

# O milho e a pérola: a descoberta do anti-elétron, a confirmação da teoria quântica do elétron e a moral da fábula

*Francisco Caruso*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Rua Dr. Xavier Sigaud 150, 22290-180, Rio de Janeiro, Brasil  
&  
Instituto de Física da Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Rua São Francisco Xavier 524, 20559-900, Rio de Janeiro, Brasil

*Um galo, escavando o chão,  
acha uma pérola, e então  
vai até a joalheria.  
“É rara, eu sei: vê que brilho!  
Mas juro que um grão de milho,  
para mim, tem maior valia!”*

— La Fontaine

## I. Introdução

É a descoberta do *anti-elétron* que nos permite entender melhor o que é o *elétron*. Foi partindo deste pressuposto que, no ano em que se comemora o centenário da descoberta experimental do elétron, optamos por escrever um artigo cujo objetivo central difere do esperado; enquanto outros artigos buscam enfatizar aspectos ontológicos do *elétron*, vamos tratar do que podemos chamar de “negativo” desta partícula elementar, ou seja, da descoberta do *anti-elétron* (termo cunhado por Dirac), e do significado de sua descoberta para a Física Moderna e Contemporânea. Essa foi a primeira anti-partícula “de laboratório”, observada por Anderson, ao estudar os raios cósmicos em 1931, e foi por ele batizada de *pósitron* — nome pelo qual é conhecida até hoje — acatando uma sugestão do Editor da revista *Science News Letter*, onde foi publicada a primeira fotografia do traço de ionização deixado pelo pósitron em uma câmara de nuvem (Veja Fig. 1).

É importante ressaltar que este não é o único exemplo na História da Ciência em que a aceitação da negativa de um conceito físico desempenha um papel epistemológico importante. Talvez o exemplo mais conhecido seja a contribuição dos atomistas gregos, no Século V a.C., que admitiram como pilares da filosofia materialista a coexistência do *átomo* (o *Ser*) e do *vazio* (o *Não-Ser*).

Neste artigo, pretendemos mostrar o quanto o descobrimento dessa “*pérola*” de grande brilho, o *pósitron*, no início da década de '30, foi decisivo para a moderna conceituação do “*milho*”, i.e., do *elétron*.

Além de sua grande valia no processo de consolidação de uma teoria capaz de descrever a interação entre fótons e elétrons — a chamada *Eletrodinâmica Quântica* —, a constatação da existência de anti-partículas exigiu que o próprio conceito de matéria fosse revisto, introduzindo o notável conceito de *anti-matéria*. Contribuiu também para abrir um novo caminho para a investigação teórica e experimental dos constituintes últimos da matéria, através do que se convencionou chamar de *Física de Partículas* e, mais tarde, *Física de Altas Energias*. De fato, a descoberta do *elétron* afastou definitivamente a idéia de que o átomo seria o constituinte último da matéria, indivisível, imutável e indestrutível, como sustentava a teoria química da matéria. Passado agora um século da sua descoberta, o *elétron* continua sendo uma *partícula elementar*, no sentido de não apresentar nenhuma estrutura, pelo menos até o limite experimental de hoje que nos permite sondar distâncias da ordem de 1.000.000.000.000.000.000 vezes menores que o metro. E em que este novo conceito de elementariedade difere do conceito clássico de *a-tomo*? Podemos continuar utilizando os mesmos critérios adotados na Química para definir o que é elementar? A resposta é não. Uma discussão detalhada desta questão estaria fora do escopo deste artigo, mas vamos nos limitar a dizer que a descoberta do *pósitron*, desencadeou um longo e profundo processo de revisão do conceito de *partícula elementar* que culminou com o entendimento de que estas partículas não são necessariamente *imutáveis* e *indestrutíveis*. Como uma das conseqüências importantes deste processo podemos citar a gênese da idéia de *quarks*, na década de sessenta. Durante este período, muito rico para a Física de Partículas, o estudo das *simetrias* das propriedades das partículas e de suas interações desempenhou um papel notável, que passou pelo reconhecimento — a exemplo do que fez Heráclito na Filosofia Grega — de que o “conflito dos opostos” é, em última análise, um tipo de harmonia, e os contínuos processos de mudança são, eles próprios, princípios fundamentais que merecem lugar de destaque nos estudos da estrutura quântica da matéria. A idéia de que para cada partícula existe uma correspondente anti-partícula (com mesma massa e um conjunto de cargas opostas) abre, de fato, a possibilidade de um grande número de novos fenômenos e conduz também a uma revisão radical do conceito de *vácuo*, como veremos mais adiante.

## II. A crise da Física Clássica: preparando o caminho

Para compreendermos a relevância da descoberta do *pósitron* é preciso inicialmente recordar, ainda que de forma bastante sucinta, os principais fatos que revolucionaram a Física nas quatro décadas que se seguiram à descoberta do *elétron*, em 1897, por J.J. Thomson.

Nesse mesmo ano de 1897, a grande unificação da Eletricidade, do Magnetismo e da Óptica feita por Maxwell na sua Teoria Eletromagnética, obteve uma espetacular confirmação experimental através da observação das ondas eletromagnéticas por Hertz. A luz passa a ser entendida como um fenômeno ondulatório e sua velocidade no éter é calculada a partir de propriedades elétricas e magnéticas deste meio.

Apesar do clima de euforia em torno da Física Clássica que caracterizou o final do século XIX, o início do século XX é marcado por uma profunda crise epistemológica. Seu marco foi a hipótese do *quantum de ação* introduzida por Planck

na tentativa de explicar a regularidade e a universalidade dos processos de emissão e absorção de energia pelos corpos negros, seguida da constatação experimental da não-existência do éter (experimento de Michelson-Morley).

O papel central que essas duas constantes fundamentais — a velocidade da luz no vácuo e a constante de Planck — viriam a desempenhar na Física Moderna ainda estava por ser compreendido.

Em 1905, Einstein publica seu famoso artigo onde, a partir da estrutura das equações de Maxwell, faz profunda crítica aos conceitos de tempo, espaço e simultaneidade. Ele abandona o conceito de éter, como meio físico material de propagação da luz, e postula que a velocidade de propagação da luz no vácuo é uma constante universal. Ainda neste mesmo ano, com base na hipótese de quantização de Planck, Einstein elabora um modelo para explicar o efeito fotoelétrico, introduzindo o conceito de *fóton*: o *quantum* da luz. Mais tarde, com a descoberta do efeito Compton, acumulam-se evidências a favor do caráter *corpúscular* da luz. Entretanto, outros experimentos, como a difração da luz, por exemplo, confirmam a teoria de Maxwell, na medida em que são explicados a partir da visão *ondulatória* da luz. Passa-se, então, a dizer que a luz apresenta uma *dualidade onda-partícula*: ora ela se manifesta como onda, ora como partícula, mas nunca dos dois modos em um único experimento. Por mais incrível que isto possa parecer, na verdade, esse termo *dualidade* esconde o início de uma profunda crise, capaz de abalar os alicerces do determinismo mecanicista a nível do microcosmo, cuja solução vai depender, crucialmente, da ampliação do domínio da crise, como proposto por Louis de Broglie, em sua Tese de Doutorado. Mas para isto vai ser necessário, antes, que Niels Bohr compreenda que a constante de Planck  $\hbar$  — que até aqui relacionava-se apenas a fenômenos de *radiação* — seria fundamental para assegurar a estabilidade do movimento dos elétrons no interior dos átomos, ou seja, para assegurar a estabilidade da *matéria*.

E o que fez de Broglie? Ele postulou a existência de uma onda associada a cada partícula livre (e ondas são descritas por campos) localizada espacialmente em torno da partícula e que seria seu piloto. Portanto, a dualidade onda-partícula deveria aplicar-se igualmente à matéria e à luz. Entretanto, havia sérios problemas. Esta onda de de Broglie, mesmo se propagando no vácuo, sofreria uma rápida dispersão, não podendo assim funcionar de fato como piloto da partícula. Outro problema é como descrever a dinâmica do microcosmo a partir das idéias de de Broglie? Em particular, como aplicá-las a partículas submetidas à ação de campos, como no caso dos “elétrons atômicos”?

A solução dessas questões foi encontrada, em 1926, por Schrödinger. Em 23 de novembro de 1925, Schrödinger deu um colóquio, a convite de Pieter Debye, sobre um assunto que há algum tempo o impressionava muito: a tese de Louis de Broglie. Ao final do colóquio, Debye lhe disse que havia aprendido com seu Mestre, Prof. Arnold Sommerfeld, que o melhor modo de tratar com ondas era dispor de uma equação de onda. Qual seria então a equação para a onda de de Broglie? — perguntou Debye. Pois bem, algumas semanas mais tarde, em outra palestra, Schrödinger deu início à sua exposição informando ao colega Debye que ele havia chegado à equação diferencial (equação de onda) fundamental para a onda de de Broglie, que hoje leva o seu nome:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\mathbf{y}(\vec{x},t)+V(\vec{x},t)\mathbf{y}(\vec{x},t)=i\hbar\frac{\mathfrak{I}\mathbf{y}(\vec{x},t)}{\mathfrak{I}t}, \quad (1)$$

onde  $\mathbf{y}(\vec{x}, t)$  denota a amplitude da onda,  $V(\vec{x}, t)$  a energia potencial da partícula,  $m$  a massa,  $\vec{x}$  o vetor posição,  $t$  o instante de tempo e  $\nabla^2$  é o chamado operador laplaciano.

Essa equação, que abriu um novo capítulo na Física Moderna, é usualmente escrita em uma forma mais geral como:

$$H\mathbf{y}(\vec{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \mathbf{y}(\vec{x}, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

onde  $H$  é o operador que corresponde à hamiltoniana do sistema que, no caso de sistemas conservativos, corresponde à energia total deste sistema.

Cabe notar que a equação de Schrödinger é uma equação *não-relativística*, pois envolve derivadas espaciais de segunda ordem, enquanto a derivada temporal é de primeira ordem. Por outro lado, Sommerfeld já havia mostrado que para explicar a estrutura fina dos espectros de raios do átomo de hidrogênio era necessário considerar correções relativísticas ao movimento do elétron orbital. Como compatibilizar, então, a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade?

### III. A Teoria de Dirac: o vácuo e a predição do anti-elétron

Essa pergunta incomodou muito a Dirac entre os anos 1926 e 28. Segundo seu próprio testemunho, ele estava tão impressionado com a beleza e a força do formalismo da Mecânica Quântica, baseado na equação de movimento de Heisenberg e a correspondente equação de Schrödinger, que acreditava que a equação relativística para descrever o elétron movendo-se em um campo deveria ser de primeira ordem na derivada temporal, como a eq. (2). Conseqüentemente, de acordo com a teoria da Relatividade, as derivadas espaciais também seriam de primeira ordem. A solução encontrada por Dirac foi a equação:

$$\left\{ i\hbar \left( \frac{\partial}{c \partial t} + \mathbf{a}_1 \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{a}_2 \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{a}_3 \frac{\partial}{\partial z} \right) + \mathbf{a}_4 mc \right\} \mathbf{y}(\vec{x}, t) = 0 \quad (3)$$

onde agora  $\mathbf{y}$  envolve quatro componentes em vez de uma só, como na eq. (2), e os coeficientes  $\mathbf{a}$  são matrizes.

No caso de partículas livres, das quatro componentes da solução  $\mathbf{y}$ , duas correspondem a partículas com energia relativística positiva,

$$E = +\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}, \quad (4)$$

e as outras duas correspondem a partículas com energia negativa, *i.e.*,

$$E = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}. \quad (5)$$

Ora, ao contrário dos estados ligados, uma partícula livre não pode ter energia negativa! Este foi o principal problema conceitual enfrentado por Dirac. Por outro lado, a Mecânica Quântica não exclui a possibilidade de haver transições entre estados de energia positiva e negativa. Dirac compreendeu que estes estados de energia negativa não poderiam ser desconsiderados, mesmo porque se isto fosse feito haveria problemas com a estrutura matemática da teoria. O próximo passo teve a ver com uma profunda revisão do conceito de vácuo, motivado, como atestam suas próprias palavras, pelo dito popular — “se você não pode vencer o inimigo, una-se a ele”:

*“Se não podemos excluir [os estados de energia negativa], devemos encontrar um método de interpretação física para eles. Pode-se chegar a uma interpretação razoável adotando uma nova concepção de vácuo. Anteriormente, as pessoas pensavam no vácuo como uma região do espaço que é completamente vazia, uma região do espaço que não contém absolutamente nada. Agora devemos adotar uma nova visão. Podemos dizer que o vácuo é a região do espaço onde temos a menor energia possível.”*

Neste modo original e revolucionário de definir o vácuo, Dirac evidencia que *espaço* e *matéria* não mais se excluem reciprocamente, como na grande escola materialista da antigüidade. O vácuo deixa de ser o espaço totalmente privo de matéria. Assim, Dirac, ao tentar conciliar a Mecânica Quântica e a Relatividade Especial — que fundamenta as simetrias entre espaço e tempo — é levado a descobrir uma profunda relação entre *matéria* e *espaço*; relação esta que decorre das simetrias matemáticas sob as quais sua equação se mantém invariante. Comentando essa tentativa de fusão entre Quântica e Relatividade, Weinberg enfatiza que dela resultou uma nova visão de mundo, onde a matéria perdeu seu papel central e são os *princípios de simetria* que assumem este papel.

Essa importante contribuição de Dirac e a quantização dos campos — a chamada *segunda quantização* — estão na base do desenvolvimento da *Eletrodinâmica Quântica* e, em geral, da *Teoria Quântica de Campos*. É no âmbito do formalismo geral desta teoria, capaz de descrever novos processos de criação e aniquilação de partículas (o que não é possível na Mecânica Quântica de Schrödinger), que se define o vácuo e se descreve a dinâmica das interações entre partículas elementares; o que, por sua vez, obriga que se reveja o próprio conceito de partícula elementar.

Inspirado na teoria da valência química, Dirac imaginou que o vácuo seria o estado com todos os níveis de energia negativa ocupados pelos elétrons — chamado de *mar de elétrons*. O vácuo teria, portanto, uma estrutura complexa (por mais paradoxal que isto possa parecer) com uma energia total negativa e infinita. Parece que *infinitos* (divergências) são uma consequência inevitável de qualquer teoria que tente satisfazer simultaneamente os requisitos da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade Especial; mas deixemos de lado esta questão e voltemos à estrutura do vácuo. O preenchimento destes estados de energia negativa dar-se-ia de modo análogo a como se preenchem as camadas fechadas dos átomos. Desta forma, de acordo com o princípio de exclusão de Pauli, um elétron de energia positiva não poderia nunca sofrer uma transição para estados de energia negativa (já todos ocupados). No entanto, um desses elétrons do vácuo poderia ser excitado, indo para um estado de

energia positiva, deixando no vácuo (“mar” de elétrons de energia negativa) o que Dirac chamou de *buraco*. Cada buraco é interpretado, de forma genial, como uma partícula de carga elétrica positiva e energia positiva. Este é o chamado processo de criação de pares de partículas e anti-partículas, que foi observado mais tarde (Veja Figs. 2 e 3). Por simetria, Dirac achou que este *buraco* deveria ter a mesma massa do *elétron*, embora com carga elétrica positiva. Entretanto, naquela época, a única partícula com carga elétrica positiva conhecida era o *próton*! Como explicar então a diferença de massa da ordem de 2000 vezes?

Foi Weyl quem primeiro acreditou na existência de outra partícula com massa igual a do elétron, pelos motivos que o próprio Dirac relata e que valem a pena serem lembrados:

*“[Weyl] disse enfaticamente que os buracos deveriam ter a mesma massa do elétron. Agora, Weyl era um matemático. Ele de modo algum era um físico. Ele se interessava pelas conseqüências matemáticas de uma idéia, calculando o que pode ser deduzido a partir das várias simetrias. E esse enfoque matemático levou diretamente à conclusão de que os buracos teriam a mesma massa que o elétron.”*

#### IV. A descoberta do pósitron

Mas, na verdade, os buracos eram muito mais do que uma possibilidade matemática. Foi necessário pouco menos de um ano para que essa estranha previsão de Dirac — de certa forma ditada pelo ideal de simplicidade e de beleza de uma teoria — tivesse uma confirmação experimental.

O *pósitron*, ou o anti-elétron, com massa idêntica e carga elétrica de mesmo valor mas de sinal oposto com relação ao elétron, foi descoberto por Anderson, que havia desviado seus interesses para as investigações de Millikan sobre os raios cósmicos. Segundo testemunho do próprio Anderson, ele conhecia a teoria de Dirac, embora não estivesse familiarizado com os seus detalhes. Ele estava tão ocupado com o funcionamento de sua câmara de nuvens que não tinha muito tempo para ler os artigos de Dirac, considerados não-ortodoxos para o pensamento científico da época. A descoberta do pósitron foi, portanto, completamente acidental, assegura-nos o próprio Anderson.

De início, Anderson detectou alguns traços curiosos, cujas trajetórias poderiam ser de partículas negativas movendo-se para cima ou de partículas positivas movendo-se para baixo. A origem desta ambigüidade é simples de entender. As partículas carregadas são desviadas pelo resultado da ação da força eletromagnética de Lorentz,

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (6)$$

onde  $q$  é a carga da partícula,  $\vec{v}$  a velocidade da partícula e  $\vec{B}$  a densidade de fluxo magnético. Portanto se fizermos simultaneamente as substituições  $q \rightarrow -q$  e  $\vec{v} \rightarrow -\vec{v}$  a força  $\vec{F}$  não se altera. Obviamente, Anderson ponderou que o sentido do movimento dos raios cósmicos deveria ser de cima para baixo. Mas como ter certeza de que aqueles eventos eram realmente assim? A solução encontrada por ele foi muito simples e engenhosa: foi colocada uma plaquinha de chumbo, de 6 mm de espessura, no diâmetro da câmara. É bem sabido que uma partícula carregada ao atravessar a matéria perde energia e, por conseguinte, perde velocidade. A fotografia abaixo (Fig. 1) mostra o traço deixado por um pósitron em uma câmara de nuvem (Cf. *Ciência Hoje*, vol. 19, No. 113, pp. 34-42) submetida a um campo magnético perpendicular ao plano da câmara. Há uma

evidente alteração na curvatura do traço. Para podermos discernir o sentido do movimento a partir desta observação vamos definir a curvatura em termos de quantidades conhecidas. Para isto basta igualar a força centrípeta à força de Lorentz,

$$\frac{mv^2}{R} = qvB \quad (7)$$

e lembrar que a curvatura é definida como o inverso do raio da curva. Obtém-se, assim, que a curvatura é inversamente proporcional à velocidade da partícula e à massa da partícula, de acordo com a fórmula:

$$\text{curvatura} = \frac{1}{R} = \left(\frac{q}{m}\right)\left(\frac{B}{v}\right) \quad (8)$$

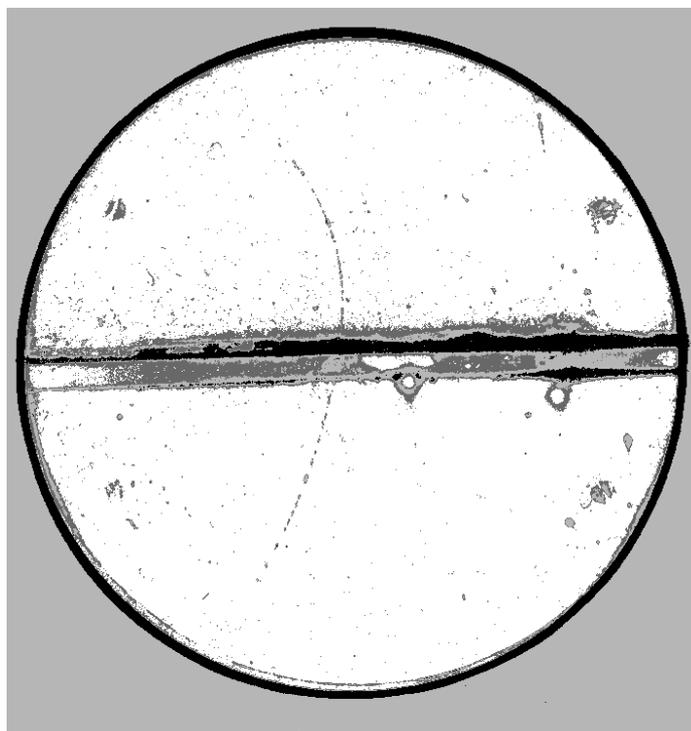


Figura 1: Fotografia (em negativo) do traço de ionização deixado por um pósitron em uma câmara de nuvem no experimento de Anderson, ao atravessar uma placa de chumbo de 6 mm. Extraída do livro de John Darius; *Beyond Vision*, Oxford Univ. Press; Oxford, 1984, que utilizou como fonte a foto do *Science Museum* de Londres.

Como é evidente que a curvatura é maior no hemisfério superior da câmara, segue-se da eq. (8) que nesta região a velocidade da partícula é menor. Pela direção do campo magnético Anderson pode concluir, então, que esta fotografia correspondia a uma partícula de carga elétrica *positiva* que penetra na câmara pelo hemisfério inferior e perde energia na placa de chumbo. Seria um próton? Impossível, por dois motivos: primeiro

porque o poder de ionização do próton seria cerca de 2 vezes maior do que aquele evidenciado na foto; segundo porque sendo a massa do próton cerca de 2000 vezes a do elétron e a curvatura inversamente proporcional à massa, o próton que tivesse energia suficiente para ultrapassar a placa de chumbo não deixaria um traço de curvatura visível na câmara de nuvem. Era assim detectada, pela primeira vez, uma anti-partícula em laboratório, que havia sido prevista pela teoria de Dirac: a primeira *partícula elementar* que não se encontra naturalmente no interior dos átomos!

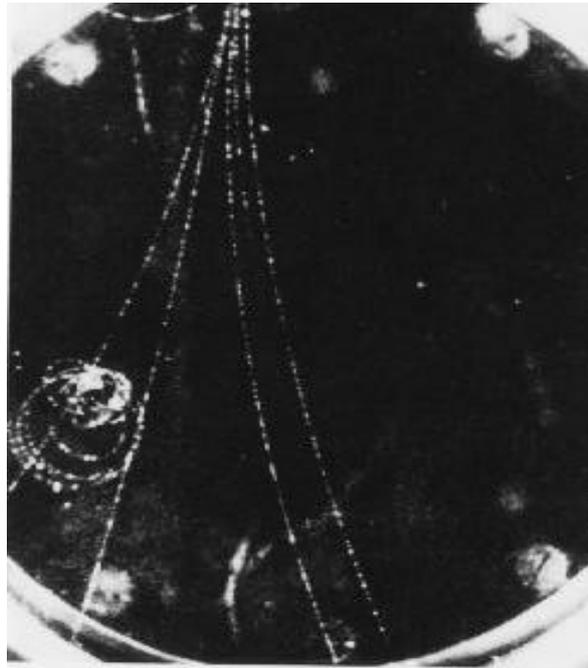


Figura 2. Fotografia feita por Anderson no topo de uma montanha no Colorado, mostrando a criação de um “chuveiro” de 3 elétrons e 3 pósitrons a partir de raios cósmicos. Extraída do livro de Frank Close, Michael Marten & Christine Sutton, *The Particle Explosion*, New York, Oxford University Press, 1987, p. 74.

A Fig. 2, também obtida por Anderson, mostra um “chuveiro” de três elétrons e três pósitrons produzidos por um raio cósmico ao interagir com a parede da própria câmara de nuvem. Nesta foto, os elétrons se curvaram para a esquerda e os pósitron para a direita. P.M.S. Blackett e G. Occhialini deram, pouco mais tarde, uma importante contribuição ao estudo e à interpretação destes “chuveiros”, que resultam da materialização de raios gama (fótons de alta energia) de origem cósmica em um par elétron-pósitron, fenômeno este que só pode ocorrer, de modo a satisfazer a conservação de momento e energia, na vizinhança de núcleos.

Cerca de um ano mais tarde, Irène Curie e Frédéric Joliot mostraram que pares elétron-pósitron também podiam ser produzidos em laboratório a partir de raios gama muito energéticos provenientes de uma fonte de polônio e berílio. Na Fig. 3, apresentamos uma fotografia “retocada” e artificialmente colorida (aos elétrons atribuiu-se a cor verde e aos pósitrons a vermelha), que mostra dois processos de criação de pares elétron-pósitron por raios gama distintos, obtida com câmara de bolhas. A diferença da curvatura dos traços dos dois pares deve-se à diferença de energia entre eles; quanto mais energético, menor a curvatura. Basta lembrar da eq. (8) e do fato que massa e energia estão ligadas pela famosa relação de Einstein  $E = mc^2$ . A energia do par da parte

superior é menor porque o gama perdeu boa parte de sua energia na colisão com um elétron atômico (a linha maior). Cabe notar que as espirais não aparecem rigorosamente simétricas devido à inclinação do plano de produção do par em relação à máquina fotográfica.

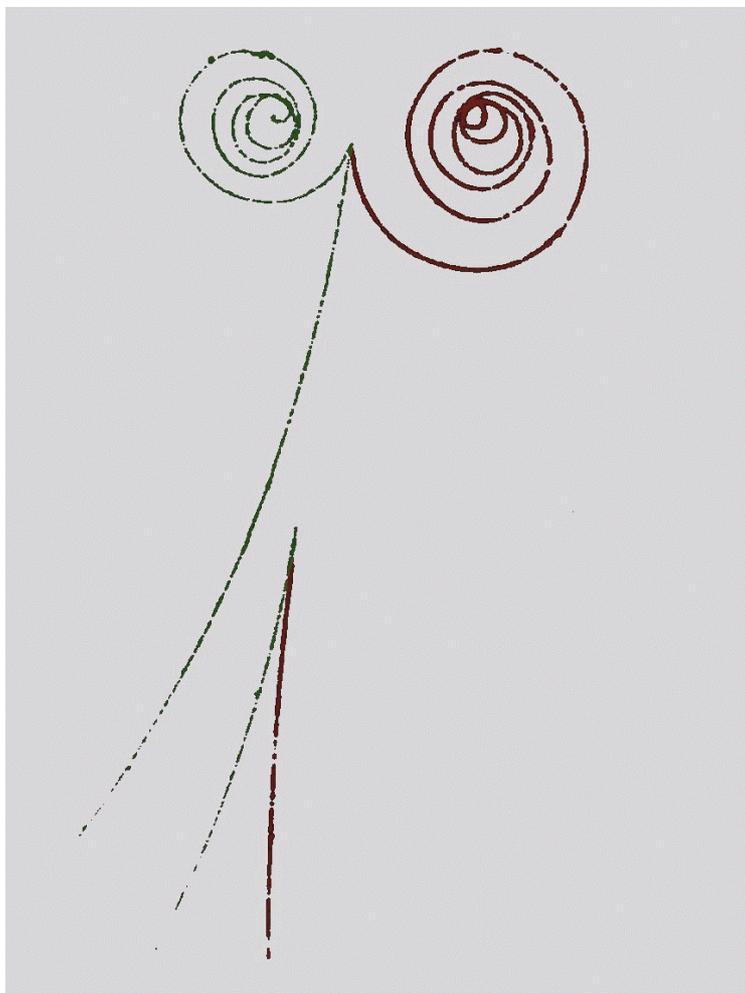


Figura 3. Fotografia indicando a criação de dois pares elétron-pósitron a partir de dois raios gama distintos. Foto tratada e colorida artificialmente, extraída do livro de Frank Close, Michael Marten & Christine Sutton, *The Particle Explosion*, New York, Oxford University Press, 1987, p. 84.

Finalmente, em julho de 1933, Irène Curie e Frédéric Joliot observaram a produção de pósitrons “desacompanhados” além dos produzidos em pares, com uma característica ainda mais marcante: a distribuição de energia destes pósitrons parecia assumir valores contínuos. Estes pósitrons são produzidos pelo chamado decaimento beta,  $p \rightarrow ne^+ \bar{\nu}$ , processo que só ocorre no interior do núcleo, em que o próton decai em um neutron mais um pósitron e um anti-neutrino. Embora eles tenham chegado bem próximos da descoberta do pósitron e do neutron, a grande contribuição do casal Joliot-Curie foi a descoberta da radioatividade artificial, pela qual receberam o prêmio Nobel. Neste

processo, o isótopo radioativo do fósforo decaía em silício mais um pósitron e um neutrino.

A compreensão do decaimento beta e da radioatividade artificial tiveram um impacto notável sobre a Física Nuclear e de Partículas, pois através dela descobriu-se um novo tipo de interação fundamental entre constituintes sub-nucleares da matéria: a *interação fraca*.

## V. A Pérola e o milho: moral da fábula

Do ponto de vista conceitual, vimos que a partir da descoberta do pósitron consolidou-se uma nova visão do que é o vácuo, visão esta que em sua essência permanece válida até hoje. O pósitron foi uma peça chave na tentativa de se construir uma teoria capaz de descrever quanticamente o elétron e sua interação com a luz: a Eletrodinâmica Quântica. Dois novos fenômenos devem ser destacados: a possibilidade de criação de pares elétron-pósitron e a existência de um “estranho átomo” (instável), eletricamente neutro, composto de um elétron e um pósitron (o *positronium*). O estudo teórico do *positronium* permitiu o teste de várias propriedades de simetria da Eletrodinâmica Quântica e mostrou-se muito útil, mais tarde, quando os físicos começaram a estudar outros estados ligados de partícula e anti-partícula como os mésons no modelo a quarks, segundo o qual cada méson é um estado quark-antiquark. Os processos de criação e aniquilação elétron-pósitron tiveram, e continuam tendo, um papel experimental muito importante no desenvolvimento da Física de Partículas. Antes de mencioná-los, gostaríamos de mencionar outra consequência importante destes processos. É a possibilidade de espalhamento da luz pela própria luz, fenômeno essencialmente quântico. Classicamente vale o princípio de que não há auto-interação da radiação eletromagnética ou, em outras palavras, vale o princípio de superposição linear para o eletromagnetismo de Maxwell. Embora esse efeito quântico, mediado pela criação e subsequente aniquilação de um par  $e^-e^+$ , seja muito pequeno, suas implicações são profundas: as equações lineares de Maxwell a nível quântico não são mais válidas e é a equação de Dirac, acoplada ao campo eletromagnético, que descreve corretamente a auto-interação da luz. Por outro lado, a descoberta do pósitron e a posterior descoberta dos múons e dos neutrinos permitiu a generalização do conceito de *carga*, que passou a denotar também novas quantidades conservadas (números quânticos) associadas a novas leis de simetria.

Outra questão conceitual muito importante que decorre diretamente da possibilidade de se criar anti-matéria — até hoje sem uma resposta definitiva — é porque existe em nosso universo esta enorme assimetria entre matéria e anti-matéria. Esta questão talvez só possa ser compreendida quando tivermos uma visão unificada das quatro interações fundamentais.

Enquanto a descoberta do pósitron abria caminho para a descoberta da *interação fraca*, a descoberta do neutrino, em 1932, abria caminho para a compreensão da *interação nuclear*, ou *interação forte*, como é conhecida hoje. Ambas são interações de curto alcance, *i.e.*, restritas a regiões espaciais ainda menores do que as do núcleo atômico. As duas, junto com as duas interações de longo alcance, a *gravitacional* e a *eletromagnética*, formam o conjunto das 4 interações fundamentais da natureza que se conhece hoje. Deixando de lado a interação gravitacional (que não deve ser relevante para a descrição das interações entre as partículas elementares), pode-se resumir o quadro teórico atual dos constituintes últimos da matéria. Existem doze partículas sem estrutura (os “a-tomos”): seis *quarks* e seis *léptons*. Os *quarks* são os constituintes dos

hádrons (partículas que sofrem interações fortes) e os *léptons* (participam das interações fracas). Claro está que quarks, hádrons e léptons carregados podem interagir eletromagneticamente. O mediador desta última interação é o *fóton*. Os mediadores das interações *forte* e *fraca* são, respectivamente, os *glúons* (em número de 8), e mais os 3 *bósons pesados Z* (neutro) e *W* (positivo e negativo). Convencionou-se chamar de “**Modelo Padrão**” o modelo atualmente aceito pela grande maioria da comunidade de físicos de partículas para a descrição das interações entre *quarks* e *léptons*. As partículas elementares deste modelo são apresentadas na Fig. 4.

		I			II			III				
		Three Generations of Matter										
Quarks	up	$u$	charm	$c$	top	$t$	photon		$\gamma$	Force Carriers		
	down	$d$	strange	$s$	bottom	$b$	gluon		$g$			
	electron neutrino	$\nu_e$	muon neutrino	$\nu_\mu$	tau neutrino	$\nu_\tau$	Z boson		$Z$			
	electron	$e$	muon	$\mu$	tau	$\tau$	W boson		$W$			

Figura 4: Tabela das Partículas Elementares de hoje segundo material divulgado pelo Fermilab, por ocasião da descoberta do *quark top*. Original gentilmente cedido pela Colaboração D0 do Fermilab.

Pois bem, vejamos agora, do ponto de vista experimental, quais destas partículas fundamentais foram descobertas a partir da interação elétron-pósitron ou a partir da interação de partícula e anti-partícula.

Começemos pelos léptons. O múon ( $\mu$ ) foi descoberto cinco anos mais tarde do que o pósitron, com a mesma técnica de estudo de raios cósmicos com câmara de nuvens e o tau ( $\tau$ ), o lépton mais pesado, foi descoberto em 1975 em um colisor no SLAC através da aniquilação de elétrons e pósitrons.

A evidência em favor do quark “*chamoso*”  $c$  vem da descoberta da partícula  $J/\psi$ , em 1974, por dois grupos independentes: um no SLAC através da aniquilação  $e^-e^+$  e outro no Brookhaven National Laboratory em colisões próton-núcleo. O último quark detectado, o quark *top*, só foi observado no início de 1995, por dois grandes experimentos no FERMILAB usando um anel de colisão próton-antipróton. Cabe notar

que um grupo de pesquisadores brasileiros do LAFEX/CBPF participou desta descoberta nos Estados Unidos.

Também os bósons intermediários, o “cimento” da matéria, foram descobertos a partir da aniquilação de partículas e anti-partículas. Os bósons W e Z foram vistos pela primeira vez no CERN, em 1983, via aniquilação de prótons e anti-prótons, enquanto a primeira evidência em favor dos glúons vem da aniquilação elétron-pósitron e data de 1979.

Constatamos, portanto, que um número expressivo das partículas elementares que constituem o *Modelo Padrão* foi observado graças à possibilidade de fazer interagir matéria e anti-matéria em grandes aceleradores. A comprovação da interpretação dada por Dirac aos “buracos” deixados no vácuo como estados de energia positiva mas de carga contrária é, em última análise, o que vem permitindo a investigação das estruturas mais íntimas da matéria em grande parte dos anéis de colisão em funcionamento hoje em dia.

Concluindo, podemos afirmar que a descoberta do *pósitron*, além de revolucionar a Física Teórica, teve conseqüências experimentais absolutamente impensáveis e inatingíveis antes que se pudesse fazer colidir, em laboratório, feixes de partículas e de anti-partículas.

Moral da história: — *Compreender a valia do brilho de uma pérola, requer toda uma sabedoria e audácia intelectual, nem sempre presentes nos galos!*

## **Agradecimentos**

É um prazer agradecer aos amigos Adolfo Malbouisson, Gilvan Alves, Nami Fux Svaiter e Sérgio Joffily pelas sugestões e a Ronald Shellard pelo estimulante convite para escrever este artigo. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

## **Bibliografia**

- Abraham Pais, *Inward Bound of matter and forces in the physical world*, New York, Oxford Press, 1988.
- Emilio Segrè, *From X-Rays to Quarks: Modern Physicists and their discoveries*, San Francisco, W.H. Freeman, 1980.
- Francisco Caruso & Alberto Santoro (eds.), *Do Átomo Grego à Física das Interações Fundamentais*, Rio de Janeiro, Aiafex, 1994.
- Francisco Caruso & Vitor Oguri, “A eterna busca do indivisível: do átomo filosófico aos quarks e léptons”, *Química Nova* **30** (3) pp. 324-334 (1997).
- Frank Close, Michael Marten & Christine Sutton, *The Particle Explosion*, New York, Oxford University Press, 1987.