

O experimento de Tales

Richard Kerner

Sorbonne-Université, Paris, França

Resumo

Há mais de 2500 anos, o filósofo grego Tales de Mileto descobriu um teorema geométrico que lhe permitiu avaliar a altura da Grande Pirâmide no Egito comparando o comprimento de sua sombra com o comprimento da sombra projetada pelo bastão vertical ao mesmo tempo. Ao fazer isso, Tales estava usando três definições independentes de linha, e geometria em geral, provenientes de três reinos da física: gravidade, física quântica e atômica, e ótica. No presente trabalho analisamos as implicações físicas e filosóficas da coincidência entre três definições de espaço físico e sua geometria.

Abstract

More than 2500 years ago ancient Greek philosopher Thales of Miletus discovered a geometrical theorem that enabled him to evaluate the height of Great Pyramid in Egypt comparing the length of its shadow with the length of shadow cast by vertical stick at the same time. By doing so, Thales was using three independent definitions of straight line, and of geometry in general, coming from three realms of physics: gravity, quantum and atomic physics, and optics. In the present paper we analyze physical and philosophical implications of the coincidence between three definitions of physical space and its geometry.

Palavras-chave: Tales de Mileto, geometria, física

Keywords: Thales of Miletus, geometry, physics.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31678](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31678)

1 Introdução: Tales e a Grande Pirâmide

Tales de Mileto ($\Theta\alpha\lambda\eta\sigma$, 625–547 A.C.) foi considerado pelos gregos antigos como um de seus *Sete Sábios*, o pai da abordagem científica para a descrição dos fenômenos naturais e, talvez, a primeira pessoa merecedora do título de matemático. Ficou famoso pela sua previsão do eclipse solar de 585 A.C., e pela sua capacidade de avaliar dimensões de objetos distantes, através da comparação de suas sombras com a sombra de um bastão de dimensão conhecida.

A relação de proporcionalidade usada por Tales para determinar a altura da Grande Pirâmide, no Egito, também é uma introdução à *dependência linear*, que constitui a essência da álgebra linear. Essa experiência fundamental tornou-se tão comum que seus aspectos físicos raramente são considerados de maneira mais detalhada.

De fato, Tales realizou um importante experimento físico relacionando diferentes definições de geometria; para ser mais preciso, as noções de re-

tas e ângulos retos. Acontece que, os fenômenos envolvidos neste experimento pertencem a diferentes domínios da física: gravitação, mecânica quântica e eletromagnetismo. O fato de que eles levam a três definições diferentes de geometria, mas compatíveis entre si, sugere que esses aspectos distintos da realidade física aparentemente estão relacionados. Esse fato dá origem a uma das questões mais importantes e fundamentais sobre a física e a nossa percepção do mundo físico, ainda em aberto depois de mais de vinte e cinco séculos.

2 As três definições de geometria

Vamos analisar as premissas e hipóteses que permitiram a Tales chegar às suas conclusões e formular o teorema das linhas paralelas que interceptam duas linhas que formam um ângulo entre si.

As duas primeiras suposições são que, na Figura 1, o segmento de reta OQ' no solo é real-

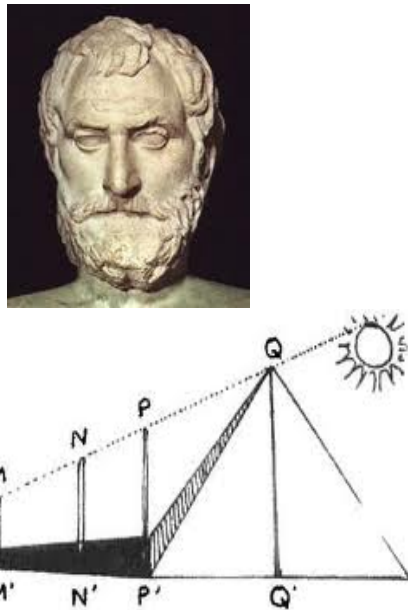


Figura 1: Tales de Mileto e a representação esquemática do seu experimento: as razões entre os comprimentos dos objetos verticais e as próprias sombras são constantes, $MM' : OM' = QQ' : OQ'$.

mente uma linha reta, e que os dois segmentos, a altura da pirâmide QQ' e o bastão MM' também são retas e formam o mesmo ângulo com a linha do solo $OM'Q'$ (neste caso, o ângulo reto de 90°). Esta é uma afirmação física e o fato de os dois objetos serem retos e verticais pode ser verificado usando os instrumentos conhecidos, baseados na exploração da gravidade.

Ambos os instrumentos mostrados na Fig. (2) são baseados no uso do campo gravitacional da Terra, que define localmente planos com direções verticais e horizontais (superfícies equipotenciais). O fato dos dois segmentos serem verticais e retos baseia-se no pressuposto de que a corda sustentando um objeto pesado no campo gravitacional na superfície da Terra pode servir como definição de uma *linha reta vertical*. A horizontalidade do solo pode ser verificada usando o mesmo princípio. Para ser mais preciso, o fato de que a corda que suporta o objeto pesado adquire uma forma reta é devido à tensão à qual a corda está submetida por causa da força gravitacional.

Uma linha reta pode ser obtida dessa maneira mesmo dentro de um satélite artificial que orbita em torno da Terra, na ausência de forças gravitacionais, ou seja, na total ausência de peso. Qualquer fio elástico sujeito a tensão assumirá a forma de uma linha reta. A tensão pode ser causada por forças que nada têm a ver com gravitação - por

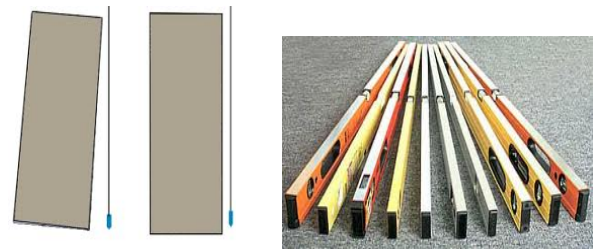


Figura 2: Dois instrumentos usados para verificar se uma linha reta ou um plano é vertical ou horizontal.

exemplo, a força dos nossos músculos, ou algum dispositivo mecânico ou elétrico.

No entanto, a gravitação da Terra é crucial para definir o *ângulo reto* entre a superfície horizontal do solo e as duas linhas retas *distantes*, a altura da pirâmide QQ' e o bastão MM' , determinando assim o que geralmente é chamado de *paralelismo distante*.

Embora o teorema de Tales pareça envolver exclusivamente relações espaciais entre linhas retas de um certo tipo, idealizando a interação espacial entre objetos físicos, o *tempo* está implicitamente envolvido em hipóteses físicas necessárias para justificar o resultado das medições de Tales.

Quando Tales estava realizando o seu experimento, a Grande Pirâmide tinha mais de 2000 anos, o que aliás explica por que as suas dimensões exatas tinham sido esquecidas há muito tempo. Um pressuposto tácito era que ela mantivesse a sua forma inicial, incluindo todos os ângulos e dimensões. Mesmo excluindo a ocorrência de eventos sísmicos, Tales ainda tinha que admitir que as pedras que formavam a pirâmide tinham mantido sua forma inalterada por longos períodos de tempo.

O fato de que o bastão também permanecesse reto e rígido deve-se a uma suposição semelhante, a saber, que ele é feito de um material cuja coesão é suficiente para manter sua forma inalterada (essa é uma definição comum de um corpo sólido). Como visto da nossa perspectiva atual, essa hipótese é baseada na suposição que os átomos possam formar estruturas estáveis capazes de se manter inalteradas sob condições razoáveis (por exemplo, a temperatura ambiente não excedendo certos valores). Do ponto de vista quadridimensional, isso significa que átomos e moléculas podem seguir geodésicas de tipo tempo paralelas, com desvio geodésico nulo.

Aliás, a capacidade de átomos e moléculas de formarem estruturas periódicas estáveis torna



Figura 3: Cristais de sal comum $NaCl$, de quartzo SiO_2 e um exemplo de retículo cristalino (SiO_2 - wurtzite). As forças interatômicas impõem as formas e a geometria dos corpos sólidos.

possível uma alternativa definição de linhas retas e ângulos retos (e não somente retos). Os cristais representados na Fig. (3) mostram uma estrutura linear notável, bem como ângulos aparentemente perfeitos, de 90° no caso da estrutura cúbica do $NaCl$, e de 60° e 120° no caso de quartzo (SiO_2).

As linhas retas e os ângulos retos obtidos da maneira tradicional, usando um compasso, uma régua e uma folha de papel, baseiam-se no mesmo princípio físico, que é a existência de corpos sólidos que sirvam como padrões de comprimento. A geometria baseada nas formas dos corpos sólidos é independente do campo gravitacional que determina linhas verticais paralelas e o plano horizontal no experimento de Tales. Do ponto de vista atual, a existência de configurações estáveis de átomos, bem como a existência dos próprios átomos, pode ser entendida somente usando os princípios da mecânica quântica, que até agora parecem ser independentes dos fenômenos gravitacionais.

Mas este não é o fim da história. Um terceiro tipo de linha reta está envolvido no experimento,

o raio de luz ao longo da linha $QPNMO$. O caráter desta linha é devido às propriedades de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo (na medida em que a influência do ar possa ser negligenciada), que *a priori* é independente dos fenômenos gravitacionais, bem como das forças predominantes em nível atômico. As frentes de onda e os raios de luz fornecem uma noção alternativa de linhas retas e de ângulos, resultando na *geometria conforme*, que preserva as noções de linhas retas e ângulos, mas ignora as noções de comprimento e distância.¹

3 Os três reinos do mundo físico

Os resultados do experimento de Tales podem ser interpretados de duas maneiras. De fato, ele estabeleceu a coincidência de três definições completamente diferentes de uma linha reta. A primeira veio da forma natural que uma corda com um corpo pesado preso a uma de suas extremidades adquire sob a influência do campo gravitacional da Terra.

O campo gravitacional define também o ângulo reto entre o solo horizontal e duas linhas verticais distantes, a altura da pirâmide e do bastão. A expressão matemática dessa afirmação é dada pela função potencial $U(x, y, z)$, que define as *superfícies equipotenciais*, $U = \text{constante}$. Na superfície da Terra essa equação define o plano horizontal e a direção vertical, pois temos

$$dU = \mathbf{grad} U \cdot d\mathbf{r} = 0, \quad (1)$$

com o vetor

$$\mathbf{grad} U = \left[\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z} \right], \quad (2)$$

definindo localmente a direção vertical, enquanto todos os deslocamentos ortogonais a ela definem (localmente) um plano horizontal.

A segunda definição vem da forma material do bastão. A existência de corpos sólidos que podem ser usados como padrões de comprimentos e ângulos resulta de propriedades de simetria das forças interatômicas, que por sua vez podem ser

¹Tales fez também uma suposição tácita extra, a saber, que as propriedades usadas para a definição de linhas retas, paralelismo e ângulos retos, fossem independentes da escala, ou seja, fossem as mesmas para o pequeno bastão e para a Grande Pirâmide. A extensão para dimensões ainda maiores, incluindo os Céus, também parecia óbvia.

derivadas *ab initio* de acordo com as regras da mecânica quântica, válidas em escala atômica.

A terceira linha reta é dada pelo raio de luz, que vem de uma idealização da propagação de ondas eletromagnéticas de uma fonte muito distante. A luz do sol que ilumina a Terra é bem descrita por uma onda plana:

$$A \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}), \quad (3)$$

com frentes de onda planares implicitamente dadas pela equação $\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = \text{constante}$. Os raios são paralelos ao vetor de onda \mathbf{k} , em todos os lugares perpendiculares às frentes de onda planares.

A primeira interpretação do experimento, que coincide com o interesse de Tales, baseia-se na suposição de que todas as definições de linhas retas e ângulos coincidem, o que lhe permitiu avaliar a altura da Grande Pirâmide.

A segunda interpretação seria, com a altura da pirâmide considerada uma quantidade conhecida, bem como a altura do bastão, ver o resultado do experimento de Tales como uma prova de que os raios de luz seguem linhas retas compatíveis com as duas definições que envolvem gravitação e forças interatômicas. Ou então, que as linhas retas e os ângulos retos definidos por meio do campo gravitacional coincidem com os definidos por meio de raios de luz e de bastões sólidos.

As três definições alternativas de geometria envolvidas no experimento de Tales estão diretamente relacionadas a três diferentes aspectos de nossa percepção da natureza. Desde o advento da física moderna, a descrição do mundo que nos cerca é baseada em três reinos essenciais, já presentes no experimento de Tales, que são

- **Espaço e tempo,**
- **Corpos materiais,**
- **Forças agindo entre eles.**

Os três principais aspectos de nossa percepção da realidade física podem ser vistos distintamente na equação fundamental que expressa a segunda lei da dinâmica de Newton:

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m} \mathbf{F}. \quad (4)$$

Esta equação mostra a relação entre três reinos diferentes que são dominantes em nossa percepção e descrição do mundo físico: corpos massivos (m), campos de força responsáveis pelas interações entre os corpos (\mathbf{F}) e relações espaço-temporais definindo a aceleração (\mathbf{a}).

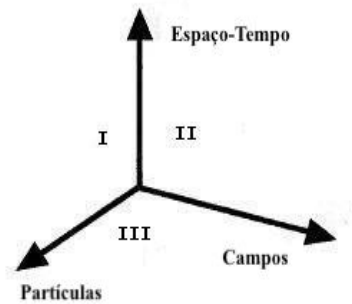


Figura 4: Os três reinos da física.

Os mesmos três ingredientes são encontrados na física das interações fundamentais: falamos de partículas elementares e campos em evolução no espaço e no tempo, formulamos deliberadamente a lei da dinâmica de Newton de uma maneira um pouco não usual, $\mathbf{a} = \frac{1}{m} \mathbf{F}$, para separar a entidade diretamente observável (\mathbf{a}) do produto de duas entidades cuja definição é muito menos direta e clara.

Além disso, colocando a aceleração sozinha no lado esquerdo, destacamos a relação causal entre os fenômenos: a força é a causa da aceleração da massa sob sua influência, e não vice-versa.

Na linguagem moderna, a noção de força é geralmente substituída pelo novo conceito de campos de vários tipos.

O fato dos três ingredientes estarem relacionados pela equação (4) poderia sugerir que talvez apenas dois deles são fundamentalmente independentes, sendo o terceiro a consequência dos dois restantes.

Vamos representar os três aspectos das teorias das interações fundamentais por três eixos ortogonais, conforme mostrado na figura a seguir, que exhibe também três opções possíveis de dois aspectos independentes da realidade física, dos quais devemos supostamente poder derivar o terceiro.

As tentativas de entender a física com apenas dois dos reinos representados na Figura 4 tem uma história muito longa. Eles podem ser divididos em três categorias, rotuladas como I, II e III.

Na categoria I podemos reconhecer facilmente a física newtoniana, apresentando o mundo físico como uma coleção de corpos materiais (partículas) evoluindo no espaço e no tempo absolutos, interagindo a distância. Newton considerava a luz feita de minúsculas partículas elásticas obedecendo às mesmas regras da mecânica como todos os corpos materiais. A noção de campos que

transmitiam forças de um corpo para outro estava totalmente ausente.

A controvérsia sobre a natureza da luz levou a profundas diferenças na interpretação do espaço. Para Huygens, que forneceu uma prova da propagação da luz em forma de onda, o espaço deve ser preenchido com algum meio que permita a propagação. Duas visões diametralmente opostas sobre o status do espaço e do movimento prevaleceram desde então. A visão newtoniana foi reforçada por Immanuel Kant, que elevou o status do espaço para a categoria independente e absoluta, existindo independentemente dos observadores, como o céu estrelado e o “imperativo moral” [2].

As teorias pertencentes à categoria II assumem que o mundo físico pode ser descrito exclusivamente como uma coleção de campos em evolução na variedade espaço-temporal. Essa abordagem foi defendida por Lord Kelvin, A. Einstein e, mais tarde, por J.A. Wheeler. O impulso inicial foi dado por Faraday e J.C. Maxwell, que introduziram um ponto de vista revolucionário, antinewtoniano, segundo o qual nenhuma interação a distância é possível. Todas as forças são transmitidas por um meio; o espaço é preenchido por esse meio. Este pode ser chamado de “éter”, e os campos de forças se tornam um novo reino físico, identificado como tensões dentro do éter, que em certo sentido é o espaço. Em certo sentido, o “espaço” se torna sinônimo de “contínuo material”, assim como, do ponto de vista de um peixe, sua separação espacial de outro peixe pode ser definida como a quantidade de água contida entre os dois.

Como seguidor de Maxwell e Faraday, Einstein acreditava no papel primordial dos campos e tentava derivar as equações de movimento como comportamento característico das singularidades dos campos ou da curvatura do espaço-tempo. Pode-se dizer que, na visão de Einstein, os campos substituíram o éter [3].

No espírito do programa de F. Klein, H. Minkowski definiu a geometria hiperbólica do espaço unida à tempo em uma única entidade chamada *variedade espaço-temporal*. Sua geometria foi definida pela ação do Grupo de Lorentz-Poincaré. No entanto, olhando mais de perto, entidades fisicamente mensuráveis que são submetidas às transformações de Lorentz (os “quadri-vetores”) não são de jeito nenhum as coordenadas do tempo

e do espaço, mas as quantidades físicas conservadas, como a energia E e o momento \mathbf{p} , ou a frequência ω e o vetor de onda \mathbf{k} de uma onda eletromagnética (ou mais precisamente, de um fóton).

O espaço-tempo minkowskiano herda a simetria de Lorentz-Poincaré porque é definido através de medições baseadas em fótons e suas interações com elétrons, cuja energia, momento e spin são quantidades covariantes de Lorentz e abrangem os espaços de representação do grupo de Lorentz-Poincaré.

A categoria III representa o ponto de vista alternativo de supor que a existência de matéria é prioritária com relação à do espaço-tempo, que se torna um domínio “emergente” - um eufemismo para “ilusão”. Essa abordagem foi defendida recentemente por N. Seiberg e E. Verlinde [11].

É verdade que as coordenadas do espaço-tempo não podem ser tratadas da mesma maneira como quantidades conservadas, como energia e momento; muitas vezes esquecemos que elas existem enquanto marcadores, e tratá-las como objetos reais é um “mau hábito”, como comentado por D. Mermin [4].

Vista sob esse ângulo, a ideia de derivar as propriedades geométricas do espaço-tempo, e talvez a sua própria existência, a partir de simetrias fundamentais e interações típicas dos constituintes mais elementares da matéria parece bastante natural. Muitas dessas propriedades não requerem menção de espaço e de tempo no nível da mecânica quântica, como foi demonstrado por M. Born e W. Heisenberg [5–7] em sua versão da mecânica matricial, ou pela formulação da teoria quântica de J. von Neumann em termos das álgebras C^* [8]. A geometria não comutativa é outro exemplo de formulação de relações espaço-temporais em termos puramente algébricos [9, 10].

Considerando a física quântica como a principal realidade subjacente da qual os objetos clássicos são uma versão média, leva-se a concluir que as propriedades quânticas de objetos físicos deviam estar intimamente relacionadas à definição de geometria em primeiro lugar.

4 O experimento de Tales na perspectiva de hoje

Voltemos ao experimento realizado por Tales mais de vinte e cinco séculos atrás. De acordo

com nossa análise, podemos reconhecer a qual reino físico pertence cada uma das três definições de linha reta. As duas linhas verticais paralelas, a altura da pirâmide e o bastão são feitos de madeira e pedra, que mantêm sua forma devido ao seu estado sólido. Sendo feitos de átomos, a existência e as propriedades de tais sólidos podem ser derivadas das regras da mecânica quântica. Este é o reino das partículas com massa: núcleons e elétrons, que formam átomos, depois moléculas e, finalmente, sólidos cristalinos ou amorfos estáveis. As forças eletromagnéticas também desempenham um papel importante, mantendo os elétrons ao redor dos núcleos e criando os residuais potenciais de Lennard-Jones fora dos átomos, dando origem às forças de Van der Waals.

Os raios de luz que criaram a sombra da pirâmide assim como a do bastão são, como sabemos agora, o inumerável enxame de fótons criando uma frente de onda plana comum. Eles são identificados com um campo de calibre sem massa, pertencendo assim ao reino das forças que tornam possível a interação entre partículas carregadas massivas. A interação entre os fótons e elétrons das camadas atômicas externas é descrita de maneira mais adequada pelas regras da física quântica.

Somente o terceiro lado de cada um dos dois triângulos que aparecem no experimento de Tales, as linhas verticais paralelas, parecem não ter nada a ver com a física quântica, suas direções sendo definidas pelo campo gravitacional da Terra. Mas após uma análise mais detalhada, podemos concluir que, mesmo neste caso, os dispositivos feitos de sólidos são necessários para detectar a presença de gravitação, e as informações sobre seu comportamento são realizadas por fótons.

Nesse ponto, podemos perguntar se o experimento de Tales poderia ser realizado sem gravidade - e a resposta é "sim". Para construir um plano e duas linhas paralelas verticais, os padrões sólidos de comprimento e ângulo reto seriam suficientes, isso pode ser feito com régua e compasso comuns. Portanto, a experiência seguindo o esquema de Tales pode ser vista como a verificação se as leis da gravidade são compatíveis com a geometria definida por corpos sólidos e luz, ou seja, pelo limite clássico da mecânica quântica e da teoria quântica de campos. A propósito, com medições muito precisas de ângulos, poderíamos descobrir a curvatura real da superfície

da Terra, porque as direções verticais definidas pelo seu campo gravitacional não são paralelas de verdade: uma distância de cerca de 31 metros corresponde a um segundo de arco entre as direções verticais locais definidas pela gravitação da Terra.

A presente análise do experimento de Tales sugere que, entre os três reinos da física representados na Figura 4, partículas e campos (física quântica) definem a geometria quando constituem objetos clássicos como corpos sólidos e frentes de onda, enquanto a presença ou ausência de gravitação é verificada com a ajuda de outros objetos clássicos. Em termos muito aproximados, corpos sólidos feitos de átomos e frentes de onda feitas de fótons existem, apesar da existência ou não da gravidade; pelo contrário, a gravidade, assim como a geometria do próprio espaço-tempo, é definida pelas propriedades de corpos sólidos e raios de luz. A própria detecção de efeitos gravitacionais não pode ser realizada sem corpos massivos extensos, que se comportem como objetos clássicos. Até o famoso experimento confirmando a variação do tempo próprio sob a influência da gravidade, realizado por Pound e Rebka [12] em 1959, usa o efeito Mössbauer com base no comportamento coletivo da rede cristalina que cancela o efeito de recuo durante a absorção de fótons.

O teorema de Tales liderou o caminho para todas as medições subsequentes de grandes distâncias, primeiramente na terra e no mar, depois aplicadas à medição do raio da Terra, por Eratóstenes, e em seguida para determinar distâncias astronômicas, por Aristarco de Samos. Mais tarde, a medição da distância até as estrelas mais próximas, devido à paralaxe anual observada, foi apenas outra aplicação do Teorema de Tales. A determinação da forma das órbitas planetárias por Kepler foi baseada em triangulação, que também é uma variante do mesmo teorema. A determinação subsequente das verdadeiras dimensões do Sistema Solar foi feita apenas em 1769, graças à observação do trânsito de Vênus e ao conhecimento exato da longitude pelo capitão Cook, que realizou as observações na ilha de Taiti. A medida crucial foi relacionada ao tempo exato do fenômeno, como observado de lugares distantes na Terra. A longitude pôde ser determinada também devido à invenção do cronômetro por Huygens.

Como a velocidade da luz no vácuo é constante

para todos os observadores galileanos, hoje em dia as medições de distâncias no espaço podem ser substituídas por medições precisas de atrasos temporais, como no sistema de posicionamento global (GPS). E não é acidental que distâncias muito grandes são medidas em equivalentes temporais, os anos-luz. As medidas exatas do tempo, que hoje em dia atingem a precisão de 10^{-15} segundos, nos permitem determinar distâncias com um grau de precisão semelhante - menos de 1 cm na superfície do nosso globo. Tais medições de tempo são possíveis devido aos relógios atômicos que obedecem às regras da mecânica quântica.

Toda a informação que recebemos do mundo ao nosso redor é transportada por fótons, léptons e bárions, partículas elementares cujas propriedades e comportamento são extremamente bem descritos pela física quântica. No entanto, podemos percebê-los e analisá-los somente através de dispositivos que representam o limite clássico da mecânica quântica. Não é surpreendente que a geometria construída na base dos dados obtidos reflete o grupo de simetria que atua no espaço dos estados das partículas elementares - o grupo de Lorentz-Poincaré. As propriedades de transformação de entidades físicas conservadas, como os quadrivetores $k^\mu = [\frac{\omega}{c}, \mathbf{k}]$ ou $P^\mu = [\frac{E}{c}, \mathbf{p}]$ são estendidas ao *espaço dual* das formas diferenciais $dx_\mu = [cdt, d\mathbf{x}]$. Estas, por sua vez, são definidas experimentalmente usando objetos clássicos, cuja própria existência (corpos rígidos formados por átomos, frentes de onda de luz feitas de fótons) é explicada pela teoria quântica.

Assim, a conclusão no caso do experimento de Tales é que, para construir a geometria euclidiana do espaço, apenas esses dois fenômenos físicos eram necessários, a luz desempenhando o papel de régua (definindo as linhas retas) e os corpos rígidos desempenhando o papel de compasso (definindo distâncias). A gravidade foi usada para definir linhas retas paralelas e ângulos retos, mas seu uso não era necessário. Pelo contrário, sua influência pode ser medida usando objetos exclusivamente clássicos.

Aparentemente, a gravitação pode ser percebida apenas no limite clássico, e não no nível quântico. Apesar de numerosas tentativas, não há limite quântico da física clássica. Isso sugere duas conclusões:

Primeiro, que o espaço e sua geometria são definidos apenas no limite clássico da teoria quântica;

Segundo, que a gravidade também é um fenômeno clássico, aparecendo apenas quando os efeitos coletivos podem ser percebidos, assim como a termodinâmica clássica pode ser definida apenas como um limite da física estatística.

Nesse caso, quantizar ondas gravitacionais é uma tarefa tão arriscada quanto uma tentativa de quantizar as ondas na superfície da água.

Nota dos editores

Artigo submetido aos CdA em inglês e traduzido ao português por Oliver F. Piattella.

Sobre o autor

Richard Kerner (richard.kerner@sorbonne-universite.fr) é professor emérito da Université Pierre et Marie Curie (Sorbonne-Université), em Paris, França. É autor de mais de 200 artigos científicos. O primeiro deles, publicado em 1968, antes de iniciar seu doutoramento, foi um marco em física teórica ao incorporar conceitos das modernas teorias das interações fundamentais às chamadas teorias de Kaluza-Klein, que foram formuladas originalmente nos anos 20 e que procuravam unificar as interações fundamentais estendendo o número de dimensões do espaço-tempo. Desenvolve pesquisas em física-matemática, gravitação, física de altas energias e física da matéria condensada. Possui três livros publicados, um sobre a teoria da relatividade restrita, outro sobre métodos geométricos para materiais amorfos e, mais recentemente, sobre métodos clássicos em física teórica.

Referências

- [1] I. Newton, *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* (Pepys, London, 1687); new English edition (Snowball publishing, Chicago, 2010).
- [2] I. Kant, *Critique of Pure Reason* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998); see also Michael Friedman, *Kant and the Exact Sciences* (Harvard University Press, Cambridge, 1992).

- [3] A. Einstein, L. Infeld, *The evolution of physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1938)
- [4] D. Mermin, *What is bad about this habit*, Physics Today **62**, 8-9 (2009).
- [5] M. Born, P. Jordan, *Zur Quantenmechanik*, Z. Phys. **34**, 858-878 (1925).
- [6] W. Heisenberg, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, Z. Phys. **33**, 879-893 (1925).
- [7] P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1958).
- [8] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton Univ. Press, Princeton, 1996).
- [9] M. Dubois-Violette, R. Kerner, J. Madore, *Non-commutative differential geometry of matrix algebras*, J. Math. Phys. **31**, 316-322 (1990).
- [10] A. Inoe, *Extension of unbounded left Hilbert algebras to partial algebras*, J. Math. Phys. **31**, 323-331 (1990).
- [11] E. Verlinde, *On the Origin of Gravity and the Laws of Newton*, arXiv:1001.0785 (2010).
- [12] E. Pound, G.A. Rebka Jr., *Gravitational redshift in nuclear resonance*, Phys. Rev. Lett. **3**, 439-441 (1959).