sempre preservada. Portanto, se a informação contida num buraco negro fosse realmente perdida, a mecânica quântica teria de ser abandonada.

SOLUÇÃO DO PARADOXO

Um dos sucessos da teoria das supercordas, a melhor candidata até agora para a unificação das quatro forças da natureza, foi resolver o aparente paradoxo da perda de informação em buracos negros. Essa teoria prevê que a informação contida num buraco negro não é perdida, pois está armazenada na radiação expelida durante a evaporação. Isso faz com que o processo de evaporação de um buraco negro passe a ser consistente com os princípios da mecânica quântica.

O PRINCÍPIO HOLOGRÁFICO



Concepção artística de matéria estelar sendo sugada por um buraco negro

CHANDRA X-RAY OBSERVATORY/NASA

ESCAPAR OU NÃO

Todo buraco negro tem um "horizonte" ao seu redor. Essa fronteira virtual determina se uma partícula poderá ou não escapar dele. Antes de cruzar essa superfície bidimensional, ainda é possível para uma partícula desviar e escapar de cair dentro do buraco negro. Mas, ultrapassado o horizonte, qualquer corpo está fadado a um destino cruel: ser sugado pelo buraco negro e só ser devolvido ao mundo exterior na forma de radiação.

ÁREA DO HORIZONTE

Uma propriedade interessante dos buracos negros é que a informação contida nele é proporcional à área de seu horizonte. Esse fato é surpreendente, pois, normalmente, se esperaria que a quantidade de informação contida num objeto fosse proporcional ao seu volume. Por exemplo, a informação contida num livro é proporcional ao tamanho de uma página bidimensional multiplicado pelo número de páginas do livro.

SUPERFÍCIE BIDIMENSIONAL

Um exemplo no qual toda a informação é contida em uma superfície bidimensional é o de uma foto holográfica. Por isso, essa propriedade da informação nos buracos negros (ou seja, o fato de a informação contida nele ser proporcional à área de seu horizonte) é chamada "princípio holográfico". Recentemente, essa propriedade holográfica de buracos negros foi explicada com a ajuda da teoria de supercordas.



TEORIA DAS SUPERCORDAS

CORDA FUNDAMENTAL

Como vimos, o modelo mais promissor deste início de século para se chegar a uma gravitação quântica (ou seja, à unificação da relatividade geral com a mecânica quântica) é a teoria das supercordas. Ela foi formulada inicialmente na década de 1970 e postulou que todas as partículas elementares (por exemplo, quarks, elétrons, neutrinos etc.) são ressonâncias de uma corda unidimensional. Nesse modelo, em vez de existirem várias partículas elementares, há apenas uma entidade física: a corda fundamental, cujas diferentes vibrações descrevem diferentes partículas.

MODOS DE VIBRAÇÃO

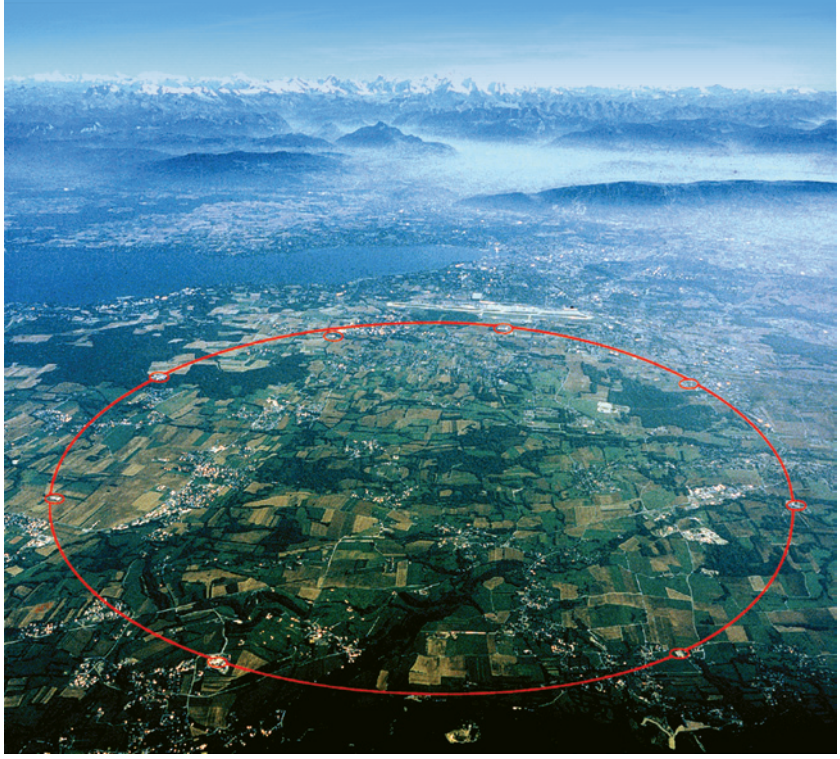
Semelhantemente a uma nota musical produzida, por exemplo, pela corda de um violino – cuja altura (grave ou aguda) e intensidade (forte ou fraca) dependem, respectivamente, da freqüência e da energia da vibração –, as propriedades de uma partícula (como sua massa e carga elétrica) dependem de como a corda fundamental está vibrando.

TESTE DE PROPRIEDADES

A teoria das supercordas prevê que, quando as distâncias são grandes, a força gravitacional toma a forma daquela estabelecida pela relatividade geral. Mas, para distâncias pequenas (da ordem de 10^{-30} cm), a teoria de supercordas modifica a relatividade geral para torná-la compatível com a mecânica quântica. Embora as energias acessíveis em experiências feitas neste início de século não sejam suficientemente altas para testar essas modificações, há várias propriedades da teoria de supercordas que podem ser efetivamente testadas em experimentos.

COMPACTAÇÃO DAS DIMENSÕES

Diferentemente da teoria da relatividade geral, que pode ser definida com qualquer número de dimensões espaciais, a teoria das supercordas somente é consistente quando o espaço contém nove dimensões. Mais uma vez, as dimensões extras devem ser compactas (ou seja, devem ser muito pequenas), de modo que não possamos vê-las. Há várias maneiras de compactar essas seis dimensões extras. Uma delas é a de Kaluza e Klein, na qual todas as seis dimensões extras seriam círculos muito pequenos. Outra é a chamada compactação de Calabi-Yau (referência ao matemático norte-americano Eugenio Calabi e ao chinês Shing-Tung Yau), em que essas seis dimensões se entrelaçam de uma maneira menos trivial. Infelizmente, ainda não sabemos se a teoria das supercordas é capaz de dizer de que modo essas seis dimensões extras estão compactadas.

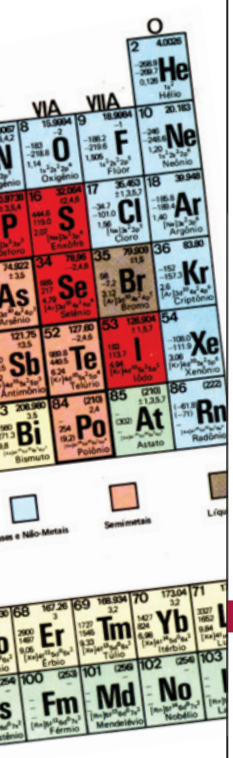


LHC/CERN

SUPERSIMETRIA

BÓSONS E FÉRMIONS

Quando as distâncias são pequenas, a teoria das supercordas prevê, além das dimensões extras, uma outra propriedade que poderia ser testada experimentalmente: a supersimetria. Supersimetria é o nome dado para uma relação postulada entre as duas principais classes de partículas elementares, ou seja, os bósons (responsáveis por transmitir as forças da natureza) e os férmions (quarks, elétrons, neutrinos etc.). A supersimetria prevê que, para cada férmion, deve existir um bóson companheiro dele, isto é, uma partícula supersimétrica. E vice-versa. Isso faria crescer significativamente o número de partículas elementares conhecidas hoje. A supersimetria parece ser não só um elemento essencial para as supercordas, mas um ingrediente necessário para dar consistência a essa teoria.



PRINCÍPIO DA EXCLUSÃO

Bósons e férmions podem ser distinguidos pelo fato de que qualquer número de bósons cabe no mesmo ponto do espaço, onde só caberia um férmion. Uma analogia para ilustrar a diferença de comportamento entre essas duas classes de partículas: se um grande grupo de bósons fosse se hospedar num hotel, provavelmente todos eles dormiriam no mesmo quarto e... na mesma cama! No caso dos férmions, cada um deles ocuparia primeiramente um quarto separado. Se o número de quartos fosse insuficiente para todos, só aí é que eles começariam dividi-los, mas nunca dormiriam na mesma cama! Essa propriedade "anti-social" dos férmions é chamada princípio da exclusão, sendo responsável pela Tabela Periódica, que descreve os vários tipos de átomos segundo a quantidade de elétrons que eles têm. Como os elétrons são férmions, os átomos na tabela periódica com mais elétrons têm tamanho maior, pois elétrons têm que estar em pontos diferentes do espaço.

SIMETRIAS ESTABELECIDAS

As simetrias experimentalmente bem estabelecidas até agora são: i) a simetria de translação (uma experiência realizada em São Paulo vai dar o mesmo resultado que uma teoria feita em Paris); ii) a simetria de rotação (o resultado de uma experiência não depende de o equipamento estar orientado na direção leste-oeste ou na direção norte-sul); e iii) a simetria de impulso (uma experiência feita num trem com velocidade constante dará o mesmo resultado que uma experiência feita num trem parado). Existem argumentos teóricos de que a única extensão natural dessas três simetrias é a supersimetria, que, como vimos, relaciona bósons e férmions.

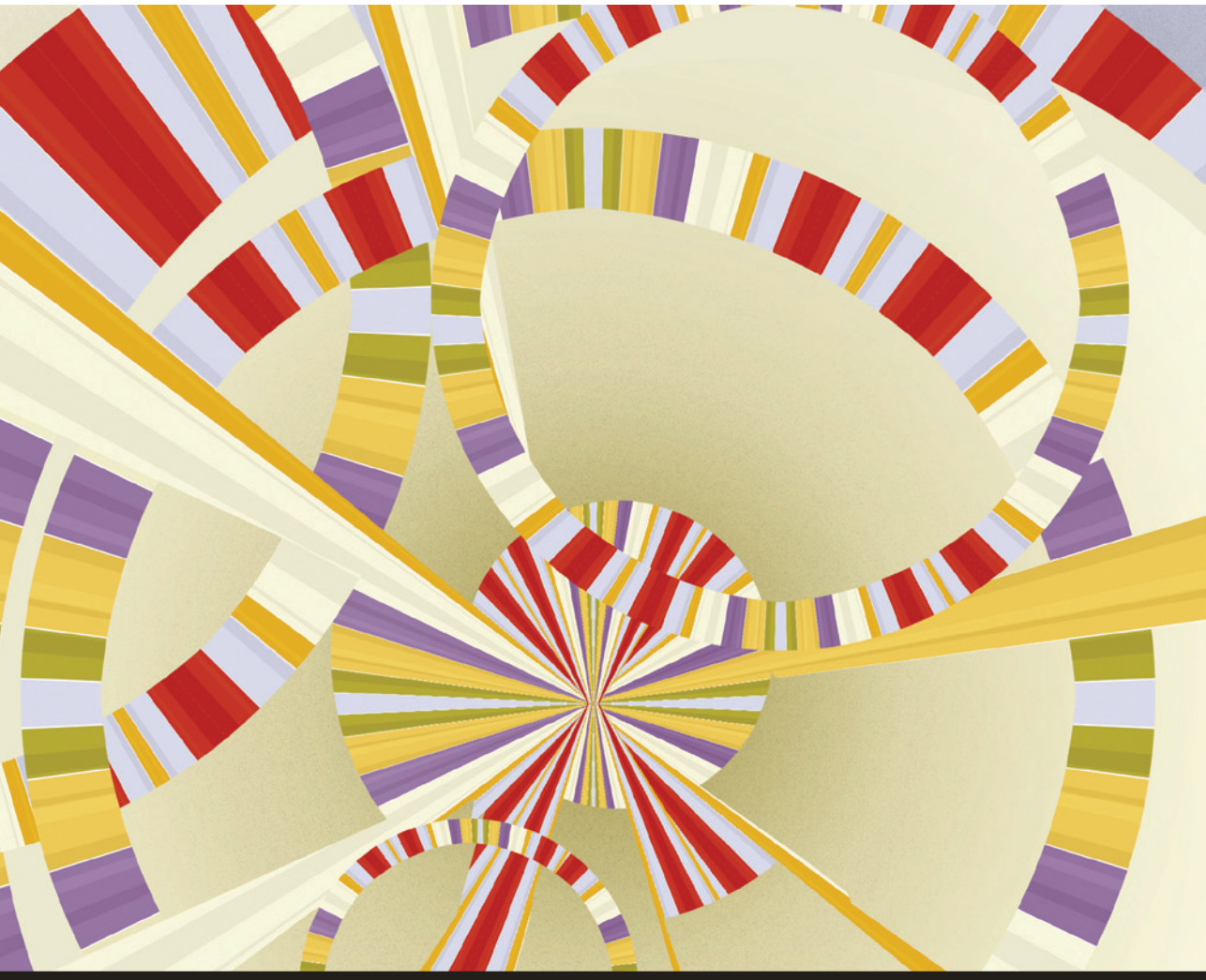
O GRANDE ACELERADOR

No entanto, ainda não há evidências diretas que confirmem a supersimetria. Ou seja, ainda não foi descoberta nenhuma partícula supersimétrica. Mas já existem evidências indiretas, vindas de experiências com aceleradores de partículas. É possível que a existência da supersimetria seja confirmada em experiências no LHC (sigla, em inglês, para Grande Acelerador de Hádrons), que será o mais potente acelerador de partículas do mundo. O LHC foi finalizado pelo Centro Europeu de Pesquisas Nucleares, em Genebra (Suíça), em 2008.

PESQUISA NO BRASIL

ALTAS ENERGIAS

Na pesquisa mundial, a teoria de supercordas talvez seja o tópico mais ativo deste início de século na área de física teórica de altas energias. No Brasil, há grupos pequenos trabalhando com supercordas na Universidade de São Paulo, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, na Universidade Federal de Itajubá (MG), no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (RJ), na Universidade Federal de Campina Grande (PB) e na Universidade Federal de Pernambuco, entre outras instituições. O grupo de supercordas com mais participantes e colaboradores internacionais está no Instituto de Física Teórica, da Universidade Estadual Paulista.



LHC

O gigante criador de matéria

Depois de mais de dez anos de construção, entrou em funcionamento em 2008 no CERN, laboratório europeu em Genebra (Suíça), uma verdadeira máquina do tempo: o grande anel de colisões de partículas batizado LHC, suas iniciais em inglês. Ele vai acelerar partículas girando em sentidos opostos e fazê-las colidir frontalmente com tamanha energia que poderá recriar condições e temperaturas características da infância de nosso universo. Assim, poderemos estudar o que aconteceu em um passado remoto, logo após a grande explosão que deu início ao universo como o conhecemos hoje.

O programa científico do LHC é riquíssimo, com potencial para grandes descobertas: Qual o mecanismo que permite transformar energia em massa? Por que a antimatéria sumiu do universo? Será que existem superpartículas até hoje não detectadas? Será que o universo tem dimensões extras e que vivemos confinados em um subconjunto delas? Quais as propriedades da escaldante sopa de matéria criada nas colisões? Essas são algumas das questões que o LHC nos permitirá estudar e para as quais, quem sabe, nos dará respostas.

Sessenta anos depois de o físico brasileiro César Lattes (1924-2005) ter detectado a partícula responsável pela coesão do núcleo atômico, o méson pi, no então maior acelerador de partículas do mundo, na Universidade da Califórnia, estamos certos de que teremos pela frente uma década de surpresas e descobertas emocionantes. Fique ligado no LHC. Esse colosso poderá mudar sua concepção do universo!

174. | **ERA DE UM COLOSSO** | GRANDE COLISOR | DIMENSÕES ÍNFIMAS | DUAS MISSÕES BÁSICAS
176. | **A MÁQUINA EM NÚMEROS** | NÚMEROS IMPRESSIONANTES | BATIDA DE FRENTE | 1,5 TONELADA | VÁCUO INTERPLANETÁRIO | TEMPERATURA INTERGALÁCTICA | DA TERRA AO SOL | $E = MC^2$
179. | **FÍSICA NO LHC** | QUESTÕES CENTRAIS | A PARTÍCULA DAS MASSAS | ONDE ESTÁ A ANTIMATÉRIA? | SOPA QUENTÍSSIMA
182. | **DETECTORES DO LHC** | CAPTURADORES DE FRAGMENTOS | ALICE | LHCB | ATLAS | CMS | PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA
186. | **GRADE DE COMPUTADORES** | WEB | 20KM DE CDS | UTILIDADE PÚBLICA
188. | **RESPOSTAS PARA AS PERGUNTAS** | MUDANÇA DE PARADIGMA | ENQUETE NA TV | RAINHA DAS MÁQUINAS

EDITOR CIENTÍFICO | Ignácio Bediaga (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas)

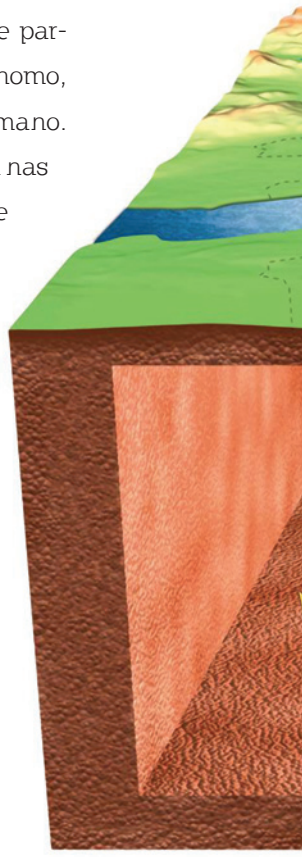
ERA DE UM COLOSSO

GRANDE COLISOR

O ano de 2008 é um marco para a física de altas energias: terá início o funcionamento do maior acelerador de partículas no mundo, o LHC (sigla, em inglês, para Grande Colisor de Hádrons). Essa máquina, por seu tamanho, número de cientistas e tecnólogos envolvidos, pelas tecnologias desenvolvidas e pelos objetivos científicos, pode ser considerada o maior empreendimento científico e tecnológico da atualidade. É um dos pontos mais altos na história do *Homo faber*.

DIMENSÕES ÍNFIMAS

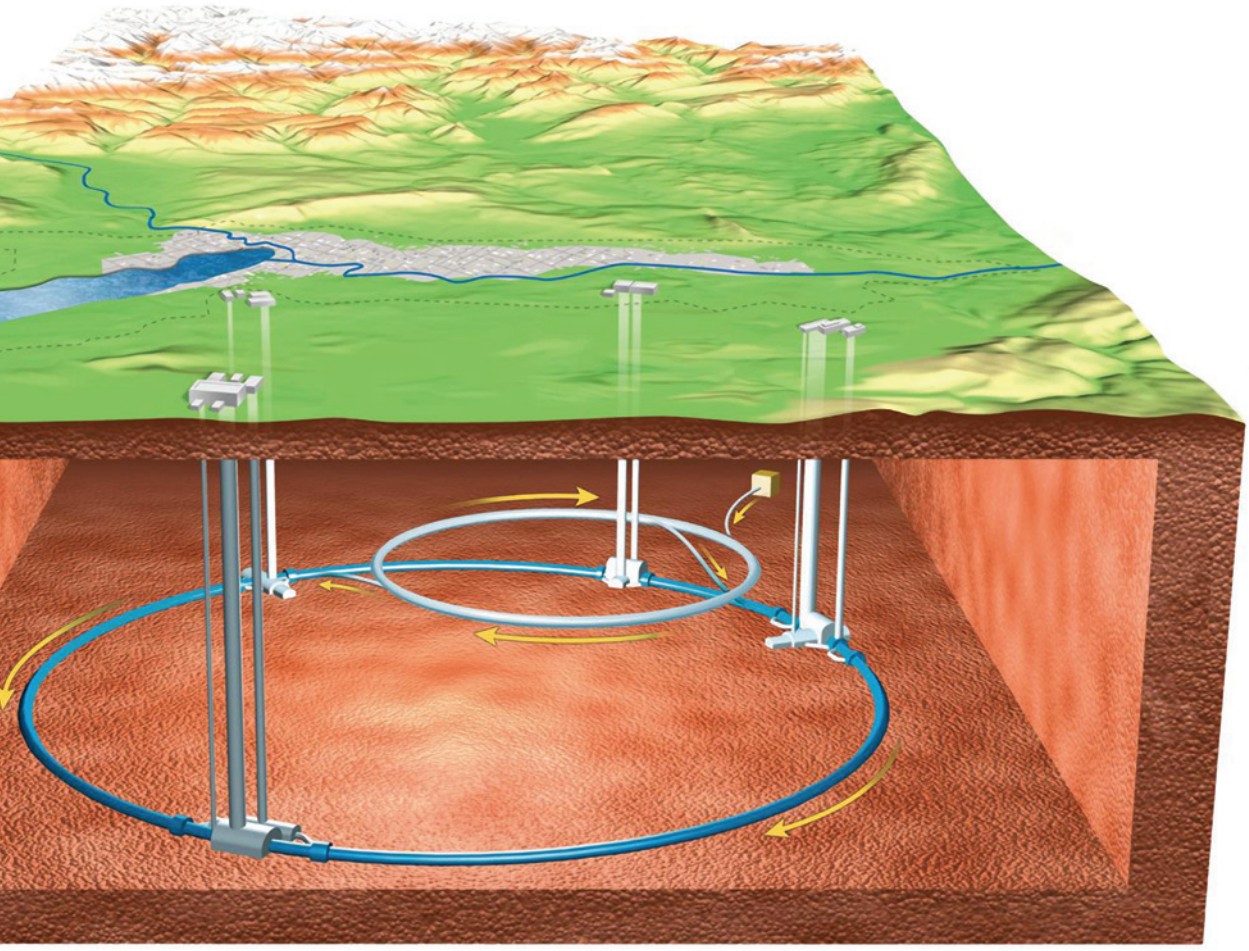
Um acelerador e seus detectores estão para o físico de partículas assim como o telescópio está para o astrônomo, o microscópio para o biólogo ou o olho para o ser humano. A função é praticamente a mesma: observar a natureza nas dimensões ínfimas. No caso desse gigante de 27km de circunferência – encravado a 100m de profundidade, na fronteira da Suíça com a França, onde está o laboratório que o abriga, o Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN) –, o objetivo é estudar a estrutura da matéria em dimensões inferiores ao tamanho dos prótons: 0,000000000000000001 (10^{-18}m). Em resumo: o LHC é o maior instrumento científico do mundo, feito para investigar as menores dimensões jamais observadas.



Esquema dos anéis do LHC

DUAS MISSÕES BÁSICAS

A primeira missão desse novo acelerador é investigar elementos previstos ou mal compreendidos na teoria atual, o chamado Modelo Padrão, com o qual os físicos estudam as partículas indivisíveis (elementares) e as forças (interações) que agem sobre elas: i) a forte, que mantém o núcleo atômico coeso; ii) a fraca, que age quando uma partícula se transforma em outra; e iii) a eletromagnética, que atua quando cargas elétricas estão envolvidas. A força gravitacional não faz parte do Modelo Padrão. A segunda missão – mais difícil de ser caracterizada – é buscar novos fenômenos físicos na altíssima escala de energia que será atingida por ele em volumes infinitesimais de espaço.



LHC/CERN



A MÁQUINA EM NÚMEROS

NÚMEROS IMPRESSIONANTES

O LHC foi feito usando os mesmos 27km (mais exatamente, 26,659km) de circunferência do túnel de uma outra façanha tecnológica, o LEP, que colidia elétrons com suas antipartículas, os pósitrons, a energias 70 vezes menores (200 bilhões de elétrons-volt). O LEP iniciou suas atividades em 1988 e foi desmontado a partir de 2002, para dar início à construção do LHC, seu primo mais robusto. De lá para cá, foram gastos cerca de US$ 6 bilhões.

BATIDA DE FRENTE

No LHC, a cada segundo, um pacote com cerca de 3 trilhões de prótons, viajando com velocidade próxima à da luz (300 mil km/s), atravessará um outro com características idênticas. Choques "de frente" ocorrerão à estonteante taxa de 600 mi-

LHC/CERN

lhões de vezes por segundo. Cada vez que houver uma colisão desse tipo, serão produzidas, em média, centenas de partículas de massas variadas.

1,5 TONELADA

Quando atingir o máximo de energia, cada próton estará dando, por segundo, cerca de 11 mil voltas no anel de 27km. Nessa fase, essas partículas nucleares estarão na impressionante casa dos 7 trilhões de elétrons-volt (7 TeV) por próton, um patamar descomunal para algo que é trilhões de vezes menor que um grão de areia. Somadas individualmente, as energias dos prótons envolvidos na colisão seriam equivalentes à de um veículo de 1,5t, viajando a 25 mil km/h.

VÁCUO INTERPLANETÁRIO

No quesito energia, o LHC será cerca de dez vezes superior ao maior acelerador de prótons hoje em atividade no mundo, o Tévatron, situado no Fermilab (EUA). A máquina européia foi projetada para trabalhar com cerca de 100 vezes mais prótons circulando no anel, em cujo interior reina um vácuo no qual há menos matéria que no espaço a mil km de altitude (para se ter uma idéia, a Estação Orbital Internacional – por sinal, outra maravilha da engenhosidade humana – está a meros 380km do chão). Serão apenas 3 milhões de moléculas por cm^3, algo espantoso para um vácuo artificial.

TEMPERATURA INTERGALÁCTICA

O LHC usa ímãs supercondutores cuja função é "forçar" o feixe de prótons a fazer curvas e permanecer sempre na trajetória circular do anel. Esses equipamentos sofisticados trabalharão a – 271°C, valor inferior à temperatura do espaço intergaláctico. Será aplicado sobre o feixe um campo magnético 100 mil vezes superior ao da Terra. Ao longo do túnel, se-

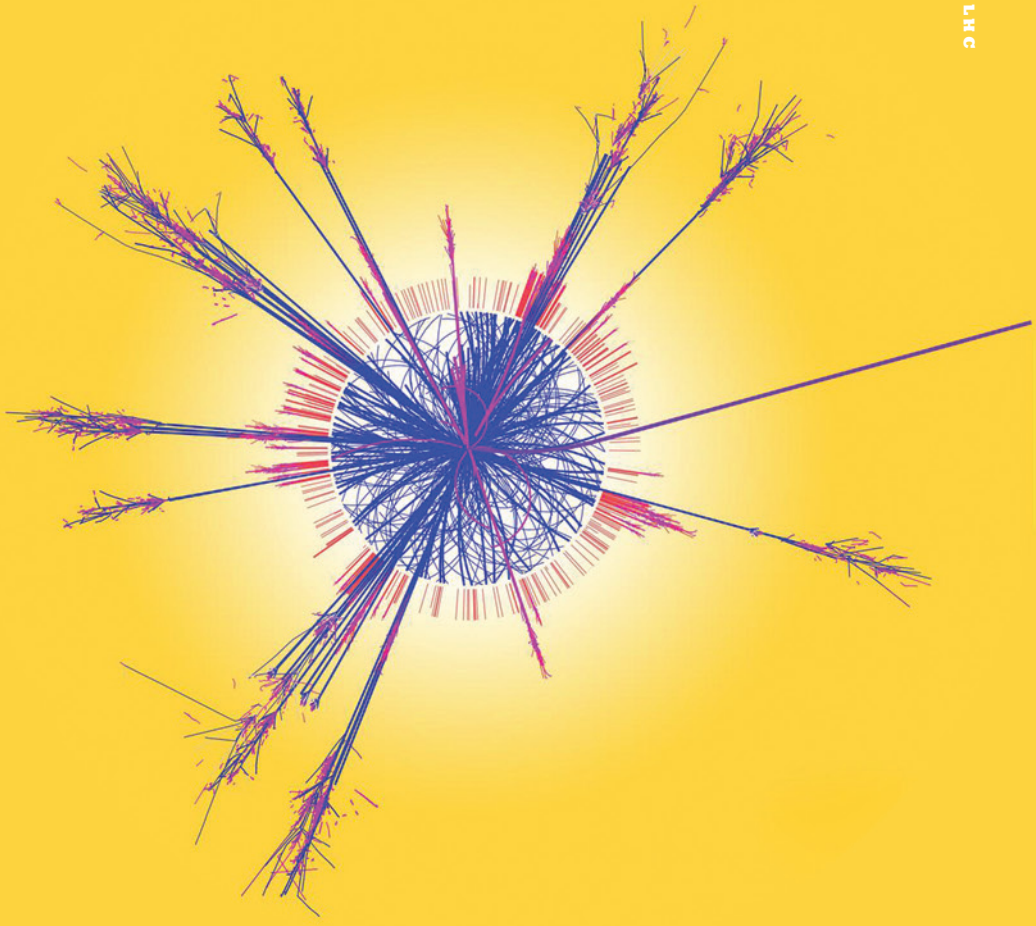
rão instalados 1.640 ímãs supercondutores, que, em média, terão 14m cada. Para manter esses artefatos a baixas temperaturas, serão usados 12 milhões de litros de nitrogênio líquido (para iniciar o processo refrigeração) e, em seguida, 700 mil litros de hélio líquido, para atingir a temperatura desejada.

DA TERRA AO SOL

Os ímãs do LHC foram produzidos com fios de liga de cobre, titânio e nióbio (este último metal foi comprado do Brasil, que detém praticamente o monopólio das reservas mundiais). Quando refrigeradas, essas ligas conduzem eletricidade sem praticamente dissipar calor. Se unidos pelas pontas, o comprimento total desses fios (cuja espessura é a de um fio de cabelo) seria astronômico: o suficiente para cinco viagens de ida e volta ao Sol (correspondendo a cerca de 150 milhões de km cada uma dela), com uma "sobra" que daria para ir à Lua algumas vezes.

$E=MC^2$

No momento da colisão de um próton com outro, a energia no LHC será suficiente para criar centenas de outras partículas, incluindo outros prótons. Essa transformação de energia em matéria tem como base a famosa equação de Einstein, $E=mc^2$, segundo a qual uma pequena quantidade de matéria pode gerar uma porção descomunal de energia, como ficou demonstrado num dos acontecimentos mais trágicos da história: a explosão de duas bombas atômicas sobre o Japão, na Segunda Guerra Mundial, deixando centenas de milhares de mortos e feridos. Nela, com uma eficiência baixíssima (cerca de 1%), alguns poucos quilos de material radioativo deram origem a um "cogumelo" atômico com quilômetros de altura. Nos aceleradores, ocorre o inverso: a energia dos prótons acelerados se transforma, por meio das colisões, em matéria.



LHC/CERN

FÍSICA NO LHC

QUESTÕES CENTRAIS

O LHC deverá ajudar os cientistas a responder a três questões centrais sobre o mundo das partículas e das forças: i) existe o bóson de Higgs?; ii) os físicos têm uma teoria adequada para explicar o que aconteceu com a antimatéria do universo?; e iii) existe a "sopa" quentíssima de quarks e glúons?

A PARTÍCULA DAS MASSAS

O Modelo Padrão tem como um dos seus fundamentos a unificação de duas forças: a eletromagnética, que tem alcance ilimitado, e a forca fraca, cujo raio de ação é inferior a 10^{-15} cm (diâmetro nuclear). Essa teoria foi testada com vigor nas últimas três décadas, e os resultados obtidos nesses experimentos comprovam a solidez desse modelo. Entretanto, a unificação entre forças tão díspares só é permitida, segundo a teoria padrão, por meio do chamado mecanismo de Higgs. Segundo esse processo, existiria uma partícula (hoje, denominada bóson de Higgs) que faria com que o fóton (que não tem massa e é responsável por "carregar" a força eletromagnética) possa ser considerado um "irmão" dos bósons Z^0 e W^+, que são os carregadores da força fraca, mas cujas massas são cerca de noventa vezes maiores que a do próton. Os físicos têm muita convicção de que o bóson de Higgs (provavelmente cerca de cem vezes mais pesado que o próton) seja a partícula responsável por gerar a massa nos bósons Z^0 e W^+. Há uma forte expectativa de que o Higgs será detectado no LHC.

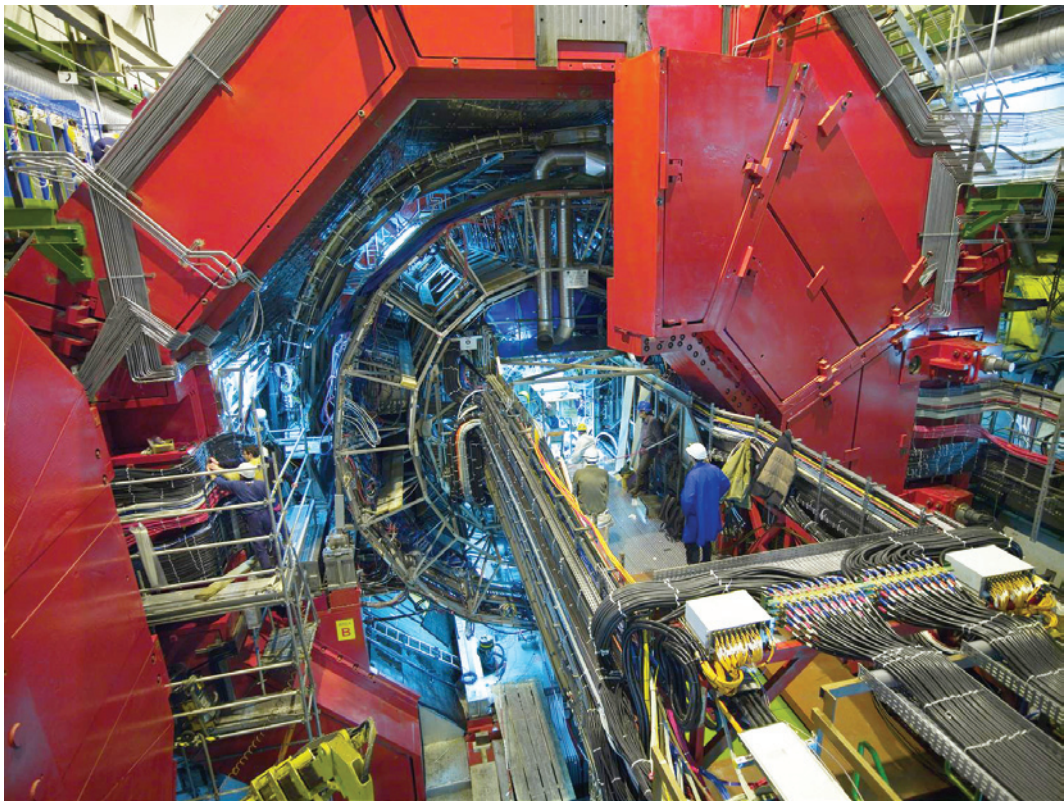
ONDE ESTÁ A ANTIMÁTÉRIA?

Toda partícula de matéria conhecida tem sua antipartícula. Assim, o elétron tem o pósitron, que praticamente difere do primeiro apenas por ter uma carga elétrica contrária. No Big Bang, "explosão" que deu início ao universo, deveria ter sido criada a mesma quantidade de matéria e antimatéria. Porém, observações mostram que o universo é majoritariamente dominado pela matéria. Surge assim uma das questões mais fundamentais da física atual: o que teria acontecido com a antimatéria? Desde a década de 1970, os físicos têm uma teoria (resumidamente, conhecida como matriz CKM) para explicar, em parte, por que há essa assimetria entre matéria e antimatéria. Essas idéias se mostraram no caminho certo

quando, a partir dessa teoria, foi prevista a existência de dois novos quarks, o top e o bottom, descobertos mais tarde. Porém, há evidências de que a matriz CKM não seja suficiente para explicar a esmagadora superioridade da matéria em nosso universo. No mínimo, o LHC deverá determinar se essa teoria é exata ou não, o que já será uma grande contribuição dessa máquina. Mas ainda é possível que o LHC, ao investigar essa questão, encontre novos fenômenos que ajudem no entendimento dessa assimetria.

SOPA QUENTÍSSIMA

Na criação do universo, há 13,7 bilhões de anos, houve um momento em que a matéria não era constituída por prótons e nêutrons, mas por um plasma (um tipo de gás quentíssimo) formado pelos constituintes dessas partículas, os quarks e os glúons. O LHC vai tentar reproduzir esse estado primordial do universo, previsto pela cromodinâmica quântica. Essa teoria é a parte do Modelo Padrão que lida com a força forte, que é cerca de 10^{39} vezes mais intensa que a gravitacional, mas só atua nas dimensões nucleares (10^{-15} m). Para reproduzir o plasma de quarks-glúons será necessário gerar colisões cujas temperaturas serão cerca 100 mil vezes superiores àquelas no centro do Sol, algo como 10^{20} graus celsius. Para isso, segundo os planos do LHC, deverá haver um período de tomada de dados no qual, em vez de prótons colidindo contra prótons, os choques serão feitos entre núcleos de chumbo, elevando a densidade de energia (e, portanto, de temperatura) aos valores desejados.



LHC/CERN

DETECTORES DO LHC

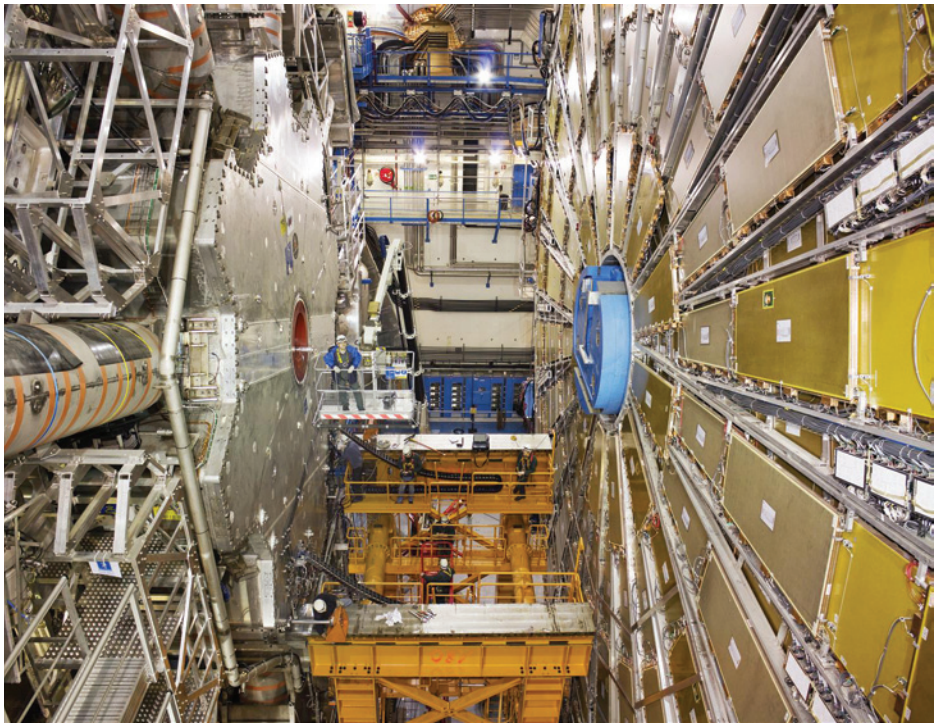
CAPTURADORES DE FRAGMENTOS

Acelerar partículas a energias extremamente altas é apenas parte da tarefa de um acelerador. A outra, tão importante quanto, é detectar um sem-número de estilhaços que se espalham pelo espaço depois das colisões. Com a reconstrução desses fragmentos, procura-se entender qual foi o mecanismo (ou força) que participou na transformação da energia em matéria. Esse é o trabalho dos detectores, máquinas igualmente sofisticadas e gigantescas. O LHC terá quatro detectores principais, posicionados em pontos diferentes de seu anel. Dois deles, o Alice e o LHCb, estão sendo construídos com objetivos bem específicos:

ALICE • O Experimento do Grande Colisor de Íons (que levou nome de mulher) é uma colaboração envolvendo mais de mil físicos e técnicos, de trinta países. Esse cilindro, com 5m de diâmetro e outros 5m de comprimento, é o primeiro detector dedicado praticamente ao estudo do plasma de quarks-glúons. Se esse novo estado da matéria existir, tudo indica que ele deva ser detectado no Alice.

LHCb • O objetivo principal é o de estudar o comportamento da matéria e da antimatéria, com base nas propriedades dos mésons do tipo B (beleza ou *beauty*). Essa máquina vai verificar se, no momento da criação desse tipo de méson, a natureza privilegia a matéria em detrimento da antimatéria (ou vice-versa). O LHCb conta com mais de 600 colaboradores, de 13 países diferentes.

LHC/CERN

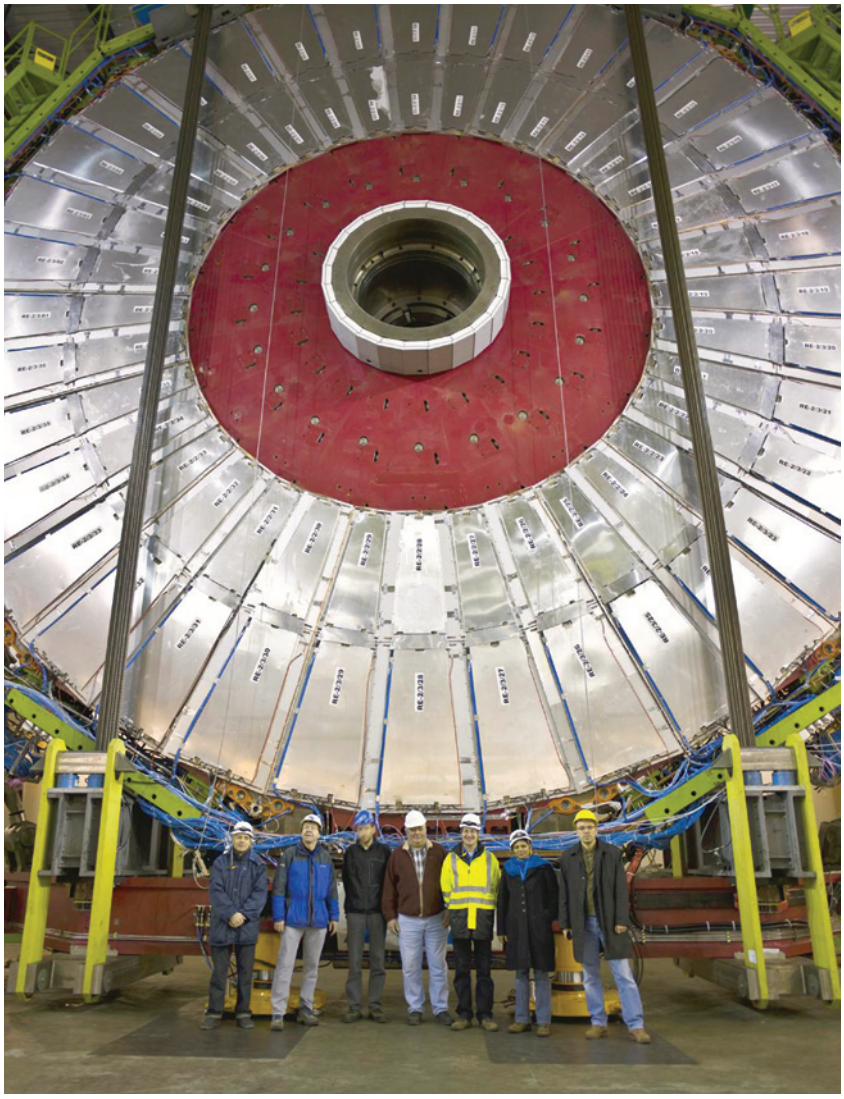


ATLAS • O nome revela algo de seu perfil: é o maior dos quatro detectores do LHC. Na caverna subterrânea que o abriga, caberia a catedral de Notre Dame. Não é por menos que ele leva o nome do titã que, segundo a mitologia grega, foi condenado a carregar o céu nas costas. Foi desenhado para determinar ou não a existência do Higgs, embora vá desempenhar outras tarefas. A equipe em torno desse colosso reunirá 1,8 mil colaboradores, de 34 países diferentes.

CMS • Assim como o gigante Atlas, é um detector com objetivos mais gerais, embora também esteja estruturado para caçar o bóson de Higgs. A colaboração "Solenóide Compacto para Múons" é a maior entre as quatro. Em sua equipe, estão cerca de 2,5 mil participantes, de 37 diferentes países.

LHC/CERN





LHC/CERN

PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA

O Brasil está presente nos quatro detectores do LHC. Do LHCb, participam pesquisadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). No Alice, estão a Universidade de São Paulo e a Universidade Estadual de Campinas (SP). A UFRJ está também no Atlas. Fazem parte da equipe do CMS o CBPF, a Universidade Estadual do Rio de Janeiro e a Universidade Estadual Paulista.



GRADE DE COMPUTADORES

LHC/CERN

WEB

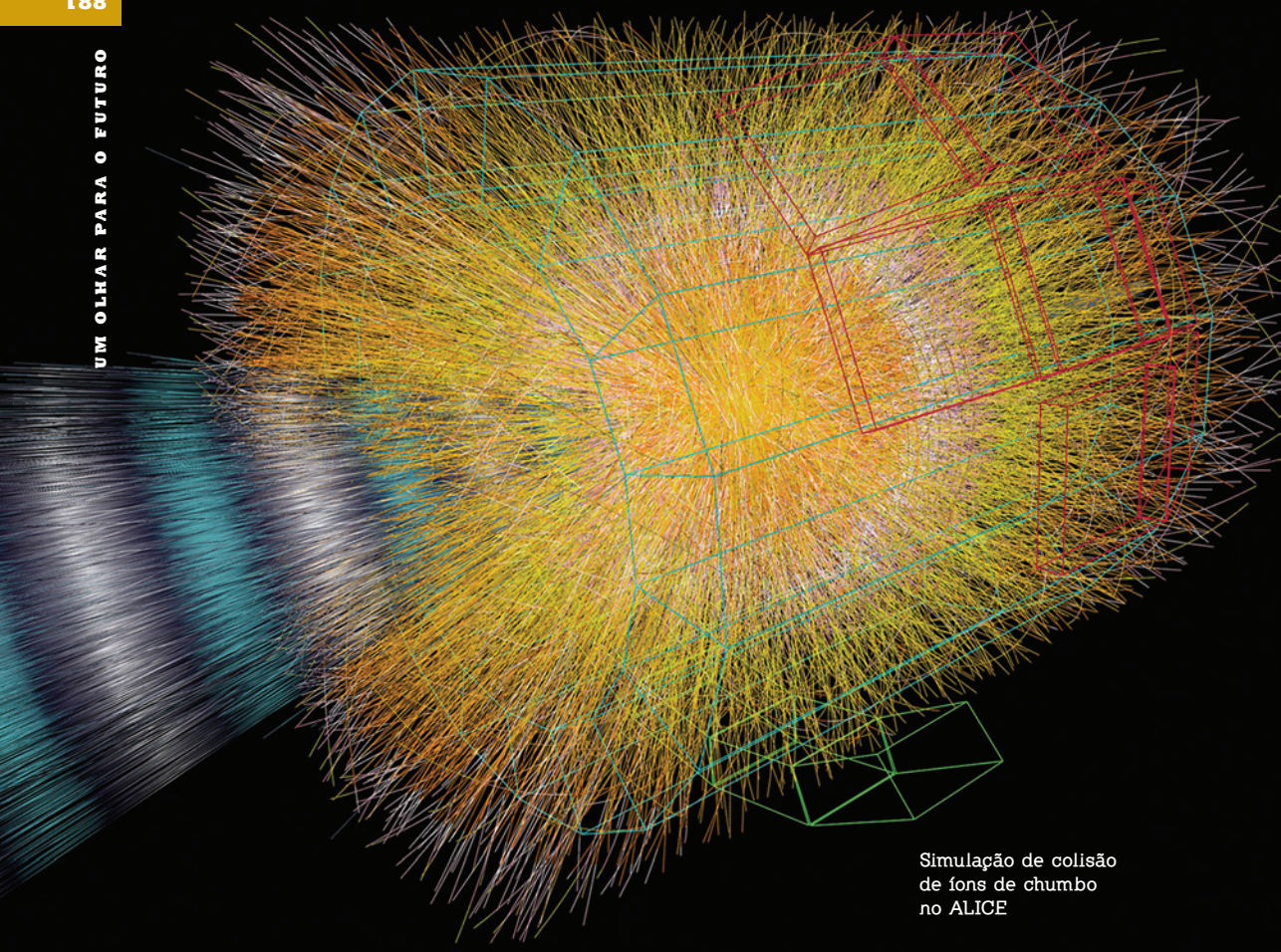
O CERN revolucionou a informação com a criação da *world wide web* (a "www"), que permitiu o acesso a páginas da *web* na internet. Só isso certamente já valeria todo o investimento feito nesse laboratório europeu, fundado em 1954, que tem uma extensa lista de bons serviços prestados à ciência e do qual hoje vinte países são membros. Outros nove têm o status de observadores, e mais 27 (entre eles, o Brasil) participam das atividades desse centro de pesquisa. Isso faz do LHC uma Babel ao contrário, onde todos se entendem.

20KM DE CDS

Os experimentos que serão realizados no LHC gerarão mais de 10 milhões de gigabytes de informação, o que equivale a uma pilha de 20km de altura de CDs, com a capacidade máxima de armazenamento esgotada. Para analisar, gerenciar e armazenar esse número astronômico de dados, o LHC criou uma rede (ou grade) de computadores interligados, com centenas de pequenos e grandes centros de computação.

UTILIDADE PÚBLICA

Essa malha gigantesca e hiperveloz de computadores, por meio do projeto EGEE (sigla inglesa para algo como "Possibilitando uma Rede de Computadores para a Ciência"), liderado pelo CERN, já está prestando serviços de utilidade pública: recentemente, os cerca de 300 mil componentes químicos do vírus da gripe aviária foram analisados por 2 mil computadores dessa grade. Objetivo: buscar potenciais medicamentos contra a doença. Outro exemplo: a infra-estrutura do EGEE fez simulações computacionais que permitiram avaliar mais de 40 milhões de candidatos a medicamentos contra a malária. Em resumo: o LHC tem o apoio de um devorador de cálculos longos e complexos.



Simulação de colisão de íons de chumbo no ALICE

LHC/CERN

RESPOSTAS PARA AS PERGUNTAS

MUDANÇA DE PARADIGMA

Desde sua fundação, o CERN tem se mostrado uma organização internacional no sentido amplo, um local onde o conhecimento é disseminado extensivamente, com a participação de todos, de forma aberta e democrática. Essa experiência de convivência e de esforço conjunto mostrou

ser tão eficaz que tem servido de modelo para outros grandes projetos científicos, nas áreas de fusão nuclear, seqüenciamento de genomas e astronomia. Organizações como o CERN estão mudando o velho paradigma do cientista isolado e que fazia grandes descobertas em pequenos laboratórios. Artigos científicos das equipes que trabalham nos detectores do CERN chegam a ter centenas de assinaturas.

ENQUETE NA TV

Uma rede de TV norte-americana ofereceu a seus telespectadores uma lista com sete opções para que, a partir dela, fossem escolhidas as maiores realizações humanas recentes. Em primeiro lugar, ficou a www; em segundo, o LHC; em terceiro, a invenção de braços biônicos. Os outros concorrentes eram façanhas igualmente respeitáveis: o desenvolvimento de Dubai (Emirados Árabes), a hidrelétrica de Três Gargantas (China), o túnel sobre o canal da Mancha (que liga o continente à Grã-Bretanha) e o viaduto de Milau (França).

RAINHA DAS MÁQUINAS

Dá para perceber que pesa sobre os ombros desse gigante criador (e esmagador) de matéria inúmeras responsabilidades. Os físicos, no entanto, apostam que essa "rainha" das máquinas, supra-sumo do que há de mais moderno na tecnologia deste início de século, irá cumprir seu papel e responder, com um sim ou não, às perguntas feitas à natureza pela comunidade mundial de física de altas energias. E, talvez, até apareça com respostas para perguntas que nem mesmo tenham ainda sido formuladas.

BIBLIOGRAFIA

ANO MIRACULOSO DE EINSTEIN
Cem anos da publicação dos artigos que mudaram a física

BRIAN, D. *Einstein – A ciência da vida*. São Paulo: Ática, 1998.

"Einstein". In: *Ciência & Ambiente*. Universidade Federal de Santa Matia, vol.30, 2005.

EINSTEIN, A. *Teoria da relatividade especial e geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

Einstein@home. In: *World of Physics*. 2005. [<www.physics2005.org>]

FRIEDMAN, A. e DONLEY, C. *Einstein – As myth and muse*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

FURTADO, F. e VIEIRA, C. L. "As visões de Einstein" [entrevista com John Stachel]. In: *Ciência Hoje*, nº 214, abril/2005.

MOREIRA, I. C. "1905: O ano miraculoso". In: *Ciência Hoje*, vol. 36, nº 212, jan/fev 2005.

MOREIRA, I. C. e VIDEIRA, A. A. P. (orgs.). *Einstein e o Brasil*. Rio de Janeiro: UERJ, 1996.

PAIS, A. *Sutil é o senhor – A ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira,1995.

____. *Einstein viveu aqui*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira,1997.

STACHEL, J. (org.) *Ano miraculoso de Einstein – cinco artigos que mudaram a face da física*. Rio de Janeiro: UERJ, 2001.

SUJIMOTO, K. *Albert Einstein – A photographic biography*. Nova York: Schocken Books, 1989.

TOLMASQUIM, A. *Einstein – O viajante da relatividade na América do Sul*. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2004.

WHITACKER, A. *Einstein, Bohr and the Quantum Dilemma*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

WHITROW, G. J. *Einstein – The man and his achievement*. Nova York: Dover, 1973.

PARTÍCULAS ELEMENTARES
A (des)construção da matéria pelo homem

BRAGG, W. "To See Atoms". In: Levi, Primo. *The Search for Roots*. Chicago: Ivan R. Dee, 2002.

CLOSE, F.; MARTEN, M. e SUTTON, C. *The Particle Explosion*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

FITCH, V. L. e ROSNER, J. L. "Elementary Particle Physics in the Second Half of the Twentieth Century". In: Brown, Laurie M.; Pais, Abraham e Pippard, Sir Brian. *Twentieth Century Physics*. Bristol e Filadélfia/NovaYork: Institute of Physics Publishing/ American Institute of Physics Press, vol. II, pp. 635-769, 1995.

GRIBBIN, J. *Q is for Quantum*. Londres: Weidenfeld & Nicolson, 1998.

KALMUS, P. I. P. "Particle Physics". In: *Physics Now – Review by leading physicists in the International Union of Pure and Applied Physics*. Jon Ogborn (ed.). IUPAP, 39, pp. 65-73, 2004.

LAMB Jr., W. E. "Fine Structure of Hydrogen Atom". [Palestra feita em 12 de dezembro de 1955 pelo recebimento do Nobel de física daquele ano. Disponível em <nobelprize.org>]

LLOYD, S. L. "Elementary Particle Physics Lectures". <hepwww.ph.qmw.ac.uk/epp/>

NATALE, A. A e VIEIRA, C. L. (eds). *Universo sem mistério – uma visão descomplicada da física contemporânea: do Big Bang às partículas*. Rio de janeiro: Vieira & Lent, 2003.

PAIS, A. *Inward Bound*. Oxford: Oxford University Press, 1986.

Nobelprize.org e Particle Data Group. Structure of Matter. [Disponível em <nobelprize.org/physics/ educational/index.html>]

WEINBERG, S. *The Discovery of Subatomic Particles*. Londres: Penguin Books, 1993.

WEISSKOPF, V. F. "Elementary Particles". In: Rapport, Samuel e Wright, Helen (eds.). *Physics*. Washington: Washington Square Press, 1965.

WOLFRAM, S. "History [of elementary particles]". In: *A New Kind of Science*. Wolfram Media, s/l, notas para o capítulo 9, p. 1.043, 2002)

The Particle Adventure. "Early Atomic Understanding" e "Summary of Particle Physics". [Disponível em <particle adventure.org>. Em português: <www. aventuradasparticulas.ift.unesp.br/>]

NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA
Modelando o futuro átomo por átomo

Ciência Hoje. [Entrevista de Cylon Gonçalves da Silva a Vera Rita Costa]. Vol.33, nº 193, maio de 2003.

ComCiência. "nanociência & nanotecnologia". [Coletânea de ensaios e reportagens (vários autores). <www.comciencia.br/reportagens/ framereport.htm>]

Eurekalert in Context – Nanotechnology [Coletânea de ensaios (vários autores) <www.eurekalert.orgcontext. php?context=nano>]

Foresight Institute. <www.foresight.org>

Nanodot. < www.nanodot.org>

Nanoscale Science, Engineering and Technology – Research Directions. <www.er.doe.gov/production/bes/ nanoscale.html>

Nanotechnology Is Big at Nist - National Institute of Standards and Technology. <www.nist.gov/public_affairs/nanotech. htm>

National Nanotechnology Initiative. <www. nano.gov>

SISTEMAS COMPLEXOS
A fronteira entre a ordem e o caos

ABE, S.; RAJAGOPAL, A. K.; PLASTINO, A.; LATORA, V.; RAPISARDA, A. e ROBLEDO, A. "Revisiting Disorder and Tsallis Statistics". In: *Science*, abril/2003, pp. 249-251.

BARANGER, M. "Chaos, Complexity, and Entropy – A physics talk for non-physicists". Disponível em <www.necsi.org>

BAR-YAM, Y. "Dynamics of Complex Systems". In: *New England Complex Systems Institute;* <www.necsi.org>

CHO, A. "A fresh take on disorder, or disordely science?". In: *Science*, agosto/2002, p. 1268.

GELL-MANN, M. *The Quark and The Jaguar*. Nova York: W. H. Freeman, 1994.

GELL-MANN, M. e TSALLIS, C. (eds.). *Nonextensive Entropy – Interdisciplinary Applications*.Oxford: Oxford University Press, 2003.

GRAHAM, R. "Constatino Tsallis – Describing a New Entropy". In: *Santa Fe Institute Bulletin*, vol. 15, nº. 2, 2002.

MOREIRA, I. de C. "Primórdios do caos determinístico". In: *Ciência Hoje* (especial Caos), vol. 14, nº 80, 1992, pp. 11-16.

NUSSENZVEIG, H. M. (org.). *Complexidade & caos*. Rio de Janeiro: Editora UERJ/ Copea, 1999.

PESSANHA, J. A. M. "Perpetuamente rebelde". In: *Ciência Hoje* (especial Caos), vol. 14, nº 80, 1992, pp. 58-60.

PRIGOGINE, I. *El Nacimiento del Tiempo*. Barcelona: Tusquets Editores, 1993.

RAIOS CÓSMICOS
Energias extremas no universo

Auger Observatory. < www.auger.org >

BEISER, G. e BEISER, A. *The Story of Cosmic Rays*. Londres: Phoenix House,1962.

CLOSE, F., MARTEN, M. e SUTTON, CHRISTINE. *The Particle Explosion*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

CRONIN, J. "O enigma das micropartículas com macroenergia" [Entrevista a R. C. Shellard e C. L. Vieira]. In: *Ciência Hoje*, nº 124, 1996.

ERLYKIN, A. D. e WOLFENDALE, A. W.. "The origin of cosmic rays". In: *European Journal of Physics*, vol. 20, 1999, pp. 409-418.

ESCOBAR, C. O. e SHELLARD, R. C. "Energias extremas no universo". In: *Ciência Hoje*, nº 151, julho/1999.

LATTES, C. "Modéstia, ciência e sabedoria" [Entrevista concedida a Fernando de Souza Barros, Micheline Nussenzveig e Cássio Leite Vieira]. In: *Ciência Hoje*, nº. 112, 1995, pp. 10-22.

LINSLEY, J. [Série de entrevistas concedidas por correio eletrônico a Cássio Leite Vieira entre 16 e 30 de abril de 1998]

MUIR, H. "A fast rain"s going to fall". In: *New Scientist*, dezembro/1996, pp. 38-42.

OPHER, R. "Introduction to the Third Workshop on New Space Physics from Space". <www.astro.iag.usp. br/~novafis introduction.html>

OTAOLA, J. A. e VALDEZ-GALICIA, J. F. *Los Rayos Cósmicos: mensajeros de las estrellas*. México D. F.: Fondo de Cultura Económica, 1992.

"Raios cósmicos". In: *ComCiência*, nº 42, maio/2003. <www.comciencia.br>

SEMENIUK, I. "Ultrahigh Energy Cosmic Rays – Astronomy"s Phantom Foul Balls". In: *Sky & Telescope*, março/2003, pp. 32-40.

SIGL, G."Ultrahigh-Energy Cosmic Rays: Physics and Astrophysics at Extreme Energies". In: *Science*, vol. 291, janeiro/2001, pp. 73-79.

SHELLARD, R. C. "Energias extremas no universo". In: Vieira, C. L. (ed.). *CBPF – Na vanguarda da pesquisa*. Rio de Janeiro: CBPF, 2001.

_____. "Cosmic Accelerators and Terrestrial Detectors". In: *Brazilian Journal of Physics*, vol. 31, nº 2, junho/2001, pp. 247-254.

VIEIRA, C. L. e VIDEIRA, A. A. P. "50 anos da descoberta do méson pi – um relato jornalístico". In: *Ciência e Memória*. Rio de Janeiro: Observatório Nacional, 1997.

WATSON, A. A.. "Ultra High Energy Cosmic Rays: The present position and the need for mass composition measurements". In: arXiv:astro-ph/0312475. vol. 1, 18/12/03.

COSMOLOGIA

A busca pela origem, evolução e estrutura do universo

BERNSTEIN, J. *Albert Einstein and the frontiers of physics*. Oxford: Oxford University Press, 1996. [Brazilian School for Cosmology and Gravitation]. [Disponível em <www.cbpf.br/~cosmogra/Escolas/indice_ingles.html>]

CHAVES, A. e SHELLARD, R. C. *Física para o Brasil – pensando o futuro*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

"Cosmologia". In: *REVISTA USP*. Nº 62, junho/julho/agosto de 2004.

"Einstein". In: *Ciência & Ambiente*. Universidade Federal de Santa Maria, vol.30, 2005.

EINSTEIN, A. *Teoria da relatividade especial e geral*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

GLEISER, M. *A dança do universo – dos mitos da criação ao Big Bang*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

GUTH, A. *O universo inflacionário*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1997.

LIVIO, M. e REES, M. J. "Anthropic Reasoning". In: *Science*, vol. 309, agosto/05, pp. 1.022-1023.

MAKLER, M. *et al*. "Observational Constraints on Chaplygin Quartessence: Background Results". In: *Phys. Rev.* D68, 123521, 2003.

NOVELLO, M. *Os jogos da natureza*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

OLIVEIRA FILHO, K. de S. "O universo como um todo". Disponível em <astro.if.ufrgs.br/univ/univ.htm>

PAIS, A. *Sutil é o senhor – A ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

REES, M. J. "Exploring our universe and others". In: *Scientific American*, dezembro/1999, pp. 44-49.

SCHWARZ, P. "The official string theory web site" (superstringtheory.com).

SOUZA, C. A. W. de. "O retrato do universo quando jovem".In: *Ciência Hoje*, vol. 32, nº 192, abril/2003, pp. 6-7.

SOUZA, R. E. "Introdução à cosmologia". Disponível em <www.astro.iag.usp.br/~tonaldo/intrcosm>

VIDEIRA, A. A. P. "Cosmologia e filosofia" [Seminário: "Einstein para além de seu tempo", MAST, Rio de Janeiro, setembro de 2005]

VILLELA, T. "Cosmologia – a aventura espetacular da descoberta do cosmo". In: *Ciência Hoje*, vol. 36, nº 216 julho/2005, pp. 20-28. [Outros textos disponíveis em <www.das.inpe.br/~cosmo>]

WAGA, I. "Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para o século XXI". In: *Revista Brasileira de Ensino de Física*. [Edição especial dedicada a Einstein no Ano Internacional da Física]. Vol. 27, nº. 1, 2005.

INFORMAÇÃO QUÂNTICA

Do teleporte à última fronteira da computação

DAVIDOVICH, L. "Informação quântica – do teletransporte ao computador quântico". In: *Ciência Hoje*, nº. 206, julho/2004.

_____. "O gato de Schrödinger: do mundo quântico ao mundo clássico". In: *Ciência Hoje*, nº. 143, outubro/1998.

_____. "Teletransporte: uma solução em busca de um problema". In: *Ciência Hoje*, nº. 137, abril/1998.

NIELSEN, M. A. "Regras para um mundo quântico complexo". In: *Scientific American Brasil* [Edição especial], nº. 8, 2005, pp. 24-33.

NIELSEN, M. A. e CHUANG, I. L. *Computação quântica e informação quântica* [Tradução de Ivan S. Oliveira]. São Paulo: Bookman Cia, 2005.

OLIVEIRA, I. S. "Computação quântica: a última fronteira da informação". In: *Ciência Hoje*, nº. 179, janeiro-fevereiro/2002.

OLIVEIRA, I. S. *et al*. "Computação quântica – manipulando a informação oculta do mundo quântico". In: *Ciência Hoje*, nº. 193, maio/2003.

ZEILINGER, A. "Teletransporte quântico". In: *Scientific American Brasil* [Edição especial], nº. 8, 2005, pp. 34-43.

NEUTRINOS

As misteriosas partículas-fantasma

CLOSE, F. *The cosmic onion*. Nova York: American Institute of Physics, 1983.

FUNCHAL, R. Z. "Neutrino do tau é observado pela primeira vez". In: *Ciência Hoje*, vol. 28, nº 164, setembro/ 2000, pp. 52-53.

FUNCHAL, R. Z. "Neutrinos: de Poltergeister a sondas do universo". In: *Revista USP*, nº 62, junho-agosto/2004.

GUZZO, M. e NATALE, A. A. "Neutrinos: as partículas fantasmas".In: Natale, A. A. e Vieira, C. L., Eds. *Universo sem mistério – uma visão descomplicada da física contemporânea: do Big Bang às partículas*. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2003.

_____. "Neutrinos: partículas onipresentes e misteriosas". In: *Ciência Hoje*, vol. 25, nº 147, março/1999.

GUZZO, M. e REGGIANI, N. "Compreendendo o cosmo". In: *Ciência Hoje*, vol. 32, nº. 189, dezembro/2002, pp. 8-10.

GUZZO, M. "Neutrinos do cosmo". In: *ComCiência* [especial Raios Cósmicos], nº 43, maio/2003; <http://www.comciencia.br/reportagens/framereport.htm>

NATALE, A. A. "Observatório detecta oscilação de neutrinos solares". In: *Ciência Hoje*, vol. 29, nº 174, agosto/2001, pp. 10-11.

SUTTON, C. *Spaceship neutrino*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

WEINBERG, S. *Os três primeiros minutos*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

BIOFÍSICA

Duas visões da vida

BRYSON, B. *Uma breve história de quase tudo*. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

EL-HANI, C. N. e VIDEIRA, A. A. P. (org.). *O que é vida? – Para entender a biologia do século XXI*. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2000.

HUNTER, G. K. *Vital forces – The discovery of the molecular basis of life*. Nova York: Academic Press, 2000.

PALHETA, F. C. e BRITO, L. P. "Biofísica do corpo humano". Disponível em <www.ufpa.br/ccen/fisica/biofisica/index.html>

SCHRÖDINGER. E. *O que é vida?* São Paulo: Editora Unesp,1997.

SILVA, S. C. da e GONZÁLEZ, F. H. D. Aulas virtuais de bioquímica e biologia molecular (UFRGS). Disponíveis em <www6.ufrgs.br/bioquimica/>

VOLKENSHTEIN, M. V. *Biofísica*. Moscou: Mir, 1985.

SUPERCORDAS

O sonho da unificação das quatro forças da natureza

BERKOVITS, N. "Supercordas: a física do futuro?" In: Natale, A. A. e Vieira, C. L., Eds. *O universo sem mistério – uma visão descomplicada da física contemporânea*. Rio de Janeiro: Vieira & Lent Casa Editorial, 2003.

_____. "Descobrindo a teoria de supercordas". In: *Scientific American Brasil*, janeiro/2004.

GREENE, B. *Universo elegante: supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva*. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

MALDACENA, J. "Ilusão em três dimensões". In: *Scientific American Brasil*, novembro/2005.

RANDALL, L. *Warped passages - unraveling the mysteries of the universes's hidden dimensions*. Nova York: Harper Collins, 2005.

LHC

O gigante criador de matéria

ANJOS, J. C. e NATALE, A. A. *Partículas elementares – (des)construção da matéria pelo homem* [Folder da série Desafios da Física]. Rio de Janeiro: CBPF (2005). [Disponível em <http://mesonpi.cat.cbpf.br/desafios/>]

"Aventuras das partículas". Disponível em <http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticulas/>

BEDIAGA, I. "LHC – o colosso criador e esmagador de matéria . In: *Ciência Hoje*, v. 42, nº 247, abril/2008.

"CERN - The Large Hadron Collider". Disponível em <http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/LHC-en.html>

Nature. [Especial sobre o LHC], vol. 448, 2007, pp. 169-312.

Symmetry. [especial sobre o LHC]. vol. 3, nº 6, agosto de 2006. [Disponível em <http://www.symmetrymagazine.org/cms/>]

A primeira edição deste livro
foi produzida no Rio de Janeiro, em novembro de 2008.
Composto em Kelin Slab Serif sobre papel couché matte (miolo)
e cartão supremo (capa).
Impresso pela Sermograf Artes Gráficas.

Colaboradores
(editores científicos)

Adriano Antônio Natale
Instituto de Física Teórica | UNESP

Constantino Tsallis
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

Daniel Acosta Avalos
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

Ernesto Kemp
Instituto de Física Gleb Wataghin | Unicamp

Henrique Lins de Barros
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

Ignácio Bediaga
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

Ildeu de Castro Moreira
Instituto de Física | UFRJ

Ivan S. Oliveira
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

João dos Anjos
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicasl MCT

Marcelo Knobel
Instituto de Física Gleb Wataghin | Unicamp

Marcelo Moraes Guzzo
Instituto de Física Gleb Wataghin | Unicamp

Martin Makler
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

Nathan Berkovits
Instituto de Física Teórica | UNESP

Ronald Cintra Shellard
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas | MCT

Sandra Murriello
Museu Exploratório de Ciências
de Campinas | Unicamp

Thyrso Villela Neto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais | MCT

"É com prazer que apresentamos neste livro alguns dos principais desafios que a física deverá enfrentar neste século que se inicia.

(...) Vez por outra a imprensa noticia avanços tecnológicos e novas descobertas, e uma pergunta fica no ar para os leitores: quais são as fronteiras da ciência e da física hoje?

Com este livro, destinado ao grande público, esperamos também contribuir para despertar vocações, mostrando aos jovens estudantes que a carreira científica é uma profissão promissora e instigante, e que muitos desafios permanecem sem solução à espera de novos cientistas dispostos a enfrentá-los."

João dos Anjos

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS/MCT

COORDENADOR DO PROJETO
DESAFIOS DA FÍSICA PARA O SÉCULO 21

ISBN 978-85-88782-48-8