



e-Boletim de Física

International Centre for Condensed Matter Physics
Instituto de Física, Universidade de Brasília

Ano III, Fevereiro de 2014 • <http://www.boletimdafisica.com/> • eBFIS 3 002-1(2014)

Viagem no Tempo, uma possibilidade no Universo de Gödel

Alesandro Ferreira dos Santos

*Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso,
78060-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brazil.**

Nesse trabalho nosso objetivo é discutir, de modo breve, a solução de Gödel, uma solução exata das equações de Einstein da relatividade geral, dando ênfase a possibilidade de termos curvas tipo-tempo fechadas em nosso universo, em outras palavras, viagens ao passado, fato que incomoda a muitos.

Palavras-chave: Viagem no tempo; Universo de Gödel.

In this work our aim is to discuss, briefly, the solution of Gödel, an exact solution of Einstein's equations of general relativity, emphasizing the possibility of time curves under closed-type in our universe, in other words, travel to the past, a fact that bothers many.

Keywords: Time Travel; Gödel Universe.

A humanidade sempre tem buscado entender o que é o tempo, e quais as consequências que se pode obter a partir de tal definição. Desde as civilizações mais antigas, sempre houve uma ou mais definições para essa quantidade, denominada tempo. Como exemplos da evolução desse conceito podemos citar que: para Leibniz existe uma certa ordem das coisas, uma ordem ideal, na medida em que o tempo não pode ser concebido antes da existência das coisas, pois é justamente em relação à sucessão destas coisas que ele se compreende, ou seja, o tempo é a ordem das sucessões [1]. Já para Kant, há duas fontes de conhecimento no sujeito: a sensibilidade e o entendimento. Para ele, o tempo é uma forma de intuição a priori, uma estrutura da sensibilidade, a qual é pré-condição para a próxima etapa, o entendimento [2]. Santo Agostinho, um filósofo cristão de origem neoplatônica, que viveu entre os séculos IV e V e que, evidentemente, acreditava ter sido o universo criado por Deus, também se debruçou sobre o problema do tempo. Quando se deparava com questões tais como: há um marco inicial para o tempo? Esse início se deu junto com a criação do universo? E antes desse momento inicial? - Santo Agostinho afirmava que, antes de Deus criar o universo ele estava preparando o “inferno” para aqueles que fizessem essa pergunta e ainda, o tempo surgiu junto com a criação do universo [3]. Na verdade, há ao longo da história muitos filósofos e pesquisadores, de várias áreas do conhecimento, que tentaram dar uma definição objetiva e final para o tempo, mas ainda hoje, o tempo

continua tendo mistérios e sendo tema de debates entre estudiosos. Talvez, Santo Agostinho tenha resumido bem essa questão dizendo: “se ninguém me pergunta o que é o tempo eu sei, mas se alguém me pergunta, já não sei mais”.

Uma questão que está ligada à definição de tempo, e com a qual todos nós já nos deparamos alguma vez na vida é: podemos viajar no tempo? Tais viagens despertam interesses tanto em pesquisadores quanto em simples leitores, curiosos, uma vez que a possibilidade de voltar ao passado e mudar algum fator que poderia influenciar fortemente sua vida é algo que faz esse tema suscitar discussões entre as mais variadas pessoas em todo o mundo. Uma outra questão, muito interessante, que leva a sérios debates é: as leis físicas, que regem a evolução e desenvolvimento do nosso universo, permitem tais viagens? Antes de responder a tais perguntas, vamos analisar em que consiste viajar no tempo.

Na física newtoniana, viajar no tempo é seguir uma implacável marcha para frente em uma flecha do tempo. Em relatividade especial a restrição é ainda maior, pois além de se mover sempre para frente nessa flecha, há ainda um limite para a velocidade desse corpo, a velocidade da luz, ou seja, o movimento se dá dentro do cone de luz. Em relatividade geral, continua verdade que você deve mover-se dentro do cone de luz na direção para frente no tempo, mas isso se torna uma noção local, pois globalmente, o cone de luz pode ser inclinado, devido à ação da força gravitacional, de tal maneira que, mesmo indo sempre para frente no tempo, localmente, ele pode passar vários vezes pelo mesmo ponto no passado. Este fato caracteriza o que se conhece como curvas tipo-tempo fe-

* alesandroferreira@fisica.ufmt.br

chadas, as famosas CTCs (*do inglês Closed Timelike Curves*) [4]. De forma mais clara, viajar no tempo em uma curva tipo-tempo não fechada significa que somos capazes de mapear, de maneira contínua, o espaço-tempo, dividindo-o em duas regiões, de modo que possamos distinguir em que direções apontam o futuro e o passado de um vetor nele contido. Se esse mapeamento for possível, diremos que o espaço-tempo é temporalmente orientado. Se não for possível, não poderemos definir uma direção para a flecha do tempo, essa é a situação quando um espaço-tempo admite curvas tipo-tempo fechadas. Assim, a flecha do tempo é dinâmica, mudando de sentido e direção em cada ponto do espaço-tempo.

Agora podemos voltar a questão chave: podemos viajar no tempo? A resposta a essa pergunta, e, ao mesmo tempo, a intensificação dos debates, veio com a teoria da relatividade geral, desenvolvida por Albert Einstein em 1915. Primeiro, é importante destacar que a relatividade geral transforma o que se entendia por gravitação, que passa a ser descrita como uma consequência da curvatura do espaço-tempo e não mais como uma força, como definia Newton em sua lei da gravitação universal. Segundo, a relatividade geral também permite, a partir da análise de suas equações de movimento, a chamada solução de Gödel, obtida pelo lógico, matemático e filósofo Kurt Gödel, em 1949. Essa solução, que não agrada a todos, tem como uma de suas características as curvas do tipo-tempo fechadas, as CTCs. No entanto, essa não é a única solução da relatividade geral a permitir esse tipo de curva. Neste sentido, o primeiro modelo foi estudado por Van Stockum [5]. Temos também, o cilindro cósmico em rotação [6], corda cósmica em rotação [7], entre outros.

A comunidade de físicos sempre considerou esse modelo obtido por Gödel com certo incômodo, uma vez que para muitos no tempo não se volta, e mais, as leis da física obedecem a causalidade. Outros, ainda diziam que era um erro teórico das equações de Einstein permitir tal solução e que esse modelo deveria ser deixado de lado por não representar a realidade de nosso universo [8]. Um grupo de físicos, liderados por Stephen Hawking, construiu um princípio de proteção causal [9], o qual simplesmente exclui a solução de Gödel, argumentando que as CTCs não existem em nosso universo [10]. Entretanto, mesmo Hawking sendo um crítico da solução de Gödel, ele a incluiu em seu livro [11], onde discute algumas soluções exatas das equações de Einstein. Por outro lado, há um outro grupo de pesquisadores que acredita que essa solução deve ser estudada mesmo que não seja uma realidade, hoje, em nosso universo, pois serve como um laboratório teórico para várias propostas de gravitação modificada, além de trazer um novo paradigma para o tempo. Aqui, entenda-se como gravidade modificada aqueles modelos nos quais a teoria gravitacional de Einstein foi generalizada; ou seja, a ação de Einstein-Hilbert foi modificada com o objetivo de se tentar explicar alguns fenômenos ainda sem solução, tais como a expansão acelerada do universo e a busca

por um modelo de gravidade quântica. Como exemplo podemos citar, a gravidade $f(R)$ [13], a gravidade de Chern-Simons [12], a gravidade de Horava-Lifshitz [14], entre outros modelos. Portanto, para esse último grupo de pesquisadores, excluir essa solução é algo como dizer, vamos pular esse problema e evitar polêmicas. Em outras palavras, ignorar importantes discussões exibidas por tal solução. A seguir, vejamos as principais características que definem o universo de Gödel.

A solução apresentada por Gödel, em 1949, foi a primeira solução cosmológica das equações de Einstein com matéria em rotação [15]. Esta solução é estacionária, espacialmente homogênea e exibe certa simetria cilíndrica. A matéria nesse universo gira com velocidade angular dada por $\omega = 2\sqrt{\pi G\rho}$, onde G é a constante gravitacional de Newton e ρ é a densidade de matéria. A característica que mais tem chamado atenção na solução de Gödel é, como dito antes, a possibilidade de existirem curvas tipo-tempo fechadas. Essas permitiriam, ao menos em teoria, as viagens no tempo, mas especificamente ao passado, e desse modo, a causalidade seria violada globalmente. Entretanto, generalizações da métrica de Gödel, em coordenadas cilíndricas, tem sido propostas [16, 17]; e neste caso, o problema da causalidade tem sido estudado com mais detalhes. É possível então, distinguir três classes diferentes de soluções, caracterizadas pelas seguintes propriedades: (i) regiões onde não existem curvas tipo-tempo fechadas; (ii) existe uma sequência infinita de regiões alternando entre regiões causais e não causais; (iii) existe somente uma região não causal.

Embora a geometria de Gödel tenha as suas particularidades, tidas por muitos como estranhas, ela não difere em nada de outros modelos de geometria que representam o espaço-tempo, pois tem como fonte principal dois termos, um fluido perfeito, o mais simples conteúdo de matéria do universo, e uma constante cosmológica, que nesse modelo assume um valor específico. Na verdade, a principal particularidade associada a essa solução está ligada ao fato de que nesse modelo a matéria está em rotação; mas não é uma rotação global, trata-se de uma rotação local. Ou seja, fisicamente é como se a matéria em todos os pontos estivesse girando em torno de um eixo de rotação local. O modelo também descreve um universo estático; isto é, um universo sem expansão. A consequência imediata dessa rotação é que a geometria que descreve o espaço-tempo permite o aparecimento das curvas tipo-tempo fechadas. Sabemos que as curvas tipo-tempo em relatividade é um dos caminhos possíveis para um observador, mas nesse modelo ao caminhar ao longo de uma curva tipo-tempo fechada o observador estará mexendo com nossas concepções a respeito do tempo, uma vez que este observador pode passar várias vezes pelo mesmo ponto; ou seja, voltar ao passado. No entanto, este processo não viola qualquer dos postulados básicos da relatividade especial, pois o observador se move sempre dentro do cone de luz. A partir desse ponto, vamos analisar, então, como seria possível um observador fazer tal viagem a seu passado; ou seja, caminhar em uma

curva tipo-tempo fechada, uma CTC.

Surge então uma pergunta quase que natural: há a possibilidade de alguma força externa atuar sobre o corpo para que o mesmo siga o caminho de uma CTC? A resposta é sim; mas por quê? Pelo fato de que na geometria de Gödel uma curva CTC não é uma geodésica, a qual é definida como o caminho mais curto entre dois pontos no espaço-tempo. Caso fosse uma geodésica, apenas a ação da força gravitacional seria suficiente para fazer um determinado corpo seguir tal caminho. Isso significa que, nesse modelo, para caminhar em uma CTC é necessário a ação de uma força externa sobre o corpo. Mas isso não é verdade em todas as geometrias que possuem CTCs. De fato, há modelos em que tais curvas tipo-tempo fechadas são geodésicas; e assim, forças externas não são necessárias.

Novello descreve duas possibilidades para seguir sobre uma CTC na geometria de Gödel [18]: uma possibilidade seria através de um foguete e a outra, via aplicação de um campo magnético no corpo. Em um trabalho dedicado a discutir as consequências filosóficas de suas descobertas em relatividade geral, o próprio Gödel calculou a quantidade de combustível necessária para viajar ao longo de uma CTC em seu universo [19]. Ele baseou seus cálculos na densidade de energia do universo e assumiu que alguma coisa deveria ser capaz de transformar sua massa em energia, uma vez que, o consumo de combustível para esse movimento é extremamente elevado e que o corpo deveria atingir uma velocidade de, aproximadamente, 0,7 da velocidade da luz, para realizar essa viagem em um tempo t . Diante desses dados, Malament verifica se um foguete poderia fazer tal viagem [20]. Em princípio, o foguete poderia realizar essa viagem, mas há um problema: parte da massa do foguete é transformada em combustível; em energia. Em [20], também foram mostrados os cálculos que exibem a porcentagem

da massa inicial do foguete que seria transformada em combustível. Diante do exposto, tal possibilidade é tecnicamente inviável, uma vez que o observador, no foguete, queira retornar. A outra possibilidade é examinar as consequências ao aplicarmos um campo magnético em uma partícula carregada. O campo faz com que a partícula desvie sua trajetória para uma curva acelerada. Assim, controlando esse campo, podemos fazer a partícula acelerar de modo a seguir uma curva tipo-tempo fechada. Dessa forma, há pelo menos duas maneiras, em princípio, para se realizar uma viagem ao passado na geometria desenvolvida por Gödel.

Diante do exposto, podemos nos perguntar: por que esse modelo de universo está ausente da maioria dos livros de relatividade, uma vez que o mesmo é uma solução exata das equações de Einstein? Um motivo é aceito: quando apresentado à solução, Einstein expressou uma opinião francamente desfavorável. Em suas palavras, Einstein “não gostava do que via”. Isto foi, aparentemente, mais do que suficiente para levar a proposta de Gödel ao quase completo esquecimento. Este aspecto, vale ressaltar, assegura a influência que Einstein exercia na comunidade dos físicos. Por outro lado, Gödel é extremamente conhecido em lógica e matemática. De fato é considerado um dos maiores lógicos do século XX.

Em resumo, o espaço-tempo de Gödel não é um modelo realístico para o nosso universo; no entanto, nenhuma outra solução cosmológica provocou tantas discussões a respeito da estrutura formal do tempo, volta ao passado, ou violação de causalidade. Estas são questões que ainda incomodam a comunidade de físicos. Por outro lado, o universo de Gödel é uma possibilidade, mesmo que teórica, para muitos que ainda sonham com viagens de volta ao passado; e o mais importante é que, isso não ocorre só na ficção científica, a teoria desenvolvida por Albert Einstein também as permitem.

-
- [1] G. W. Leibniz, *Coleção Os pensadores. Correspondência com Clarke*. Tradução: Carlos Lopes de Mattos, Abril Cultural: São Paulo, 1974.
 - [2] I. Kant. *Crítica da Razão Pura*. Tradução de Manuela Pinto dos Santos e Alexandre Fradique Morujão, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.
 - [3] Santo Agostinho, *Coleção Os pensadores. Confissões*. São Paulo: Abril Cultural, 1980.
 - [4] S. M. Carroll, *An introduction to general relativity - Spacetime and Geometry*. Addison Wesley (2004).
 - [5] J. W. Van Stockum, *The gravitational field of a distribution of particles rotating around an axis of symmetry.*, Proc. Royal Soc. Edinb. **57**, 135 (1937).
 - [6] B. Jensen e H. H. Soleng, Phys. Rev. D **45**, 3528 (1992).
 - [7] S. Deser e R. Jackiw, Comments Nucl. Part. Phys. **20**, 337 (1992).
 - [8] M. Novello, *O que é cosmologia? A revolução do pensamento cosmológico*. Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 2006.
 - [9] S. Hawking, *The chronology protection conjecture*, Phys. Rev. D **46**, 603 (1992).
 - [10] M. Novello, *Do Big Bang ao Universo Eterno*. Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 2010.
 - [11] S. W. Hawking e G. F. R. Ellis, *The large scale structure of space-time*. Cambridge University Press, 1973.
 - [12] R. Jackiw e S.-Y. Pi, *Chern-Simons modification of general relativity*, Phys. Rev. D **68**, 104012 (2003), gr-qc/0308071.
 - [13] S. Nojiri e S. D. Odintsov, *Introduction to Modified Gravity and Gravitational Alternative for Dark Energy*, Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys. **4**, 115 (2007).
 - [14] P. Horava, *Quantum Gravity at a Lifshitz Point*, Phys. Rev. D **79**, 084008 (2009).
 - [15] K. Gödel, *An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations of gravitation*, Rev. Mod. Phys. **21**, 447 (1949).
 - [16] M. Rebouças e J. Tiomno, *On the homogeneity of riemannian space-times of Gödel-type*, Phys. Rev. D **28**, 1251 (1983).
 - [17] M. Novello e M. J. Rebouças, *Rotating universe with suc-*

- cessive causal and noncausal regions*, Phys. Rev. D **19**, 2850 (1979).
- [18] M. Novello, *Máquina do tempo - Um olhar científico*. Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 2005.
- [19] K. Gödel, *A remark about the relationship between relativity theory and idealistic philosophy*, in: Albert Einstein - Philosopher-Scientist, ed. P. A. Schilpp, Evanston, Ill. 555, (1949).
- [20] D. B. Malament, *Minimal acceleration requirements for time travel in Gödel space-time*, J. Math. Phys. **26**, 774 (1985).