

FÍSICA DE PARTÍCULAS & ASTROPARTÍCULAS

***Das Altas Energias até o
Big Bang***

Mickael Victhor Santos de Farias

Ricardo C. S. Rêgo

Natal/RN - 2023

*Editado por Farinaldo Queiroz

Sobre Este Ebook

Este ebook está completamente direcionado para pessoas de ensino médio, graduação, e até mesmo àqueles interessados em física de partículas de um modo geral. Dito isto, a matemática e o formalismo matemático é mantido no mínimo possível, para que dê-se ênfase na compreensão dos conceitos e no entendimento por trás das ideias que giram em torno dos temas tratados .

Com isso, na primeira parte busca-se abordar primeiramente temas relacionados às bases da física de partículas, como por exemplos as principais equações da quântica, a relatividade especial e o modelo padrão. Por fim, a parte II trata de assuntos além do modelo padrão e contextos nos quais testamos ou aplicamos diretamente conhecimentos de físicas de partículas.

Este material é resultado do projeto final do Programa de Formação em Física de Partículas e Astropartículas (Código PJ933-2023) vinculado à UFRN. O objetivo deste programa é fornecer educação em Física de Partículas para estudante do ensino médio e início da graduação e, por fim, estimulá-los a produzir um ebook (como esse) com os conhecimentos adquiridos.

Sumário

PARTE I - FÍSICA DE PARTÍCULAS

Capítulo 01: Uma Jornada pelas Equações - Schrödinger, Klein-Gordon e Dirac

Capítulo 02: Relatividade Especial

Capítulo 03: Partículas Fundamentais

PARTE II - ALÉM DO MODELO PADRÃO: ASTROPARTÍCULAS E MATÉRIA ESCURA

Capítulo 04: Cosmologia - A Física por trás dos Cosmos

Capítulo 06: Além do Modelo Padrão - Matéria Escura

Capítulo 06 - *The Big Picture* - O que está acontecendo

Parte I

Física de Partículas

Capítulo 01: Uma Jornada pelas Equações - Schrödinger, Klein-Gordon e Dirac

1.1 Equações de Euler- Lagrange

Este capítulo, que por sinal poderia tomar mais do que 100 páginas, é crucial para a formulação por trás da física de partículas, pois é nele que estão as bases das ferramentas matemáticas que ditam as expressões de energias, tanto das partículas, quanto dos campos associados à estas, as chamadas na literatura de “Lagrangianas do Modelo Padrão”. Quanto ao Modelo Padrão em si, será reservado um capítulo apenas para sua discussão; já o termo “lagrangiana”, este por sua vez refere-se a um conceito chave: energia. Uma lagrangiana genérica é descrita pela energia cinética e potencial, e ela descreve a física de um sistema. A lagrangiana do modelo padrão faz a mesma coisa, sendo que os termos cínéticos não só estão ligados ao movimento das partículas mas também as suas interações entre si, enquanto os termos de potencial estão relacionados as massas destas partículas.

Com a energia cinética e potencial de um sistema, é possível definir uma lagrangiana L , como visto na primeira equação a baixo. A segunda equação, conhecida como a equação de Euler-Lagrange, usa a lagrangiana L (que contem as informações físicas do sistema) para encontrar as equações do movimento do sistema, que nos diz como ele evolui no tempo.

$$L = T - V$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = 0$$

Mas além disso, o que essas equações aparentemente pequenas, nos dizem? Uma vez encontrada a energia cinética de uma partícula T , e o potencial no qual esta está sujeita V , temos um conjunto de n equações diferenciais que devem ser resolvidas (muitos dos problemas não são possíveis de serem resolvidos analiticamente, somente computacionalmente por meio de programas). Mas por que n equações? porque esse termo “ q ” e “ q ponto” referem-se às coordenadas generalizadas do problema, como x , y e z , ou até mesmo um outro sistema de coordenadas mais sofisticado. Ou seja, para cada coordenada há uma equação diferencial de Euler-Lagrange para ser resolvida.

Mas pode-se surgir a necessidade de se perguntar: por que para obtermos as chamadas equações de movimento, oriundas das equações diferenciais de Euler-Lagrange, não utilizamos apenas a Segunda Lei de Newton, uma vez que, conhecendo a aceleração que a partícula está sujeita, basta fazer o somatório das forças agindo sobre esta? Por dois motivos muito sutis: ao utilizar a Segunda Lei de Newton, estamos por lidar com vetores, algo extremamente desvantajoso quando temos um sistema complexo, pois teríamos que fazer análise vetorial para cada um dos corpos, já com a lagrangiana (que mais vez é importante destacar, tem dimensão de energia), estamos lidando puramente com energia, que é um escalar, ou seja um número. Podemos associar o sistema à números, ao invés de vetores, o que simplifica as contas. O segundo motivo é crucial: a modelagem matemática é muito mais sofisticada, pois vai e muito além das equações mostradas acima. Na Física Teórica de altas energias, importam-se com teoremas importantes relacionados ao formalismo da lagrangiana, como por exemplo o Teorema de Noether, que associa invariâncias na lagrangiana (simetrias contínuas, no contexto de Teoria de Grupos) à leis de conservação. Invariâncias são muito bem-vindas na Física Teórica.

São incontáveis os casos em que, sempre que temos uma invariância, temos a esta associada uma informação valiosa sobre o sistema físico (É daí que, por meio de transformações contínuas, conseguimos obter lagrangianas de campos importantes no Modelo Padrão, como a *Quantum Electrodynamics - QED*), ou seja,

$$L \rightarrow L'$$

Que informação isso pode fornecer? Ao fazer uma transformação (na verdade não é uma transformação arbitrária, são chamadas de transformações infinitesimais de grupos geradores, algo que não é de interesse para esse material), podemos extrair comportamento de campos e de partículas associadas a estes (que se dá por meio dos chamados *Gauges*, algo também muito sofisticado e complexo para ser tratado neste material).

Na próxima seção iremos explorar uma formulação para as lagrangianas que envolvem princípios da Mecânica Quântica, e portanto chegar à uma expressão para energia sutilmente diferente, mas que englobam os conceitos de invariância, de leis de conservação e simetria mencionados aqui.

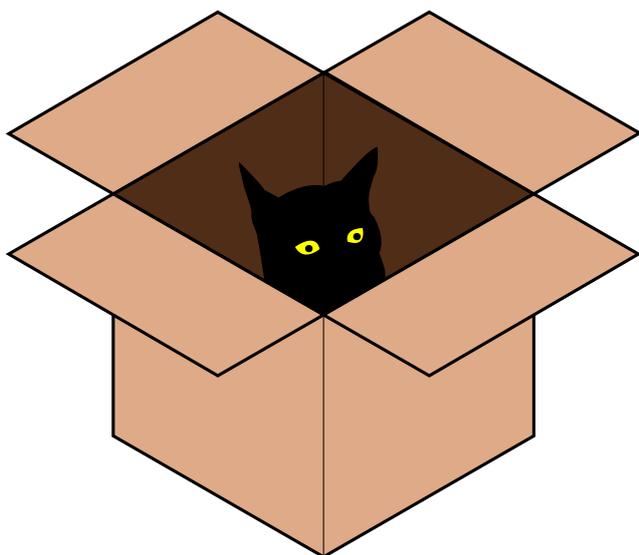
1.2 Equação de Schrödinger

As equações que usamos carregam uma informação valiosa sobre os problemas físicos que estamos tratando: elas carregam consigo os princípios que foram usados para derivá-las. Antes, usávamos a mecânica Newtoniana para descrever os problemas, agora introduzimos a noção de lagrangiana. No mundo quântico há mais um formalismo: a equação de Schrödinger, que é dada por [para mais detalhes, veja Thomson (2013, Seção 2.3)]:

$$\hat{H}\Psi = E_n\Psi$$

Isso nos diz que o hamiltoniano H (uma relação de energia que é a soma da energia cinética T e da potencial V) aplicada a uma função de onda Ψ equivale aos seus autovalores de energia multiplicados também por Ψ . Mas o que nos importa não é isso. O que afinal é esse Ψ ? Ele aparece em todos os lugares na física de partículas, e é o principal postulado da mecânica quântica!

Se há uma função de onda $\Psi(r,t)$ associada à uma dada partícula, então esta função descreve a dinâmica da partícula.



Mas afinal, o que é essa função de onda? Ninguém sabe até hoje! (ela por si só não tem um significado físico, é apenas um artifício matemático). A única coisa que podemos extrair diretamente dela é que ao elevamos ao quadrado, podemos encontrar a probabilidade daquela partícula estar em um dado lugar. Nunca poderemos olhar diretamente para uma partícula, pois estaríamos perturbando o meio no qual ela está inserida, mudando as configurações do sistema! É por isso que na Física de Partículas usamos a Mecânica Quântica, porque antes na mecânica de Newton tínhamos que saber a localização exata (mundo determinístico), aqui isso se torna impossível (probabilidades de configurações de estados).

1.3 Equação de Klein- Gordon

Como foi comentado acima, na física de partículas utiliza-se da Mecânica Quântica para descrever sistemas, mas tem um pequeno detalhe: a equação de Schrödinger como estava colocada acima não nos interessa, pois ela não consegue descrever partículas em um regime relativístico. Porém, no nosso mundo as partículas subatômicas são relativísticas por natureza, então estamos interessados em uma expressão que contenha informações relativísticas no que diz respeito às energias, momento e à própria função de onda. É aí que surgem as tentativas de montar equações usando as expressões de energia abaixo, derivada por Einstein:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

A primeira tentativa de obter uma equação de Schrödinger relativística foi a equação de Klein-Gordon, que descreve partículas de spin zero. A partir daqui estaremos usando unidades naturais, ou seja, $c = \hbar = 1$. Com isso, considerando o formalismo quântico de operadores, e multiplicando a equação por Ψ , temos:

$$E^2 \psi = \hat{p}^2 \psi + m^2 \psi$$

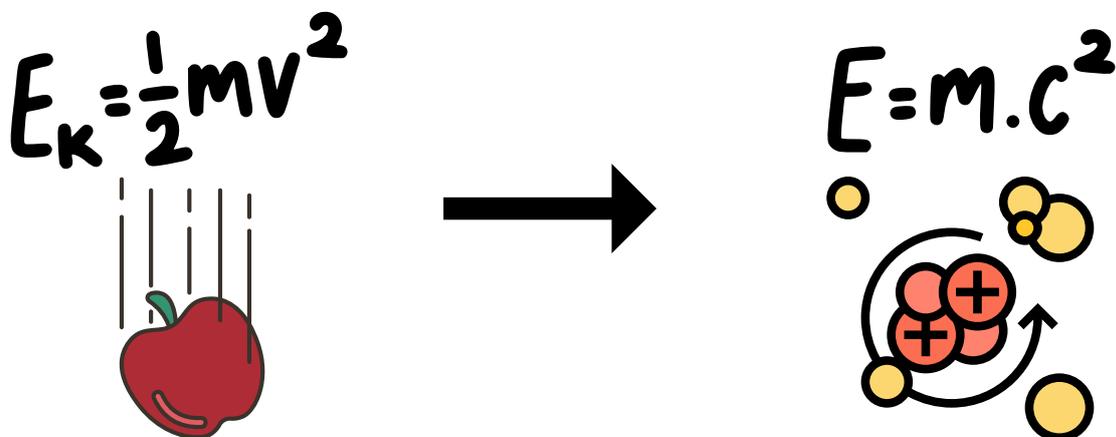
Que se torna, usando conhecimentos gerais de Quântica [Veja Thomson (2013, p. 81):

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = (\nabla^2 - m^2) \Psi \quad \text{Equação de Klein-Gordon (forma não covariante)}$$

Essa porém ainda não é a equação final que se usa na física de partículas. A equação final requer conhecimentos mais avançados, mas podemos dizer que a diferença crucial entre estas é que a equação usada (equação de Dirac) trata de matrizes, spinores e usa uma notação que chamamos de covariante, que é quando junta-se as derivadas espaciais e temporais em uma só, uma derivada no espaço-tempo.

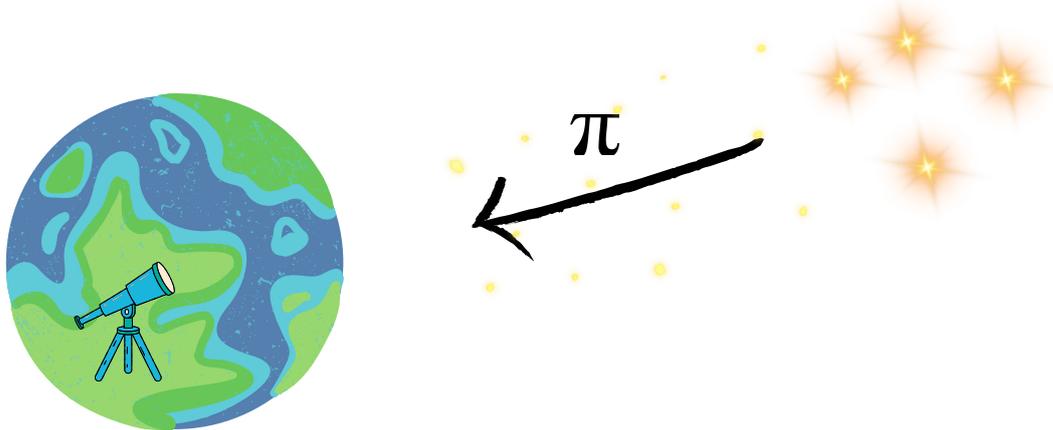
Capítulo 02: Relatividade Especial

Um das principais ferramentas que físicos de partículas utilizam para estudar o comportamento das partículas fundamentais em situações de altas energias, como em grandes colisores, são os princípios e expressões da Relatividade Especial, formulada por Albert Einstein no início do século XX. Aqui continuam sendo verdades absolutas as famosas conservações de momento e de energia, como na formulação da Mecânica Newtoniana. A principal diferença é que agora temos uma velocidade limite, no qual partícula massiva alguma poderá jamais alcançar: a velocidade da luz. Com isso, construímos por meio de ferramentas matemáticas e noções de Cálculo elementar as principais equações da energia de uma partícula (agora temos conhecimento que, mesmo que a velocidade seja zero, haverá uma energia repouso, que cada corpo massivo tem apenas por existir: $E=mc^2$), assim como o momento, a dilatação do tempo e contração do espaço, por sinal famosas expressões. As duas últimas são derivadas a partir das Transformações de Lorentz [Veja Thomson (2013, p. 34)].



Mas por que isso importa e por que tal conhecimento é útil para física de partículas? Deve-se atentar ao fato de que partículas fundamentais são extremamente pequenas, e que qualquer excitação no meio é capaz de dar uma energia considerável a elas. As escalas de altas energias, no qual estuda-se em formações de física de partículas e astropartículas, são naturalmente relativísticas, como as elevadas temperaturas no universo primordial e os grandes colisores existentes hoje, e necessitam de um tratamento adequado, do contrário, teremos teorias não compatíveis.

E como falar de relatividade especial e física de partículas sem antes mencionar a descoberta de uma importante partícula, que foi crucial para validar experimentalmente as transformações de Lorentz: O pión (lê-se como a letra grega π), uma partícula produzida por raios cósmicos, acima da atmosfera. Era previsto pelos melhores modelos do século passado que essa partícula, com seu tempo de vida médio muito curto, não deveria atingir o solo terrestre e permitir medições relacionadas a sua existência.

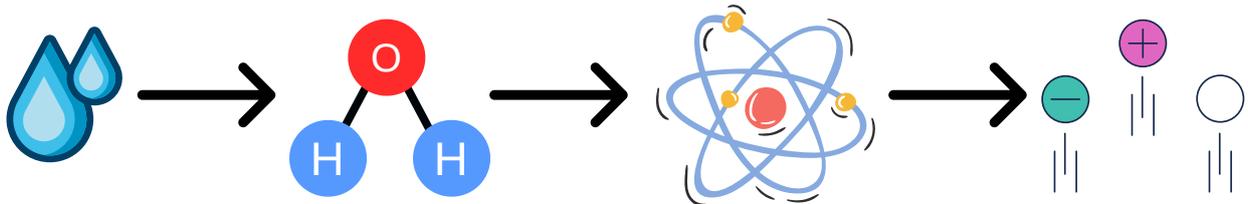


Não havia nenhum mecanismo ou fenomenologia que explicasse tal acontecimento até a chegada da relatividade especial e das transformações de Lorentz. Podemos calcular com ótima precisão que, uma vez que o pión se move com altas velocidades, o tempo se dilata consideravelmente, e permite que ele chegue até nós. Em outras palavras, o tempo de vida média mencionado acima só era válido no referencial da partícula; para altas velocidades, aquele tempo é dilatado, permitindo assim que esta partícula consiga chegar em solo terrestre.

Assim, com a confirmação da relatividade especial, deu-se início a uma corrida para desenvolvimento de modelos subatômicos e de efeitos relativísticos, com impactos tanto na Mecânica, quanto no Eletromagnetismo, além do surgimento, poucos anos depois, do modelo padrão de física de partículas, que como veremos mais à frente, nasceu da fusão dos princípios da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade Especial.

Capítulo 03: Partículas Fundamentais

3.1 O que são Partículas?



Se dermos um *zoom* em uma gota d'água, veremos cadeias de moléculas de H₂O, se dermos mais um *zoom*, veremos os átomos de hidrogênio e oxigênio. Se tivesse como aplicarmos mais um último *zoom*, veríamos os elétrons orbitando o núcleo dos átomos. A partir daí não conseguiríamos dar mais nenhum *zoom*, porque essas partículas (os elétrons) são coisas fundamentais do universo, ou seja, elas não podem ser divididas e não compostas por nada mais fundamental do que elas. Isso que são partículas: os elementos físicos mais fundamentais da natureza e indivisíveis.

3.2 O Modelo Padrão

Se pudéssemos organizar todas as partículas fundamentais conhecidas até hoje e agrupá-las em uma tabela de fácil compreensão, onde poderíamos distinguir a que respectiva família de partículas aquelas correspondem seria de grande ajuda, correto? Correto. Esta tabela é uma forma de organização similar a maneira como é organizada a tabela periódica, sendo que no lugar de elementos químicos tem partículas fundamentais e bosons mediadores.

Ao ver qualquer tabela disponível sobre o modelo padrão vemos que, apesar de parecerem termos e nomes difíceis de entender, na verdade o modelo padrão pode ser muito didático e de fácil compreensão. Temos tipos de partículas diferentes, pertencentes à mesma família, justamente porque compartilham de características muitíssimo semelhantes e apresentam comportamentos similares.

Ao pesquisar “tabela do modelo padrão” note algo nas tabelas disponíveis online: estão faltando os componentes do núcleo atômico, ou seja os prótons e nêutrons. O que acontece? Eles não são partículas elementares! Pode parece um tanto quanto incomum, mas isso pode ser respondido por meio de uma simples pergunta: como os prótons, que deveriam se repelir, conseguem se manter coesos no núcleo? Precisa-se de uma interação (“força”) que vença a interação eletromagnética. Tal força é a conhecida força forte, que atua sob os quarks. É por isso (dentre outras coisas) que sabemos que os prótons são formados por quarks (ou seja, os prótons e nêutrons não são partículas fundamentais, porque são compostos de partículas mais fundamentais do que eles). [Thomson (2013, Seção 1.1)]

Férmions

Constituem a matéria que conhecemos, e são partículas que não podem ocupar o mesmo estado quântico. Por exemplo os elétrons e os quarks presentes no núcleo atômico (quarks, conectados pela força forte, cuja partícula associada é o glúon). Para o elétron, o múon e o tau, há seus respectivos neutrino.

Bósons

São as partículas conhecidas por serem as intermediadoras das interações entre outras partículas. Por exemplo, se um elétron é colocado próximo à outro elétron e estes interagem, o mensageiro responsável por essa interação é o fóton. Dizemos que o fóton é portanto um bóson.

3.3 Pontos Fora da Curva: O Modelo Padrão não é a Teoria Final

Apesar de o Modelo Padrão estar intimamente ligado à diversos Prêmios Nobel de Física, e a descobertas fundamentais na física de partículas, é um fato conhecido na comunidade científica de que este modelo está incompleto, pois possuem ainda diversas questões em aberto, como por exemplo:

- Gráviton - ainda não descoberto

A única interação que o modelo padrão não consegue nenhuma ou quase nenhuma informação sobre é a gravitacional. Todas as forças da natureza são bem descritas: a força forte, fraca e eletromagnética. Porém a força gravitacional é difícil demais de ser testada, justamente por ser extremamente fraca (dez elevado a trinta e nove vezes mais fraca do que a eletromagnética).



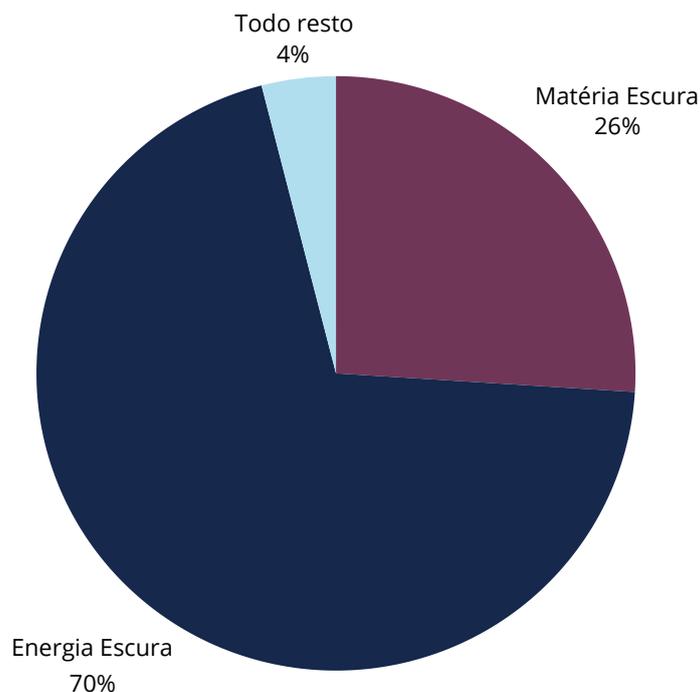
Temos algumas previsões teóricas sobre essa partícula hipotética que governa a força gravitacional, como por exemplo esperamos que tenha massa zero, já que essa interação viaja na velocidade da luz, assim como a eletromagnética.

- Assimetria matéria e antimatéria

Não há nenhuma explicação plausível no modelo padrão do porquê existir mais matéria do que antimatéria. É em situações assim que a Cosmologia se mostra de grande utilidade, pois combinando conhecimentos na área de Física de Partículas e Cosmologia, podemos talvez em um futuro próximo resolver questões como essas, com melhores modelos da realidade.

- Energia Escura e Matéria Escura

A energia escura, que exerce uma pressão negativa sobre o tecido do espaço-tempo, e portanto faz com que o universo se expanda, e a matéria escura (que será abordada nas próximas sessões) não são explicadas no modelo padrão atual. Isso é grave, pois essas duas combinadas correspondem a cerca de 96% da energia total do cosmos. Ou seja, o que conhecemos é apenas uma pequena fração. veja no gráfico a contribuição de cada item para a densidade de energia do universo [Veja um gráfico similar em Liddle (2015, p.168)]:



Parte II

**Além do Modelo
Padrão:
Astropartículas e
Matéria Escura**

Capítulo 04: Cosmologia - A física por trás dos Cosmos

Um dos principais áreas de interesse da Física de Astropartículas é a Cosmologia, justamente por causa da sua importância para validar nossas melhores teorias sobre a evolução temporal e térmica do universo, bem como entender o material e partículas dentro dele. É a partir dela que podemos estudar fenômenos que validam a Teoria do Big Bang e o modelo λ CDM, como por exemplo o parâmetro de Hubble H_0 (relacionado à expansão do cosmos, e, portanto, à idade do universo), o *redshift*, e a medição da abundância de elementos. Todos os termos e fenomenologias mencionados acima contribuem fortemente para o estudo do nosso universo, e descobrir suas características únicas, como por exemplo a sua expansão acelerada, as eras cosmológicas, entre outros.

4.1 O parâmetro de Hubble

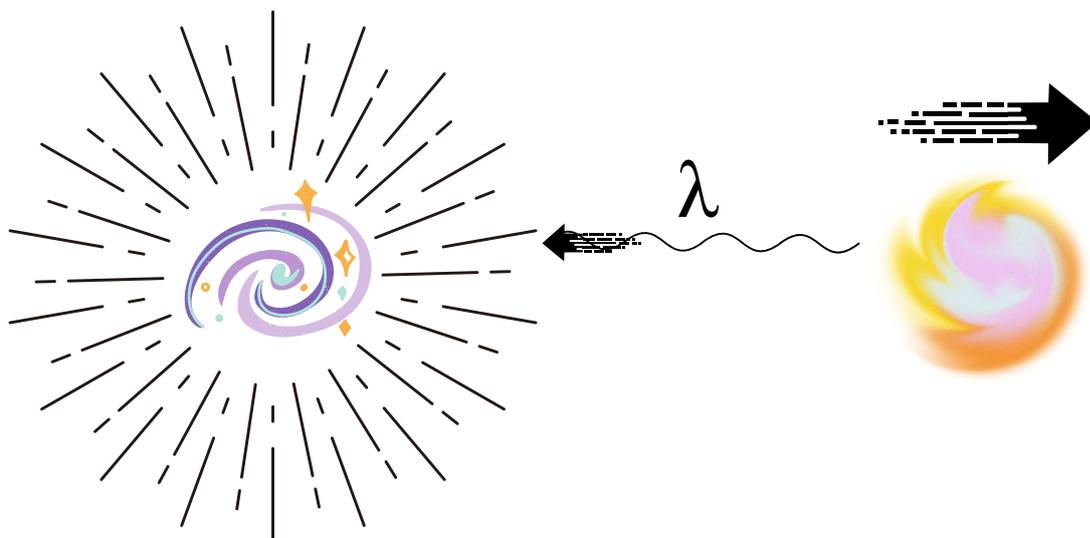
Em 1920, um astrônomo chamado Edwin Hubble observou por meio de dados de variadas galáxias que a velocidade radial com que as galáxias estavam se afastando da nossa não era zero, mas na verdade obedecia a equação de uma reta (linear) com relação à distância. Em outras palavras, ao plotarmos uma gráfico da velocidade radial das galáxias *versus* distância dessas mesmas galáxias com relação à nossa veremos uma linha de tendência linear, onde a constante angular é chamada de "Constante"/ Parâmetro de Hubble (constante não um termo apropriado, pois esta é na verdade uma função do tempo, ou seja, da idade do universo). O que isso implica: o universo está se expandindo. (para aprofundar no tema veja Ryden (2016, Seção 2.6))



4.2 Redshift

O efeito físico usado por Hubble para calcular a velocidade das galáxias próximas, e com isso descobrir que estão se afastando de nós é o efeito Doppler da Cosmologia, mais conhecido na literatura como redshift. Quando aponta-se um telescópio para o céu, ao olharmos as galáxias e corpos mais distante, observamos que estes apresentam um desvio para o vermelho. Esse efeito é muitíssimo conhecido no contexto de ondas sonoras, associado ao efeito *Doppler*: se um corpo que emite um som está se afastando de um observador com uma dada velocidade, então as linhas hipotéticas que usamos para representar a propagação desta onda sonora, se afastam uma da outra, produzindo um som mais grave (a frequência diminui).

Um efeito análogo acontece ao observamos uma galáxia que se afasta de nós: vemos que a luz (é importante lembrar que a luz pode ser interpretada como uma onda) que aquela galáxia produz chega até nós com um tom avermelhado, representando o fato físico de que aquela luz viajante teve sua frequência afetada e seu comprimento de onda se tornou maior para nós que observamos. O que isso implica: uma forte evidência de que o universo está a se expandir. [para mais detalhes, veja Ryden (2016, Seção 2.6)]



4.3 Abundância de Elementos Leves

Com uma temperatura da ordem de 10 MeV (Mega *eletronvoltz*), e portanto um universo antigo e dominado por radiação, temos que, com algumas condições iniciais relacionadas à curvatura do universo e à taxa de interação das partículas, podemos montar um modelo para formação de núcleos e aferirmos suas respectivas abundâncias em galáxias ou até mesmo localmente, confirmando ou não nosso modelo de expansão do universo (apesar de parecer simples, é um assunto extremamente delicado e envolve contas relativísticas).

Mas como isso pode se relacionar com Física de Partículas e Cosmologia? Veja que estamos tratando de um universo muito antigo e denso, logo associado à uma temperatura estratosférica, de modo que as partículas ali inseridas no fluido cósmico tem velocidades muitíssimo elevadas (lembre-se que quanto maior a temperatura em um determinado gás ou líquido, maior a vibração das partículas nele) e colidem de forma constante. A abundância que temos de elementos leves hoje são os que se formaram após o resfriamento do universo, quando as partículas e fótons energéticos perderam energia criando um ambiente propício a formação de átomos.

Quando associamos a taxa de interação entre as partículas com a velocidade de expansão do cosmos, chega-se à conclusão de que, dado que o universo se expande, inevitavelmente ocorrerá um momento em que a taxa expansão será maior do que a taxa de interação das partículas incluídas dentro do gás primordial, de modo que as partículas não conseguirão mais alcançar umas as outras. Dizemos na literatura que temos uma Abundância de Relíquias, as partículas que restaram (Veja em detalhes em Liddle (2015, p. 96))

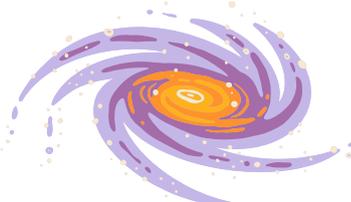


Capítulo 05: Além do Modelo Padrão - Matéria Escura

Como explicamos, foi visto que maior parte das coisas que tem massa no universo não são compostas pela matéria que é descrita no Modelo Padrão. Mas afinal o que seria essa matéria escura? Em poucas palavras, é uma matéria faltante no universo, algo que não é bariônico e que a princípio aparenta só interagir gravitacionalmente. É de fato uma coisa muito fora do comum, mas há diversas observações cosmológicas e astronômicas que validam sua existência. Vejamos:

- Curva de Rotação das Galáxias

Usando a 2ª Lei de Newton para os corpos celestes ao redor das galáxias para encontrar a relação entre velocidade radial e distância de um ponto qualquer até o centro da galáxia encontramos [Veja Ryden (2016, Seção 7.2)]:


$$\sum \vec{F} = ma \Rightarrow \frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Mas os dados observacionais nos dizem algo muito peculiar: a velocidade radial não é proporcional ao inverso da raiz de r , mas para longas distâncias, a velocidade é aproximadamente constante, algo crucial para manter a estabilidade de alguns tipos de estruturas. Foi aí que surgiu a ideia inicial de matéria escura: deve haver uma matéria nas bordas das galáxias formando um *halo*, tal que mantenha essa velocidade radial constante. Para isso ser verdade, precisamos que haja 10 vezes mais matéria escura do que matéria luminosa!

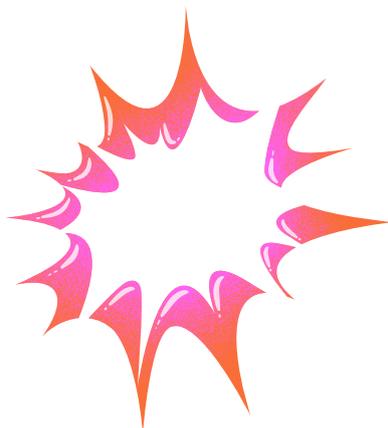
- Lentes Gravitacionais



A teoria da Relatividade geral prevê que a matéria, assim como a energia (estes são equivalentes) tem a capacidade de curvar o espaço-tempo ao redor. Se a matéria escura existe, então ao observarmos galáxias distantes devemos ver uma lente gravitacional devido a matéria luminosa e a matéria escura. Por exemplo quando observamos um desvio maior do que aquele levando em conta apenas matéria visível, então é um sinal forte de que pode haver matéria escura ali.

- Formação de Estruturas após o Big Bang

Após o nascimento do universo, não existe matéria bariônica o bastante para explicar a formação das galáxias e aglomerados de galáxias que podemos observar hoje. Portanto, a existência de matéria escura é usada como a atração gravitacional restante para formar estas estruturas. Consequentemente, a matéria escura começa a se combinar em uma rede complexa de halos de matéria escura bem antes da matéria ordinária, que “lutam” contra as forças de pressão dentro dessas estruturas. Além disso, sem matéria escura, a época de formação de galáxias ocorreria muito mais tarde no universo do que é observado.



Capítulo 06 - *The Big Picture: O que está acontecendo*



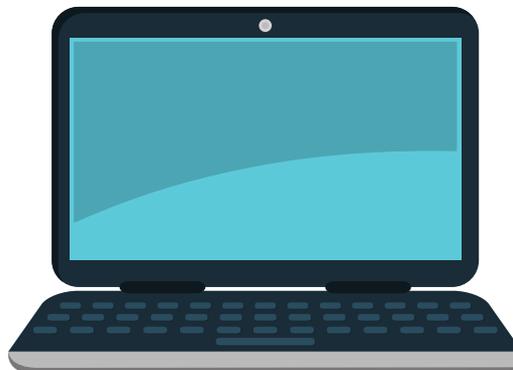
É indiscutível que tudo que foi feito aqui exige muito estudo e preparação, porque são temas e tópicos de anos de pesquisa e dignos de prêmios Nobel por diversos anos neste e no século passado. Dito isso, se tem um fato que podemos aferir é que a Física de Astropartículas é uma área que requer uma interdisciplinaridade e uma bagagem de conhecimento muitíssimo sofisticada.

Mas por que cada um desses temas tratados importa? A resposta é um tanto quanto complexa, mas basicamente porque são fenômenos que envolvem toda e qualquer interação da natureza! Usamos Relatividade Especial para não termos interpretações e resultados não coincidentes com os princípios da constância da velocidade da luz para todo e qualquer referencial inercial; usamos a Mecânica Quântica, porque estamos lidamos com as menores estruturas do universo; usamos Cosmologia porque essas pequenas estruturas tem severas implicações em nossos melhores modelos de comportamento do cosmos e das interações entre tais partículas no universo primordial; e por consequência, equações como as de Klein-Gordon e Dirac são as ferramentas matemáticas fundamentais que possibilitam estudar tais sistemas minúsculos de partículas no âmbito da Teoria Quântica de Campos.



As contribuições dessas áreas nos quais mencionamos e exploramos acima vai muitíssimo além do formalismo acadêmico. Na verdade, por incrível que pareça, é uma área com contato próximo do cotidiano das pessoas, pois engloba os mais variados setores

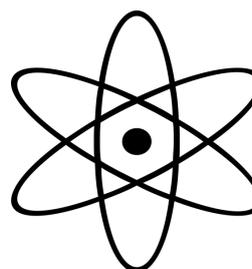
- Computação: a enorme quantidade de dados envolvendo pesquisa de física de partículas levou a construção e aperfeiçoamento de redes de computadores potentes e redes de armazenamentos de dados em larga escala



- Medicina: imagiologia por emissão de pósitrons (PET) e cristografia de raios-X



- Quântica: influência para a modelagem de computadores quânticos



Referências

THOMSON, M. Modern Particle Physics. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 570 p.

LIDDLE, Andrew. An Introduction to Modern Cosmology. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2015. 177 p.

RYDEN, Barbara. Introduction to Cosmology. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 276 p.