

## Investigação do Papel das Constantes Fundamentais nas Leis da Física

## Investigation of the Role of Fundamental Constants in the Laws of Physics

### RESUMO

As constantes fundamentais da física possuem valores aparentemente arbitrários, ou seja, não é de nosso conhecimento o porquê de elas possuírem estes valores. Todavia, propriedades importantes do universo dependem diretamente desses valores, uma vez que, se fossem outros, o mundo seria completamente diferente, podendo até não ser capaz de produzir as moléculas complexas que compõem os organismos vivos. Há, portanto, um interesse científico na busca do entendimento da origem destas constantes e até mesmo em definir se estas são de fato constantes. A teoria de Brans-Dicke, formulada na década 1960, supõe que a constante gravitacional  $G$  seja um campo com uma dinâmica própria. Outras teorias que analisam a possibilidade de as constantes fundamentais não serem constantes foram desenvolvidas em anos posteriores, com diferentes níveis de sucesso. O presente trabalho objetivou a realização de uma revisão dessas teorias, com foco nos seus aspectos essenciais, buscando uma visão panorâmica geral sobre as constantes fundamentais. Em particular, examinamos a possibilidade de haver uma relação entre duas importantes constantes, a de Boltzmann e a de Planck.

**PALAVRAS-CHAVE:** Constantes fundamentais. Constante de Boltzmann. Constante de Planck.

### ABSTRACT

The fundamental constants of physics have apparently arbitrary values, that is, it is not known to us why they have these values. However, important properties of the universe depend directly on these values, since, if they were other values, the world would be completely different and may not even be able to produce the complex molecules that make up living organisms. There is, therefore, a scientific interest in seeking to understand the origin of these constants and even define whether they are in fact constant. Brans-Dicke's theory, formulated in the 1960s, assumes that the gravitational constant  $G$  is a field with its own dynamics. Other theories that analyze the possibility of fundamental constants not being constant were developed in the following years, with different levels of success. The present work aimed to carry out a review of these theories, with a focus on their essential aspects, seeking an overview of the fundamental constants. In particular, we examined the possibility of a relationship between two important constants, Boltzmann's and Planck's.

**KEYWORDS:** Fundamental constants. Boltzmann constant. Planck constant.

Ariely Bertolani Lex  
[ariely\\_lex@hotmail.com](mailto:ariely_lex@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Ronaldo Penna Neves  
[ronaldopneves@utfpr.edu.br](mailto:ronaldopneves@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Uma constante fundamental, a princípio, é definida como uma constante física independente do sistema de unidades, representada por um número sem dimensões. Essas seriam as únicas constantes estritamente universais. Todavia, o termo pode ser utilizado para referir-se a constantes físicas universais com dimensões, como por exemplo, a constante gravitacional. Uma constante sempre está associada a algum tipo de regularidade, portanto, identificar uma constante da natureza tem o significado de reconhecer um padrão de comportamento dos sistemas físicos.

“E apesar do fluxo constante de eventos em mutação, sentimos que o mundo tem um fundamento invariante, cujo aspecto geral permanece o mesmo. Também os físicos gostam de acreditar nisso.” (BARROW, John, 1994, p.122)

Nem todas as constantes são igualmente importantes. Algumas estão intimamente relacionadas às leis fundamentais, como, por exemplo, a constante gravitacional,  $G$ , enquanto, outras apenas descrevem características de um sistema físico, como, por exemplo, a massa do elétron. As constantes associadas a leis são geralmente consideradas mais importantes e vistas como constantes fundamentais. Dentre elas, existem três que são as mais importantes: a constante da velocidade da luz ( $c$ ), a constante gravitacional ( $G$ ) e a constante de Planck ( $h$ ). Contudo, há ainda um outro aspecto essencial: existem, no mínimo, três dimensões físicas que merecem ser distinguidas: tempo, comprimento e massa. As combinações das três constantes mencionadas acima geram, naturalmente, uma constante para cada dimensão: o tempo de Planck, o comprimento de Planck e a massa de Planck.

Os físicos constantemente buscam uma simplificação nas suas teorias, com a redução do número das constantes que aparecem nas equações matemáticas. Existem algumas constantes, porém que são adimensionais, impedindo que sejam eliminadas. (BARROW, 1994)

A busca por indícios que comprovem o fato de as constantes fundamentais da física variarem no tempo ou não é, atualmente, uma importante área de estudo do mundo acadêmico.

Dois questionamentos podem ser feitos a respeito das constantes da natureza, sendo o primeiro a respeito do valor que elas assumem. Estes valores poderiam ser diferentes, ou existe algum tipo de lei, de razão ou raciocínio que explique o determinado valor que uma constante pode assumir? Além disso, na hipótese de uma certa constante assumir um valor diferente, qual seria a consequência deste fato? Um segundo questionamento diz respeito às constantes que assumimos como tais: elas podem de fato ser tratadas como constantes, ou de determinada maneira variar. ou podem variar de alguma maneira?

Com o enfoque nas três constantes mais fundamentais, a possibilidade de cada uma delas não se tratar de uma verdadeira constante já foi investigada, sendo a primeira delas a constante gravitacional. Segundo Clifford Will (1996), a teoria de Brans-Dicke é definida como sendo uma teoria da gravitação com  $G$  variável. Recentemente, João Magueijo (2003) propôs uma teoria para a velocidade da luz variável e Sabine Hossenfelder (2013) verificou a possibilidade de a constante de

Planck variar com o tempo. Todas essas teorias são especulativas e não possuem comprovação experimental direta, todavia permanecem como alternativas viáveis.

O físico Alaor Chaves, em seu livro didático (CHAVES, 2007), apresentou a hipótese de que haveria uma relação entre duas constantes fundamentais, a de Planck e a de Boltzmann. Um dos objetivos do presente trabalho foi verificar a validade dessa hipótese.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre a temática de diversos aspectos relacionados às constantes da natureza.

O embasamento teórico foi adquirido em dos seguintes textos: “Teorias de Tudo: A Busca da Explicação Final”, cujo autor é John Barrow (1994); “Física Básica: Gravitações, Flúidos, Ondas, Termodinâmica” de Alaor Chaves (2007); “ A possibility to solve the problems with quantizing gravity” de autoria de Sabine Hossenfelder (2013); “Mais rápido que a Velocidade da Luz” de João Magueijo (2013); “O Grande, o Pequeno e a Mente Humana” autor Roger Penrose (1998); “Apenas Seis Números: As Forças Profundas que Controlam o Universo” de Martin Rees (2000) e “Einstein Estava Certo? Colocando a Relatividade Geral à Prova” cujo autor é Clifford Will (1996).

Na segunda etapa do trabalho, concentrou-se em examinar cuidadosamente a hipótese de Alaor Chaves, cujo raciocínio envolveu radiação de corpo negro. Especial atenção foi dada à lei de Stefan-Boltzmann.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente projeto, como elencado anteriormente, objetivou realizar uma revisão bibliográfica a respeito de temáticas relacionadas às constantes da natureza.

No desenvolvimento do projeto, foi possível alcançar embasamento teórico sobre as constantes fundamentais da natureza, os seis números que regem o Universo e a teoria de Brans -Dicke, bem como realizar a análise da hipótese proposta pelo físico Alaor Chaves.

John Barrow, em seu livro intitulado de “Teorias de Tudo: A Busca da Explicação Final”, apresenta uma visão geral a respeito do papel das constantes fundamentais da natureza. Diz ele:

“Dar a uma quantidade o epíteto de ‘constante da natureza’ é atribuir-lhe uma condição privilegiada no esquema das coisas.” (BARROW, 1994, p. 122.)

Na obra “Apenas Seis Números”, o autor Martin Rees afirma que o universo é modelado por apenas seis números, dois relacionados às forças básicas, dois fixando o tamanho e a textura do universo e os dois últimos relacionados às propriedades do próprio espaço. Esses seis números são:

- $N$ , que mede a intensidade das forças elétricas;

- $\epsilon$ , que define a intensidade da união entre os núcleos atômicos;
- $\Omega$ , que mede a quantidade de matéria em nosso universo;
- $\lambda$ , que corresponde a uma “antigravidade” cósmica;
- $Q$ , que representa a razão entre duas energias fundamentais na época do Big Bang;
- $D$ , cujo número representa o número de dimensões espaciais do mundo.

Caso qualquer um desses números fosse alterado, o universo seria tal que a vida não teria se desenvolvido. Segundo Rees:

“As leis da física e a geometria poderiam ser diferentes em outros universos, e isso oferece uma nova perspectiva a respeito dos valores aparentemente especiais que os seis números têm em nosso universo.” (REES, Martin, 2000, p. 23.)

O autor Clifford Will (1996) apresenta uma introdução conceitual à teoria escalar-tensorial da gravidade, conhecida como teoria de Brans-Dicke, que foi a primeira teoria formulada a investigar a possibilidade de uma constante fundamental da natureza não ser verdadeiramente constante. Dicke considerou experimentalmente métodos de detectar a variação da constante gravitacional  $G$  e apresentou questionamentos a respeito do trabalho de Einstein, indagando se o físico teria cometido equívocos em suas afirmações sobre a gravidade.

João Magueijo (2013), um físico português, propôs uma teoria na qual a velocidade da luz não é uma verdadeira constante, com o seu valor variando lentamente no tempo. A teoria dele se apresenta como uma hipótese concorrente a um aspecto do modelo cosmológico padrão aceito hoje em dia, uma fase pela qual o universo teria passado, conhecido como fase de *inflação*. Se a teoria de Magueijo for correta, a inflação não teria ocorrido.

A física Sabine Hossenfelder (2013) examinou a possibilidade de a constante de Planck, fundamental na mecânica quântica, não ser constante. Ela propôs que essa constante fosse, na verdade, um campo físico, que teria tido um valor nulo no início do universo, mas, depois, teria passado por uma evolução dinâmica, terminando por se estabilizar no pequeno valor não nulo que medimos hoje.

O texto de Roger Penrose (1998) destaca o papel fundamental das três constantes fundamentais,  $c$ ,  $G$  e  $h$ :

- A velocidade da luz ( $c$ ), tem uma relação direta com fenômenos relativísticos, tais como a relatividade do tempo e do espaço que são descritos pela teoria da relatividade restrita de Einstein. O valor de  $c$  é muito grande, mas é finito. Se seu valor fosse infinito, o mundo não seria relativístico. Isso também afetaria algumas propriedades dos campos elétrico e magnético, já que a luz é uma onda eletromagnética.
- A constante gravitacional ( $G$ ), está relacionada ao fenômeno da gravitação. Seu valor é relativamente pequeno; se fosse nulo, não haveria, no universo, nenhuma força de atração gravitacional.

- A constante de Planck ( $h$ ), diz respeito aos fenômenos quânticos, que são importantes em escalas muito pequenas, como a dos átomos e das partículas elementares. Seu valor é bem pequeno; se fosse nulo, não existiriam fenômenos quânticos.

Percebemos, então, que na proposta feita por Hossenfelder, o universo começaria totalmente não quântico e só passaria a apresentar as propriedades que reconhecemos hoje como quânticas depois, quando  $h$  adquirisse um valor não nulo.

O ponto final do presente trabalho foi averiguar, com base no trabalho de Chaves, a possibilidade de duas constantes, a de Boltzmann ( $k_B$ ) e a de Planck ( $h$ ), serem relacionadas entre si.

A constante de Boltzmann desempenha um papel importante na mecânica estatística. Ela aparece na definição estatística da entropia:

$$S = k_B \ln W, \quad (1)$$

onde  $W$  representa o número de microestados de um sistema físico que são macroscopicamente equivalentes.

Chaves apresenta a seguinte hipótese:

“Ao concluir esta seção, julgamos estar preparados para dar uma resposta à pergunta original. Inicialmente, temos de admitir que qualquer universo que não viole as leis da lógica é em princípio possível. Como a quantização não parece ser uma exigência da lógica, seria possível a existência de um universo não-quântico. Mas tal universo seria deveras muito estranho. Nele, não poderia haver uma grandeza como a entropia, pois seu valor seria infinito. Ou, alternativamente, nesse universo a constante de Boltzmann também teria de ser nula. Na verdade, há pelo menos mais outra razão para que um valor finito para  $k_B$  requeira um valor também finito pra  $h$ . O fato é que, se  $k_B$  fosse finito e  $h$  fosse nulo, qualquer corpo irradiaria uma quantidade infinita de energia térmica. Esse fato, conhecido como catástrofe do ultravioleta, foi descoberto tão logo tentaram entender a irradiação térmica a partir da mecânica estatística. De fato, Planck postulou um valor finito para  $h$  exatamente para fugir dessa predição catastrófica. No presente estágio da ciência. Ainda não sabemos dizer qual é a origem das constantes universais. Mas a discussão que acabamos de apresentar parece indicar que a constante de Boltzmann e a de Planck estão estreitamente entrelaçadas, e que a compreensão de uma delas requer a compreensão da outra.” (CHAVES, 2007, p. 226.)

Em essência, Chaves afirma que caso  $h = 0$ , então  $k_B = 0$ . Ele cita duas razões para que sua proposição seja válida. A primeira é que, segundo ele, com  $h$  nulo, qualquer sistema físico possuiria uma entropia de valor infinito. Isso tem relação com a equação (1): em um mundo não quântico, em que  $h = 0$ , o número de microestados macroscopicamente equivalentes,  $W$ , seria infinito, forçando a entropia a ser infinita. Logo, para manter a entropia finita com  $W$  infinito,  $k_B$

também teria de ser nulo. Entretanto, este argumento não é totalmente convincente, uma vez que Chaves associa  $W$  com o “número de pontos” em um certo espaço de fase, e o número de pontos em qualquer volume ou superfície é infinito. Todavia, as coisas não funcionam desta maneira, pois a medida de um volume (ou de uma área) não corresponde à contagem dos pontos lá contidos; faz perfeitamente sentido que um volume (ou área) seja finito (ou finita), apesar de ele ter infinitos pontos. E  $W$  é proporcional ao volume (ou área); não há motivo para preocupação com o número infinito de pontos. Logo,  $h = 0$  não implica que  $W$  tenha de ser infinito, o que destrói o argumento.

O segundo argumento citado pelo autor diz que, em um mundo não quântico, todo corpo irradiaria uma quantidade infinita de energia térmica. Para evitar que ocorra este fato, teríamos de ter  $k_B = 0$ . Podemos analisar este argumento através da lei de Stefan-Boltzmann, segundo a qual a potência irradiada por um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. A constante de proporcionalidade é a constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma$ . Essa constante tem a seguinte expressão matemática:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \quad (1)$$

Evidentemente, é perceptível o raciocínio de Alaor Chaves: quando  $h = 0$  com  $k_B$  finito,  $\sigma$  se torna infinito. Contudo, a presença de outra constante fundamental nessa expressão é ignorada:  $c$ . Podemos ter ambas  $k_B$  e  $\sigma$  finitas com  $h = 0$ , desde que  $c$  seja infinita. Isso significa que não haveria radiação térmica infinita num mundo não quântico ( $h = 0$ ), desde que ele fosse, também, não relativístico ( $c$  infinito). Assim, é possível admitir que a análise de Chaves seja incompleta, uma vez que ela se restringe a somente duas constantes, não levando em consideração o que ocorre com as demais.

## CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado no presente trabalho, é possível sintetizar que foi feito um estudo de revisão bibliográfica a respeito da temática das principais constantes fundamentais da física, uma vez que, os principais conceitos foram absorvidos e, por conseguinte, a hipótese específica do físico Alaor Chaves, a possibilidade da existência da relação entre duas importantes constantes, a de Boltzmann e a de Planck, fora averiguada.

Por fim, pode-se concluir que a análise realizada por Alaor Chaves trata-se de um estudo incompleto, uma vez que, não é condizente restringir-se a apenas duas constantes, desprezando as demais constantes envolvidas.

## REFERÊNCIAS

BARROW, John D. **Teorias de Tudo: A Busca da Explicação Final**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1994.

CHAVES, Alaor. **Física Básica: Gravitações, Fluidos, Ondas, Termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

HOSSFELDER, Sabine. *A possibility to solve the problems with quantizing gravity*. Phys. Lett. B 725 (2013), pp. 473-476.

MAGUEIJO, João. **Mais Rápido que a Velocidade da Luz**. Rio de Janeiro: Record, 2003.

PENROSE, Roger. **O Grande, o Pequeno e a Mente Humana**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP (UNESP/Cambridge), 1998.

REES, Martin. **Apenas Seis Números: As Forças Profundas que Controlam o Universo**. Rio de Janeiro: Rocco, 2000.

WILL, Clifford M. **Einstein Estava Certo? Colocando a Relatividade Geral à Prova**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1996.