



Por que as coisas caem?

Níckolas de Aguiar Alves ^{id}

ABSTRACT: Algumas perguntas em Física Fundamental são tão simples e profundas que há milênios são perguntadas por todos, mas ainda seguem sem uma resposta plenamente satisfatória. O que é o tempo? Do que as coisas são feitas? Por que elas caem? Nesta apresentação, vamos discutir algumas das visões mais recentes sobre estas perguntas e, em especial, como o formalismo da Teoria Quântica de Campos em Espaços-Tempos Curvos nos ajuda a entender melhor a terceira.

KEYWORDS: Gravitação Quântica, Gravitação Semiclássica, Teoria Quântica de Campos em Espaços-Tempos Curvos, Relatividade Geral, Mecânica Quântica.

Sumário

1	Por que as coisas caem?	1
2	Relatividade Geral	1
3	Mecânica Quântica	2
4	Teorias Efetivas e Gravitação Quântica	3
5	Teoria Quântica de Campos em Espaços-Tempos Curvos	4
	Referências	5

1 Por que as coisas caem?

Existem questões em Física que são tão simples, mas tão profundas, que invadem o pensamento humano há milênios. O que é o tempo? Do que as coisas são feitas? Por que as coisas caem? Perguntas tão simples que pode ser feitas por uma criança, mas ao mesmo tempo tão complexas que seguimos sem respostas satisfatórias.

A Física Aristotélica já se preocupava com algumas destas questões. A saber, segundo Aristóteles (Russell 2004, Book I, Chap. 23), todos os objetos abaixo da Lua seriam formados por quatro elementos: água, terra, fogo e ar. A queda de objetos é entendida em termos da natureza de cada elemento: a terra é absolutamente pesada, e assim se move para baixo; o fogo é absolutamente leve, e assim se move para cima; a água é relativamente pesada; o ar é relativamente leve. Ademais, estes elementos tem a tendência de se mover em linha reta. Quanto ao movimento dos corpos celestes, estes são feitos de um quinto elemento, cuja tendência é se mover em círculos. Assim, entende-se do que as coisas são feitas e o porquê delas caírem.

É importante mencionar que em toda teoria que fala de movimento, assume-se alguma noção de espaço-tempo, isto é, assume-se a existência de alguma estrutura sobre a qual as coisas existem e sobre a qual se movem. No caso Aristotélico, este espaço-tempo possui as propriedades do espaço e do tempo serem absolutos para todos os observadores. Uma implicação disto é, por exemplo, que tem-se uma noção de repouso absoluto, por consequência da noção de espaço não ser relativa a observadores inerciais, como ocorre posteriormente no espaço-tempo de Galilei, por exemplo.

A Física contemporânea possui uma visão distinta. Hoje em dia, a Física Fundamental se apoia sobre dois pilares: a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral. A primeira diz respeito a do que as coisas são feitas, enquanto a segunda diz respeito ao espaço-tempo sobre o qual elas existem.

2 Relatividade Geral

A Relatividade Geral é uma teoria sobre o espaço-tempo que, por acaso, descreve o funcionamento da gravidade. Ela rege o comportamento do espaço-tempo sobre o qual

fenômenos físicos ocorrem. Porém, de maneira curiosa, também dita que o próprio espaço-tempo toma partido em fenômenos físicos.

Tal qual o espaço-tempo de Aristóteles e o posterior espaço-tempo de Galilei, o espaço-tempo relativístico fornece um palco sobre o qual fenômenos físicos ocorrem. Porém, a estrutura do espaço-tempo relativístico é mais complexa. Enquanto os espaços-tempos anteriores eram eternos e imutáveis, o espaço-tempo relativístico se curva ante à presença de matéria. Esta curvatura então afeta o movimento da própria matéria, resultando em um efeito que conhecemos pelo nome de gravidade. Como sumarizado por John A. Wheeler (Wheeler 2000, p. 235), em Relatividade Geral “O espaço-tempo diz à matéria como se mover; a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar”. Como consequência dessa relação entre a presença de matéria e a curvatura do espaço-tempo, temos o fato de que agora o espaço-tempo possui graus de liberdade. Ao invés de ser um mero palco, o espaço-tempo passa a ser parte integrante dos fenômenos físicos.

Além disso, a Relatividade Geral vem acompanhada de diversas mudanças nos conceitos de espaço e tempo que tínhamos desde o espaço-tempo de Galilei. Por exemplo, embora no espaço-tempo de Galilei o tempo seja uma entidade absoluta e idêntica para todos os observadores, isto não é mais verdade em contextos relativísticos. Agora, cada observador possui seu próprio relógio e o tempo passa em ritmos distintos para observadores distintos. Isto não é um mero detalhe experimental, mas algo fundamentalmente profundo sobre a natureza do tempo: é possível, por exemplo, que dois irmãos gêmeos envelheçam em ritmos diferentes por terem tido trajetórias distintas no Universo.

É interessante mencionar que no limite em que os efeitos gravitacionais são desprezíveis, a Relatividade Geral dá lugar à chamada Relatividade Especial.

3 Mecânica Quântica

A Mecânica Quântica é uma estrutura que deve ser respeitada por todos os graus de liberdade físicos. Ela dita as regras sobre qual é a informação necessária para caracterizar completamente um sistema físico, quais quantidades podem ser observadas, e assim por diante.

Na Mecânica Clássica, que antecede historicamente a Mecânica Quântica, os estados de um sistema são dados pela posição e momento de cada partícula do sistema. Em outras palavras, se conhecemos a posição e momento de todas as partículas do sistema, somos capazes de determinar qualquer observável do sistema (como energia, momento angular, etc). Isto se deve também ao fato de que os observáveis clássicos são funções da posição e do momento de todas as partículas.

Na Mecânica Quântica, o processo é bem diferente. Os estados são vetores num chamado espaço de Hilbert e os observáveis são matrizes agindo nesse espaço. Assim, a energia, por exemplo, é uma matriz. Ademais, nem todo estado possui energia bem definida: é possível termos estados em que há uma certa probabilidade de uma medição da energia fornecer um certo valor, mas uma outra probabilidade de fornecer um valor diferente. A teoria passa a prever probabilidades ao invés de sempre prever resultados definidos.

Um efeito curioso que temos então é que podemos ter uma partícula preparada num estado em que há 50% de chance de estar numa posição $x = -a$ e 50% de chance de estar numa posição $x = a$. Isto é, ao medirmos a posição da partícula, temos 50% de chance de obter um resultado e 50% de chance de obter o outro. Antes de fazermos a medição, a teoria não diz onde a partícula está*.

É importante notar que a Mecânica Quântica é uma estrutura, não uma teoria. Embora ela forneça as regras que devem ser respeitadas por sistemas físicos, ela não descreve um sistema físico em si. Para obtermos uma teoria, devemos modelar um sistema físico utilizando as regras da Mecânica Quântica. Em Física Fundamental, isto é feito dentro da Física de Partículas Elementares, por meio do Modelo Padrão da Física de Partículas. O Modelo Padrão é uma teoria quântica (no sentido de que respeita as regras da Mecânica Quântica) relativística (no sentido de que é cunhada sobre o espaço-tempo da Relatividade Restrita). O Modelo Padrão nos fornece uma descrição extremamente adequada sobre do que as coisas são feitas. Porém, é tipicamente formulado apenas na ausência de gravidade, visto que as interações entre partículas elementares são tipicamente muito mais intensas do que interações entre as partículas elementares e a gravidade.

Também relevante é o fato de que o Modelo Padrão se encaixa num framework de teorias ainda mais específico que a Mecânica Quântica no geral: o Modelo Padrão é dito ser uma teoria quântica de campos. Como o nome sugere, tais teorias descrevem o comportamento de campos, como o campo eletromagnético, de maneira quântica. Elas são algumas das estruturas mais fundamentais conhecidas pela Física contemporânea e implementam de maneira conveniente os princípios elementares da Mecânica Quântica e da Relatividade Restrita.

4 Teorias Efetivas e Gravitação Quântica

Neste ponto, é importante mencionarmos que a Física moderna entende todas as teorias conhecidas como teorias efetivas. Isto é, as entendemos como descrições adequadas dentro de certas escalas de tamanho ou energia, mas de modo algum acredita-se que elas tem a obrigação de funcionar em todas as escalas. Por vezes, escuta-se esta ideia sumarizada como “todas as teorias estão erradas, mas algumas são úteis”.

Um exemplo é a Mecânica Newtoniana. Embora hoje em dia saibamos que os graus de liberdade físicos deveriam respeitar a Mecânica Quântica e que a gravidade pode ser entendida em termos da Relatividade Geral, a teoria Newtoniana ainda fornece excelentes previsões em diversas situações, além de ser muito mais simples de se utilizar do que suas contrapartes mais modernas.

Este comentário é importante para nos lembrarmos que a Relatividade Geral e o Modelo Padrão também não possuem a obrigação de funcionar em quaisquer escalas, mas provavelmente deixarão de funcionar em certas escalas que ainda não fomos capazes de explorar experimentalmente. Por exemplo, dado que a Relatividade Geral prevê que o espaço-tempo possui graus de liberdade físicos, é esperado que esses graus de liberdade

*Há aqueles que dizem que a partícula está em dois lugares ao mesmo tempo. Isto é uma interpretação possível da matemática, mas eu a considero particularmente sensacionalista e pouco razoável.

devem respeitar as regras da Mecânica Quântica, ou seja, é esperado que vamos precisar obter uma teoria de Gravitação Quântica.

Podemos estimar as escalas em que uma tal teoria seria relevante. A gravitação é caracterizada pela constante da gravitação universal de Newton, G ; efeitos relativísticos são tipicamente caracterizados pela velocidade da luz, c ; efeitos quânticos são tipicamente caracterizados pela constante \hbar . Utilizando estas constantes e análise dimensional, obtém-se o chamado comprimento de Planck, l_P , dado por (Particle Data Group et al. 2020)

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616\,255(18) \times 10^{-35} \text{ m.} \quad (4.1)$$

A fins de comparação, as dimensões estudadas pelos experimentos em Física de Partículas atualmente são da ordem de $\sim 1 \times 10^{-18}$ m. Assim, temos uma grande diferença de escala entre o que conhecemos e as escalas envolvendo Gravitação Quântica, sendo esta diferença tão grande quanto tentar entender Física de Partículas a partir dos objetos de uma sala de estar.

Dada a pequenez do comprimento de Planck, será possível estudarmos a interação entre a Gravidade e a Mecânica Quântica de maneira robusta com os conhecimentos de hoje?

5 Teoria Quântica de Campos em Espaços-Tempos Curvos

Uma forma natural de aprender mais sobre a interação entre a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral consiste em simplesmente trabalhar com teorias quânticas no espaço-tempo dinâmico fornecido pela Relatividade Geral. Por exemplo, podemos considerar o que ocorre ao modificarmos o Modelo Padrão para que seja formulado em espaços-tempos curvos.

Tipicamente, lidar com o Modelo Padrão por inteiro é uma tarefa muito complexa. Antes de fazer isso, podemos tomar uma teoria quântica de campos mais simples. Escolhemos a teoria mais simples possível, que descreve uma partícula fictícia com propriedades tão simples quanto possíveis (por exemplo, uma partícula incapaz de “girar” em torno do próprio eixo*) e formulamos sua descrição num espaço-tempo curvo. Este processo, embora mais complicado que a formulação em espaços-tempos planos, é razoavelmente direto e não envolve passos especulativos. Ele consiste essencialmente em tomar uma teoria quântica de campos, que já é conhecida e bem testada no limite sem gravidade, e a adaptar de maneira tão simples quanto possível para um espaço-tempo pré-definido mais elaborado, espaço-tempo este descrito por uma teoria que também é extremamente conhecida e bem testada experimentalmente. O resultado é conhecido como teoria quântica de campos em espaços-tempos curvos. A grosso modo, este é o framework que descreve como partículas elementares caem.

Embora simples, esta é uma ideia poderosa e que forneceu profundas compreensões para a humanidade acerca do funcionamento da Mecânica Quântica e da Gravitação,

*De modo mais específico, uma partícula de spin zero.

além de nos conduzir a novas dúvidas. Por exemplo, uma das primeiras previsões feitas com este formalismo foi a previsão de Stephen Hawking de que buracos negros—entidades gravitacionais cuja gravidade é tão forte que nem mesmo a luz deles escapa—emitem partículas tal qual emitiria um corpo com temperatura bem-definida*, sendo esta temperatura inversamente proporcional à massa do buraco negro.

Após a surpresa com este resultado, o formalismo foi utilizado em contextos ainda mais simples para obter resultados ainda mais extraordinários. Por exemplo, houve a descoberta de que observadores em aceleração uniforme no espaço-tempo da Relatividade Restrita veriam um mar de partículas em uma distribuição térmica onde observadores inerciais não veriam nenhuma. A temperatura desta distribuição é proporcional à aceleração. Ou seja, o próprio conceito de partícula é relativo: na mesma situação física, um observador inercial pode estar congelando no vácuo, enquanto um observador suficientemente acelerado está cozinhando em meio a diversas partículas.

Não sendo isto suficiente, o resultado de Hawking deu um novo significado a já conhecidos teoremas da Relatividade Geral. Era sabido que a geometria espaço-temporal dos buracos negros respeita teoremas matemáticos muito semelhantes às Leis da Termodinâmica. A descoberta de Hawking de que buracos negros de fato tem uma temperatura bem-definida permitiu reinterpretar os rigorosos teoremas sobre buracos negros como casos particulares das Leis da Termodinâmica, que haviam sido descobertas de maneira fenomenológica décadas antes. Por meio dos buracos negros passamos a ter então estruturas que misturam efeitos termodinâmicos, gravitacionais e quânticos simultaneamente, trazendo novas perguntas sobre a estrutura fundamental do Universo.

Os sucessos deste formalismo não significam que ele está vazio de perguntas. Por exemplo, seguimos sem entender de maneira detalhada como os próprios campos quânticos curvam o espaço-tempo. Dado que eles também possuem energia e, na Relatividade Geral, tudo que possui energia gravita, é preciso que eles curvem o espaço-tempo também. Entender de modo detalhado† o como isso ocorre é ainda algo a ser feito. Na verdade, entender as interações entre campos quânticos em espaços-tempos curvos de modo detalhado é também algo a ser feito. Sem falar, é claro, que o formalismo da TQCEC é cunhado como método para estudar efeitos quânticos na gravitação de maneira simples, mas ainda temos o objetivo de entender de maneira aprofundada o que ocorre em Gravitação Quântica.

Referências

Particle Data Group et al. (14 de ago. de 2020). “Review of Particle Physics”. Em: *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2020.8**, p. 083C01. DOI: [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).

Russell, Bertrand (2004). *History of Western Philosophy*. London: Routledge.

Wheeler, John Archibald (2000). *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. Em colab. com Kenneth W. Ford. New York: Norton.

*Mais especificamente, um corpo negro.

†Mais especificamente, de modo não-perturbativo.