

Artigos Gerais

Usando a antimatéria na medicina moderna (Using antimatter in modern medicine)

A.C.B. Machado¹, V. Pleitez¹ e M.C. Tijero²

¹*Instituto de Física Teórica, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, Brasil*

²*Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*

Recebido em 30/1/2006; Revisado em 12/4/2006; Aceito em 30/5/2006

Neste artigo, fazemos uma breve exposição de como um dos conceitos fundamentais da física moderna, a existência de antimatéria, tem aplicação na medicina, na chamada tomografia por emissão de pósitrons (PET na sigla em inglês). Ela consiste na produção de imagens tomográficas digitais do organismo que são obtidas pela detecção da radiação produzida na aniquilação do pósitron com o elétron.

Palavras-chave: PET, física médica, antimatéria.

In this paper we discuss how the existence of antimatter, one of the main concepts of modern physics, is used in modern medicine in the so-called positron emission tomography (PET). It consists of bringing about digital images of the body, which are obtained through the detection of the radiation produced in the electron-positron annihilation.

Keywords: PET, medical physics, anti-matter.

1. Introdução

É cada vez mais difícil fazer uma distinção, que seja válida em geral, entre *pesquisa básica* e *pesquisa aplicada*. A trajetória entre a obtenção de conhecimento, suas aplicações e seu melhoramento através da *inovação tecnológica* pode demorar décadas ou meses. Assim, uma relação “linear” entre a pesquisa básica e a aplicada, ou desta com a inovação tecnológica, não é mais sustentável [1]. Mas essa relação continua a ser imprevisível. Um exemplo disto é o uso das teorias da relatividade especial e geral no Sistema de Posicionamento Global (*GPS* pela sigla em Inglês) [2] que agora é usado até para guiar carros. Outro caso, talvez mais impressionante, é o das aplicações da física moderna em medicina. De fato, não é exagero dizer que, sem o conhecimento das leis que regem o mundo atômico, nuclear e das partículas elementares, obtido ao longo do século passado, não existiriam muitos dos métodos de terapia e diagnóstico usados na medicina moderna.

Isso não é uma surpresa já que a física tem tido desde muito tempo atrás aplicações nas diversas áreas da medicina. Essa estreita relação foi intensificada com o uso cada vez maior dos conhecimentos obtidos pelos físicos do Século XX. Em particular, as principais técnicas de diagnóstico e de terapias médicas estão baseadas, cada vez mais, nas descobertas da Física de

Partículas Elementares (FPE) dos últimos 80 anos.

Por outro lado, nota-se facilmente que o tratamento dado aos aspectos da física moderna em livros texto, como por exemplo o de Wolbarts [3], dada a limitação de espaço, não é suficiente. Assim, faz-se necessário usar outras fontes para compreender melhor e valorizar mais ainda, a importância que a pesquisa básica tem tido ao longo das últimas décadas na medicina. Neste artigo vamos analisar o método de diagnóstico chamado Tomografia por Emissão de Pósitrons (PET). Esta técnica é descrita brevemente mesmo em livros de nível médio [4]. Neste artigo damos uma descrição geral do método e analisamos os conceitos de física que lhe dão sustentação. Esperamos poder preencher algumas das lacunas presentes nos livros especializados de física médica.

Na Sec. 2 fazemos uma breve incursão na FPE. Na Sec. 3 abordamos as generalidades do PET, incluindo um histórico na Sec. 3.1 e os conceitos funcionais básicos na Sec. 3.2. Na Sec. 4 descrevemos as bases físicas do PET: a equação de Dirac para o elétron, a *antimatéria* e a *eletrodinâmica quântica*. As conclusões estão na última seção. O apêndice dispõe uma espécie de glossário que serve mais como guia do que como um conjunto de definições fechadas. Estão incluídas no glossário as palavras que aparecem no texto grafadas em *italico*.

¹E-mail: vicente@ift.unesp.br.

2. A física de partículas elementares

A FPE apresentou consideráveis avanços nas últimas três décadas. Mencionamos os principais. 1) Foram descobertas novas partículas, como o lépton τ , seu respectivo neutrino ν_τ , e os *quarks* da terceira geração *b* e *t*. 2) Os neutrinos, finalmente, depois de uma busca de mais de meio século, mostraram-se partículas com massa; 3) os mediadores da força fraca, os *bósons vetoriais intermediários*, W^\pm e Z^0 , foram observados e os da força forte, os *glúons*, foram, mesmo que indiretamente, detectados. Além disso foi necessário fazer medidas de precisão em laboratórios como o FERMILAB e o CERN para comparar os resultados experimentais com as previsões teóricas [5]. Tudo isso, e centenas de outros dados experimentais obtidos ao redor do mundo, colocaram o chamado *modelo padrão* das interações fundamentais numa posição privilegiada, como não se via desde a eletrodinâmica quântica, *QED* (pela sigla em Inglês). Esse modelo já é de fato, material de livros texto e didáticos.

É interessante que desde o seu início, as descobertas, principalmente as experimentais, tiveram impacto direto nas terapias e diagnósticos usados em medicina. Vale a pena lembrar o caso dos raios-X, da radioatividade e dos aceleradores [6], que desde seu início foram usados em tratamentos contra o câncer. Por exemplo, em 1929, E. O. Lawrence construiu o primeiro *ciclotron*, o que possibilitou a obtenção de centenas de *radioisótopos*. Em colaboração com seu irmão J. Lawrence, que era médico, começou a estudar as aplicações médicas e biológicas desses aparelhos [7]. Posteriormente, com versões mais sofisticadas dos ciclotrons, também foi possível na década dos anos 40 estudar a produção artificial das partículas elementares chamadas *mésons*² e a própria antimatéria foi produzida em laboratório.

Acreditamos que sempre será útil, principalmente para os professores, aprofundar os conceitos subjacentes às aplicações da física moderna em diversas áreas do conhecimento. Enfatizamos que a pesquisa básica tem tido, e possivelmente continuará a ter, aplicações que não foram planejadas. Isso ajudará na valorização dessas áreas pelas pessoas que utilizam seus derivados e aos gestores de ciência, tecnologia e inovação. Os conceitos da FPE podem ser encontrados com mais detalhes em livros como os das Refs. [8, 9, 10, 11].

3. PET: Generalidades

O desenvolvimento da metodologia do PET ocorreu a partir de 1950, quando foi feita a primeira imagem com o aparelho desenvolvido no laboratório de pesquisas físicas do hospital geral de Massachussets. A Fig. 1a mostra o primeiro dispositivo PET [12] e a Fig. 1b uma

versão moderna. Estudava-se, na época, a possibilidade do uso da radiação proveniente da aniquilação do pósitron melhorar a qualidade da imagem do cérebro. Certas substâncias são emissoras de pósitrons, e por sua vez, quando um destes é emitido imerso na matéria, ele viaja uma pequena distância e então interage com um elétron do meio. A interação de matéria com antimatéria resulta na completa aniquilação de ambas as partículas. Devido à conservação de energia e momento, suas massas são convertidas em um par de *fótons* que viajam em direções opostas. A detecção simultânea desses fótons torna possível a produção de imagens tomográficas. Portanto o desenvolvimento de um simples *scanner* de pósitrons com dois detectores de iodeto de sódio foi projetado e construído em um prazo de seis meses. Quase imediatamente após a construção, foram feitas imagens de pacientes com suspeita de tumores no cérebro. Apesar da pequena sofisticação deste aparelho as imagens obtidas foram de excelente qualidade. Devemos ressaltar também que uma das vantagens do PET é que ele fornece uma imagem do cérebro em atividade, dando detalhes da função cerebral de áreas distintas do cérebro humano e com o paciente consciente.

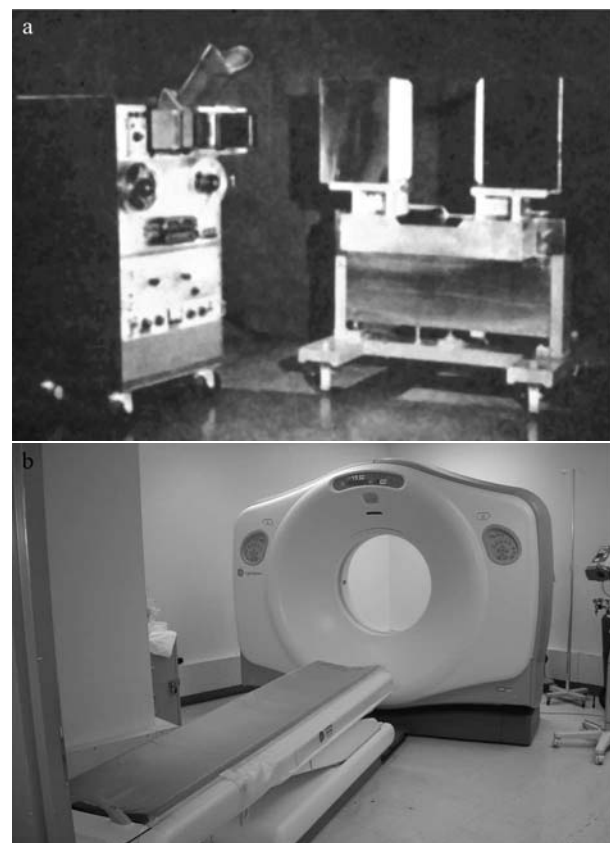


Figura 1 - (a): O primeiro dispositivo tomográfico de imagem latente PET. (b): Aparelho PET moderno, onde os scanners localizam-se na parte quadrada e a maca, com o paciente deitado, desloca-se para o interior do scanner.

²Um exemplo são os mésons π^\pm descobertos por César Lattes e colaboradores em 1948 nos raios cósmicos, o pión neutro π^0 seria descoberto depois em aceleradores.

3.1. Breve histórico sobre o desenvolvimento do PET

Quando um pósitron e um elétron se encontram aniquilam-se criando dois ou mais fótons seguindo princípios de conservação bem conhecidos como o da *conjugação da carga* e de momento angular. No entanto o processo com a probabilidade maior é aquele no qual são produzidos dois fótons que emergem simultaneamente e em direções opostas. Esse processo foi observado pelos físicos experimentais com uma precisão de $1/137$ nos anos 50 [13]. Quer dizer que se esses fótons fossem detectados em coincidência, a fonte de atividade deveria estar em algum lugar da linha reta unindo os dois detectores. F.R. Wrenn, M.L. Good e P. Handler testaram esta hipótese para a detecção de tumores cerebrais usando *cintiladores* [14], que tinham sido observados por R. Hofstadter e colaboradores, que são bons para detectar fótons [15]. Os isótopos usados por Wrenn *et. al.* foram Zn (número de massa $A = 65$) com *vida média* (τ) de 260 dias, *fração de decaimento* β^+ de 1.3% e energia de 320 keV; e também Cu ($A = 64$) com $\tau = 12,8$ h, uma fração de decaimento β^+ de 15% e energia de 660 keV [16]. Em 1952, foi desenvolvido o primeiro aparelho para imagens clínicas. O sucesso do protótipo possibilitou desenvolver um *scanner* específico para o cérebro. Entre 1968 e 1972, foi desenvolvido o primeiro programa computacional para imagem tomográfica e para imagem tomográfica computadorizada usando o PET.

Em 1968, a US Atomic Energy Commission Record of Invention reconheceu como invenção o PC-I, primeiro computador desenvolvido para gerenciar a disposição dos detectores e para posterior reconstrução das imagens. Devido aos movimentos dos detectores podem ser obtidas imagens focalizadas, tanto nos planos paralelos aos planos do detector, como em planos transversais. Porém, este aparelho não chegou a ser patenteado, pois na época vários grupos de pesquisa estavam trabalhando sobre esse mesmo tema.

Em 1974, M.E. Phelps, E.J. Hoffman e colaboradores da Universidade de Washington construíram o primeiro tomógrafo PET para estudos com humanos, o qual tinha 48 detectores de NaCl(Tl), distribuídos hexagonalmente, e foi denominado PET III. O primeiro tomógrafo PET comercial chamado ECAT II (Emission Computed Axial Tomography), agora com 96 detectores de NaCl(Tl), foi desenvolvido pela firma EG&G ORTEC em colaboração com Phelps e Hoffman. Em 1975 O.H. Nester e C.Y. Huang caracterizaram as propriedades do óxido de germanato de bismuto (BGO), material que era usado como detector dos *raios gama* de 511 keV gerados na aniquilação do pósitron.

Em 1978, T. Ido, C.N. Wang e J.S. Casella do Laboratório Nacional de Brookhaven fizeram a primeira síntese do *radiofármaco* Fluor-2-desoxi-D-glicose (FDG). Mas o método atual utilizado para a síntese

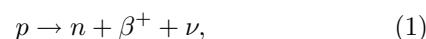
de FDG foi obtido por K. Hamacher, H.H. Cohen, e G. Stocklin em 1986. Em 1979 foi obtida a primeira imagem PET com o FDG por Phelps e colaboradores. Acontece que a molécula de FDG é similar em estrutura à glicose e pode ser utilizada para conseguir imagens de partes do cérebro que estão consumindo mais glicose do que outras (ou seja, elas são mais ativas, necessitando de mais energia, que vem da queima de glicose).

Outros avanços tecnológicos da década de oitenta muito contribuíram para a melhoria do PET. Dentre eles o mini-ciclotron para uso médico, o primeiro modelo de sínteses químicas automatizado para o FDG e outros traçadores. Podemos observar que o desenvolvimento da tomografia por emissão de pósitron ocorreu ao longo de várias décadas e teve a contribuição de diversos indivíduos. De fato, o único desafio envolvendo a detecção de radiação por aniquilação foi o uso da técnica para detectar doenças ou estudar os processos fisiológicos através das imagens produzidas por dados adquiridos pela radiação de aniquilação.

Para mais detalhes sobre a história do PET ver as referências [12, 17, 18, 19, 20, 21, 22].

3.2. Conceitos funcionais básicos do PET

Já sabemos que a tomografia por emissão de pósitrons utiliza-se basicamente do fato de que a matéria aniquila-se com a antimatéria. No caso, o corpo do paciente é constituído por matéria, ou seja por elétrons, que se aniquilam com a antimatéria emitida por um radionuclídeo emissor de pósitrons, ver a Fig. 2. Um núcleo emissor de pósitron é aquele que apresenta um excesso de prótons em relação aos nêutrons e que para alcançar a estabilidade decai segundo a seguinte equação:



onde p = próton, n = nêutron, $\beta^+ \equiv e^+$ = pósitron e ν = neutrino (mais adiante estas partículas serão definidas). O núcleo instável emissor β^+ é produzido num acelerador, por exemplo um ciclotron, e no caso específico do PET temos um feixe de prótons de alta energia, que após ser acelerado, colide contra um alvo composto de átomos de uma certa substância. Devido ao bombardeamento os átomos do alvo tornam-se isótopos instáveis e radioativos. Num Hospital, o *radiofármaco* é então injetado no paciente, que será submetido a exame com um equipamento de detecção, como aparece na Fig. 3, e posterior produção de imagens, a qual é feita por uso de modelo matemático que converte os dados adquiridos pelo detector em imagem digital.

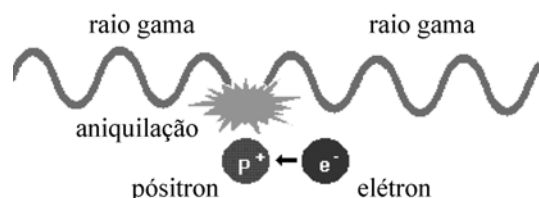


Figura 2 - Esquema ilustrativo da aniquilação do pósitron. Fonte: www.epub.org.br/cm/n01/pet/petworks_port.htm.

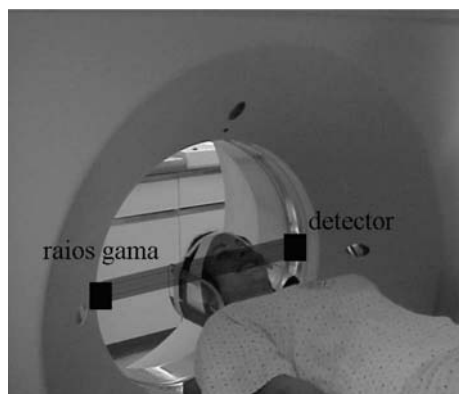


Figura 3 - esquema de detecção dos fótons. Fonte: www.epub.org.br/cm/n01/pet/petworks_port.htm.

Radiofármacos são moléculas ou uma estrutura celular, de maior afinidade com o órgão ou tecido a ser estudado, que apresentam em sua constituição um isótopo radioativo e são usados para diagnóstico e/ou tratamento de doenças. São considerados medicamentos e sua produção deve ser feita, portanto, em laboratórios farmacêuticos submetidos ao controle das autoridades sanitárias. No Brasil, o maior centro de produção de radiofármacos é o IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, localizado na Cidade Universitária em São Paulo. O IPEN é um órgão público vinculado à administração federal. Os radionuclídeos emissores de pósitron usados com maior frequência no PET estão definidos na Tabela 1 [18]. As características físicas e químicas fazem com que entre os nuclídeos dessa tabela, os "orgânicos" ^{13}N , ^{15}O e ^{18}F , sejam os mais usados. Os motivos disso são os seguintes:

1. Os átomos de C, N e O estão presentes em todas as biomoléculas e, por isso, podem ser compostos marcados idênticos aos orgânicos.
2. A química do carbono e a química orgânica em geral, estão muito bem estudadas.
3. O flúor é incorporado facilmente pelas moléculas análogas às moléculas orgânicas, assim esses compostos são incorporados pelas células com maior facilidade.
4. A resolução das imagens está relacionada com a energia do pósitron (E_{β}^+ na Tabela 1). Quanto menor é a energia, menor é a distância percorrida

pelo pósitron antes de se aniquilar com o elétron, logo, a incerteza entre o lugar de desintegração e a aniquilação é também menor.

Tabela 1 - Radionuclídeos (isótopos radioativos) emissores de pósitrons mais usados na produção de radiofármacos. Estes por sua vez, são usados tanto em radiodiagnóstico quanto em medicina nuclear. Sua vida média ($T_{1/2}$) corresponde ao tempo necessário para que uma certa quantidade de isótopo seja reduzida a sua metade, isto é, metade da quantidade de isótopos que contém o radiofármaco decaíram para um elemento estável emitindo um pósitron. A energia E_{β}^+ corresponde a energia cinética do pósitron.

Isótopo	$T_{1/2}$ (minutos)	E_{β}^+ (keV)
^{11}C	20.4	960
^{13}N	9.96	1190
^{15}O	2.05	1720
^{18}F	109.6	635
^{38}K	7.6	2680
^{73}Se	426	1320
^{75}Br	96	1720
^{76}Br	966	3900
^{62}Cu	9.7	2930
^{68}Ga	68.3	2930
^{82}Rb	1.3	3350

Os radiofármacos são ministrados ao paciente por via oral ou são injetados. Após a administração, essas substâncias migram pela corrente sanguínea e se alojam no tecido ou órgão de maior afinidade. O paciente, então, está pronto para fazer o exame no aparelho que fará as leituras das radiações que emanam dele, leituras essas que geram uma imagem que, na realidade, representa o exame propriamente dito.

Para que a emissão do pósitron seja detectada e transformada em imagem, os dois fótons (raios gama) resultantes da aniquilação do pósitron com o elétron, como esquematizado na Fig. 2, devem ser detectados simultaneamente. Os dados são transformados em coordenadas geométricas para cada evento de aniquilação e são armazenados na memória do computador. São necessários diversos pares de detectores adjacentes envolvendo todo o corpo do paciente. Isto permite a aquisição simultânea de dados, que são usados para reconstruir imagens em planos diversos.

Para a obtenção de uma imagem PET existem três etapas distintas: i) a aquisição dos dados, ii) processamento e reconstrução dos dados e, por fim, iii) a obtenção da imagem.

Portanto, o sistema básico de imagem PET consiste em um conjunto de detectores de radiação envolvendo o corpo do paciente. Quando um detector intercepta a radiação de um fóton, um sinal elétrico é produzido. Esses sinais são processados pelo computador gerando uma imagem digital reconstruída. Ver Fig. 3. A reconstrução da imagem é feita por um modelo matemático que converte os dados adquiridos em uma imagem digital. São consideradas pelo modelo as atenuações dos fótons pelo corpo do paciente, caso estas não fossem consideradas, os desvios de in-

formação poderiam distorcer a imagem [23]. Para explicar a física de partículas elementares que existe por trás deste aparelho de diagnóstico, em primeiro lugar definiremos o pósitron, como foi descoberto, suas principais características e alguns outros fatores de essencial importância. Ao avançarmos nossos estudos, esclareceremos a aniquilação do pósitron, explicando assim, como a radiação proveniente da aniquilação pode ser usada para a obtenção de imagens médicas. Recomendamos visitar os interessantes sites na rede como na Ref. [24] www.howpetworks.com.

4. Física de partículas elementares no PET

Em 1928 Paul Audrien Maurice Dirac (1902-1984) propôs a equação de onda relativística para o elétron que previa corretamente o momento magnético dessa partícula explicando também o *efeito Zeeman* [25]. Em 1930, para dar uma interpretação quanto-mecânica a sua teoria do elétron, introduziu o “mar de elétrons de energia negativa” no qual, a ausência de um desses elétrons corresponde a um “buraco” de carga elétrica positiva. No entanto, Dirac interpreta os buracos como sendo prótons, afinal era a única partícula de carga positiva na época [26]. Em 1931 prediz a existência de antielétrons e antiprótons e também a possibilidade da existência de monopolos magnéticos [27]. Em 1932 Carl David Anderson (1902-1984) descobre partículas de carga elétrica positiva com uma massa “menor” que a do próton e chama-as de “elétrons positivos” ou “pósitrons” (na época o elétron era chamado de “négatron”). É curioso que Anderson não foi motivado pela teoria de Dirac para procurar a existência do pósitron [28].

A base da previsão de Dirac era a união das duas grandes revoluções da história da física: a *mecânica quântica* e a teoria da relatividade especial. O argumento de Dirac é mais ou menos assim. Consideremos a equação quântico-relativística do elétron (fazemos simplificações para evitar uma notação completa que não é necessária aqui):

$$(O - eA)\Psi = 0, \quad (2)$$

onde O é um operador diferencial e o termo $-eA$, é a interação do campo do elétron, Ψ , com o campo do fóton, A . A intensidade desta interação está determinada pela carga elétrica do elétron, $-e$. Dirac descobriu uma nova simetria da natureza chamada *conjugação da carga*. Após uma transformação dessa simetria a Eq. (2) fica

$$(O + eA)\Psi^c = 0. \quad (3)$$

Existe uma maneira de obter Ψ^c a partir de Ψ mas o que nos interessa aqui é que Ψ^c obedece uma equação “quase igual” à Eq. (2). A diferença está em que o

termo de interação é agora $+eA$, ou seja, com o sinal da carga “e” trocado em relação ao caso do elétron.

A equação de Dirac para um elétron livre tem soluções de energia positiva e negativa, como pode ser observado na Fig. 4a. A coexistência dos dois tipos de soluções é comum em física clássica. O expediente usado nesses casos era simplesmente descartar como “não físicas” as soluções de energia negativa. Isto é possível porque em mecânica clássica as variáveis dinâmicas são contínuas, assim, não é possível fazer uma transformação contínua de uma energia cinética positiva para uma negativa, por exemplo, de $T > 0$ para $T = -mc^2$. Por que não foi feito o mesmo no caso da equação de Dirac? Acontece que logo ficou claro que, mesmo fazendo isso em colisões, por exemplo, com uma barreira de potencial, as soluções de energia negativa são produzidas de novo³. Assim, não adianta descartá-las como “não físicas”. Elas eram parte do formalismo e por isso tinham que ser interpretadas de alguma forma. O pior era que, esse tipo de soluções, se realmente fossem parte da teoria, implicariam que o átomo de hidrogênio não seria estável: nada impediria um elétron de cair para níveis de energia cada vez menores e colapsar no núcleo atômico. A maneira de evitar esse problema foi a seguinte: Dirac assumiu que **todos** os estados de energia negativa estavam ocupados. Na Fig. 4b mostramos isto de maneira simplificada. Dessa forma, e usando o *princípio de exclusão de Pauli*, os elétrons de energia positiva (acima de mc^2) não poderiam mais cair num nível de energia negativa. Porém, como consequência disso, uma radiação incidente sobre o átomo poderia arrancar um elétron de energia negativa para uma posição de energia positiva. Ver Fig. 4c. Nesse caso teríamos um elétron de energia positiva e um “buraco”, de energia negativa. Esse buraco de energia negativa pode ser interpretado como uma antipartícula, no caso um pósitron. O processo inverso pode ocorrer se um elétron de energia positiva cair num “buraco”, neste caso seria emitido um fóton (radiação) e o elétron seria aniquilado pelo buraco. Ver Fig. 4d.

Ainda que Dirac tenha usado o princípio de Pauli (que diz que: dois elétrons não podem ocupar simultaneamente o mesmo estado quântico) para a descoberta da antimatéria, posteriormente observou-se que o uso desse princípio não era necessário. Pode existir antimatéria mesmo no caso dos *bósons* que não seguem o princípio de Pauli. Um exemplo é o dos *káons* neutros, K^0 tem sua própria antipartícula, o \bar{K}^0 ⁴. O importante é que uma partícula tenha algum *número quântico* diferente de zero. No caso dos káons esse número quântico é a estranheza. Já o fóton (radiação eletromagnética) e o pión neutro π^0 , são exemplos de partículas que são elas mesmas, suas próprias antipartículas. Lembremos que os káons, o fóton e o méson π^0 são bósons (o primeiro e o terceiro tem spin zero e o segundo spin 1) e por isso não obedecem o princípio de Pauli.

³Ou seja, em mecânica quântica podem existir transformações discretas de variáveis dinâmicas [29].

⁴Usualmente denotam-se as antipartículas com uma barra sobre o símbolo da respectiva partícula.

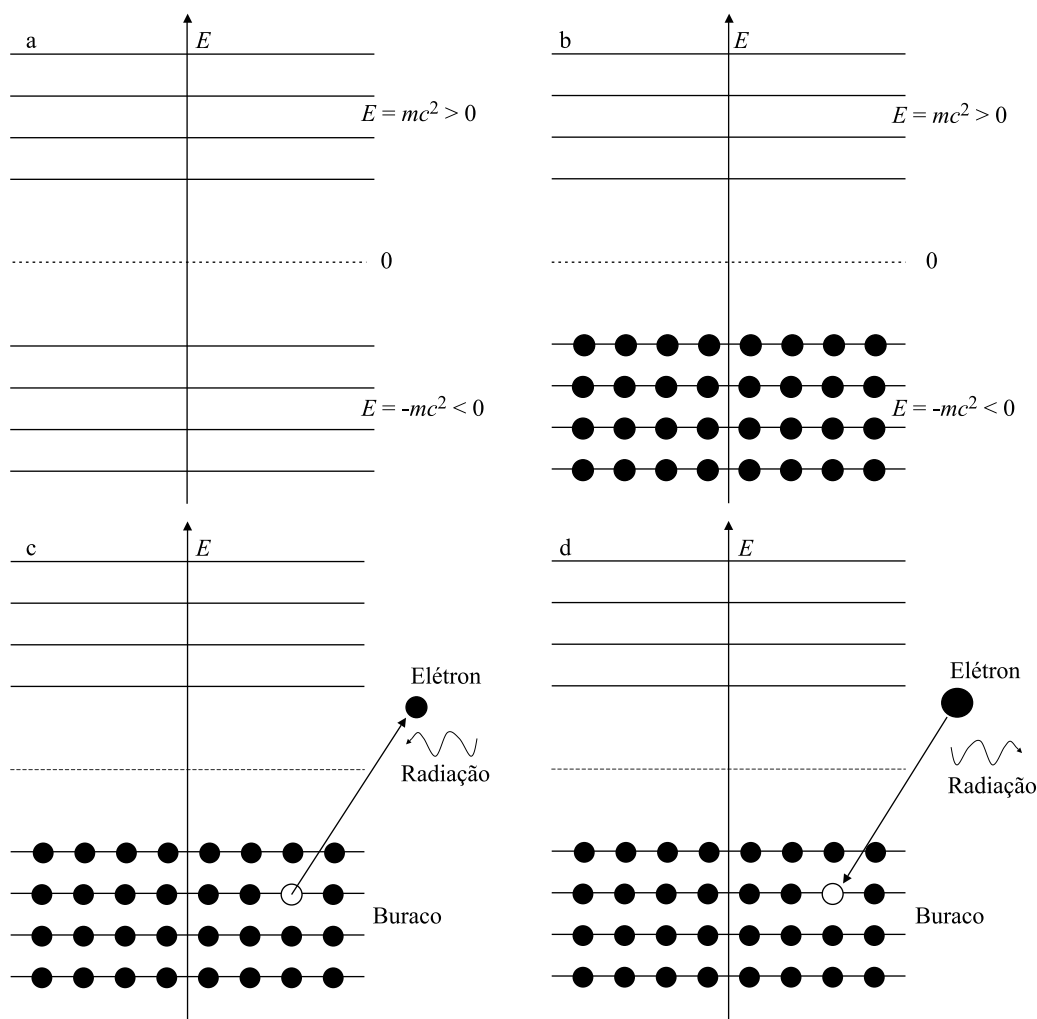


Figura 4 - Estrutura de níveis de energia positiva ($>mc^2$) e negativa ($<mc^2$). (b) Os estados de energia negativa estão todos ocupados. (c) Um desses estados pode ser arrancado por um fóton num campo externo pode criar um par de partícula-antipartícula. (d) Aniquilação de pares produz radiação, na maioria dos casos um par de fótons. Na verdade os níveis são contínuos mas apresentam-se discretos apenas por simplicidade.

Posteriormente, com a construção dos *aceleradores*, foi possível criar em laboratório outros tipos de antimatéria, como *antiprótons* e *antinêutrons*. Atualmente sabe-se que a maioria das partículas têm as correspondentes antipartículas e algumas, como os exemplos do fóton e do pión neutro, são suas próprias antipartículas. Esse esquema conceitual resultou não ser apenas acadêmico. Hoje a antimatéria, por exemplo no caso dos pósitrons, é usada rotineiramente em várias frentes tecnológicas. De fato, nos dias de hoje já pode ser obtido nos laboratórios o antipróton e até o átomo de antihidrogênio, que permitirá muitas aplicações num futuro não muito longínquo [30, 31, 32].

Dirac ganhou o Nobel de Física em 1933 pela descoberta da teoria quântica relativística do elétron que, como vimos, implicava na existência de partículas virtuais e da antimatéria, como o pósitron. Não é nenhuma surpresa que Dirac concluisse que a antipartícula

do elétron fosse o próton. Afinal, era a única partícula de carga positiva conhecida na época. Também já era sabido que o próton possui uma massa cerca de duas mil vezes maior que a do elétron, assim a antipartícula do elétron, como poderia ser o próton? Dirac, sabia disso mas pensava que, quando a dinâmica fosse melhor compreendida surgiria uma explicação natural para a massa observada do próton. A partícula em questão, gêmea do elétron, mas de carga positiva, nunca fora observada até esta data, portanto a teoria de Dirac deveria ter alguma inconsistência a menos que fosse encontrada uma maneira de gerar a diferença de massa entre o próton e o elétron, e foi deixada de lado. Tudo mudou em 1932 quando a descoberta de Anderson confirma a conjectura de Dirac. A confirmação de sua observação foi feita por Blackett e por Occhialini logo em seguida. Stueckelberg e, muito depois Feynman, deram uma interpretação mais simples aos esta-

dos de energia negativa, a qual dizia simplesmente que as soluções de energia negativa representavam o estado de energia positiva das partículas de antimatéria. Posteriormente, o formalismo chamado de “teoria quântica de campos” deixaria claro que, como dissemos acima, para todo tipo de partícula (seja férmion ou bóson) existe uma antipartícula, com todas as características da partícula, porém com a carga oposta. Esta carga não é necessariamente a carga elétrica, pode ser, por exemplo, a “estranheza”, ou outro número quântico aditivo. Mesmo que, na moderna teoria quântica de campos, não seja necessário usar o princípio de Pauli para justificar a existência da antimatéria e também não seja preciso trabalhar com energias negativas, a abordagem de Dirac ainda é útil na descrição de alguns fenômenos de matéria condensada. Devemos observar que a gravidade age sobre a matéria e sobre a antimatéria do mesmo modo, pois as interações gravitacionais dependem da massa e energia das partículas e não de suas cargas.

Os léptons carregados, como o elétron e o pósitron sentem, além da interação eletromagnética, também a interação fraca. Essas duas interações estão agora unificadas no chamado *modelo padrão eletrofraco*, conhecido comumente como “modelo de Weinberg-Salam” ou “modelo de Weinberg-Salam-Glashow”, ainda que na verdade, na sua versão definitiva de três gerações (ver resumo em [33]) houve mais de uma dúzia de físicos teóricos que contribuíram, isso sem mencionar o grande número de físicos experimentais que ajudaram a confirmar o modelo. Assim, ao falarmos de fenômenos envolvendo o elétron e o pósitron não podemos nos restringir à interação com o fóton. É preciso incluir a interação com o Z^0 . Isso é confirmado não apenas nos aceleradores como o LEP no CERN ou o Tevatron no Fermilab, mas também em experimentos realizados usando a velha espectroscopia atômica, mas com técnicas modernas, onde já foi observada a violação da paridade devido ao Z^0 .

Segundo o Modelo Padrão, sabemos que o elétron é um lépton da primeira geração e seus números quânticos estão descritos na Tabela 2; seguindo a definição de antipartícula, o pósitron possui os mesmos números quânticos do elétron, porém com os sinais dos números quânticos aditivos opostos. É isso o que faz com que a matéria se aniquile com a antimatéria, por exemplo no processo de aniquilação de pares, do tipo mencionado acima, temos

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma, \quad (4)$$

ou seja, um elétron e um pósitron se aniquilam produzindo dois fótons com comprimento de onda na faixa dos raios gama. Justamente esta é a reação que é a base do PET. O fato importante é que quando um pósitron colide com um elétron como na Eq. (4), são gerados dois fótons com energia de 0,511 MeV, que corresponde à massa, tanto do pósitron, quanto do elétron

em repouso. Esta interação conserva a quantidade de momento e de energia, assim conseguimos saber com suficiente precisão a localização da reação. Portanto, a aniquilação do pósitron emitido pela substância radioativa com um elétron do corpo do paciente, pode ser usada para a obtenção de dados geométricos e com isto podemos construir uma imagem.

Tabela 2 - Características do elétron e do pósitron: Carga (Q) e número leptônico do elétron (L_e). Os outros, o número do muon (L_μ) e o número do tau (L_τ) são nulos para estas partículas.

Partícula	Q	L_e
e^-	-1	+1
e^+	+1	-1

A mesma interação que produz a aniquilação produz também o chamado *efeito Compton*:

$$e^- + \gamma \rightarrow \gamma + e^-, \quad (5)$$

que nada mais é que a interação de um elétron com um fóton. Em eletrodinâmica clássica esse efeito é chamado de *efeito Thomson*. Observe-se que o efeito Compton, corresponde à inversão das posições do elétron resultante com o fóton incidente na Eq. (4).

A aniquilação do pósitron com o elétron é apenas um exemplo das quatro possíveis interações entre partículas elementares. Faremos agora um pequeno resumo do que consiste o chamado modelo padrão. Nesse modelo são consideradas as interações eletromagnética, fraca e a interação forte e inclui também três tipos de partículas fundamentais: léptons (6), quarks (6), e mediadores das interações (12). Os seis léptons são classificados de acordo com suas cargas (Q), número leptônico do elétron (L_e), número do múon (L_μ) e o número do tau (L_τ). Os léptons estão naturalmente distribuídos em três famílias (ou gerações), como pode ser observado na Tabela 3. Existem também seis antiléptons, os quais têm todos os números quânticos aditivos com o sinal oposto àqueles dos respectivos léptons. O pósitron, por exemplo, carrega a carga +1 e o número leptônico do elétron -1. Similarmente, existem seis “sabores” de quarks, os quais são classificados de acordo com a carga (Q), estranheza (s), charme (c), beleza (b) e top (t). Os quarks também estão distribuídos em três gerações, novamente trocando todos os sinais da tabela obtemos os antiquarks. Cada quark e antiquark está dividido em três cores (no caso dos quarks) e três anticores (no caso dos antiquarks). Finalmente, cada interação possui um mediador. O fóton é o mediador das forças eletromagnéticas, os dois W 's e um Z para a força fraca, o mediador das forças fortes são os glúons e no modelo padrão existem oito deles. Os glúons carregam carga de cor e esta não existe isoladamente (*confinamento*), mas podem ser detectados indiretamente estudando processos hadrônicos. Em princípio, também poderiam existir combinações de glúons chamados *glueballs*, mas ainda não foram descobertas. As evidências indiretas da existência dos glúons, vêm dos experimentos de colisões

inelásticas de prótons, que originam um jato de estruturas características do espalhamento do próton de altas energias, que pode ser explicado em termos da desintegração de quarks e glúons em vóo.

Tabela 3 - As três gerações de léptons do modelo padrão. Temos, da esquerda para a direita, a geração do elétron, a do múon, e a do tau. Cada um dos dubletos (pares), que aparecem em cada coluna envolvem, apenas as componentes de spin de mão esquerda. As componentes de mão direita, que não são mostradas aqui, são singletos. Ainda não se sabe se os neutrinos de mão direita existem.

e^-	μ^-	τ^-
ν_e	ν_μ	ν_τ

5. Conclusões

Como vimos ao longo do presente trabalho, existe uma linha tênue entre a pesquisa básica e a inovação tecnológica. Em particular, a física de partículas elementares tem uma série de aplicações das quais colocamos aqui *uma* delas: a aplicação da antimatéria na medicina moderna.

O desenvolvimento do PET, técnica de diagnóstico por imagem de extrema importância na medicina, teve início 22 anos depois dos estudos iniciais sobre antimatéria por Dirac. No entanto, é fato que, sem o conhecimento prévio sobre as interações entre matéria e antimatéria, não seria possível idealizar um *scanner* para a radiação produzida na aniquilação de partículas elementares que por sua vez, gera uma imagem funcional dos órgãos. Por outro lado, grande parte da pesquisa em física nuclear como o estudo de reações nucleares, determinação de vidas médias, estudo das propriedades e síntese de isótopos radioativos, etc, tiveram como objetivo estudar a física do núcleo atômico. Portanto, não podemos dizer que a física nuclear e de partículas são áreas de interesse puramente acadêmico, mesmo que suas aplicações demorassem para serem desenvolvidas.

Por outro lado, a radiação eletromagnética, que foi uma das primeiras aplicações da física na medicina através dos raios-X, ainda é muito utilizada no tratamento do câncer [34, 35, 36], e mesmo os núcleons (próton e nêutron) são usados em terapias contra essa doença [37]. Existem muitas outras aplicações da FPE também em áreas diferentes da medicina, e da tecnologia, por exemplo a dos nêutrons ultrafrios em ciências dos materiais, etc.

Uma das grandes dificuldades no ensino e aprendizagem da Física é a ausência de possíveis aplicações de seus conceitos teóricos. O exemplo descrito neste artigo pode ser um incentivo ao aprendizado desses conceitos para o público em geral e, especificamente, para que alunos de ensino médio e graduação compreendam as possíveis aplicações da pesquisa básica em física. É interessante, portanto, que o professor tenha conhecimento desses dados e que eles sejam levados para a sala de aula, a fim de serem discutidos com os alunos, mos-

trando a importância da física básica para o desenvolvimento de novas tecnologias. Numa época onde os constituintes do núcleo atômico, os prótons e os nêutrons, são cada vez mais ubíquos nos hospitais modernos e também na indústria, reforça a proposta de que a física de partículas deveria ser ensinada já na escola básica e uma maneira de como fazê-lo já existe na literatura em português [33].

Apêndice: Glossário

Antipartículas (antimatéria): Cada partícula de matéria tem sua respectiva antipartícula (antimatéria) que tem todas as cargas de sinal oposto à da respectiva partícula. Algumas partículas, como por exemplo o fóton, são suas próprias antipartículas.

Bósons: partículas de spin inteiro $0, 1, 2, \dots$ em unidades de $\hbar = h/2\pi$, onde h é a constante de Planck. Não obedecem o princípio de exclusão de Pauli.

Bósons vetoriais intermediários W^\pm, Z^0 : Mediadores da força fraca.

Ciclotron: Aparelho onde as partículas carregadas são desviadas por um forte campo magnético, com isso passam sucessivas vezes por campos elétricos e portanto são aceleradas, ou seja, o campo magnético faz com que a partícula passe repetidas vezes pelo campo elétrico e a cada passagem a partícula é mais acelerada.

Cor: É a carga fonte das interações fortes dos quarks e vem em três variedades. As antipartículas levam anticor. Os hádrons são neutros. A teoria que descreve essas interações é a Cromodinâmica Quântica ou QCD, pela sigla em Inglês.

Cintiladores: São detectores construídos a partir de materiais que emitem luz visível quando irradiados, estes materiais podem ser sólidos, líquidos ou gasosos.

Confinamento da cor: Hipótese que diz respeito à não observabilidade da cor dos quarks e glúons em liberdade.

Conjugação de carga: Transformação matemática que permite passar a matéria para antimatéria e vice-versa.

Cromodinâmica Quântica: Teoria dinâmica dos graus de liberdade da cor.

Detectores: São os elementos de um sistema de detecção, que são sensíveis à radiação ionizante. São utilizados para determinar a quantidade de radiação presente num determinado meio de interesse. Existem vários tipos de detectores, por exemplo, a gás, câmaras de ionização, entre outros.

Efeito Compton: Interação do elétron com radiação eletromagnética.

Efeito Thomson: Versão clássica do efeito Compton.

Efeito Zeeman: Separação das linhas do espectro devido à presença de um campo magnético.

Eletrodinâmica Quântica (QED): Teoria que descreve a interação eletromagnética de férmions fundamentais (quarks e léptons carregados) com a radiação eletromagnética.

Férmions: Partículas de spin semi-inteiro ($1/2, 3/2, \dots$), em unidades de \hbar , que obedecem o princípio de exclusão de Pauli e a equação de Dirac.

Glúons: Portadores da força forte entre os quarks.

Glueballs: Estados ligados de glúons, ainda não foram observados.

Fóton: Mediador da interação eletromagnética.

Fração de decaimento: Um núclídeo ou uma partícula pode ter diferentes tipos de decaimento. A fração de decaimento diz qual a importância relativa de cada modo de decaimento. A soma total deve ser, claro, 100%.

GPS: Sigla em Inglês do Sistema de Posicionamento Global, um sistema de 24 satélites que acompanham a rotação da Terra. Com ele e um pequeno aparelho, pode-se medir com exatidão de centímetros a altitude, longitude e altura de qualquer ponto da Terra. Está baseado num sistema de relógios atômicos e para ter essa precisão devem ser usadas correções tanto da relatividade especial quanto da relatividade geral.

Inovação Tecnológica: Melhoramento das aplicações práticas da ciência.

Léptons: São férmions que não sentem a interação forte (não carregam a carga de cor). Podem ser de dois tipos: carregados e neutros. Cada um vêm em três variedades. Os léptons carregados sentem as interações fracas e eletromagnéticas e são: elétron (e^-), múon (μ^-) e tau (τ^-). Os neutrinos sentem apenas as interações fracas e são: neutrino do elétron (ν_e), neutrino do múon (ν_μ) e neutrino do tau (ν_τ)⁵.

Modelo Padrão: No caso da FPE é o modelo composto por duas partes: a interação eletrofraca (modelo de Weinberg-Salam-Glashow) e a interação forte (QCD).

Número quântico aditivo: Qualquer carga carregada pelas partículas, como por exemplo a própria carga elétrica que, quando temos várias partículas, o valor da carga total é a soma de todas as cargas.

Pesquisa Básica: Pesquisa realizada sem se pensar em fins práticos.

Pesquisa Aplicada: Pesquisa realizada com o objetivo principal de uma aplicação prática.

Radiofármaco: São compostos radioativos para o uso *in vivo* no diagnóstico e terapias de doenças humanas, como o câncer, por exemplo.

Radionuclídeos: São átomos com núcleos instáveis, no nosso caso o radiofármaco é o FDG e o radionuclídeo é o Fluor-18.

Raios gama: Radiação eletromagnética de alta energia (da ordem de alguns milhões de eV, MeV).

Simetria: Propriedade que têm alguns corpos de ficar sem se modificar após um determinado tipo de transformação. Quando essa é uma propriedade das leis da física diz-se que é uma simetria da Natureza.

Vida média: É o tempo necessário para que um certo núclídeo radioativo tenha o seu número de desintegrações por unidade de tempo reduzido à metade.

Referências

- [1] D.E. Stokes, *O Quadrante de Pasteur* (Editora da UNICAMP, Campinas, 2005).
- [2] N. Asby, *Physics Today* **55**, 41 (2002).
- [3] A.B. Wolbarst, *Physics of Radiology* (Medical Physics Publishing, Madison, 1993).
- [4] R.K. Hobbie, *Intermediate Physics for Medicine and Biology* (Springer, New York, 1997).
- [5] V.V. Ezhela B. Armstrong, B. B. Filimonov, S. B. Lugovsky, B. V. Polishchuk, S. I. Striganov, Y. G. Stroganov, R. M. Barnett, D. E. Groom, P. S. Gee, T. G. Trippe, e C. G. Wohl (eds), *Particle Physics: One Hundred Years of Discoveries* (American Institute of Physics, Woudbury, 1996).
- [6] S. Kullander, *Accelerators and Nobel Laureates*, <http://nobelprize.org/physics/articles/kullander/index.html>.
- [7] Ver <http://www.nobel.se/physics/laureates/1939/lawrence-bio.html>.
- [8] F. Halzen e A.D. Martin, *Quarks and Leptons* (John-Wiley, New York, 1984).
- [9] D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles* (John-Wiley, New York, 1987).
- [10] I.S. Hughes, *Elementary Particles* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996), 3ª ed.
- [11] D.H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000), 4ª ed..
- [12] G.L. Brownell, *A History of Positron Imaging*, palestra apresentada no Massachusetts General Hospital, 15 de outubro de 1999.
- [13] S. De Benedetti, C.E. Cowan, W.R. Konneker e H. Promakoff, *Phys. Rev.* **77**, 205 (1950).
- [14] F.R. Wren, M.L. Good e P. Handler, *Science* **113**, 525 (1951).
- [15] R. Hofstadter, *Phys. Rev.* **75**, 796 (1949); J. McIntyre e R. Hofstadter, *Phys. Rev.* **78**, 617 (1950).
- [16] G.T. Seaborg e I. Perlman, *Rev. Mod. Phys.* **20**, 585 (1948).
- [17] P. Sprawls Jr. *Physical Principles of Medical Imaging* (Medical Physics Publishing, Madison, 1995), 2ª ed.
- [18] M. Cantero, *Radiobiologia* **3**(1), 47 (2003). Revista eletrônica, acessível em www.rayos.medicina.uma.es/rmf/radiobiologia/revista/radiobiologia.htm.
- [19] <http://web.mit.edu/nrl/>; <http://www.bnct/info/description/description.html>; http://www.sc.doe.gov/production/ober/msd_bnct.html.
- [20] R. Nutt, *Mol. Imag. Biol.* **4**, 11 (2002); *History of PET*, https://www.cpspet.com/our_company/history_o_pet.shtml.
- [21] Ver também: <http://www.triumf.ca/welcome/petscan.html>.
- [22] A.C.B. Machado, *Aplicações da Física Moderna em Medicina*, Projeto de Conclusão de Curso apresentado na Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 12/11/2004.
- [23] GATE: A Simulation toolkit for PET and ESPET, *Phys. Med. Biol.* **49**, 4543 (2005), pode ser obtida gratuitamente em <http://br.arxiv.org/abs/physics/0408109>.
- [24] Por exemplo: www.howpetworks.com e na Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography.
- [25] P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* **A117**, 610 (1928).
- [26] P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* **A126**, 360 (1930).
- [27] P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* **A133**, 60 (1931).

⁵Assume-se que todas as partículas elementares sentem a interação gravitacional.

- [28] C.D. Anderson, *Science* **76**, 238 (1932); *Phys. Rev.* **43**, 491 (1933).
- [29] P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Clarendon Press, Oxford, 1995) 4^a ed. (revisada).
- [30] G. Gabriele, A. Speck, C. H. Stony, D. LeSage, N. Guise, D. Grzonka, W. Oelert, G. Schpers, T. Sefzick, H. Pitter, J. Waltz, T. W. Hansch, D. Comeau e E. A. Hessels (ATRAP Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **93**, 073401 (2004).
- [31] Ver <http://athena.web.cern.ch/athena>; <http://hussle.harvard.edu/atrap>.
- [32] J. Eacher, *The antiproton: a subatomic actor with many roles*, disponível em <http://cerncourier.com/main/article/43/6/17>.
- [33] M.A. Moreira, *A Física na Escola* **5**(2), 10 (2004).
- [34] A.L. Boyer, M. Goitein, A.J. Lomax e E.S. Pedroni, *Physics Today* **55**, 34 (2002).
- [35] A.L. Boyer, *Physics Today* **55**, 38 (2002).
- [36] A.K. Solomon, *Physics Today* **55**, 52 (2002).
- [37] M. Goitein, *Physics Today* **55**, 45 (2002).