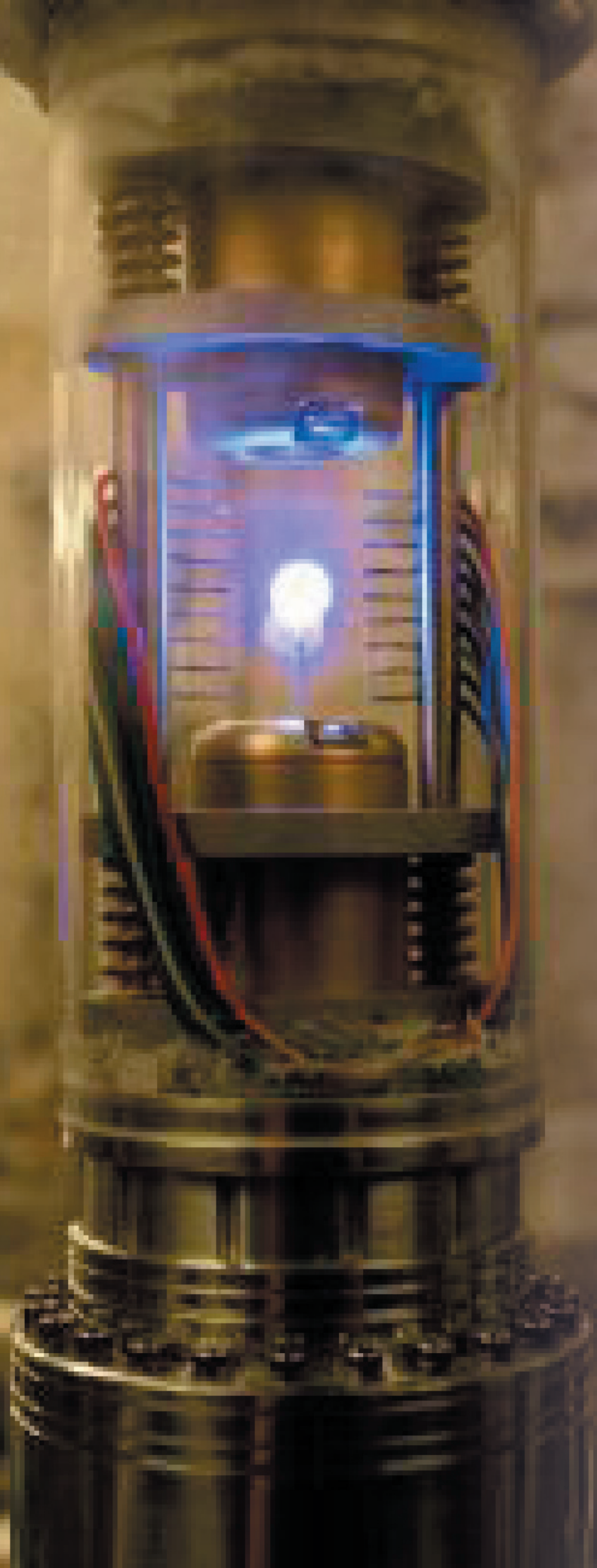


*Uma diminuta quantidade de antimatéria é roubada do Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN). Objetivo: usá-la para destruir o Vaticano. Esse é o mote de Anjos e Demônios, do escritor norte-americano Dan Brown, também autor do sucesso Código da Vinci. O livro – transformado recentemente em filme – é apenas uma das repercussões artísticas de uma grande descoberta da física: a existência da antimatéria, tema ainda hoje intensamente debatido na comunidade científica.*

*Cerca de oito décadas depois da detecção da primeira antipartícula, os físicos ainda se perguntam: por que o universo observado atualmente tem somente matéria? Por que a antimatéria desapareceu?*

**Ignacio Bediaga**

Coordenação de Física experimental de Altas Energias (Lafex)  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (RJ)



# A ANTIMATÉRIA e o UNIVERSO

**No início do universo, matéria e antimatéria foram criadas na mesma proporção.** Basicamente, para cada partícula havia sua antipartícula correspondente, ou seja, para cada elétron foi criado um pósitron; para cada *quark*, um antiquark e assim por diante. Esse cenário dominou o universo logo depois da ‘explosão’ primordial, comumente denominada *Big Bang*.

Quando uma partícula encontra sua antipartícula correspondente (um elétron interage com um pósitron, por exemplo), as duas se aniquilam, transformando-se em energia. Esta, por sua vez, se transforma, de novo, em um par de matéria e antimatéria. Essa ideia, baseada nas atuais teorias das partículas elementares (reunidas no chamado modelo padrão), nos permite criar uma imagem dinâmica daquele cenário inicial: um imenso movimento frenético de criação e aniquilação, envolvendo bilhões de bilhões de pares de partícula e antipartícula. Tudo isso a temperaturas altíssimas, expressa por números com cerca de 30 zeros.

Depois de passar por um período de expansão muito rápida, o universo esfriou com mais intensidade, e o processo de criação de matéria e antimatéria ficou dificultado. A aniquilação passa a dominar completamente o cenário: a energia (luz) criada nesse momento paira até hoje no universo. Denominada radiação cósmica de fundo, ela pode ser entendida como um ‘eco’ daquele cenário inicial.

Décimos de milésimos de segundo depois do *Big Bang*, parte das partículas, os *quarks*, passa a se combinar, formando os bárions (compostos por três *quarks*, como os prótons e os nêutrons) e os mésons (um par *quark-antiquark*). Formaram-se também os antibárions, como anti-prótons e antinêutrons. Léptons e antiléptons (elétron, múon, tau, neutrino e suas respectivas antipartículas) ainda seguem se movimentando livremente (figura 1). Matéria e antimatéria continuam se aniquilando furiosamente. Átomos – e antiátomos – têm ainda dificuldade em se formar, em função do alto estado de agitação de seus componentes básicos (elétrons e *quarks*; pósitrons e *antiquarks*).

E aqui nossa história começa a ficar mais interessante. Uma pequena parte da matéria sobrevive a esse processo de aniquilação. É essa porção ínfima que hoje forma todo o universo conhecido, com bilhões de galáxias, cada uma com bilhões de estrelas, com planetas e todo o resto. Portanto, nós, humanos, temos nossa origem naquela mínima fração de matéria que sobreviveu no início do universo.

A visão esquemática da história contada até aqui pode ser vista na figura 2.

Após este preâmbulo, surgem duas perguntas:

- i) O que é a antimatéria?
- ii) O que aconteceu com a antimatéria do universo?

Sabemos a resposta para a primeira. Mas ainda não temos como responder à segunda, embora experimentos que começam agora prometam resultados que talvez nos ajudem a entender essa questão.

## ENERGIA NEGATIVA?

A descoberta da existência da antimatéria é um dos capítulos mais surpreendentes da física do século passado. Em 1928, o físico inglês Paul Dirac (1902-1984) apresentou uma teoria para o comportamento do elétron com base nas duas grandes teorias da física moderna: a mecânica quântica, que trata dos fenômenos no universo atômico e subatômico, e da relatividade restrita, que lida com fenômenos envolvendo velocidades próximas à da luz no vácuo (300 mil km/s).

A equação de Dirac – como ficou conhecida – tinha uma solução que descrevia, com precisão, o comportamento do elétron. Mas outra apontava para algo completamente inusitado: um elétron com energia negativa. E isso não fazia – e ainda não faz! – o menor sentido.

### Energia negativa?

Depois de muitas especulações, o próprio Dirac teve a coragem de afirmar que aquela solução estava indicando a existência de uma partícula com a mesma massa do elétron, mas com carga elétrica oposta. Ou seja, um elétron positivo, mais tarde denominado pósitron. Seis meses depois, ainda em 1931, o físico norte-americano Carl Anderson (1905-1991) observou o pósitron em um experimento. Era a primeira evidência da realidade da antimatéria.

Uma das principais características do elétron, além de sua pequena massa e carga elétrica, é o *spin*, que, para o propósito deste artigo, pode ser imaginado como a rotação do elétron. Embora Dirac tenha escrito a equação dele para o elétron, na verdade ela servia para todas as partículas que tivessem *spin* semelhante ao do elétron (no linguajar da física, *spin* igual a  $1/2$ ). Consequentemente, se todas as partículas com esse *spin* obedeciam à equação de Dirac, elas necessariamente tinham que ter também uma antipartícula correspondente. E assim aconteceu.

Desde a descoberta do pósitron até hoje, todas as partículas de *spin*  $1/2$  detectadas têm sua antipartícula. E não foram poucas: o próton, o nêutron, o múon, o tau (estes dois últimos, são parentes pesados do elétron), o lambda, entre dezenas de outras – inclusive os *quarks*, que obedecem a essa surpreendente consequência da equação de Dirac.

Outro resultado importante: sempre que fazemos uma colisão em um acelerador de partículas, criamos, na exata proporção, o mesmo número de partículas e de antipartículas. Essa simetria na produção de matéria e antimatéria nunca foi violada em nenhuma das centenas de experiências, com milhões de colisões produzidas, em média, nos experimentos em aceleradores de partículas. Esses resultados, aliados ao desenvolvimento das teorias sobre as três forças fundamentais que regem o mundo das partículas elementares (a força forte, a fraca e a eletromagnética), nos levou à convicção de que, no início do universo, a quantidade de partículas elementares era idêntica à de antipartículas elementares.

## E A ANTIMATÉRIA DO UNIVERSO?

Se o universo foi criado dessa maneira (ou seja, com a mesma quantidade de matéria e antimatéria), o que aconteceu, no meio do caminho, que fez com que hoje só exista matéria? Como desapareceu a antimatéria?

Essas questões seguramente são difíceis de serem respondidas pelos cientistas. Temos somente pistas de como isso aconteceu, mas nada definitivo. Algo

Figura 1.  
Quarks,  
léptons e suas  
respectivas  
antipartículas

Quarks		Antiquarks	
Up $u$	$d$ Down	$\bar{u}$	$\bar{d}$
Top $t$	$b$ Bottom	$\bar{t}$	$\bar{b}$
Strange $s$	$c$ Charm	$\bar{s}$	$\bar{c}$
Léptons		Antiléptons	
Elétron $e$	$\nu_e$ Neutrino do elétron	$e^+$	$\bar{\nu}_e$
Múon $\mu$	$\nu_\mu$ Neutrino do múon	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}_\mu$
Tau $\tau$	$\nu_\tau$ Neutrino do tau	$\bar{\tau}$	$\bar{\nu}_\tau$



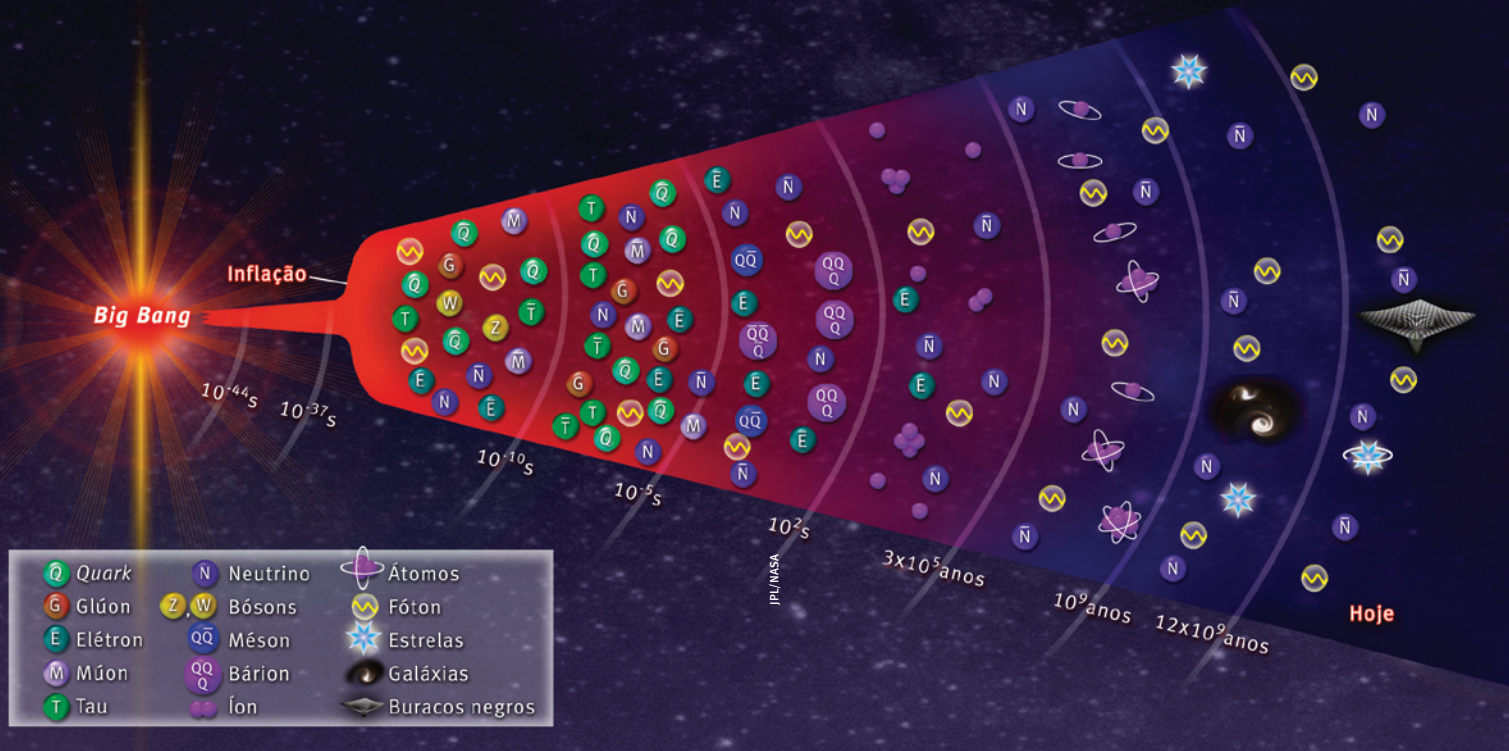


Figura 2. História do universo, da origem aos dias de hoje

realmente revolucionário terá que aparecer nas próximas experiências e no desenvolvimento das próximas teorias para dar conta desse mistério.

Na realidade, temos que fazer uma importante ressalva: no início, antes que houvesse o rápido processo de resfriamento do universo, o número de partículas de matéria e de antimatéria era imensamente superior ao existente hoje. Ou seja, nosso universo atual tem massa infinitamente inferior aquela do universo primordial. O testemunho disso é a igualmente imensa quantidade de fótons observados atualmente no espaço, produzidos, como dissemos, por meio da aniquilação entre partículas e suas antipartículas.

Depois da criação desses fótons, o universo continuou se expandindo, o que perdura até hoje. Por um lado, essa expansão foi reduzindo a temperatura do universo; por outro, fez com que esses fótons ficassem igualmente distribuídos no espaço e dotados de energias muito parecidas. Essas consequências do modelo de criação do universo se confirmaram experimentalmente de forma espetacular: observou-se que a radiação cósmica de fundo tem energia praticamente homogênea que, traduzida em temperatura, corresponde a uma variação extremamente pequena, entre 2,7248 kelvin e 2,7252 kelvin (zero kelvin corresponde a 273 graus celsius negativos).

Experimentos de grande precisão estimaram também que, para cada partícula de matéria no universo de hoje (ou seja, para cada próton, nêutron ou elétron existentes), temos o impressionante

valor de 20 bilhões de fótons. É justamente essa razão que nos permite pensar que o universo já teve uma massa imensamente maior que a atual.

## CONDIÇÕES DE SAKHAROV

Para tentar explicar essa pequena ‘sobra’ de matéria após a grande aniquilação, o físico russo Andrei Sakharov (1921-1989), prêmio Nobel da Paz de 1975, por seu papel como dissidente pacifista e defensor dos direitos humanos na antiga União Soviética, propôs duas condições necessárias para que houvesse a sobrevivência da matéria:

- i) o próton e o antipróton teriam que se desintegrar, ou seja, se transformarem em outras partículas;
- ii) essa desintegração teria que ocorrer com mais frequência para as antipartículas que para as partículas, ou seja, deve haver uma assimetria entre matéria e antimatéria.

No artigo original, Sakharov chama a atenção para o seguinte: o fato de nenhuma das duas condições terem até então sido observadas experimentalmente (o artigo foi publicado em 1967) poderia ser consequência de que elas só ocorrem em uma transição de fase – fenômeno semelhante àqueles sofridos pela água ao mudar de fase. Sabe-se hoje que o universo primordial sofreu forte transição de fase.

## VIOLAÇÃO DE CP

A observação da assimetria entre o modo como a matéria e a antimatéria decaem criou grande desconforto no mundo dos físicos de partículas, devido a um importante teorema conhecido como CPT, no qual C representa a conjugação de carga; P, a chamada conservação de paridade; e T, a reversibilidade temporal. Posto de modo simples, o C significa uma operação que transforma a partícula em sua antipartícula ou vice-versa. Exemplo: um elétron se transformando em um pósitron. A reversibilidade temporal pode ser entendida como a impossibilidade de dizer qual a ordem dos acontecimentos. Exemplo: filme uma bola de bilhar ricocheteando contra a lateral de uma mesa de bilhar e passe o filme ao contrário. Ninguém seria capaz de dizer

se o filme está ao contrário ou não. Por fim, a paridade tem a ver com a imagem dos eventos refletida em um espelho.

O teorema CPT é um tipo de Santo Graal da física, algo como a conservação de energia. No caso, essa tríade de grandezas deve, em conjunto, ser conservada. Se, por exemplo, ocorrer violação na conservação de carga e de paridade, ela deve ser 'compensada' por uma violação da reversibilidade temporal na proporção inversa. Isso fará com que C, P e T se conservem, e o teorema seja válido.

Em 1964, foram publicados resultados de um experimento com mésons K (ou kâons), que contêm um *quark* do tipo *strange*. Nessa experiência, mostrou-se haver violação de CP e, conseqüentemente, de T. Em termos práticos, a violação da reversibilidade temporal significa que o processo de desintegração dos kâons não

poderia seguir o caminho inverso, ou seja, não poderia ser reconstruído a partir dos fragmentos gerados em sua desintegração. Em resumo: o processo era irreversível.

Esses resultados com os kâons podem parecer pouco importantes em nosso dia a dia, em que estamos acostumados a processos irreversíveis (por exemplo, uma xícara que se despedaça no chão não volta à forma original). Mas, no mundo da física envolvendo poucos corpos elementares, essa era a primeira vez que isso ocorria – nem a mecânica clássica, nem o eletromagnetismo e nem mesmo a mecânica quântica tinham apresentado até então violação da reversibilidade temporal.

Essa situação causou enorme agitação no meio científico. Por quase 10 anos, centenas de trabalhos foram feitos sem sucesso para tentar entender essa singularidade no conhecimento. Em uma solução

## EM BUSCA DE RESPOSTAS

A assimetria matéria-antimatéria observada até hoje nos experimentos continua insuficiente para explicar a ausência de antimatéria no universo. Estimativas indicam que essa assimetria teria que ser pelo menos um bilhão de vezes maior. Experiências que comecem agora no acelerador LHC (figura 3), do CERN, pretendem buscar novas fontes para o estudo dessa assimetria. Para isso, há várias hipóteses a serem testadas. Uma das mais simples

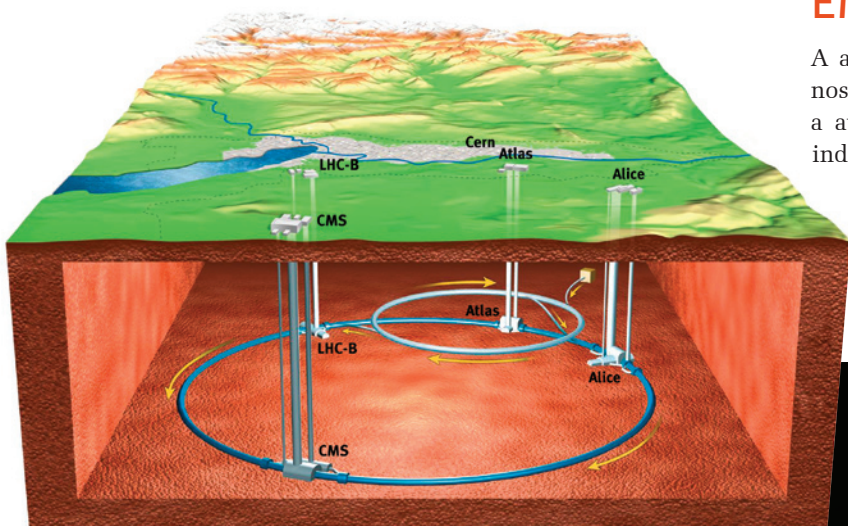
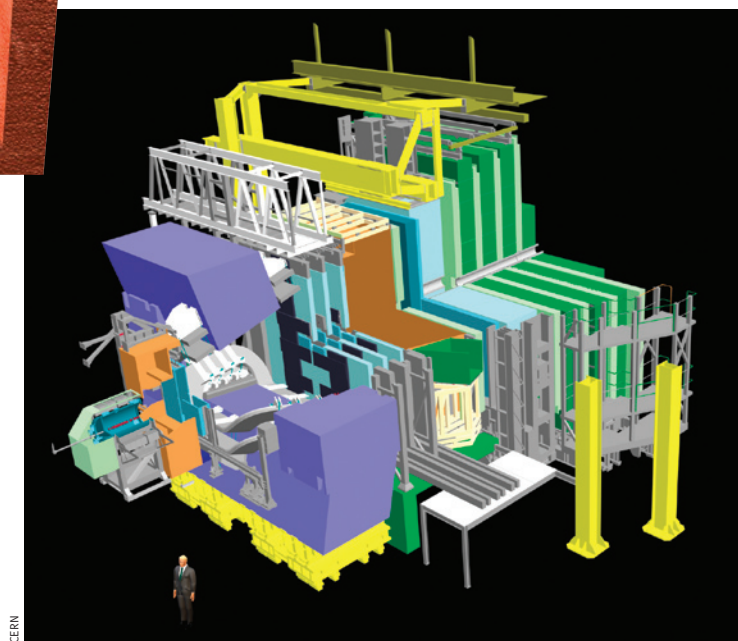


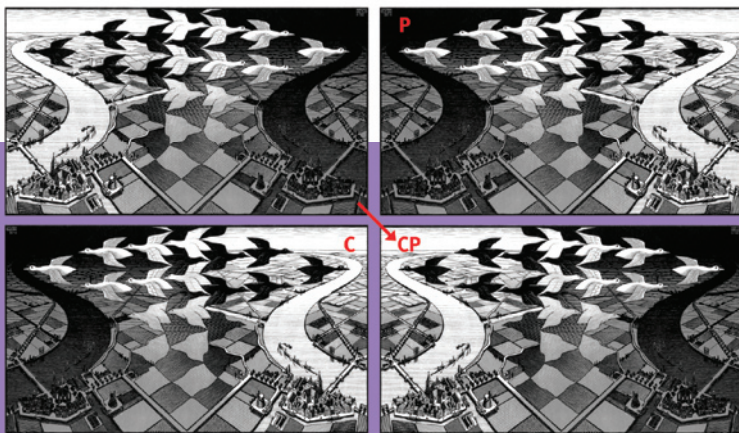
Figura 3. Visão esquemática do LHC, com os quatro detectores principais

A primeira condição, embora procurada em um grande número de experimentos, não foi detectada até este momento. Mas, naquela época, a segunda condição já havia sido observada (ainda que em pequena quantidade) em experiências feitas em aceleradores. Mas, no artigo, Sakharov não faz menção ao fato (provavelmente, devido ao isolamento científico em que vivia).

Embora necessária para explicar a assimetria matéria-antimatéria no universo, a observação dessa assimetria na desintegração da matéria e antimatéria, em 1964, foi enorme surpresa para a comunidade científica (ver 'Violação de CP').





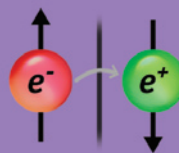


surpreendente – e um tanto ousada –, um estudante de doutorado e um pós-doutorando, ambos japoneses, respectivamente, Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa, resolveram o problema, postulando a existência de mais dois *quarks* (*top* e *bottom*), além dos quatro que, na época, se conheciam (*up*, *down*, *strange* e *charm*).

Esses dois *quarks* foram descobertos, um em 1976 (*bottom*) e o outro em 1996. Uma consequência importantíssima dessa nova teoria com seis *quarks* foi a descoberta, pelo

também físico japonês Anthony Sanda e pelo alemão Ikaros Bigi, de que a violação de CP seria muito mais intensa na desintegração das partículas contendo o recém-descoberto *quark bottom* do que naquela observada na desintegração dos méson constituídos por *quarks strange*. Essa nova previsão também foi confirmada recentemente.

Em 2008, Kobayashi e Maskawa ganharam, juntamente com o físico teórico japonês Yoichiro Nambu, o Nobel de Física. Merecidamente.



Explicação das transformações de C, P e CP, usando a xilogravura *Day and Night*, do artista gráfico holandês M. C. Escher (1898-1972). Supondo que os pássaros negros são partículas e os brancos antipartículas, vemos que, por uma transformação de paridade (P), ou seja, espelhando-se o quadro, os pássaros trocam de direção. Na transformação de conjugação de carga (C), as partículas se transformam em antipartículas e vice-versa. Ao aplicarmos uma transformação conjunta de C e P, o quadro deveria voltar ao normal. Mas podemos notar que isso não ocorre, pois, nas transformações aqui sofridas pelo quadro, houve uma pequena violação de CP. No destaque, mostramos a transformação de uma partícula em uma antipartícula por meio da aplicação da simetria de CP

especula sobre a existência de novos *quarks*, além dos seis conhecidos hoje. Se isso for confirmado, seguramente teremos mais pares partícula-antipartícula em que a assimetria matéria-antimatéria poderá surgir com maior intensidade.

Os quatro grandes experimentos do LHC – cada um deles contando com seu próprio detector – irão estudar a assimetria matéria-antimatéria. Mas um deles, o LHCb (o ‘b’ da sigla refere-se ao *quark bottom*), tem um programa quase que exclusivamente voltado para o tema (figura 4). Para isso,

serão recolhidos, por ano, bilhões de mésons que contenham o *quark bottom*, para que sejam analisadas minuciosamente todas as possíveis desintegrações dessas partículas. O primeiro objetivo é medir com precisão todos os parâmetros relativos a uma possível diferença entre a taxa de decaimento do *bottom* e do *antibottom*, para depois buscar anomalias no modo como essas partículas interagem entre si e com as outras, comparando esses resultados com aqueles obtidos para partículas formadas por outro tipo de *quark*, o *charm*.

Por que essa comparação? Os *quarks* charmosos, diferentemente do *bottom*, têm como característica principal não permitir, em quantidade significativa, a assimetria entre matéria e antimatéria com base no modelo-padrão. Portanto, o decaimento de partículas charmosas serve como um bom laboratório, pois, caso seja detectada essa assimetria em níveis expressivos, isso indicaria que há uma física não prevista pela teoria (ver ‘Além do modelo-padrão’). A experiência LHCb deverá coletar milhões de *quarks charm* em apenas um ano de tomada de dados.

Os físicos estão esperançosos em relação aos resultados do LHC, principalmente os do LHCb, na questão relativa a assimetria entre matéria e antimatéria. É provável que saia da maior e mais complexa máquina construída pelo ser humano a resposta para uma das mais intrigantes perguntas científicas de todos os tempos: Afinal, o que aconteceu com a antimatéria?

### Sugestões para leitura

QUINN, H. R.; NIR, Y. *The mystery of the missing antimatter* (Princeton: Princeton University Press, 2008).

BEDIAGA, I. ‘O colosso criador e esmagador de matéria’. *Ciência Hoje* n. 247, 2008.

BEDIAGA, I. (Ed. Cient.). ‘LHC – o gigante criador de matéria’. Série Desafios da Física. Rio de Janeiro: CBPF, 2008. Disponível em formato pdf em: <http://mesonpi.cat.cbpf.br/desafios/>

### Na internet

Aventura das partículas (em português): [www.sprace.org.br/AventuraDasParticulas/](http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticulas/)

## ALÉM DO MODELO PADRÃO

Nosso grupo no CBPF, em colaboração com pesquisadores dos institutos de física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e da Universidade Federal do Rio de Janeiro, tem trabalhado na busca de sinais experimentais da assimetria entre matéria e antimatéria em partículas que contêm tanto o *quark charm* quanto o *quark bottom*. No momento, estamos desenvolvendo novos métodos experimentais de detecção de fenômenos dessa natureza, que são usualmente chamados ‘fenômenos além do modelo padrão’. O autor deste artigo trabalha no experimento LHCb, no CERN, onde passa seu ano sabático.

Figura 4. O detector LHCb, principal responsável pelo estudo da assimetria entre matéria e antimatéria nos experimentos do LHC