

LEPTOGÊNESE

Palavras-Chave: Leptogênese, Bariogênese, Cosmologia

Autores(as):

Caio Wagner Rodrigues de Melo, IFGW – Unicamp

Prof. Dr. Pedro Cunha de Holanda (orientador), IFGW - Unicamp

INTRODUÇÃO:

Como seres deste mundo, é natural aos humanos quererem conhecer o ambiente em que vivem, descobrir do quê as coisas são feitas e por que certos eventos ocorrem da maneira como ocorrem. Dentre as perguntas expostas anteriormente, a segunda estará presente na pesquisa desenvolvida aqui.

A princípio, pode parecer uma pergunta sem fim ou resposta, pois pode-se entrar num ciclo de “isto é feito daquilo, que é feito daquilo...” ou ainda pode-se concluir que cada coisa é formada por algo distinto, único. Entretanto, ao longo da história, diferentes pessoas pensaram em diferentes possibilidades e começaram a ponderar sobre a existência de compostos elementares, isto é, objetos que não são estruturados por objetos menores e que ainda estruturam os demais objetos. Por exemplo, Empédocles formulou a teoria dos quatro elementos, na qual tudo na natureza seria formado por quatro elementos fundamentais (terra, água, ar e fogo); Leucipo e Demócrito, por sua vez, formularam uma teoria atomista, em que toda a matéria é formada por seres microscópicos, indivisíveis e eternos, chamados de átomos.

No fim, por volta de 1970, após muitas hipóteses e experimentos, chegou-se ao modelo padrão de física de partículas, o qual considera a existência de 17 partículas elementares (figura 1) que compõem a matéria que encontramos no Universo.

Entretanto, com o desenvolvimento da mecânica quântica relativística, notou-se algo interessante. Em 1927, Paul Dirac descobriu a Equação de Dirac, que descreve o movimento de elétrons livres relativísticos. A partir dela, Dirac notou que suas soluções admitiam elétrons tanto com uma energia positiva quanto com uma energia negativa. Isto levou Dirac a elaborar sua ideia de um “mar de elétrons” ocupando estados quânticos de energia negativa e de que a ausência de um dos elétrons deste “mar” atuaria como a presença de uma partícula de energia positiva, carga elétrica positiva e de mesma massa que o elétron. Na época, não se conhecia uma partícula assim.

Porém, em 1931, Carl Anderson descobriu uma partícula - chamada de pósitron - que tinha exatamente as características exigidas por essa teoria de Dirac. Posteriormente, Stueckelberg e

Feynman formularam uma explicação mais simples para a existência de soluções da equação de Dirac com energias negativas: tais soluções são, na verdade, estados com energia positiva de pósitrons.

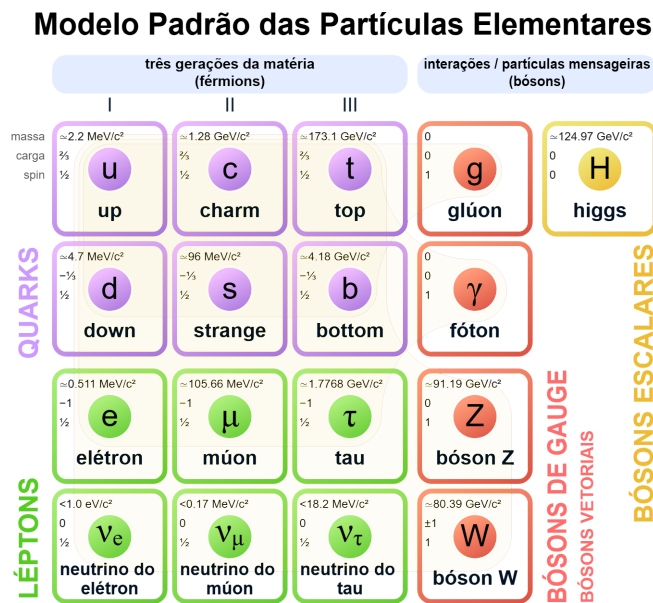


Figura 1 - Partículas elementares que compõem o modelo padrão de física de partículas. Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-pt-br.svg.

Interessantemente, algo similar ocorre para as demais partículas do modelo padrão: para cada partícula, existe uma outra correspondente - chamada de antipartícula - que possui massa idêntica e carga elétrica oposta à primeira. Nesse sentido, o pósitron é a antipartícula do elétron.

Todavia, isso propõe uma outra questão. Na discussão sobre os elementos fundamentais da matéria que nos cerca, tivemos como resultado a figura 1. Porém, também existem partículas idênticas às da figura 1, porém com a carga elétrica oposta, que poderiam formar, naturalmente, corpos e objetos, sendo tal matéria formada por antipartículas chamada de antimatéria. Pelo o que pôde ser analisado na Terra, no Sistema Solar, na Via Láctea e até no Universo observável, antimatéria é algo extremamente raro, sendo observada apenas em raios cósmicos e processos de decaimento nuclear. Isto é bem estranho, pois, assim como o caso de cargas elétricas positivas e negativas, o que se define como partícula e como antipartícula é completamente arbitrário - foi resultado de nossa experiência local na Terra. Haveria o Universo uma preferência pelo o que chamamos de matéria hoje em dia? Estaríamos vivendo em uma parte do Universo dominada por matéria por acaso, havendo outras partes do Universo que contêm quantidades consideráveis de antimatéria?

Diante disso, podemos adotar algumas posturas. Podemos assumir que o Universo sempre possuiu, desde o seu princípio, um grandíssimo excesso de matéria em relação à antimatéria. Podemos assumir que o Universo pode ou não conter uma mesma quantidade de matéria e antimatéria, mas, seja qual for o caso, apenas acontece que estamos vivendo numa região do Universo em que a matéria é predominante. Podemos assumir que o Universo foi iniciado com a

mesma quantidade de matéria e antimatéria, porém algo processo ocorreu no Universo primordial e instaurou a dominância da primeira sobre a última.

Dentre elas, a terceira é a mais atraente. Primeiro, porque partículas e antipartículas não possuem propriedades tão distintas a ponto de se justificar um excesso de matéria logo no início do Universo (excluindo a primeira postura). Segundo, caso exista uma região do Universo que seja dominada por antimatéria fora do Universo observável, tal região deve ter pelo menos o tamanho do Universo observável; entretanto, devido ao fenômeno de aniquilação de pares, a fronteira entre as regiões de matéria e antimatéria produziria vários fótons de alta energia, porém isso não é observado no fundo cósmico de raios gama difusos (CDGB); assim, as regiões de matéria e antimatéria devem estar separadas por grandes vazios no Universo, mas a homogeneidade da radiação cósmica de fundo não permite que tamanha separação espacial ocorra antes do período de recombinação (período de formação estável de átomos de hidrogênio no Universo), implicando, novamente, a presença de fótons no CDGB que não são realmente observados.

Com isso, resta-nos analisar quais possíveis processos podem ter gerado a assimetria entre matéria e antimatéria.

BARIOGÊNESE E LEPTOGÊNESE:

De modo geral, processos que possam ter gerado tal assimetria recebem o nome de mecanismos de bariogênese. Para ser mais preciso, o termo “bariogênese” refere-se à geração de um excesso de bárions em relação a antibárions - noutras palavras, refere-se à geração da assimetria bariônica. Entretanto, devido ao fato de que as estimativas quantitativas da assimetria bariônica são bem mais precisas que aquelas da assimetria leptônica, acaba-se estendendo o sentido desse termo para abarcar a assimetria matéria-antimatéria como um todo.

Ao longo do tempo, vários mecanismos de bariogênese foram propostos. Por exemplo, a bariogênese eletrofraca, o mecanismo de Affleck-Dine, a leptogênese, a *axiogenesis*, a *hylogenesis*, e muitas outras. Embora diversos, todos eles têm algo em comum: todos devem satisfazer as condições de Sakharov. Em 1967, Andrei Sakharov encontrou as três condições que todo mecanismo de bariogênese deve satisfazer. Primeiro, deve haver interações que violem a conservação do número bariônico. Segundo, tais interações também não devem respeitar as simetrias C (conjugação de carga) e CP (conjugação de carga combinada com inversão de paridade). Terceiro, a geração da assimetria bariônica deve ocorrer num período em que há algum desvio do completo equilíbrio termodinâmico.

Interessantemente, o modelo padrão de física de partículas possui os processos *sphaleron* que violam a conservação do número bariônico, e também apresenta violação de CP na matriz CKM. Entretanto, isso por si só não é capaz de justificar a grande assimetria entre matéria e antimatéria existente hoje em dia. Além disso, não há algum processo no modelo padrão de física de partícula que ocorra fora do equilíbrio térmico que ocorra nos primórdios do Universo. Por isso, mecanismos de

bariogênese geralmente introduzem alguns elementos que não estão presentes no modelo padrão de física de partículas para tentar explicar a assimetria bariônica.

Nesta pesquisa de iniciação científica, pretende-se estudar e apresentar apenas um desses vários mecanismos: a leptogênese. Convém dizer que, embora existam variações como a *supersymmetric leptogenesis* e a *soft leptogenesis*, esta pesquisa foca no estudo da leptogênese padrão.

A leptogênese é um modelo atraente porque ela envolve considerações interessantes sobre a física de neutrinos. Resumidamente, ao invés de propor uma bariogênese “direta”, ela propõe que a bariogênese é gerada como consequência de uma leptogênese, isto é, a geração da assimetria bariônica decorre da geração de uma assimetria leptônica anterior. Em maior detalhe, tal produção de uma assimetria leptônica é explicada assumindo que neutrinos são partículas de Majorana (são suas próprias antipartículas), que existe, para cada neutrino leve do modelo padrão, um neutrino pesado estéril (de mão direita) que decai em léptons e em antiléptons, mas preferencialmente em antiléptons, gerando um número leptônico total (L) negativo. A partir daí, os processos *sphaleron* conseguem transformar essa assimetria leptônica em uma assimetria bariônica (com $B > 0$) se utilizando do fato que, mesmo dentro do modelo padrão de física de partículas, a quantidade $B - L$ é sempre conservada.

Com isso, vê-se que a leptogênese acaba se relacionando com outras questões interessantes de física de neutrinos, como as questões de que eles são partículas de Dirac ou de Majorana, e do modelo gangorra para explicar a pequenez da massa dos neutrinos do modelo padrão (o que está atrelado com a existência de neutrinos estéreis). Por fim, ela também se relaciona com o fenômeno de oscilação de neutrinos, pois, devido ao decaimento assimétrico do hipotetizado neutrino estéril no modelo da leptogênese, espera-se que tal assimetria acabe se tornando presente nos neutrinos leves, em particular espera-se que as taxas da oscilação de neutrinos e de antineutrinos sejam diferentes. Com isso em mente, o *Deep Underground Neutrino Experiment* planeja investigar, entre outros assuntos, tais taxas de oscilação, de modo que se possa avaliar se uma das consequências das hipóteses assumidas pela leptogênese é, de fato, observada.

ESTIMATIVA DA RAZÃO NÊUTRON-PRÓTON:

A parte quantitativa do estudo da leptogênese é complicada pois envolve conceitos avançados de física de partículas e também, como vimos, extensões ao modelo padrão de física de partículas. Todavia, é possível realizar um cálculo presente no contexto da cosmologia, a razão nêutron-próton, de modo que se possa ilustrar alguns dos aspectos envolvidos em cálculos de leptogênese em um contexto mais simples, mas também interessante. O motivo disto ficará mais claro adiante.

A assimetria bariônica no Universo pode ser estimada pelo valor da razão da densidade de bárions no Universo pela densidade de fótons no Universo. Tal valor pode ser calculado utilizando teoria e observações da radiação cósmica de fundo (CMB) e da nucleossíntese do Big Bang.

Entretanto, embora isso nos permita calcular o tamanho da assimetria, a nucleossíntese e a CMB não conseguem explicar por que ela existe.

Além de proporem uma forma de se gerar uma assimetria, os mecanismos de bariogênese devem ser capazes de obter um valor para a razão bárion-fóton consistente com o obtido através da nucleossíntese e da CMB.

Esse cálculo é complicado, porém é possível ilustrá-lo através do cálculo de uma quantidade diferente, mas similar: a razão da densidade de nêutrons pela densidade de prótons no Universo. Tal quantidade acaba sendo importante para a nucleossíntese, porém o ponto principal é que seu cálculo elucida a intersecção entre cosmologia e física de partículas (e até física estatística) tipicamente presente em estudos do Universo primordial. Nesta pesquisa, utilizamos equações de Boltzmann e diagramas de Feynman para calcular a razão nêutron-próton, assumindo algumas hipóteses para simplificar os cálculos. No fim, apresentaremos um gráfico da evolução temporal dessa grandeza (no momento de escrita deste resumo, ainda em produção) e discutiremos algumas análises que podem ser feitas a partir dele.

BIBLIOGRAFIA

GRIFFITHS, David. **Introduction to Elementary Particles; 2nd rev. version**. New York, Wiley, 2008

DODELSON, Scott, SCHMIDT, Fabian. **Modern Cosmology**. London, Elsevier, 2021

LESGOURGUES, Julien et al. **Neutrino Cosmology**. New York, Cambridge University Press, 2013

CANETTI, Laurent et al. Matter and antimatter in the universe. **New Journal of Physics**, v. 14, 095012, 2012

BLINOV, Nikita et al. New Ideas on Baryogenesis: A Snowmass White Paper. **Snowmass 2021**, 2022

FOGAÇA, Jennifer. **Teoria dos Quatro Elementos**. [S. l.], 2025. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/teoria-dos-quatro-elementos.htm>>. Acesso em: 2 ago. 2025

PORFÍRIO, Francisco. **Leucipo e Demócrito**. [S. l.], 2025. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/filosofia/leucipo-democrito.htm>>. Acesso em: 2 ago. 2025