

# PET, decaimento nuclear e as interações radiação-matéria

## Uma análise educativa dos princípios físicos em jogo

O fato da ciência ser onipresente nas nossas vidas não deve ser nenhuma surpresa para ninguém - aliás, deriva da própria definição da ciência, não é mesmo? Então, hoje utilizaremos dessa realidade para analisar a física por detrás de um exame que você pode até já ter realizado: tomografia axial computadorizada por emissão de pósitrons, escaneamento por *Positron Emission Tomography*, ou, simplesmente, PET. Para o fazer, iremos aprender sobre antipartículas, decaimentos nucleares, efeito Compton, e mais um bom tanto de curiosidades que me pareceram pertinentes.

OBS1: Ao longo desse texto, haverá várias observações explicativas breves, tais quais essa :D Mas todas as outras vão estar compendiadas no fim do texto. Eu realmente não queria jogar elas lá para o fundo, mas achei necessário em nome do fluxo do texto. Espero que elas lhe sejam úteis apesar disso!

### 1-O princípio básico

#### O pósitron.

Me parece bastante razoável começarmos pela partícula titular desse exame, não é? Então... o que é um pósitron?

Essa pergunta, como muitas na física, é inesperadamente complexa. A princípio, ele é uma das vinte e quatro partículas fundamentais do modelo padrão (dependendo de como você quiser contar).

OBS2: *O Modelo Padrão da Física de Partículas.*

Ademais, o pósitron também é a antipartícula do elétron, o qual você deve conhecer bem. Eu gostaria de dedicar um pouco de atenção especial a esse fato, porque ele vai ser beem importante na nossa discussão. Observando partículas da natureza, nós percebemos que elas vêm aos pares, cada uma snedo a antipartícula da outra. Uma antipartícula apresenta várias propriedades idênticas à sua partícula correspondente, notavelmente a massa. Há, contudo, diversas propriedades “invertidas”. Para nós, a

mais relevante dessas é a carga. Assim, enquanto elétrons são negativos, pósitrons são - como o nome sugere - positivas, sendo que ambas essas cargas têm mesmo módulo.

Obs3: Eu menti para você, didaticamente.

Eu mobilizo esse contexto por causa de uma interação de imensa importância, exclusiva a um par partícula-antipartícula. Ela é tão importante que ganhou seu próprio tópico, que começa agora:

## A Aniquilação.

Agora sim o gancho: aniquilação. Quando uma partícula e sua respectiva antipartícula se encontram, ambas *deixam de existir*. Mas... hã? E a conservação de energia? E a de massa?? Que raios!?! Calma, meu leitor curioso e precipitado; vamos por partes.

Eu suponho que conheça a célebre  $E=mc^2$ , sim? Mas, o que exatamente ela significa? Bom... é complicado (como há de ser), mas a essência dessa fórmula é algo extremamente mágico e relativístico: ela relaciona massa e energia. Especialistas discutem entre si qual a melhor forma de precisamente interpretar tal relação; talvez seja um caso de “conversão entre massa e energia”, talvez “massa e energia sejam faces da mesma coisa”. O que importa é que são intimamente relacionadas.

Obs4:  $E=mc^2$  não é a fórmula completa.

Tomando um exemplo famoso, prótons têm massa observada de, aproximadamente,  $1672,2 \cdot 10^{-30} \text{kg}$ . Esse valor é extremamente bizarro se você olhar a constituição dele. Um próton é formado por dois quarks up, a massa de cada qual é  $3,7 \cdot 10^{-30} \text{kg}$ , e por um down, cuja massa é  $8,9 \cdot 10^{-30} \text{kg}$  (não se preocupe caso não seja familiar com essas partículas, o importante são as suas massas). Se fôssemos simplesmente somar as massas desses três quarks, teríamos:

$3,7 \cdot 10^{-30} + 3,7 \cdot 10^{-30} + 8,9 \cdot 10^{-30} = 16,3 \cdot 10^{-30} \text{kg}$ ... o que é bastante diferente de  $1672,2 \cdot 10^{-30} \text{kg}$ . Então, o que há? Nesse caso, temos energia sendo medida como massa: os quarks no interior do próton estão com um grau absurdo de agitação por causa da natureza da força que os une. Essa energia cinética que é responsável por 99% da massa do próton, sendo que temos “energia convencional” sendo medida como massa, obedecendo  $E=mc^2$ . Mucho loco.

Aliás, falando em mucho loco, eu devo lhe contar um segredo antes de continuar: físicos são preguiçosos. E essa preguiça leva diretamente a várias unidades de medida *bizarras*. No nosso contexto específico, vale salientar que eles pegaram a mania de medir massa com unidades de energia, devido à relação linear entre as duas no repouso. Assim sendo, como um quark com massa de  $3,7 \cdot 10^{-30} \text{kg}$  tem 2 MeV de energia, dizemos simplesmente que ele tem “massa” de 2 MeV.

Obs5: O eV.

Agora, sabendo disso, nós podemos olhar para os princípios de conservação sob uma ótica renovada. A forma como você aplicava conservação de massa e de energia como duas coisas isoladas só funciona em casos bem específicos: quando as energias são ínfimas em relação à massa, e quando a massa é “bem-comportada” (com isso, quero dizer que não há transformação de massa em energia nem vice-versa). Contudo, fora dessas circunstâncias, a conservação ainda é válida, mas agora precisaremos considerar a conservação de “energia total”, que inclui também toda energia contida na massa do sistema.

Armados dessa informação, podemos, finalmente, falar sobre a aniquilação (uhu)! Lembra quando eu te disse que ambas as partículas deixam de existir? Então, eu omiti uma informação importante: ocorre a formação de um *par de fótons*, o que é essencial para entender por que o PET é tão preciso. Então, lembra-te disso. Ah e, caso toda essa baderna de criação e destruição de partículas te incomode, saiba que é extraordinariamente comum no mundo quântico...

Obs6: A razão pela qual são dois fótons.

Dessa forma, temos o exato contrário do caso do próton, na medida em que toda energia originalmente contida na massa dos pósitron e elétron passa a estar sob “energia convencional”, nos fótons recém-criados. Então que tal a gente calcular isso, hein? Por fins práticos, vou considerar nosso par de partículas inicialmente em repouso.

$$E_{\text{inicial}} = E_{\text{final}}$$

-expandindo com um elétron, um pósitron e dois fótons, temos:

$$m_{\text{elet}} * c^2 + m_{\text{posi}} * c^2 = E_{\text{fóton}} + E_{\text{fóton}}$$

-lembra que as massas do elétron e do anti-elétron são idênticas, e saiba que ambos fótons serão idênticos entre si, por simetria:

$m * c^2 = E_{\text{fóton}}$ ; ou seja, a energia de cada fóton é idêntica à contida na massa do elétron. Então, já que a massa de um elétron é 511 keV - pode pesquisar -, essa vai ser a energia dos nossos fótons emitidos. *Guarde esse número na sua alma*, porque vai ser bem importante.

## 2-O que fazer com os fótons

### O Efeito Compton.

É bastante provável que o número que eu lhes acabo de pedir para guardar com carinho não possua significado algum para ti, meu querido leitor. Medidas de energia como um todo já são extremamente abstratas, então imagine uma que esteja numa unidade que você não conheça. Então, deixe-me tentar elucidar: apesar de medidas em keV serem pequeníssimas aos nossos padrões macroscópicos, 511 keV é uma medida de

respeito para um único fóton. Tanto que tal fóton seria classificado como um raio gama - ou seja, ainda mais energético que um raio-x. Além de uma curiosidade interessante, saber disso é essencial por causa de um fenômeno fundamental ao PET, que aliás, dá o título a essa secção.

Eu suponho que já conheceis bem o efeito fotoelétrico, não? Fótons com energias equivalentes a transições eletrônicas sendo absorvidas e reemitidas e tals e tals? Bom, quando o seu fóton é muito energético - digamos, pelo menos mais energético que um raio-x -, um tipo totalmente diferente de interação entra em vigor, o efeito Compton.

Esse regime de interação pode ser sucintamente descrito em uma palavra: colisão. Quando as energias do fóton são tão grandes a ponto da ligação elétron-núcleo ser desprezível, observamos que o que ocorre pode ser perfeitamente descrito como uma colisão clássica, que nem duas bolinhas de bilhar. Assim o fóton tem seu trajeto desviado, e perde parte da sua energia ao elétron deslocado.

Obs7: Por que o espalhamento Compton tem que ser quântico.

Eu realmente queria entrar em detalhes sobre quão fascinante é lidar com conservação de momento com partículas à velocidade da luz - dica: você consegue uma relação linear de momento com energia utilizando a versão completa de  $E=m*c^2$  -, e sobre a dependência louca entre a perda de energia e o ângulo de espalhamento. Todavia, aquilo ia fugir do alcance desse trabalho, que já está bem difuso, diga-se de passagem. Mas se isso o interesse, corra atrás, porque eu juro que é incrível.

Por hora, basta você saber duas coisas:

Primeiramente, que a intensidade do efeito Compton é proporcional à densidade eletrônica do material que o fóton percorre - a qual coincide bem com densidade normal -, o que é bastante intuitivo, quanto mais elétrons, mais provável de haver colisão

Segundamente (eu sei que essa palavra não existe, me deixa eu), que fótons que sofrem espalhamento Compton saem com energia menor que no início. Nesse caso, terão algum valor menor que 511keV.

## Oposição diamétrica.

Agora eu vou tratar da última grande cosia que nós precisamos antes de entender o como e o porquê do PET: a geometria dos fótons produzidos na aniquilação.

Obs8: O texto irmão a esse.

Mas antes de falar exatamente sobre os fótons, vou falar brevemente sobre o pósitron que os deu origem. (Eu sei que já faz um tempo que eu estou dando voltas e voltas, mas confia em mim, vai fazer sentido)

Enfim, digamos que, por algum golpe inesperado do destino, um pósitron se encontrou viajando no seu interior. O que ocorreria?

A princípio, um fenômeno que pode ser denominado de “frenagem de baixo poder”. Quando uma partícula carregada que está a altas velocidades atravessa a matéria, todas as suas interações serão brevíssimas - pense, antes que o pósitron possa realmente ser atraído por um elétron ou repellido pelo núcleo, ele já vai estar longe a ponto de qualquer interação ser desprezível. Assim, nosso pósitron atravessa uma boa região quase ininterrompido, lentamente perdendo energia em uma série de interações como as descritas.

Contudo, quanto mais lenta a partícula carregada fica, mais longas serão as suas interações. Dessarte, começa a entrar em vigor o que pode ser chamado de uma “frenagem de alto poder”. Com o pósitron agora a velocidades mais manejáveis, ele perde muita energia com cada interação e sofre desvios consideráveis, ficando, assim, exponencialmente mais lento. Isso prossegue até que ele esteja lento o suficiente para ocorrer uma aniquilação.

Mas espera aí, e a aniquilação? Eu acabei de deixar implícito que ela geralmente só ocorre quando a partícula e a antipartícula têm velocidade relativa baixa, mas por que isso? Bom, aqui nós encontramos uma falha na nossa intuição macroscópica. É fácil querer imaginar a aniquilação como uma simples colisão entre o par. Assim, pensaríamos que se uma “batesse perfeitamente” na outra, elas “se encaixariam” ou algo assim, se aniquilando. Mas, lembra que partículas quânticas não são exatamente... “algo”, estando mais próximas de nuvens de probabilidade do que qualquer outra coisa.

Tá bom... mas o que determina se ocorre aniquilação então? Na verdade, é até simples; quanto mais sobreposição tiver entre as “nuvens” do elétron e do pósitron, e quanto mais tempo esse *overlap* durar, mais provável é que a aniquilação aconteça. Por conseguinte, mesmo que o pósitron passasse perfeitamente pelo elétron, eles provavelmente não se aniquilariam se o pósitron estiver rasgando pelo espaço a velocidades enormes, porque a interação entre os dois vai ser breve demais.

Eu não sei se toda essa explicação foi completamente desnecessária, mas eu sei que eu queria que alguém tivesse *me* explicado isso antes, então estou lhe explicando por precaução. Espero que tenha feito sentido :p

ENFIM, esses últimos parágrafos existiram para explicar afundo algo bastante simples: primeiro o pósitron vai rápido, depois ele fica bem lento do nada, e só depois disso que ele sofre aniquilação. Mas está bem... o que isso tem a ver com a geometria dos fótons?

Tudo! Se lembra que a conservação da quantidade de movimento é válida até na aniquilação? Então, no início, nós temos um par de partículas basicamente paradas entre si. No fim, nós temos um par de partículas em movimento - literalmente o mais rápido possível, aliás. Qual a única forma do momento se conservar? Se os dois fótons forem em direções diametricamente opostas! O título dessa seção, baby!

Mas eu ainda prolongo isso mais um pouco, com um detalhe fofo e importante. Os fótons são produzidos de forma perfeitamente simultânea. Ademais, caso eles não sofram nenhuma interação com a matéria que os circunda, vão viajar em linha reta na velocidade da luz - ou seja, *rápido para burro*. Nessa velocidade, toda e qualquer distância dentro da sala de um hospital é plenamente desprezível, o que faz com que ambos os fótons cheguem “instantaneamente” em qualquer sensor no seu caminho, independente da distância do trajeto. Isso leva ao que chamamos de *coincidência temporal* entre as medidas de pares de fótons de aniquilação. Veremos em breve a relevância disso.

Juntando tudo.

Ok, oficialmente temos um pósitron viajando no seu corpo - depois eu vou explicar como ele foi parar lá, por hora saiba que há uma fonte de pósitrons no corpo do paciente. Ele anda um pouco, geralmente não mais do que 1,5 mm, e sofre aniquilação com algum elétron do seu corpo. São produzidos, então, dois fótons de aniquilação - cada qual a 180° do outro e ambos com quase exatamente 511keV -, que viajam através do seu corpo, podendo sofrer espalhamento Compton. Desses, em média metade passa completamente inalterada para o exterior, sendo que o resto sai com energia inferior a 511 keV.

Ótimo, agora como que a gente tira qualquer tipo de informação útil disso? Bom, medir radiação de alta energia sempre é complexo, por causa quantidade imensa de barulho de fundo que há em relação à pequena quantidade a que seres humanos podem se expor com segurança - eu te juro, é impressionante o quanto físicos nucleares e radiologistas têm que lidar com filtrar poluição de fundo. Assim sendo, percebemos por que é sempre frustrante fazer exames médicos onde produzimos e medimos fótons diluídos ao longo de um grande leque de energias. Se torna difícil diferenciar os fótons de interesse do barulho sem que a fonte seja muito intensa. Geralmente, exames radiométricos convencionais exigem que o paciente proteja suas partes mais sensíveis à radiação exatamente por causa disso - vide, as saias de chumbo que protegem suas gônadas no raio-x.

Talvez, se em vez de produzir radiação ao longo de uma faixa gorda do espectro - tal qual radiologia convencional -, a gente produzisse todos nossos fótons concentrados em uma energia muito específica? Isso ia deixar muito fácil diferenciar as medidas de fato da poluição de fundo, até usando pequenas doses, né?

Eu espero que já tenha percebido onde quero chegar. Caso não tenha, dê uma olhada no bauzinho que você tem na sua alma. Lá deve encontrar um pedacinho de papel escrito “511keV”, uma energia muito específica e fácil de diferenciar do barulho ambiente.

Assim, pondo o paciente em uma cuba de sensores - cada um dos quais é, por enquanto, deveras caro -, calibrados para verem a faixa ao redor de 511keV, um físico-médico pode analisar quantos fótons chegam em coincidência temporal, e comparar isso com quantos chegam sozinhos. Quando apenas um fóton de 511keV é medido, quer dizer que o seu irmão sofreu o efeito Compton ao longo do caminho, e quanto mais fótons solitários forem medidos, mais denso será o caminho que o fóton não-observado percorreu. Ó, te disse que a dependência pela densidade do efeito Compton era relevante.

O fato de não obtermos informações sobre o caminho do fóton não-observado *seria* um problema se não fosse pela coisa que eu passei duas páginas explicando: a oposição diamétrica. Com isso, podemos prever de forma simples e elegante o caminho do fóton irmão ao observado, e analisar a densidade de lá. Dessa forma, pondo todos nossos dados para um computador potente analisar, a gente poderá construir um mapa tridimensional, detalhado e preciso da densidade de alguma região do corpo. Como pode imaginar, isso é muuito útil para diagnosticar irregularidades normalmente invisíveis, como tumores.

Agora todo preparo que eu te dei ao longo de umas oito páginas faz sentido? (por favor responda que sim)

MAAAS, embora análise de densidade seja uma aplicação do PET, não é a mais comum. Só que, para falar da principal aplicação, eu queria divagar um último tiquinho. Não seria exatamente necessário explicar tudo que eu vou, mas eu acho legal, então vou fazer.

Obs9: Uau... 5 conectivos de negação em um único parágrafo. Elegante.

### 3-De onde vêm os pósitrons

Porque núcleos são positivos.

Eu vou entrar numa divagação meio nada a ver, mas eu sou autor desse TCC, então eu quem mando. E fora que vale a pena, eu juro que você vai entender o decaimento beta melhor que nunca.

Então, bora mandar brasa. Eu suponho que você seja familiar com o modelo atômico de nucleons (prótons e nêutrons), né? Assim sendo, você provavelmente passivamente aceitou o fato de que núcleos estáveis geralmente têm alguns nêutrons amais que prótons. A explicação que devem ter te dado para isso - se é que deram - é que o núcleo precisa da força nuclear a mais de nêutrons para compensar a repulsão dos prótons.

Isso está plenamente correto no que se trata de explicar por que não ter núcleos só feitos de prótons. Contudo, ignora plenamente o outro extremo: por que não temos núcleos só feitos de nêutrons? Realmente pense um pouquinho sobre isso, porque ativamente postular ajuda na sua compreensão.

Obs10: Menti educativamente para vocês II, o retorno.

## O decaimento beta-

Bom, realmente entender a necessidade de prótons em um núcleo requer conhecimento sobre as transformações entre nucleons, então que tal falarmos um pouco sobre isso?

Como em qualquer bom acontecimento científico, podemos dizer que tudo começa com uma observação empírica: um nêutron livre no espaço não dura muito. Depois de, em média, treze minutinhos, o nêutron decai para um próton. Em contraste, *nunca* observamos um próton livre decaindo para um nêutron, por mais que os cientistas procuraram e procuraram.

A priori, eu poderia só acabar por aqui: núcleos têm prótons porque esses são mais estáveis que nêutrons. Mas qual é cara, isso não ia ter a menor graça! Vamos, então, um pouquinho mais afundo.

O processo pelo qual um nêutron vira um próton é chamado de decaimento beta-, leia-se “beta menos”, e é um pouco mais complicado do que eu acabei de dar a entender. De forma completa, nós temos um nêutron dando origem a um próton, um elétron e um antineutrino eletrônico. Não se preocupe com esse último, quase todo mundo o ignora porque ele só interage com o mundo pela força fraca e pela gravidade, ambas as quais tendem a ser desprezíveis. Neutrinos são os esquecidos do rolê.

Ah, mas tenha atenção e não se iluda: o elétron *não* fica dentro do nêutron, esperando para sair. Ele, junto com o antineutrino, simplesmente passa a existir - de novo esse conceito bizarro - durante o processo. “Ok... e a conservação de energia?” você me pergunta, já sabendo das implicações relativísticas e massivas disso, com toda sua inteligência exuberante. Talvez você se lembre, lá no fundo do seu cérebro, que nêutrons são um tiquinho mais pesados que prótons. Esse fato é a razão pela qual o decaimento em questão é possível com um nêutron isolado: ao se transformar em um próton, o tiquinho minúsculo de diferença de massa é o suficiente para criar duas novas partículas - e ainda dar um bom tanto de energia cinética a elas - sem que o nêutron precise receber energia externa.

Ótimo, agora consigo dar uma explicação de verdade. Se você tivesse um “núcleo” feito de alguns nêutrons, eles iam começar a sofrer decaimento beta- até que prótons e nêutrons se encontrassem em uma proporção agradável. E digo mais, a razão pela qual esse ciclo de decaimento não continua é exatamente a que você conhece: ia começar a ter prótons demais em espaço de menos. Logo, a repulsão deles ia fazer com que nenhum ganho de estabilidade conquistado com o decaimento dos nêutrons valesse mais a pena. Tcharaaam :D

Mas ok, teoricamente você já tem o que precisa. Contudo, eu queria introduzir brevemente um conceito que vai facilitar a minha vida no futuro próximo: a “linha de estabilidade”. Nós acabamos de ver que um núcleo não pode ter nem nêutrons demais, nem prótons demais. Dessarte, podemos dizer que há uma linha que delimita os tipos de núcleos: de um lado, tem prótons em excesso, do outro, nêutrons. Por consequência, bem em cima da linha haverá uma zona ideal, onde a proporção é perfeita e o núcleo é estável. Ótimo? Ótimo.

## Decaimento Beta+

Agora, você, meu digníssimo e paciente leitor - aliás, muito obrigado por ter lido até aqui, está de parabéns -, deve estar perguntando a si mesmo: “como será que esse louco vai amarrar tudo de volta ao PET?”. Se for isso mesmo que se pergunta, a resposta é o título dessa seção - tudo foi calculado. Aliás, leia-se “beta mais”.

Mas, como disse Jack o Estripador, vamos por partes. O PET depende, quem diria, de pósitrons. Mas, todo e qualquer representante desse tipo de partícula quase imediatamente sofre aniquilação e deixa de existir, em função da abundância de antipósitrons que há nesse mundo. De onde tiramos o P do PET? A gente *poderia* instalar um imenso acelerador de partículas no hospital - os mais chiques do mundo até têm -, mas isso ainda é um tanto pouco prático. Então, o que fazer? Deixe-me te contar um pouco de história que talvez te dê ideias.

O nome do decaimento que já analisamos (beta-) é uma referência a um tipo de “radiação” historicamente observada ao redor de núcleos instáveis, que foi denominada de partícula beta - em contraste com as outras duas principais: alfa e gama. Como você provavelmente já deve saber, posteriormente descobriram que a partícula beta não era nada mais nem nada menos que um elétron energético, especificamente aquele um elétron que é emitido junto com o antineutrino, se lembra disso?

Até aí, suponho que não seja nada muito inovador. Mas o que pode lhe ser novidade é que, com o avanço do estudo de radiação, descobriram algo inesperado. Alguns núcleos emitiam partículas aparentemente idênticas à beta, com a ressalva de que essas novas tinham o sinal oposto - positivo. Assim, a partícula original ficou “beta-”, e essa nova partícula, assim como o decaimento que a dá origem, ficou “beta+”.

Obs11: Como diferenciar tipos diversos de radiação. É bonito, vai por mim.

Caso seja tão astuto quanto eu suponho que és, deves ter deduzido que o que estava sendo observado era o nosso querido pósitron - idêntico ao elétron, mas com carga oposta -, estrela do show de hoje. Então, esse tal de decaimento beta+ seria uma ótima fonte de pósitrons para realizarmos nossa tomografia computadorizada, não acha? Analisá-lo-emos, que tal?

Você se lembra do conceito de linha de estabilidade que eu enfiei em algum lugar? Então, nós vimos o que ocorre quando nosso núcleo está do lado “nêutrons demais” da linha: beta menos. Mas, o que acontece do outro lado do espectro? Bom, se tivermos um núcleo com prótons demais MESMO, ele pode só ser tão energético que explode. Tá, e um núcleo que só fica um pouquinho longe da linha, como um carbono-10 da vida? Aí sim, beta+!

Esse processo pode ser descrito como um próton virando um pósitron e um neutrino eletrônico. Mas... espera um pouco, eu não tinha falado que prótons não têm energia o suficiente para virarem nêutrons, muito menos nêutrons mais uns coisinho zuados fazendo companhia?? Cuidado, minhas palavras exatas foram “nunca observamos um próton livre decaindo para um nêutron”, ênfase no “livre”.

Obs12: Neutrinos e antineutrinos: a lógica das antipartículas, explicada.

O que está realmente acontecendo nesse processo fascinante é mais um caso de conversão de energia pouco-convencional. O núcleo se tornará mais estável - menos energético - se um próton virar um nêutron. Então, o próton “usa” essa energia liberada pelo núcleo para fazer uma transformação que normalmente seria proibida. Assim, o núcleo se aproxima um tanto mais da linha de estabilidade, e, para conservar as cargas, um pósitron é produzido e emitido. Nós, então, pegamos isótopos que sofrem decaimento beta+, ou injetamos ou inserimos no paciente de alguma forma - que nem contraste -, e fazemos o PET. Missão cumprida.

Obs13: A incerteza energética.

## A principal aplicação do PET.

Vai, você tem que concordar que toda essa divagação foi, ao menos um pouco, divertida, né? Mas agora, dada a volta toda, eu finalmente me sinto realmente seguro para explicar a principal aplicação do PET: mapeamento metabólico.

Isótopos que sofrem decaimento beta+ não são muito comuns, e raramente ocorrem na natureza. Assim, a maior parte da matéria-prima de exames PET precisa ser especialmente sintetizada - geralmente com pequenos aceleradores de partículas -, o que normalmente tornaria o exame inviável, ao passo que sintetizar quase sempre é muito mais caro do que extrair. TODAVIA, se lembra de todo aquele papo sobre quão eficiente o PET é? Então, isso reduz a quantidade de substância radioativa necessária a ponto de ser viável.

Assim, que tal a gente pensar um pouco no que poderíamos fazer com o PET? Já que nós mesmos que sintetizamos os radioisótopos, a gente podia aproveitar e fazer direito. Ideia: e se em vez de usarmos alguma substância inerte ao corpo, usássemos alguma com algum tropismo específico? Uma substância que acumule em certas partes do corpo a depender de algum fator que a gente quisesse estudar?

Bom, acho que já deu de enrolar. O que cientistas fazem é dar moléculas de glicose marcadas para o paciente ingerir. Tais moléculas só diferem de glicose normal em um átomo: no lugar de um dos hidrogênios há um átomo de flúor-18 - o qual tem exatamente um nêutron a menos que o único isótopo estável de flúor, o flúor-19. Essa glicose segue uma vida normal: é absorvida, entra na corrente sanguínea e serve como base da respiração celular.

Em pouco tempo, o flúor marcado começa a se acumular nos locais que mais consomem glicose. Ou seja, nos locais com maior taxa metabólica. Esse flúor, por estar um pouco do lado “protônico” da linha de estabilidade sofre decaimento beta+, e tudo que eu lhes descrevi ao longo dessa dúzia de páginas ocorre. Só que agora, quanto maior a taxa metabólica de uma região, mais fótons vão se originar de lá

Agora nós repetimos o mesmo processo que antes, só que dessa vez sem olhar a diferença entre os que vêm solitários e os que vêm aos pares, porque não é muito necessário. Agora, é só deixar o paciente uns vinte minutos numa cuba de sensores, depois dar os dados coletados a um computador - é uma tomografia *computadorizada* afinal -, e você tem um mapa tridimensional e detalhado do metabolismo de alguma região do corpo.

Se você for que nem eu, isso pode inicialmente parecer muito menos impressionante do que um mapa de densidade de tecidos. Mas pense que a região analisada poderia ser - bem como frequentemente é - o cérebro. Mais interessante, hein? Agora a gente pode ver os níveis de atividade de múltiplas partes da região encefálica quando o paciente está em diversos estados ou praticando diversas ações, o que psiquiatras e neurologistas usam direto.

Ou outra, digamos que você fez uma análise metabólica das suas vísceras, e na imagem apareceu uma bolota misteriosa consumindo muita glicose? Isso mesmo, PET pode diagnosticar, analisar e ajudar a caracterizar nossos velhos amigos, os tumores.

## Conclusão.

Fascinante, né? Eu queria dizer muito mais - você não imagina quanta coisa eu tive que cortar, e olha que ainda ficou longo, meu orientador tinha pedido um *paper* de 10 páginas. Infelizmente, contudo, isso é tudo que lhe posso ensinar por hora. Espero que tenha aprendido ao menos algo nessa análise educativa dos princípios físicos em jogo - Ó, eu terminei com o título, autor de qualidade.

Obs14, a última: Caso ache bizarro meu uso excessivo de conectivos inesperadamente formais, saiba que é culpa do vestibular. Sou atualmente aluno do ensino médio com péssimas habilidades redacionais, então aproveitei para usar isso como oportunidade de treinar um pouco.

Ah e recomendação final: veja o vídeo que está nas fontes. Confia.

Atenciosamente, João Guilherme O. Rosa

Observações:

OBS2: O *Modelo Padrão da Física de Partículas* é, atualmente, uma das melhores teorias para explicar interações entre partículas, desde o mundo macroscópico até a escala quântica. Felizmente (ou, talvez, infelizmente), não vamos precisar de conhecimentos que não sejam bastante superficiais a seu respeito. Mas sintam-se à vontade para pesquisar mais a respeito!

Obs3: Na realidade eu acabo de mentir para voscê: há várias partículas que não têm antipartículas, assim como algumas em que é... ambíguo. Isso ocorre, pois, tais partículas, como fótons ou neutrinos, não apresentam as características que normalmente seriam invertidas (como carga, sendo neutras). Assim, elas podem ou ser idênticas às suas antipartículas, ou tais antipartículas podem simplesmente não existir.

Obs4:  $E = m \cdot c^2$  só é válida para o caso específico de uma partícula em velocidades desprezíveis (em relação a  $c$ , a velocidade da luz), o que é bom o suficiente para hoje. Contudo, caso lhe interesse saber, a fórmula completa é  $E^2 = (m \cdot c^2)^2 + (p \cdot c)^2$ , onde  $p$  é a quantidade de movimento da partícula. Assim, podemos dizer que a fórmula na verdade relaciona a “energia total”, com a “energia em massa” e a “energia de movimento”.

Obs5: O eV. Ele é a sigla de “elétron-volt”, e é mais um caso de preguiça pura. Se trata de uma unidade de energia muuuito pequena -valendo lá seus  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$ -, que é definida como “a energia que uma partícula com a carga de um elétron tem, a um potencial de um volt”. A única peculiaridade dele é que é tão pequeno que quase nunca usamos seus sub-múltiplos, ficando mais com múltiplos normais, como o keV, o MeV e o GeV. Dica: caso queira impressionar um físico, pronuncie como se fosse uma palavra só, tipo “quévi” e “mévi”. Honestamente, eu queria só ter evitado o eV inteiramente por fins educativos, mas ele é TÃO COMUM que eu tive que aceitar sua existência.

Obs6: A razão pela qual são dois fótons é bastante simples na verdade: conservação da quantidade de movimento (a qual ainda é plenamente válida, mesmo que coisas sem massa possam ter quantidade de movimento. É estranho, eu sei). Independente da forma como a colisão ocorra, haverá uma perspectiva na qual ambas partículas colidem uma diretamente na outra com mesma velocidade -chamamos esse de o “referencial do centro de massa”. Nesse referencial, não é possível que um único fóton conserve a quantidade de movimento posto que 1) A quantidade de movimento inicial era zero; e 2) fótons sempre se movem a  $c$ , independente do referencial. Assim, sempre serão formados um par de fótons que conserve a quantidade de movimento.

Obs7: A gente consegue identificar que o espalhamento Compton é um fenômeno quântico porque, com o fóton perdendo energia, sua frequência diminui. Classicamente, uma onda eletromagnética ia ser difratada pelo elétron sem nenhuma mudança de frequência, apenas intensidade, porque o elétron ia “entrar em ressonância” com a onda, se tornando uma fonte secundária perfeitamente em fase. Agora, pare e pense um pouquinho sobre quão incrível isso é. Imagine como seria tentar explicar para Sir Isaac Newton ou Lord Kelvin que a radiação *colide com o elétron*. Quântica é linda.

Obs8: Caso não saiba, há um texto irmão a esse, escrito pelo Gabriel Nicolitt -meu amigo e colega carioca- que vai bem afundo nas interações entre íons e matéria, também enfatizando aplicações médicas, como o texto que presentemente lê. Eu profundamente recomendo você dar uma olhada, porque lida afundo com coisas pelas quais eu vou passar super batido agora. Não é necessário nem nada assim, mas é uma leitura curta e interessante.

Obs10: Na verdade temos: Estrelas de Nêutron. Mas eu não consigo nem chegar perto de explicar direito que raios tá acontecendo com elas, então vou elegantemente as ignorar. Caso sua curiosidade seja indomável, contudo, eu recomendo ver a página de wikipédia em inglês sobre elas, a qual é muito informativa -e sim, wikipédia é uma fonte boa para ciências e matemática, então shiu.

Obs11: a forma pela qual Rutherford e Cia. faziam a separação de tipos de radiação é muito bonita: eles as põem para atravessar um campo magnético perpendicular ao seu movimento. Partículas neutras seguem reto, negativas viram para um lado, positivas, o outro. E digo mais, pelo raio da curva, conseguem saber a razão carga/massa da partícula. Isso faz com que beta+ e beta-, por terem mesma razão massa/carga em módulo, sigam caminhos circulares perfeitamente espelhados. É muito lindo de ver, pesquise depois.

Obs12: De forma muito, muito sucinta, a gente pode dizer que, dentro de certas dadas categorias de partículas, a diferença entre partículas e antipartículas é constante, mesmo que as partículas em questão sejam diferentes. Uma de tais categorias é o que podemos chamar de “a família do elétron”, que inclui o próprio elétron e o neutrino eletrônico. Assim, toda vez que um elétron é criado/destruído, é necessário criar/destruir também ou um antielétron ou um antineutrino. Analogamente, se criarmos/destruirmos um pósitron, será criado/destruído um elétron ou um neutrino. Isso elucidava um pouco o porquê dos decaimentos beta serem do jeito que são?

Obs13: Eu não sei se isto te incomodou também, mas eu sei que me fez travar muito: como que o próton usa a energia liberada no decaimento para poder realizar o próprio decaimento? Digo, parece que a causalidade energética está invertida. Então, você conhece o princípio de incerteza? É um postulado que associa inversamente a incerteza de duas grandezas. O exemplo mais clássico é momento/posição: quanto mais sabemos da posição das partículas, menos sabemos das suas velocidades. Contudo, há outros pares menos cantados. Notavelmente para esse caso, há o par energia/tempo: quando olhamos intervalos muito breves de tempo, a energia pode oscilar de forma esquisita desde que, globalmente, isso não afete as conservações. Isso tem muitas consequências muito esquisitas - como partículas virtuais, conhece elas? -, mas no nosso caso, explica por que não deveríamos nos preocupar com “causalidade energética”. Na escala de tempo em questão, é melhor você só olhar a energia antes e a energia depois, porque durante o processo, tudo vale.

Fontes, bases e referências:

A Vital Legacy: Biological and Environmental Research in the Atomic Age, de Vaughan D., ed.

Minute physics, youtube

MIT OpenCourseWare, youtube

A Companion to Psychiatric Studies, de J Douglas Steele e Stephen M Lawrie

Introduction to PET physics, de Ramsey Badawe

Fowler J. S. and Wolf A. P. (1982). The synthesis of carbon-11, fluorine-18 and nitrogen-13 labeled radiotracers for biomedical applications.

<https://www.youtube.com/watch?v=lpYwcTDVRAg>

