

Filosofia nas Controvérsias Científicas

Questão: Os físicos precisam de filosofia?

1. Física e Filosofia

O trabalho do físico se concentra em pelo menos quatro pontos centrais: (1) desenvolvimento da linguagem *matemática* para representar fenômenos do mundo natural; (2) realização de *experimentos* para explorar este mundo; (3) elaboração de programas *computacionais* que simulem um modelo do mundo físico ou que processem dados; (4) investigação dos *conceitos* das teorias científicas e geração de novas ideias.

Além disso, há pelo menos quatro outras atividades periféricas que são importantes na interface entre ciência e sociedade: (5) desenvolvimento de aplicações *tecnológicas*; (6) *ensino* e divulgação científica; (7) *organização* do trabalho científico, por meio de políticas de incentivo e distribuição de recursos; (8) ciência “complementar”: história, filosofia, psicologia e sociologia da ciência.

Dos pontos centrais da física, a filosofia da ciência (mencionada no último item) se debruça principalmente sobre o ponto (4), estudando os conceitos da física, seu significado, desenvolvimento histórico e problemas. O ensino de ciências também se debruça sobre conceitos (além dos outros três itens centrais, de maneira introdutória), mas ele não procura se deter nos problemas não-resolvidos da ciência, ao contrário da filosofia, que prospera no terreno das questões sem solução definida.

Há dois tipos principais de investigações em filosofia da ciência. A análise das coisas existentes no mundo físico, e dos conceitos que a eles se referem, é chamada de *ontologia*, que significa “estudo do ser” ou daquilo que existe. Por outro lado, a discussão de como a investigação científica funciona, quais os traços gerais de sua metodologia, e qual a relação entre teoria e realidade, recebe o nome de *epistemologia*, ou “estudo do conhecimento”. Às vezes, o termo “epistemologia” é usado em um sentido mais amplo, englobando a ontologia.

O trabalho dos físicos geralmente se dá sem a necessidade de reflexões filosóficas sobre sua atividade. Será que a filosofia tem alguma utilidade para o físico? Iniciemos com uma citação de Albert Einstein:

A relação recíproca entre a epistemologia e a ciência é de uma espécie notável. Elas são dependentes uma da outra. Epistemologia sem contato com a ciência torna-se um esquema vazio. Ciência sem epistemologia – na medida em que isso até seja pensável – é primitiva e confusa. No entanto, quando o epistemólogo, que busca um sistema claro, consegue desbravar o caminho e atingir tal sistema, ele tende a interpretar o conteúdo teórico da ciência em termos do seu sistema e a rejeitar qualquer coisa que não se encaixe em seu sistema. O cientista, porém, não pode se dar ao luxo de levar tão longe sua busca por uma sistemática filosófica. Ele aceita de bom grado a análise conceitual epistemológica; mas as condições externas, que lhe são colocadas pelos fatos da experiência, não permitem que ele se deixe restringir em demasia, na construção de seu mundo conceitual, pela aderência a um sistema epistemológico. Assim, ele deve parecer para o epistemólogo sistemático como um tipo de oportunista inescrupuloso: ele aparece como um *realista* enquanto busca descrever um mundo independente dos atos da percepção; como um *idealista* enquanto olha para os conceitos e teorias como invenções livres do espírito humano (não deriváveis logicamente do que é dado empiricamente); como um *positivista*, enquanto considera que seus conceitos e teorias são justificados *apenas* na medida em que fornecem uma representação lógica das relações entre as experiências dos sentidos. Ele pode até parecer como um *platônico* ou *pitagórico*

enquanto considera o ponto de vista da simplicidade lógica como um instrumento indispensável e efetivo de sua pesquisa.¹

Na visão de Einstein, o cientista pode então ser caracterizado como um “oportunista inescrupuloso”, que não é capturado pelos rótulos estanques dos filósofos da ciência. Mesmo assim, este cientista projetado por Einstein é alguém que adota diferentes posturas filosóficas em diferentes momentos. Esclareceremos o significado dessas mencionadas posturas filosóficas nos Caps. III e IV.

Mas nem todos os físicos concordam que a filosofia tenha importância em seu trabalho. Richard Feynman teria colocado isso de maneira bem humorada: “A filosofia da ciência é tão útil para a ciência quanto a ornitologia o é para os pássaros.” Steven Weinberg intitulou um capítulo de livro “Contra a filosofia”, apesar de seu ataque ser principalmente contra os relativistas e os positivistas (sendo ele em boa medida um realista):

Não desejo negar o valor da filosofia, muito do qual nada tem a ver com a ciência. Não desejo nem mesmo negar o valor da filosofia da ciência, que, no que ela tem de melhor, me parece uma ilustração da história e das descobertas da ciência. Mas não devemos esperar que a filosofia forneça aos cientistas de hoje uma orientação efetiva sobre como conduzir seus trabalhos ou sobre o que eles poderão encontrar.²

Na pesquisa diária que visa a publicação de *papers*, geralmente não há lugar para questionamentos que fujam da ciência “normal”, ou seja, do trabalho de resolução de charadas dentro do “paradigma” vigente – para usar os termos do historiador e filósofo da ciência Thomas Kuhn. Exemplos de paradigmas científicos seriam a mecânica newtoniana, a química a partir da tabela periódica, a síntese entre evolução e genética (na biologia), a tectônica de placas nas geociências, e o resultado de duas grandes revoluções na física do século XX: a teoria da relatividade e a física quântica.

Apesar de reconhecer que a atividade de ciência normal não envolve muita filosofia, Kuhn aponta uma ocasião especial em que os cientistas filosofam:

Creio que é sobretudo nos períodos de crises reconhecidas que os cientistas se voltam para a análise filosófica como um meio para resolver as charadas de sua área de estudos. Em geral os cientistas não precisaram ou mesmo desejaram ser filósofos. Na verdade, a ciência normal usualmente mantém a filosofia criadora à distância e provavelmente faz isso por boas razões. Na medida em que o trabalho de pesquisa normal pode ser conduzido utilizando-se do paradigma como modelo, as regras e pressupostos não precisam ser explicitados.³

As crises enfocadas por Kuhn são aquelas que precedem uma grande revolução científica. Mas há um outro tipo de crise em que os cientistas fazem uso intenso de argumentos filosóficos: as controvérsias científicas.

¹ EINSTEIN, A. (1949), “Remarks concerning the essays brought together in this co-operative volume”, in Schilpp, P.A. (org.), *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, pp. 663-87. Citação na pp. 683-4.

² WEINBERG, S. (1996), *Sonhos de uma teoria final*, Rocco, Rio de Janeiro (orig.: 1992), p. 134. Sobre a citação ornitológica de Feynman, não se sabe ao certo sua origem, mas ela é citada por diversos autores, como na p. 32 de KITCHER, P. (1998), “A plea for science studies”, in Koertge, N. (org.), *A house built on sand*, Oxford U. Press, pp. 32-56. Há vários vídeos no Youtube mostrando Feynman filosofando ou falando mal dos filósofos!

³ KUHN, T.S. (1978), *A estrutura das revoluções científicas*, trad. da 2ª ed. de 1970 por B.V. Boeira & N. Boeira (com numeração dos capítulos alterada), Perspectiva, São Paulo, p. 119 (orig.: 1962).

2. Controvérsias Científicas

Uma controvérsia científica pode ser definida como uma disputa pública persistente, envolvendo parcelas significativas da comunidade científica, sem fácil resolução, envolvendo argumentos “epistêmicos” (ou seja, argumentos considerados próprios do método científico) e também *fatores não-epistêmicos*, como emoções, traços de personalidade, pressões institucionais, influências políticas, rivalidades nacionais, eventos fortuitos e até fraude. Controvérsias científicas envolvem diferentes crenças ou opiniões, sendo uma disputa relativa basicamente a fatos, ao passo que controvérsias políticas, éticas e tecnológicas envolvem um conflito de diferentes atitudes ou propostas de ação, sendo uma disputa relativa a valores.⁴

Podem-se dividir as controvérsias científicas e tecnológicas em quatro grupos: (a) Controvérsias entre teorias científicas ou relativas à evidência experimental, como no debate recente entre as teorias das cordas e da gravitação quântica em laço, que examinaremos na seção I.4. (b) Controvérsias quanto a aplicações tecnológicas, como no caso da energia nuclear, ou quanto à ética na pesquisa, como no caso da tecnologia de edição genética em bebês humanos. (c) Controvérsias entre concepções científicas e não-científicas, como na disputa envolvendo o heliocentrismo entre Galileo e o Cardeal Bellarmino, ou entre a teoria biológica da evolução e o criacionismo (*design* ou desenho inteligente). (d) Controvérsias quanto a prioridades em descobertas ou invenções, como na disputa entre Mayer e Joule relativa à determinação do equivalente mecânico do calor.

O encerramento de uma controvérsia pode se dar de cinco maneiras: (i) Por correção: argumentos são dados ou evidência é encontrada, justificando cientificamente que um dos lados da disputa é “correto” e o outro “errado”, como na controvérsia relativa ao heliocentrismo. (ii) Por consenso: A força de uma posição supera as outras, e um consenso é atingido, mesmo sem argumentos conclusivos; nesse caso, a controvérsia pode ressurgir posteriormente, como na controvérsia dos quanta entre Niels Bohr e Einstein. (iii) Por procedimento: um procedimento formal é adotado para encerrar a controvérsia, por exemplo por votação ou decisão governamental, como na decisão de não se construir o Superconducting Supercollider no Texas. (iv) Por morte natural: a controvérsia irresoluta deixa de despertar interesse e é esquecida. (v) Por negociação: uma solução minimamente satisfatória para as partes é obtida, sem que uma posição predomine totalmente.

Controvérsias científicas surgem geralmente quando as evidências experimentais ou aplicações práticas se tornam escassas. Assim, os argumentos usados passam a envolver críticas de natureza filosófica, e mesmo sociológica.

⁴ McMULLIN, E. (1987), “Scientific controversy and its termination”, in Engelhardt, Jr., H.T. & Caplan, A.L. (orgs.), *Scientific controversies*, Cambridge U. Press, pp. 49-91. A divisão em quatro grupos que vem a seguir foi inspirada no site *Understanding science*, da U. California em Berkeley. Sobre o encerramento de controvérsias, seguimos BEAUCHAMP, T. (1987), “Ethical theory and the problem of closure”, pp. 27-48 do livro editado por Engelhardt & Caplan.

3. A Unificação da Física Fundamental

Como primeiro exemplo de controvérsia científica, tomemos um exemplo recente que transcorre na física teórica, que envolve a unificação da teoria quântica com a teoria da relatividade geral. Antes de tratar dessa controvérsia, vale a pena fazer um pequeno resumo da história da física teórica fundamental no séc. XX, em seu esforço de *unificação* das forças da natureza, no que às vezes é chamado de “teoria de tudo”, mas que claramente não explica diversos aspectos de sistemas complexos, como o fenômeno da consciência humana.

A mecânica quântica é a teoria que descreve o comportamento dos átomos e de sua interação com radiação. Formulada em 1925-26, por Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan, Erwin Schrödinger e Paul Dirac, ela apresenta uma visão de mundo bastante diferente daquela da física clássica, partindo da noção de que a matéria ordinária (e não só a radiação) tem propriedades ondulatórias. A teoria funciona muito bem para sistemas de poucas partículas, e como fundamento para a mecânica estatística, mas há dificuldades de estendê-la para sistemas macroscópicos, o que inclui a dificuldade de descrever o aparelho de medição em termos quânticos.⁵

A outra grande revolução ocorrida na física no início do séc. XX começou com a teoria da relatividade restrita, iniciada por Hendrik Lorentz e Henri Poincaré e arrematada por Einstein, em 1905, e Hermann Minkowski. Segundo esta teoria, a velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os referenciais inerciais, mas não as medições de comprimento e duração temporal entre dois eventos. O trabalho de Einstein culminou com sua teoria da gravitação (1916), a teoria da relatividade geral.⁶ Assim como a física quântica, esta teoria tem uma base de confirmação excelente, mas ela também tem seus limites, por exemplo na descrição de buracos negros e do início do universo (o *Big Bang*).

O próprio Einstein buscou desenvolver uma teoria que unificasse a gravitação e o eletromagnetismo, mas o caminho a ser trilhado era árduo demais. O caminho encontrado pela física passou primeiro pelo desenvolvimento da teoria quântica de campos relativísticos, em 1946-49, que além da simetria entre partículas e antipartículas, incorporou a noção de um vácuo quântico polarizável. Esta eletrodinâmica quântica foi desenvolvida por Shinichiro Tomonaga, Hans Bethe, Julian Schwinger, Feynman e Freeman Dyson, e a geração de “partículas virtuais” a partir do vácuo levou a cruciais correções nas massas e cargas medidas para elétrons.⁷

⁵ Há diversos livros que discutem os princípios da física quântica e seus problemas conceituais. Em português, uma introdução voltada para o ensino médio é apresentada por FREIRE JR., O. & CARVALHO NETO, R.A. (1996), *O universo dos quanta*, FTD, São Paulo. Uma discussão dos problemas filosóficos é apresentada em: HERBERT, N. (1989), *A realidade quântica*, Francisco Alves, Rio de Janeiro, e em GRIBBIN, J. (1988), *À procura do gato de Schrödinger*, Presença, Lisboa. Vários livros apresentam capítulos com boas introduções à mecânica quântica, como GREENE, B. (1999), *O universo elegante*, trad. J. Viegas F^o, Companhia das Letras, São Paulo, cap. 4, e PENROSE, R. (1991), *A mente nova do rei*, Campus, Rio de Janeiro, cap. 6. Uma discussão de questões mais recentes é apresentada por ZEILINGER, A. (2005), *A face oculta da natureza*, trad. L. Repa, Globo, São Paulo.

⁶ Para a teoria da relatividade restrita, um texto bem introdutório é: LANDAU, L. & RUMER, Y. (1985), *O que é a teoria da relatividade*, Humus, São Paulo (orig. em russo: 1959). Ver também: STACHEL, J. (org.) (2001), *O ano miraculoso de Einstein*, trad. A.C. Tort, Ed. UFRJ, Rio de Janeiro. Das referências mencionadas na nota anterior, GREENE (1999), caps. 2 e 3, e PENROSE (1991), caps. 5 e 7, cobrem as duas teorias da relatividade. Sobre a corroboração experimental da relatividade geral (até 1986), ver WILL, C.M. (1996), *Einstein estava certo?*, trad. M.G.F. Perpétuo, Ed. UnB, Brasília.

⁷ Hoje em dia temos acesso a relatos confiáveis dos conceitos e da história da física moderna através da internet. Um sítio bastante rico é o das palestras do Prêmio Nobel, em http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates. Para mais detalhes da história da eletrodinâmica quântica, pode-se consultar SCHWEBER, S.S. (1994), *QED and the men who made it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*, Princeton U. Press.

Em 1963, Sheldon Glashow, Weinberg e Abdus Salam mostraram como unificar as forças eletromagnética e nuclear fraca, que seriam a mesma interação a temperaturas acima de 10^{15} K, mas sofrendo “quebra espontânea de simetria” após os primeiros instantes do big bang. Previram a existência de três bósons de interação, observados em 1973 e 1984. O ponto alto do projeto de unificação das forças da natureza ocorreu com o desenvolvimento teoria das forças nucleares fortes, a cromodinâmica quântica, e a formação do chamado “modelo padrão”, em torno de 1974. Trata-se de uma teoria quântica de campos relativísticos que unifica as forças eletromagnética, fraca e forte, fazendo uso da noção de invariância de calibre (*gauge invariance*), e de famílias de partículas elementares que incluem quarks, léptons e bósons de interação. A última previsão de partícula, feita por esta teoria, foi verificada em 2012: a existência do bóson de Higgs.⁸

Nota-se também que os métodos das teorias quânticas de campo relativístico também foram aplicados com sucesso em outro contexto, o da física da matéria condensada.⁹

4. A Controvérsia das Cordas

A teoria das cordas surgiu em torno de 1970 como uma explicação para dados observados em aceleradores para interações envolvendo a força nuclear forte. Após a derivação de uma expressão matemática, pelo italiano Daniele Veneziano, que descrevia esses dados, Yoichiro Nambu, Holger Nielsen e Leonard Susskind postularam independentemente que haveria cordas minúsculas cujos modos normais de oscilação gerariam famílias de partículas de diferentes massas (energias). A divisão e recombinação dessas cordas explicariam as interações entre partículas. Até 1974, várias propriedades interessantes foram desenvolvidas na teoria: a possibilidade de unificar todas as interações, inclusive a gravidade; a descrição tanto de bósons quanto férmions, por meio da propriedade de supersimetria; a necessidade de trabalhar em muitas dimensões, tipicamente nove dimensões espaciais, sendo que seis estariam “enroladas”.

O interesse inicial na teoria diminuiu, até que John Schwarz & Michael Green publicaram um artigo em 1984, demonstrando que a teoria das cordas é finita e consistente, carecendo de certas anomalias comuns a teorias unificadoras. Isso gerou a chamada 1ª revolução das cordas, levando à solução de diversos problemas teóricos, por meio de geometrias multidimensionais sofisticadas. Mas a proliferação em diferentes tipos de teorias acabou dispersando o interesse dos físicos. A situação mudaria novamente em 1995, com a 2ª revolução das cordas, e a proposta de Edward Witten de unificar as diversas teorias, no que veio a ser chamada a teoria M, em um espaço-tempo de onze dimensões. Em seguida, Joe Polchinski mostrou que a teoria deveria conter não só cordas, mas também membranas de 2 ou mais dimensões espaciais, chamadas “branas”. E por fim, o argentino Juan Maldacena e

⁸ Em português, uma apresentação conceitual bastante didática do modelo padrão é: ABDALLA, Maria Cristina B. (2006), *O discreto charme das partículas elementares*, Ed. Unesp, São Paulo. Ver também WEINBERG (1996), op. cit. (nota 2). Em inglês: SCHUMM, B.A. (2004), *Deep down things: the breathtaking beauty of particle physics*, Johns Hopkins University Press, Baltimore. Para um relato histórico detalhado da descoberta da partícula de Higgs, ver WU, San Lan (2014), “Brief history for the search and Discovery of the Higgs particle – a personal perspective”, <https://arxiv.org/pdf/1410.6453.pdf>.

⁹ Para uma discussão histórica deste compartilhamento metodológico, ver: JOAS, C. (2010), “Campos que interagem: física quântica e a transferência de conceitos entre física de partículas, nuclear e do estado sólido”, in Freire Jr., O.; Bromberg, J. & Pessoa Jr., O. (orgs.), *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*, Eduepb/Livraria da Física, Campina Grande, pp. 109-52.

outros conseguiram construir um modelo de buraco negro, por meio das branas, que explicava bem as propriedades termodinâmicas dessas concentrações altíssimas de matéria.¹⁰

A teoria das cordas é apenas uma dentre várias tentativas de unificar a gravidade com as outras três interações, e certamente a que tem tido maior sucesso. No entanto, em 2006 surgiram dois livros bastante críticos com relação às pretensões deste programa de pesquisa, escritos por Lee Smolin e por Peter Woit, lançando o que veio a se chamar “a controvérsia das cordas”.¹¹ O argumento principal é que a teoria das cordas não tem conseguido obter previsões empíricas que possam ser testadas experimentalmente (ver seção seguinte). Dentre as críticas mais técnicas, está a de Smolin de que uma teoria de gravitação quântica teria que ser “independente de fundo”, ou seja, não deveria impor restrições sobre as condições de contorno do universo, isto é, sobre a métrica do espaço-tempo. Ao passo que não há uma formulação da teoria das cordas que seja independente de fundo, Smolin defende que a teoria da gravitação quântica em laço (ver seção I.7) consegue isso. As críticas de Smolin e Woit são um bom exemplo de como os físicos lançam argumentos de ordem filosófica e sociológica. Do lado sociológico, Smolin reclama que a alocação de verbas e contratações para os físicos trabalhando com a teoria das cordas são desproporcionalmente altas em relação ao que é dedicado aos programas de pesquisa rivais, na busca da unificação da gravitação com as teorias quânticas de campo relativísticos.

5. Confirmação e Falseabilidade de Teorias

O que faz com que uma teoria científica seja considerada melhor do que outra? Vamos supor que tenhamos duas teorias físicas rivais, como ocorria na década de 1840, com a teoria ondulatória da luz e a “teoria da emissão”, que era a teoria corpuscular da luz proposta por Isaac Newton. Como cada uma dessas teorias se modificava com o tempo, diante de novos experimentos e resultados teóricos, podemos falar em “programas de pesquisa” rivais. Em 1850, Léon Foucault mostrou experimentalmente que a luz se propaga mais rapidamente no ar do que na água, *confirmando* as previsões da teoria ondulatória e *falseando* as previsões da teoria da emissão.

Ambas as teorias eram “falseáveis”, ou seja, elas deixavam claro quais seriam os resultados experimentais que estariam em desacordo com as suas previsões. Como argumentou bem Karl Popper¹², *apenas teorias falseáveis devem ser consideradas científicas*. A teoria ondulatória era falseável, mas com o experimento de Foucault ela foi confirmada, ou “corroborada”, como preferia Popper. Após esse teste, que passou a ser considerado “crucial”, a teoria da emissão foi abandonada pela maioria dos cientistas. Às vezes se fala que uma teoria foi “refutada”, mas esse adjetivo é geralmente muito forte, pois às vezes o que parece

¹⁰ Bons relatos conceituais sobre a teoria das cordas encontram-se em GREENE (1999), op. cit. (nota 5), e também no crítico SMOLIN, L. (2006), *The trouble with physics*, Houghton Mifflin, Nova Iorque, caps. 7-9. Ver também: ABDALLA, E. & CASALI, A. (2003), “Cordas, dimensões e teoria M”, *Scientific American Brasil* 10, março, pp. 28-35. Um estudo da perspectiva da filosofia da ciência é: DAWID, R. (2013), *String theory and the scientific method*, Cambridge U. Press.

¹¹ SMOLIN (2006), op. cit. (nota 10), e WOIT, P. (2006), *Not even wrong*, Basic Books, Nova Iorque. Uma resposta foi dada na resenha escrita por POLCHINSKI, P. (2007), “All strung out?”, *American Scientist* 95(1), p. 1. Em nossa disciplina, apresentamos uma tradução de trechos dessa controvérsia entre Smolin & Polchinski (ver “A controvérsia das cordas”, na página do curso).

¹² POPPER, K.R. (1974), *A lógica da pesquisa científica*, trad. L. Hegenberg & O. Silveira da Mota, Cultrix/EDUSP, São Paulo. Versão incompleta em *Os Pensadores*. Em inglês: *The logic of scientific discovery*, Hutchinson, London, 1959. Orig. em alemão: *Logik der Forschung*, Springer, Viena, 1934. Ver seções 6 e 20.

ser uma refutação aparentemente absoluta acaba sendo explicada por algum erro experimental ou por algum refinamento da teoria falseada. Já o termo “falseado” não diz nada sobre se a teoria é verdadeira ou falsa: ele apenas diz que um experimento confiável foi realizado e um resultado proibido pela teoria foi obtido.

Apesar de a teoria ondulatória ter sido confirmada, ela continuou sendo falseável, como seria de se esperar de uma teoria científica. E o programa de pesquisa da teoria ondulatória da luz continuou forte e progressivo, passando por vários testes, mas nem todos, até ser falseado de maneira notável pelos experimentos do efeito fotoelétrico de Robert Millikan, em 1916.

Segundo os críticos da teoria das cordas, ela “não é nem falsa”, pois não poderia ser falseada. Será que eles têm razão?

Parte da razão pela qual a teoria das cordas não faz nenhuma previsão nova é que ela parece vir em um número infinito de versões. Mesmo se nos restringirmos a teorias que concordam com alguns fatos observados básicos a respeito do nosso universo, como seu tamanho imenso e a existência de energia escura, sobram em torno de 10^{500} distintas teorias das cordas (ou seja, o dígito 1 seguido de 500 zeros), mais do que todos os átomos do universo conhecido. Com um número tão vasto de teorias, há pouca esperança de que possamos identificar o resultado de um experimento que não seria abarcado por uma delas. Assim, o que quer que os experimentos mostrem, a teoria das cordas não pode ser falseada. [...] (SMOLIN, 2006, p. xiv)

6. A Escala de Planck

Tanto a teoria das cordas quanto outras teorias da gravitação quântica atribuem significado especial para o comprimento de Planck ℓ_p , que foi derivado pelo pioneiro da teoria quântica, Max Planck, em 1899, ao buscar exprimir uma grandeza com unidades de comprimento, em termos de três constantes fundamentais da natureza: a constante gravitacional G , a velocidade da luz c e a constante (reduzida) de Planck da física quântica, \hbar . Seu resultado foi $\ell_p = \sqrt{G\hbar/c^3}$, cujo valor é $1,6 \cdot 10^{-35}$ m.

Conjectura-se que a escala em que as diferentes interações têm a mesma intensidade seja na escala de Planck ou próxima a ela. Uma corda poderia ter um tamanho bem maior do que o comprimento de Planck, e mesmo assim ser bem menor do que o tamanho de um próton. Já para a teoria da gravitação quântica em laço, o comprimento de Planck é a unidade fundamental em um universo discretizado, e a unidade fundamental de tempo seria o tempo de Planck (dividindo-se ℓ_p por c), da ordem de 10^{-43} segundos.

7. Teoria da Gravitação Quântica em Laço

A teoria da gravitação quântica em laço (ou *loop*, em inglês) parte de uma formulação das equações da teoria da relatividade geral de Einstein em termos de um campo de calibre (de maneira semelhante à teoria quântica de campo relativístico do modelo padrão), desenvolvida pelo indiano Abhay Ashtekar, em 1986. Em cima disso, Smolin, Carlo Rovelli e outros colegas interpretaram a métrica do espaço-tempo como linhas de força de um campo elétrico, e conseguiram quantizar o campo com independência de fundo.

O espaço-tempo quântico obtido é discretizado em unidades de comprimento de Planck e do tempo de Planck. Isso pode ser visto como uma rede de pontos ligados por segmentos de reta. A rede resultante é semelhante a “redes de spin”, usados na década de

1960 por Roger Penrose para descrever a gravitação. As partículas elementares estariam associadas a nós e os campos aos segmentos entre os nós; o movimento dessas partículas se daria em passos discretos, de nó em nó. O movimento da matéria e energia, por sua vez, alteraria o padrão de conectividade da rede, o que refletiria na estrutura do espaço.¹³

O espaço contínuo, como o conhecemos, seria uma propriedade *emergente* das estruturas no comprimento de Planck, que se comportariam de maneira aleatória, flutuando ao sabor do princípio de incerteza quântico, como uma “espuma”. Tal concepção do espaço como uma propriedade emergente é compartilhada por muitos teóricos das cordas.

O debate sobre se a estrutura udekométrica¹⁴ do espaço e rekométrica do tempo é discretizada ou contínua nos remete ao paradoxos de Zenão (Cap. V). Será que tal paradoxo tem alguma relevância para o debate atual?

¹³ Sobre a teoria da gravitação em laço, ver SMOLIN, L. (2002), *Três caminhos para a gravidade quântica*, trad. W.J. Maciel, Rocco, Rio de Janeiro, caps. 9-10, e também SMOLIN, L. (2004), “Átomos de espaço e tempo”, *Scientific American Brasil* 21, fevereiro, pp. 56-65. Outro texto sobre os “tijolos” que comporiam o espaço e o tempo é: AMBJØRN, J.; JURKIEWICZ, J. & LOLL, R. (2008), “Universo quântico auto-organizado”, *Scientific American Brasil* 75, agosto, pp. 28-35.

¹⁴ Os seguintes prefixos métricos são usados oficialmente para as escalas cada vez mais pequenas, de mil em mil vezes menores: mili (10^{-3}), micro (10^{-6}), nano (10^{-9}), pico (10^{-12}), femto (10^{-15}), ato (10^{-18}), zepto (10^{-21}) e yocto (10^{-24}). A partir deste ponto, não há regra oficial, mas uma proposta bastante divulgada é a seguinte: xeno (10^{-27}), weko (10^{-30}), vendeko (10^{-33}) e udeko (10^{-36}). O comprimento de Planck seria em torno de 16 udekômetros, mas o tempo de Planck é ainda inefável. Se inventarmos teko (10^{-39}), seko (10^{-42}) e reko (10^{-45}), a nova proposta para o crônion seria em torno de 100 rekossegundos. Inefável também é o “comprimento de Compton” do Universo, com valor em torno de 10^{-85} m! Ver: SCHILLER, C. (2012), *Motion mountain: the adventure of physics*, vol. I: *Fall, flow, and heat*, www.motionmountain.net, Munique, pp. 51, 390.