



## OLHANDO O CÉU DO FUNDO DE UM POÇO

Ricardo Avelino Gomes<sup>1</sup>

No início havia um múon – que atravessou toda a atmosfera e chegou na superfície da Terra. Na viagem, desafiou e desdenhou a mecânica de Newton. Como se não bastasse, continuou sua trajetória, penetrou a Terra e foi, eventualmente, observado em um detector subterrâneo a 705 m de profundidade...

Um instante, por favor. Sim, claro. Nem todos tiveram o prazer de conhecer o múon. Eu mesmo o conheci somente na universidade, no curso de física moderna. Não, ele não era um aluno, tampouco um professor. Aqui vai a apresentação: o múon é primo-irmão do elétron. Aquele mesmo elétron que conhecemos desde não sei quando e sabe-se lá de onde, e que dizem, e eu acredito e confirmo, ser muito importante para o eletromagnetismo.

O múon é uma partícula muito semelhante ao elétron – por isso dizemos serem “primos”. Mas o múon tem uma massa cerca de 200 vezes maior que a do elétron. Curioso, mas apesar de ser mais pesado, os físicos levaram muito mais tempo para encontrá-lo. Isto porque a matéria que nos rodeia, e que, por acaso, também forma o nosso corpo, é composta apenas por prótons, nêutrons e elétrons. Não existem múons na estrutura elementar dos átomos com que lidamos no dia a dia.

Agora sim, que já sabemos quem são os múons, vejamos o que eles têm a dizer. Mais um instante. Antes, me pedem para contar sobre a origem dos múons. De onde vieram? Por que vieram? Pra onde foram? Já foram? Nem vi!

<sup>1</sup> Doutor em Física (Unicamp / Fermilab) e professor do Instituto de Física da UFG.

Os múons foram descobertos em estudos de raios cósmicos – que são partículas de origem extraterrestre que viajam pelo cosmo afora. Em geral os raios cósmicos são prótons, mas podem ser até núcleos do átomo de ferro. Alguns raios cósmicos, por sorte ou azar, depende do ponto de vista, acabam se chocando com a atmosfera de um planeta chamado Terra.

Da colisão entre o raio cósmico e as moléculas de nitrogênio ou oxigênio que compõem a atmosfera, várias outras partículas são produzidas, que produzem outras, que produzem mais outras..., formando o que chamamos de “chuveiro atmosférico extenso” – cascatas de partículas de vários tipos e energias. Dentre essas partículas estão os píons ou mésons  $\pi$  – aqueles descobertos pelo físico brasileiro Cesar Lattes e sua turma.

Os píons são partículas instáveis, o que significa que eles decaem em outras partículas. Repentinamente deixam de existir e se transformam em partículas filhas. O que isso tem a ver com os múons? É justamente no decaimento dos píons que são produzidos os múons!

Uma análise da árvore genealógica parece simples – os múons são filhos dos píons, netos dos raios cósmicos e primos dos elétrons. Mas os múons também são instáveis e, de acordo com um tempo de vida próprio, decaem em elétrons e neutrinos. Ou seja, os múons além de primos, também são pais dos elétrons. E um estudo detalhado permite concluir que, além de pais dos neutrinos, também são seus irmãos!

Bem, talvez seja melhor esquecer as relações de parentesco dos múons – é uma família confusa. Vamos tentar entender suas propriedades. Já mencionei brevemente que alguns deles atravessam a atmosfera. Mas por que os múons desafiam a mecânica clássica de Newton? O problema é que essa teoria simplesmente não consegue explicar a viagem do múon.

Os múons produzidos na alta atmosfera, numa camada conhecida como estratosfera, são bastante energéticos, ou seja, têm velocidades muito altas. Em 1905, um físico chamado Albert Einstein – tem gente que já ouviu falar dele – publicou um artigo sobre a teoria da relatividade especial, que faz uma descrição para o movimento de partículas a altas velocidades, diferente da descrição da mecânica clássica de Newton.

De acordo com a mecânica clássica, pelo tempo de vida do múon, não seria possível que ele chegasse ao nível do mar – os múons de raios cósmicos deveriam decair rapidamente antes que pudessem atravessar a atmosfera. Entretanto, pela mecânica relativística de Einstein, haveria uma dilatação do tempo, que possibilitaria a viagem dos múons e que os observássemos em detectores de superfície e subterrâneos.

A detecção de múons na superfície foi uma das muitas demonstrações da validade da teoria da relatividade de Einstein. Trocando em miúdos, um múon em repouso tem um tempo de vida muito curto; mas um múon em movimento com velocidades próximas à velocidade da luz no vácuo, tem um tempo de vida dilatado, fazendo com que ele viaje longas distâncias antes de decair.

Mas qual é a importância em estudar os múons de raios cósmicos? Afinal, o que dizem tais múons que, pela mecânica clássica, nem deveriam chegar na superfície terrestre? Para saber o que “dizem”, temos que construir equipamentos que possam “escutá-los” e precisamos compreender sua “língua”. Os equipamentos para escutá-los são conjuntos de detectores gigantescos, colocados na superfície da Terra ou no subterrâneo. E felizmente os múons falam a língua da física de partículas, que a humanidade está começando a aprender.

Um dos grandes detectores de múons de raios cósmicos já construídos conta com a participação do Instituto de Física da UFG. Trata-se do Experimento *Main Injector Neutrino Oscillation Search* (MINOS) no *Fermi National Accelerator Laboratory* (FERMILAB) nos Estados Unidos. Como seu nome indica, o MINOS tinha como objetivo principal a procura por oscilação de neutrinos usando um acelerador de partículas chamado *Main Injector* do FERMILAB. É um experimento de neutrinos, mas que também pode ser usado para estudar múons de raios cósmicos. Vejamos como isso é possível.

O funcionamento básico do experimento é muito simples – mas não tente fazer em casa sem a presença de um físico. Pega-se um feixe de prótons do *Main Injector*, com cerca de 120 GeV de energia (é muita energia), e faz-se-o colidir com um alvo de grafite, para produzir um feixe de píons – dentre outras partículas. Os píons carregados (com carga elétrica) são focalizados por campos magnéticos e decaem em múons e neutrinos. Agora, basta remover os múons, também com o uso de campos magnéticos, e você terá um feixe de neutrinos. Toda essa receita é feita no próprio FERMILAB, próximo de Chicago, no Estado de Illinois.

O feixe de neutrinos é produzido com um determinado ângulo, que irá fazê-lo entrar por debaixo da Terra, atravessar 735 km de distância, e aparecer em uma mina de ferro em Soudan, no Estado de Minnesota. Para estudar os neutrinos, construíram-se dois grandes detectores: um no FERMILAB, com 1.000 toneladas; e outro na mina de Soudan com 5.400 toneladas e a 705 metros de profundidade.

É esse detector enterrado em uma mina em Soudan, denominado Far Detector, que usamos para escutar, ou melhor, detectar os múons de raios cósmicos. O Far Detector é o primeiro detector de subterrâneo magnetizado, o que permite distinguir entre um múon positivo e um negativo. Como o múon fornece informações sobre o raio cósmico que o produziu, podemos pensar que esse detector funciona como um telescópio de raios cósmicos.

Mas o que diz um telescópio de raios cósmicos? Para que serve? Um telescópio desses é fundamental para tentar descobrir o que são os raios cósmicos, de onde vêm, como são produzidos, como viajam pelo Universo, e o que determina a forma de seu espectro de energia. Quer dizer que um *telescópio de raios cósmicos* permite olharmos o céu do fundo de um poço? Sim! É isso!

Quando detectamos um múon de raios cósmicos, medimos suas características – sua energia, sua direção (de que região do espaço ele veio) e sua carga (se é positivo ou negativo). Como o experimento MINOS funciona desde 2003, também podemos obter informações sobre a intensidade (o número) de múons ao longo desse período. Tal fato nos permite correlacionar as medidas observadas com outras variáveis, como por exemplo o ciclo de atividade solar.

Uma das primeiras informações que tiramos das medidas dos múons é de fundamental importância para fazermos do MINOS um telescópio de raios cósmicos. Todo telescópio necessita de uma fonte bem definida que permita calibrá-lo,

que permita definir a resolução angular do equipamento. Um telescópio óptico utiliza uma estrela padrão como referência para a calibração.

Para um telescópio de raios cósmicos o procedimento não é diferente. Ou melhor, não deveria ser diferente. O problema central é que não conhecemos uma fonte pontual de raios cósmicos no Universo. Por outro lado, existe um fenômeno observado no céu que é o contrário de uma fonte – é um déficit de raios cósmicos. Trata-se da Lua, que absorve os raios cósmicos que incidem sobre ela, causando um déficit nos múons de raios cósmicos que chegam na Terra, vindos de sua direção. É um fenômeno conhecido como *sombra da Lua*.

A medida da sombra da Lua fornece a resolução angular do telescópio. Em outras palavras, nos diz com que precisão o telescópio é capaz de definir a posição no espaço de uma possível fonte de raios cósmicos. O mesmo procedimento pode ser feito para detectar o déficit de múons de raios cósmicos na direção do Sol. Mas, devido aos campos magnéticos intensos do Sol, a resolução da medida encontrada não é tão boa quanto a que é feita usando a Lua.

Outra informação essencial que os múons de raios cósmicos nos dão está relacionada à temperatura da estratosfera. Esse é mais um dos estudos que temos feito no MINOS, na tentativa de medir uma correlação entre a intensidade dos múons detectada e a temperatura da estratosfera. Já foi possível mostrar que há uma forte correlação entre essas variáveis, o que permite concluir que construímos um detector subterrâneo que funciona como um *termômetro da alta atmosfera*.

O que explica essa correlação é que a temperatura tem influência na densidade da estratosfera, que irá determinar a probabilidade das colisões dos píons produzidos com

as partículas da atmosfera. Quanto maior a temperatura, menor a densidade, menor a chance de haver uma colisão e, conseqüentemente, maior a chance do pión decair e produzir um múon. A temperatura da estratosfera desempenha, portanto, um papel importante na evolução do chuveiro atmosférico como um todo e, em particular, na determinação da intensidade dos múons que observamos. A variação do número de múons acompanha a variação da temperatura da estratosfera.

Pelo visto os múons dizem bastante coisa. E esses falastrões já nos disseram mais uma. No MINOS foi feito um estudo para medir a proporção entre múons positivos e negativos. Sabemos que a maioria dos raios cósmicos produz um número maior de partículas positivas que negativas. Este fenômeno se deve ao fato do próprio raio cósmico, em geral, ser uma partícula positiva – ele pode ser um próton (com carga +1) ou um núcleo mais pesado como o do átomo de ferro (com carga +26), que contém 26 prótons.

Um estudo sobre a razão entre o número de múons positivos e negativos nos indica, portanto, a composição química do raio cósmico. Essa razão parece ter uma dependência com a energia dos múons – quanto maior a energia, maior a razão. Ainda, novas medidas da razão podem nos dar informações interessantes sobre a quantidade de antimatéria no Universo. Informações essas, que ajudariam a elucidar o mistério aparente do Universo de haver mais matéria que antimatéria.

Os múons de raios cósmicos realmente contam histórias curiosas. E são muitos os motivos que nos instigam a escutar mais e melhor o que essas partículas têm a dizer. Ao mesmo tempo, continuamos a aprimorar nosso conhecimento da língua que os múons utilizam – essa magnífica construção intelectual chamada física de partículas.