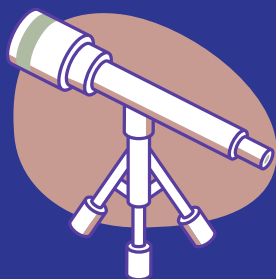
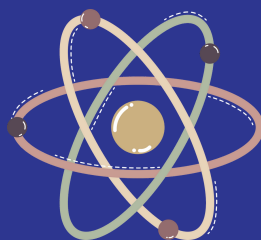


Introdução à Física de Partículas



e um prelúdio à Matéria Escura

Yasmim Andrade Diniz
Letícia Guedes

Sumário

Prefácio.....	3
Capítulo 1: Uma breve história da Cosmologia Moderna.....	4
Capítulo 2: Introdução à Relatividade Especial.....	5
Capítulo 3: Equações de Euler e Lagrange.....	8
Capítulo 4: Equações de Klein-Gordon e Dirac.....	10
Capítulo 5: Simetrias e Invariância de Gauge....	13
Capítulo 6: Modelo Padrão.....	15
Capítulo 7: Introdução à Matéria Escura.....	17

Prefácio

Este livro foi escrito com o intuito de introduzir conceitos de cosmologia e da física de astropartículas para alunos de graduação e ensino médio que tenham conhecimento básico da teoria do Eletromagnetismo Clássico. Todo o seu conteúdo foi pensado e criado inicialmente através das referências bibliográficas disponibilizadas por membros do grupo Astroparticles Natal da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Agradeço imensamente aos alunos de pós-graduação da UFRN/IIF (IIF - Instituto Internacional de Física) que auxiliaram na jornada para a conclusão deste livro, desde as aulas que ocorreram transmitidas pelo YouTube quanto a cada material didático e, principalmente, pelo esforço em tornar temas tão complexos acessíveis para alunos de graduação, como eu. Meus agradecimentos se estendem a minha família também por sempre me apoiarem na minha carreira, em especial ao meu noivo, Lucas, por tudo o que fez por mim.

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.

Capítulo 1: Uma breve história da Cosmologia Moderna

No início do século XX, o modelo que melhor representa o cosmos, de acordo com os físicos contemporâneos à aquela época, era um universo estático e eterno, representado pelo Modelo Cosmológico Estacionário. No entanto, observações conduzidas por Edwin Hubble na década de 1920 revelaram que as galáxias estavam se afastando umas das outras. Essa descoberta crucial apontava para uma expansão do universo, derrubando de uma vez a ideia de um universo estático.

A teoria do Big Bang (1927), que considerava o início do universo a partir de um estado extremamente denso e quente, foi proposta pelo físico e padre belga Georges Lemaître como uma forma de resposta sofisticada para as descobertas de Hubble. Logo mais, em 1965, houve a detecção da radiação cósmica de fundo em micro-onda que comprovou a teoria do Big Bang.

Outra descoberta fascinante para a Cosmologia foi a detecção de matéria e energia escura, que ainda possuem origens misteriosas, mas que são peças fundamentais na formação e evolução do cosmos.

É de extrema importância a compreensão de tais fenômenos, que interferem tanto no mundo macro quanto no microscópio do universo. Além do mais, tais fenômenos como a energia e matéria escura embora possuam suas bases e importâncias bem definidas, ainda não conseguimos relacionar suas origens com o Modelo Padrão de Partículas (ou qualquer outro modelo), tornando essa área da Física intrigante e com muitas descobertas a serem reveladas ainda.



Assim, para entender um pouco mais sobre a matéria escura, que será o item principal a ser discutido nesse texto, veremos outros assuntos e conceitos nos assuntos a seguir.



Capítulo 2: Introdução a Relatividade Especial

A primeira generalização que temos das leis do movimento começou com o célebre físico Isaac Newton (1643-1727). Essas leis são válidas apenas para referenciais inerciais, isto é, o referencial de um corpo parado ou se movendo com velocidade v constante, e elas obedecem as transformações de Galileu quando tratamos de uma mudança de referencial do sistema.

As leis descritas por Newton são invariantes para a transformação de Galileu (1564-1642), mas as leis de Maxwell (1831-1879) para o eletromagnetismo não eram, o que fez com que muitos físicos fossem atrás de uma solução que pudesse contemplar a transformação de Galileu e as equações de Maxwell. Com esse novo desafio em mãos, descobriu-se que não era possível unificar as duas ideias pelo seguinte motivo: a transformação de Galileu não era válida para altas velocidades. Com tudo, paralelo às novas descobertas e publicações recentes na Física, Einstein publicou suas descobertas em seu trabalho “Sobre a Eletrodinâmica de Corpos em Movimento” apresentando então a relatividade especial e deduzindo a cinemática das transformações de Lorentz (em substituição à de Galileu).

A proposta da relatividade especial se deu da seguinte forma: deve-se obter as equações de transformação entre dois sistemas (inerciais) se movendo uniformemente de modo que conserve a velocidade da luz. A partir daí examina-se as leis da Física nos sistemas, para saber se conservam a mesma forma ou não. As leis que não forem invariantes (que não se alteram ao aplicar-se um



conjunto de transformações) - de acordo com as equações de transformação - deverão ser generalizadas. Por fim, as equações obtidas após isso foram chamadas de transformações de Lorentz.

Para tanto, é válido ressaltar o Princípio da Relatividade:

- i. As leis da Física são as mesmas para todos os sistemas inerciais. Não existe sistema inercial preferencial.
- ii. A velocidade da luz no vácuo tem valor c (velocidade da luz) em todos os sistemas inerciais.

Voltando para as transformações de Lorentz, elas tratam sobre a contração do comprimento e a dilatação temporal:

Contração do comprimento: o comprimento de um objeto é máximo quando medido em repouso em relação ao observador. Quando ele se move com uma velocidade v relativa ao observador, seu comprimento medido contrai-se na direção do seu movimento enquanto suas dimensões perpendiculares à direção do movimento não são afetadas.

Contração do tempo: um relógio avança com máxima velocidade quando está em repouso em relação ao observador. Quando se move com uma velocidade v relativa ao observador, a sua velocidade de avanço é reduzida pelo fator γ , fazendo com que os relógios em movimento se atrasem em relação a relógios em repouso. Uma das aplicações importantes deste conceito é o estudo em física de partículas para o decaimento de múons.

É importante salientar que a adoção das transformações de Lorentz implica na modificação de algumas quantidades vindas da Mecânica Clássica no contexto da relatividade especial, tal como a adição de velocidades (velocidade relativa de uma partícula considerando dois sistemas inerciais).



A partir deste tópico, os próximos conteúdos abordados em cursos universitários de relatividade restrita fogem da temática de divulgação científica proposta pelo ebook. A seguinte bibliografia é adequada para aqueles que desejam se aprofundar teoricamente e/ou matematicamente em mais tópicos de uma das teorias mais importantes da Física: *Introdução à Relatividade Restrita* (Robert Resnick), *Física Moderna* (Paul Allen Tipler) e os livros didáticos dos cursos de Física: *Física Básica vol.4* (H. Moysés Nussenzveig) e *Fundamentos da Física - vol. 4 - Óptica e Física Moderna* (David Halliday; Robert Resnick; Jearl Walker)

Teoria revolucionária sobre a compreensão do espaço, tempo e energia

Capítulo 3: Introdução às Equações de Euler-Lagrange

Para entender os conceitos por trás das equações de Euler-Lagrange, além de ter uma boa base teórica da Física, é preciso entender Cálculo, sobretudo Cálculo Variacional (busca de máximos e mínimos de funções contínuas definidas sobre algum espaço funcional). Contudo, começaremos introduzindo os conceitos “rasos” e fica a cargo do leitor uma pesquisa profunda em Cálculo (caso não seja do seu conhecimento).

Ao longo de muitos anos de estudo, é de conhecimento geral que o universo não favorece grandes energias para executar uma ação e que as forças sempre procuram estados de mínima variância para suas oscilações de estado. Esse conceito é definido pelo Princípio da Mínima Ação (Princípio de Hamilton).

Com isso em mente, vamos passar para o conceito da mecânica de Lagrange. A lagrangiana (L) pode ser descrita como:

$$L(q, \dot{q}) = T - V$$

onde T representa a Energia Cinética, V a Energia Potencial Gravitacional e q são as coordenadas generalizadas do sistema.

Assim, a mecânica lagrangiana nada mais é que uma forma diferente de definir o movimento dos corpos, porém em vez de considerar as forças, como é a mecânica newtoniana, ela é descrita em termos das energias.



Contudo, precisamos usar o Princípio da Mínima Ação (Princípio de Hamilton) em conjunto com a lagrangiana para obtermos a equação de Euler-Lagrange, que é capaz de gerar as equações de movimento do sistema (assim como obtemos a equação de “sorvetão” considerando as forças na mecanica de Newton):

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

Equação de Euler-Lagrange

Também é possível obter as equações de movimento para o pêndulo simples e duplo usando a equação de Euler-Lagrange e, em muitos casos (como esses citados agora), ela se torna um modo bem mais fácil de resolver comparado ao formalismo de Newton. São incontáveis as aplicações para essa equação, que são muito abordadas no curso de Física, especialmente em Mecânica Clássica.

**Equação fundamental usada para
encontrar as trajetórias em
sistemas físicos**

Capítulo 4: Introdução às Equações de Klein-Gordon e Dirac

A Mecânica Clássica era capaz de descrever apenas o mundo macroscópico, deixando de lado o mundo microscópico, em meio a escuridão do conhecimento. Vendo este empecilho, os físicos passaram a olhar para o mundo micro e então surgiu a Mecânica Quântica. Com isso, e a comprovação experimental da Relatividade de Einstein, houve a necessidade de unificar as duas novas áreas da Física em uma só: a Mecânica Quântica Relativística, que é o formalismo utilizado para descrever o mundo das partículas.

Com isso em mente, vamos falar então das equações que descrevem as partículas. A equação de Klein-Gordon é uma equação atemporal que reconcilia a Relatividade Especial com a Mecânica Quântica. Entretanto, ela nos dá um resultado verídico apenas para partículas com spin 0 (spin é um conceito bem complexo, mas basicamente é uma propriedade intrínseca das partículas. A única partícula de spin 0 que temos até hoje é o bóson de Higgs).

Usando a equação da energia-momento de Einstein, basta escrever as equações como operadores que estão agindo sobre uma função de onda e usando a energia e operadores da Mecânica Quântica, para chegarmos na equação de Klein-Gordon com o tempo e espaço separados.

No entanto, além de só funcionar para spin zero, temos outro fator intrigante. O resultado retorna duas possibilidades: um resultado positivo e outro negativo para a energia. Embora na mecânica



clássica seja comum ignorar energias negativas, o mesmo não pode ser aplicado ao mundo quântico, a Mecânica Quântica não admite não admite energias negativas por ter relação direta com uma probabilidade (não existe probabilidade negativa), tornando a equação de Klein-Gordon insuficiente para sistemas relativísticos (entretanto, suas aplicações em Teoria Quântica de Campos são perfeitamente aceitáveis para descrever excitações de partículas de spin 0).

Não muito tempo depois, Paul Dirac (1902-1984) propôs em 1928 outra solução com muito sucesso para partículas de spin $1/2$. Além do mais, Dirac também contempla a existência de antipartículas no mundo quântico como uma interpretação física da “energia negativa” visto que, no caso da equação de Dirac, sua existência não apresentava mais incongruências. Assim, após inúmeras contas (encontradas em livros acadêmicos de Física de partículas) aplicando os operadores da Mecânica Quântica é possível dar fim ao impasse das energias negativas e finalmente obter a equação de Dirac.

A equação de Klein-Gordon descreve partículas sem spin na estrutura da mecânica quântica, enquanto a equação de Dirac descreve o comportamento dos férmions incorporando a teoria da relatividade especial

Capítulo 5: Simetrias e Invariância de Gauge

A invariância de Gauge é um dos conceitos fundamentais usados para sustentar e entender o Modelo Padrão, que é uma estrutura teórica que descreve as partículas fundamentais e as forças que interagem entre elas.

Uma simetria na física nada mais é que a equivalência de um sistema após algum tipo de transformação, ou seja, uma invariância após uma certa transformação. Por exemplo, se girarmos uma esfera, ela continuará sendo vista da mesma forma de qualquer lado, ou seja, ela tem uma simetria de rotação. Ou se invertermos um quadrado (como em um espelho) ele ainda será um quadrado, logo ele é invariante por reflexão (simetria reflexiva).

Alguns exemplos de simetrias são as de translação (um objeto se mantém o mesmo quando é deslocado em linha reta), rotação e reflexão, como foram citadas anteriormente. Existe, também, um teorema que descreve que simetrias contínuas correspondem a uma quantidade conservada, por isso, podemos associar uma simetria de translação à conservação do momento linear, assim como uma simetria de rotação está relacionada com conservação de momento angular.

Assim, a invariância de Gauge implica que o sistema é invariante sobre transformações de Gauge. Esse conceito surgiu a partir das equações de Maxwell (eletromagnetismo), pois podia se fazer uma transformação nos potenciais sem alterar, fisicamente, as equações. Com isso, as equações de Maxwell puderam ser escritas em apenas



duas equações em termos de potenciais com quatro quantidades a serem definidas, ao invés de quatro equações com seis quantidades a serem definidas, segundo o Eletromagnetismo Clássico.

Ressaltando a importância desse processo, as partículas presentes no universo interagem entre si por meio dos bósons de Gauge, que surgem devido à uma teoria de Gauge (na qual não vamos entrar em detalhes).

Princípio fundamental na teoria quântica de campos, indicando que as leis físicas permanecem inalteradas quando certas transformações de simetria são aplicadas aos campos

Capítulo 6: Modelo Padrão

Por volta dos anos 1980, estava se formando um quadro completo sobre as partículas já descobertas. Com muitas outras surgindo nos experimentos realizados nas décadas passadas, houve a necessidade de “catalogar” essas partículas em algo que pudesse descrever suas características, bem como suas interações. Surgiu assim o Modelo Padrão.

A Tabela 1 abaixo busca informar mais sobre o modelo de partículas mais importante na Física.

Modelo Padrão das Partículas Elementares

	três gerações da matéria (férmions)			interações / partículas mensageiras (bósons)	
	I	II	III		
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carga	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g glúon	H higgs
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ fóton	
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e elétron	μ múon	τ tau	Z bóson Z	
LÉPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	0	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e neutrino do elétron	ν_μ neutrino do múon	ν_τ neutrino do tau	W bóson W	
	$\approx 1.0 \text{ eV}/c^2$	$\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
				BÓSONS DE GAUGE BÓSONS VETORIAIS	BÓSONS ESCALARES

Imagem 1: Tabela de quarks, léptons, bósons e férmions (fonte: Wikipédia)

O Modelo Padrão tem por objetivo descrever as interações de três gerações de partículas por meio de três forças fundamentais, sendo mediadas através de seus próprios “transmissores de força”. As partículas existem em dois tipos básicos: os férmions, compostos por quarks e léptons (elétron, muon...), e os bósons (fóton...). Para todo férmion, há uma partícula de antimatéria correspondente.



A descoberta de tantas partículas se deu graças aos avanços tecnológicos, pois muitas detecções ocorrem nos aceleradores de partículas, como nas descobertas dos bósons Z e W, que foram previstos pelo modelo padrão teoricamente.

O Modelo Padrão foi uma grande realização da Física no século passado, mas ainda há questões em aberto como a não inclusão da gravidade. Postulou-se que haveria a existência de uma partícula chamada de "gráviton", que deveria transmitir a força da gravidade, mas (ainda) não foi comprovada a existência de tal partícula para incluí-la no Modelo Padrão, tornando-se mais um problema da física de partículas.

Estrutura teórica fundamental que descreve as partículas elementares e suas interações no universo conhecido, unificando forças eletromagnéticas, fracas e fortes

Capítulo 7: Introdução à Matéria Escura

A matéria escura é um “elemento” misterioso e invisível que compõe uma grande parte da massa total do universo. O primeiro sinal da existência de matéria escura se deu por volta da década de 1990, com as observações na velocidade das estrelas da galáxia de Andrômeda. Era esperado que as estrelas na parte mais externa da galáxia tivessem velocidades menores do que as estrelas mais próximas ao centro, contudo foi notado que ambas as estrelas tinham as mesmas velocidades, fazendo os cientistas teorizarem sobre uma massa invisível (matéria escura) atuando na galáxia.

É curioso o fato de que uma das parcelas mais abundantes no universo tenha origem desconhecida, por isso a matéria escura é um mistério de grande impacto. A distribuição desta matéria oculta influencia diretamente na formação e evolução de estruturas do universo, além de desacelerar significativamente a expansão do universo se comparado com o estimado para a matéria visível.

A matéria escura atrai diversos cientistas e entusiastas da Astronomia, desafiando as concepções convencionais e motivando esforços para desvendar esse mistério. Assim, é possível afirmar que por muitas décadas ainda haverá físicos teóricos para formular suas teorias e físicos experimentais em busca de provas (ou contraprovas) sobre o componente mais abundante do universo.

Forma misteriosa de matéria que não emite, absorve ou reflete luz constituindo a maior parte da matéria no universo observável

PROGRAMA DE FORMAÇÃO EM FÍSICA DE PARTÍCULAS E ASTROPARTÍCULAS

UMA INICIATIVA DE



INTERNATIONAL
INSTITUTE OF
PHYSICS
Federal University of Rio Grande do Norte