

## As Fronteiras da Intuição

### Questões: O que é a Física? Por que a Física Moderna é contraintuitiva?

#### 1. O Papel da Intuição na Física

A *intuição* que temos a respeito do mundo é confiável? “Intuição” pode ser definida como uma crença que surge de maneira imediata na consciência, ou seja, sem a mediação de uma cadeia de raciocínios. Segundo o psicólogo Daniel Kahneman, são “pensamentos ou preferências que vêm rapidamente à mente e sem muita reflexão”.<sup>19</sup> Até o séc. XIX, muitas correntes filosóficas confiavam no poder da intuição humana. René Descartes propôs o seu *cogito*, “eu sou, eu existo”, como uma intuição fundamental a partir da qual poderia construir, através da razão, o edifício do conhecimento.<sup>20</sup> A filosofia da natureza (*Naturphilosophie*) de língua alemã, inspirada nas ideias de Johann Wolfgang Goethe (1790) e Friedrich Schelling (1799), acreditava que poderíamos conhecer a essência da natureza através da intuição, sem necessidade de observações metódicas e raciocínios lógicos, pois como fazemos parte da natureza (e compartilhamos de suas leis), poderíamos descobrir dentro de nós, através da intuição, as leis que regem toda a natureza externa. Outro filósofo que colocava a intuição acima da razão foi Henri Bergson (1911).

Na Física Clássica, a intuição desempenha um papel importante, muitas vezes nos guiando na formulação de princípios e leis. Mas após o declínio do sonho romântico da *Naturphilosophie* na ciência, a partir de 1830, ficou claro para a maioria dos cientistas que a intuição humana não traz consigo as garantias de certeza. Sem dúvida, a intuição é um excelente instrumento “heurístico”, fornecendo ideias que podem propiciar novas descobertas, mas as hipóteses baseadas em intuições devem sempre passar pelos testes da experiência.

No início do séc. XX, com o surgimento da Teoria da Relatividade Restrita, ficou patente que o universo se comporta de maneiras muito mais estranhas do que supõe a nossa intuição cotidiana. Por outro lado, a paulatina aceitação da teoria da evolução biológica, com o papel central desempenhado pelo princípio de seleção natural, forneceu uma explicação para a estranheza da Física Moderna. O nosso *aparelho cognitivo* (ou seja, encéfalo, órgãos dos sentidos etc., envolvidos no conhecimento do mundo) evoluiu como uma adaptação ao nosso ambiente natural macroscópico e ao nosso ambiente social. Assim, possuímos uma

---

<sup>19</sup> KAHNEMAN, D. (2003), “Maps of bounded rationality: a perspective on intuitive judgment and choice”, in Frängsmyr, T. (org.), *Les Prix Nobel – The Nobel Prizes 2002*, Nobel Foundation, Stockholm, pp. 449-89, disponível online em: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/kahnemann-lecture.pdf>

<sup>20</sup> “Suporei, pois, que há não um verdadeiro Deus, que é a soberana fonte da verdade, mas certo *gênio maligno*, não menos ardiloso e enganador do que poderoso, que empregou toda a sua indústria em enganar-me. Pensarei que o céu, o ar, a terra, as cores, as figuras, os sons e todas as coisas exteriores que vemos são apenas ilusões e enganos de que ele se serve para surpreender minha credulidade. [...] não me persuadi também, portanto, de que eu não existia? Certamente não, eu existia sem dúvida, se é que eu me persuadi, ou, apenas, pensei alguma coisa. Mas há algum, não sei qual, *enganador mui poderoso e mui ardiloso* que emprega toda a sua indústria em enganar-me sempre. Não há, pois, dúvida alguma de que sou, se ele me engana; e, por mais que me engane, não poderá jamais fazer com que eu nada seja, enquanto eu pensar ser alguma coisa. De sorte que, após ter pensado bastante nisto e de ter examinado cuidadosamente todas as coisas, cumpre enfim concluir e ter por constante que esta proposição, *eu sou, eu existo*, é necessariamente verdadeira todas as vezes que a enuncio ou que a concebo em meu espírito” (DESCARTES, R., 1962, “Meditações”. In: *Obra escolhida*. Trad. J. Guinsburg & B. Prado Jr. São Paulo: Difel, pp. 105-99. Original em latim: 1641. Citação de I.12 e II.4, grifos meus). O gênio maligno é o avô de outros “demônios” que aparecerão na filosofia da física, como o transportador, o de Laplace e o de Maxwell.

compreensão intuitiva apenas do mundo macroscópico da Física Clássica, e não necessariamente de domínios com os quais nunca tivemos contato durante a evolução.<sup>21</sup>

Podemos entender intuitivamente os sólidos, os líquidos, o fogo, o ar e a luz, temos uma boa intuição da gravidade, das forças e do trabalho. Outros conceitos da Física Clássica que estão mais distantes do cotidiano, como a entropia e a eletricidade, já são um pouco mais contraintuitivos. Mas quando nossa experiência, mediada por instrumentos e por teorias, atinge domínios que nunca vivenciamos em nossa história evolutiva, nossa intuição costuma fracassar. Exemplos disso são o muitíssimo veloz (Relatividade Restrita), o muitíssimo massivo ou denso (Relatividade Geral), o muitíssimo pequeno (Mecânica Quântica), o muitíssimo quente (Física dos Plasmas), o muitíssimo frio (condensados de Bose-Einstein) e o muitíssimo antigo (o *big bang*). Em outras palavras, *é intuitivo que a ciência moderna seja contraintuitiva!*

## 2. Seleção Natural

Vale a pena expor brevemente o princípio de seleção natural, proposto aqui e ali ao longo da história da biologia, mas consolidado no séc. XIX com as publicações independentes de Alfred Wallace e Charles Darwin, em 1858. Apesar de este ser um princípio eminentemente biológico, ele se encaixa muito bem no estilo mecanicista de pensamento (seção XIX.4), próprio da Física Clássica, em que causas finais não desempenham papel fundamental, mas apenas causas eficientes e flutuações estatísticas.

A *seleção natural* ocorre em um sistema qualquer se forem satisfeitas algumas condições. Estas podem ser agrupadas em quatro pontos:<sup>22</sup>

### 1) REPLICAÇÃO.

- a) Populações orgânicas fazem parte de uma *história* com *ancestrais* e *descendentes*.
- b) Os membros de tais populações *herdam* traços de seus ancestrais e os *passam* para seus descendentes.

### 2) VARIAÇÃO.

- a) Os membros também *variam* com relação a esses traços herdados.
- b) As variações dos traços herdados ocorrem de maneira *aleatória*, ou seja, não são influenciadas pelo meio ambiente. (Contra Lamarck)

<sup>21</sup> Pode-se perguntar sobre o papel da educação e da cultura no desenvolvimento da intuição. Será que uma pessoa jovem educada com conceitos científicos mais amplos poderia achar intuitivo que o tempo transcorrido para cada indivíduo possa ser diferente (ver experimento mental dos gêmeos viajantes, seção IX.1) ou que a luz e um elétron exibam propriedades ondulatórias mesmo sendo sempre detectados pontualmente (dualidade onda-partícula fraca, seção XIX.1). Para responder a esta questão, será preciso levar em conta as concepções de Jean Piaget e de outros psicólogos cognitivos e educadores. Ver, por exemplo, FISCHBEIN, H. (2002), *Intuition in science and mathematics: an educational approach*, Kluwer, Dordrecht. Uma discussão filosófica (travada em aula) é se todos os domínios da ciência e da matemática são passíveis de serem intuídos pela mente humana, por meio da educação, ou se há domínios (como espaços geométricos de altas dimensões) que não podem ser adequadamente intuídos a partir do nosso encéfalo, mas atacados apenas a partir do raciocínio.

<sup>22</sup> Estamos seguindo, com modificações, a análise de LENNOX, J.G. (1992), "Philosophy of biology", in SALMON, M.H. et al. (orgs.), *Introduction to the philosophy of science*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ), pp. 269-309. Ver p. 271. Vale mencionar que o mecanismo de seleção natural tem sido identificado em outros sistemas que não o da evolução das espécies. David Hull examinou três outros sistemas: mudança conceitual na ciência, reação do sistema imune a antígenos, e aprendizado operante. Ver HULL, D.L. (2001), *Science and selection*, Cambridge U. Press.

## 3) COMPETIÇÃO.

- a) Há uma tendência de tais populações de aumentarem geometricamente (exponencialmente), ao passo que os recursos necessários à sua sobrevivência aumentam aritmeticamente (linearmente). (Malthus)
- b) Por causa disso, os membros de tais populações *competem* entre si pelos recursos limitados.

## 4) ADAPTAÇÃO.

- a) O meio ambiente é altamente *complexo*, assim como as relações do organismo com o meio.
- b) Cada organismo tem um *grau de adaptação* ao meio ambiente que é dado por sua estrutura, por sua engenharia, por sua bioenergética.
- c) Cada organismo tem um *grau de sucesso reprodutivo*, que depende do número de cópias geradas por reprodução assexuada, ou do número de gametas ou ovos gerados por reprodução sexuada, e também do sucesso em copular com parceiros do sexo oposto.
- d) O meio ambiente *muda constantemente* (fornecendo “oportunidades adaptativas”), em geral numa escala de tempo longa em relação ao tempo de vida de um organismo.

SELEÇÃO NATURAL: Dadas estas condições, segue-se que a *probabilidade é alta* de que:

N1) Algumas variações tornam seus possuidores mais bem adaptados (no sentido estrutural) em comparação aos outros, ou seja, tais variações seriam “vantajosas”. (Diferencial de adaptação)

N2) Os organismos com estas variações vantajosas (no sentido estrutural) terão maior chance de sobreviver.

N3) Eles tenderão a deixar nas gerações seguintes um número proporcionalmente maior de descendentes, que herdaram essas variações. (Diferencial de transmissão)

## SELEÇÃO SEXUAL:

S1) Algumas variações dão a seus possuidores um maior grau de sucesso *reprodutivo* em comparação aos outros de sua espécie, mesmo que não aumentem seu grau de adaptação ao ambiente. (Diferencial de sucesso reprodutivo)

S2) Eles tenderão a deixar um número proporcionalmente maior de descendentes com estas variações nas gerações seguintes.

O *grau de aptidão (fitness)* seria a reunião dos diferenciais de adaptação estrutural (N1) e de sucesso reprodutivo (S1). Em consequência de N3 e S2, as variações vantajosas tenderão a se fixar na população, em detrimento de outras variações, levando a uma *mudança adaptativa da população*. Este mecanismo torna-se mais acentuado com as mudanças ambientais.

Tomemos um exemplo curioso. A toxoplasmose é uma doença infecciosa causada pelo protozoário *Toxoplasma gondii*. Este se reproduz sexualmente apenas em felídeos, como o gato doméstico. No ano 2000, pesquisadores na Universidade de Oxford descobriram que ratos infectados pelo protozoário perdem a aversão ao cheiro de urina de gatos. Assim, os ratos infectados se tornam presa mais fácil para os gatos, que assim consomem ratos infectados pelo protozoário, permitindo ao protozoário deixar mais descendentes no interior dos gatos. Estudos mais recentes investigaram o mecanismo pelo qual os protozoários atuam no cérebro dos ratos, “sequestrando-os” para um comportamento favorável à reprodução dos protozoários. Tal situação pode ser explicada pelo mecanismo da seleção natural. Em algum momento do passado evolutivo, uma pequena variação genética no protozoário, que deixava os ratos mais bobos e passíveis de serem comidos pelos gatos, gerou um diferencial de transmissão, aumentando o número de descendentes do protozoário com aquela variação

genética. Variações posteriores foram aumentando o impacto do protozoário sobre o comportamento dos ratos, até se chegar à situação atual. Há vários outros exemplos de semelhante “sequestro” do cérebro de um animal por parasitas.<sup>23</sup>

### 3. O Domínio Mesoscópico do Complicadíssimo

Na lista de fenômenos com os quais nunca tivemos contato epistêmico durante a evolução, esboçado na seção II.1, deixamos de lado o domínio do *muitíssimo complicado*. Em nossas redes sociais, na internet, podemos acompanhar talvez 1000 amigos, mas a nossa intuição fracassa ao tentar dar conta, de maneira exata, de bilhões de partículas. Compreendemos bem o mundo macroscópico, com escala em torno de 1 metro (m), e conseguimos desenvolver uma teoria surpreendentemente precisa de poucos corpos na escala atômica, abaixo de 1 nanometro (nm,  $10^{-9}$  m), mas o domínio “mesoscópico” que cobre boa parte dessas nove ordens de grandeza de escala, quando há um número imenso de partículas interagindo de maneira bastante forte, é um ambiente ao qual nosso aparelho cognitivo não se adaptou ao longo da evolução. Assim, é de se esperar que surpresas contraintuitivas surjam no estudo desse domínio do muito complicado, na passagem da escala nano para a macro. Isso pode estar relacionado com dois grandes problemas perenes da Física: o problema da irreversibilidade, que estudaremos em nosso curso (Cap. XXIV), e uma questão relacionada a esta, na Física Quântica, que é o “problema da medição” (seção XIX.2).

Além dessas questões, há toda uma série de perguntas relacionadas com a emergência de comportamento *complexo* (voltaremos a isso no Cap. XXVI). Em sistemas de muitíssimas partículas com dinâmica complicada, o termo “complexidade” está associado a um comportamento macroscópico simples e eficiente, com o surgimento e manutenção de estruturas macroscópicas. Este é o “caminho do meio” salientado por físicos da matéria condensada, como Robert Laughlin e David Pines.<sup>24</sup> O termo “complexidade” também é associado a sistemas de poucos corpos, com interações não lineares, denominadas “caos determinístico”, que veremos na seção XIV.5. É possível que nossa intuição a respeito das “leis de escala” que varrem a região entre o nanoscópico e o macroscópico (para não falar das escalas subatômicas) também tenha falhas.

A desconfiança a respeito de nossas intuições clássicas guiou Ernst Mach, em 1872, a aventar a hipótese de que “não é necessariamente preciso representar os processos moleculares espacialmente, ao menos não num espaço tridimensional”.<sup>25</sup> Isso o estimulou a criticar o atomismo e a mecânica estatística de Ludwig Boltzmann, mas neste caso a história mostraria que as intuições clássicas a respeito do espaço e do tempo conservam sua validade no domínio atômico. É verdade que o surgimento da Física Quântica embanhou tudo de novo, mas mencionei o exemplo de Mach apenas para salientar que a questão de se nossa intuição funciona ou não, enquanto ainda não adquirimos conhecimento satisfatório a respeito de um domínio, é uma questão em aberto.

<sup>23</sup> Ver reportagem de RAVVEN, W. (2011), “To get to cats, common parasite hijacks cats’ arousal circuitry”, *New York Times*, 17 de agosto, disponível online. O artigo original é: HOUSE, P.K.; VYAS, A. & SAPOLSKY, R. (2001), “Predator cat odors activate sexual arousal pathways in brains of *Toxoplasma gondii* infected rats”, *PLoS ONE* 6, e23277: 1-4.

<sup>24</sup> LAUGHLIN, R.B.; PINES, D.; SCHMALIAN, J.; STOJKOVIC, B.P. & WOLYNES, P. (2000), “The middle way”, *Proceedings of the National Academy of Sciences (U.S.A.)* 97, pp. 32-27.

<sup>25</sup> MACH, E. (2014), *História e raízes do princípio de conservação de energia*, trad. G.D. Leitão, Ed. UERJ, Rio de Janeiro, nota IV, p. 101. Em inglês, tradução de 1911, p. 86. Original em alemão: 1872.

#### 4. A Física da Consciência

Um problema conceitual especialmente agudo que surge no domínio mesoscópico é o do surgimento da consciência. Este é um problema tão difícil para a Física que os físicos raramente pensam nele como um problema a ser estudado.

O *materialismo* consiste da tese de que a mente é produzida pelo sistema nervoso, ou que ela emerge do corpo (de certas classes de animais). Ao contrário do espiritualista, o materialista acredita que, na morte do cérebro, a mente desaparece. Um termo próximo a este é *fisicismo* (ou “fiscalismo”, do inglês *physicalism*), que considera que tudo é físico, incluindo a mente (porém, é preciso definir o que se entende por “físico”, ver seção II.5).

A tese materialista de que a consciência desaparece na morte do corpo não descarta, porém, a possibilidade de que corpos perfeitamente semelhantes (descendo até a escala molecular) gerem consciências perfeitamente semelhantes. Esta tese, de que o estado físico-químico detalhado do corpo “determina” univocamente o estado mental, é conhecida como a tese da *superveniência* da mente sobre o corpo (um refinamento da tese do “paralelismo psicofísico” do final do séc. XIX). Apesar de o materialismo com superveniência ser uma posição majoritária entre filósofos e cientistas atuais, a maior parte dos filósofos tende a rejeitar a tese de que a mente possa ser “reduzida” ao sistema nervoso. Essa posição não reducionista pode ser chamada de materialismo emergentista (no sentido forte do termo “emergência”, ver Cap. XXVI).

A explicação para a relação de superveniência entre mente e cérebro é um problema em aberto, chamado apropriadamente de “problema difícil da consciência”.<sup>26</sup> Para investigar a questão, consideremos o experimento mental do “quarto de Mary”, proposto pelo filósofo australiano Frank Jackson (1982). Imaginemos uma neurocientista chamada Mary que vive no séc. XXII, quando toda a ciência da visão em cores já teria sido desvendada. Ela foi criada em um quarto preto, branco e cinza, e nunca viu ou vivenciou cores; quando ela sai para uma balada, coloca óculos especiais para não detectar cores. Além disso, podemos supor que uma vez por semana, durante seu sono profundo, ao longo de toda sua vida, uma manipulação especial é feita em seu encéfalo, para que este não atrofie e Mary não perca a capacidade de vivenciar cores.

Por outro lado, Mary tornou-se uma renomada neurocientista, tendo estudado teoricamente e experimentalmente todos os aspectos físicos, químicos e biológicos da ciência da visão. Segundo Jackson, ela teria “conhecimento físico” completo a respeito das cores, ou seja, um conhecimento descritivo linguístico-quantitativo completo (que deixa de fora apenas o conhecimento por contato – *acquaintance* – das cores) e capacidade de realizar experimentos. A questão é: ela conhece tudo o que há para saber a respeito das cores?

Quando Mary finalmente sai do quarto e observa, pela primeira vez, uma mancha de tinta verde pintada em uma parede, ela adquire conhecimento novo? E a seguir, quando alguém lhe diz que aquela mancha tem cor verde, há algum elemento novo adicionado a seus conhecimentos sobre o verde? A resposta usual é sim. Isso indica que há uma diferença entre o “conhecimento físico” (descrição linguístico-quantitativa e capacidade experimental de manipulação) de um elemento e a vivência (*acquaintance*) do mesmo. Essa diferença é o que é chamado de *qualia*, ou qualidades subjetivas.

<sup>26</sup> CHALMERS, D.J. (2004), “O enigma da experiência consciente”, *Scientific American Brasil Especial 4, Segredos da mente*, junho, pp. 40-49; disponível online, original em inglês: 1995. Ver também: FEIGL, H. (1958), “The mental and the physical”, in Feigl, H.; Scriven, M. & Maxwell, G. (orgs.), *Concept, theories, and the mind-body problem* (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. 2), U. Minnesota Press, Minneapolis, pp. 370-497. O experimento mental do quarto de Mary é apresentado em: JACKSON, F. (1982), “Epiphenomenal qualia”, *Philosophical Quarterly* 32, pp. 127-36. Ver também: FLANAGAN, O.J. (1993), *Consciousness reconsidered*, MIT Press, Cambridge. Para uma resenha da questão, ver NIDA-RÜMELIN, M. (2010), “Qualia: the knowledge argument”, online in *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.

O chamado “argumento do conhecimento” de Jackson desemboca assim na tese de que *há conhecimento não físico sobre o mundo*. Notamos que este experimento mental define “conhecimento físico” de uma determinada maneira. Mas aceitando esta definição, conclui-se que o conhecimento de qualia é um “conhecimento não físico”. Mas poder-se-ia concluir também que os qualia *são entes não físicos*, como defende David Chalmers? Para isso, seria preciso adicionar mais uma hipótese ao argumento, de que “se algo é conhecível e se for físico, então ele é conhecível fisicamente”. Aceitando-se esta hipótese, infere-se então que há algo não-físico que é conhecível, que seriam os qualia. Portanto, o fisicismo seria falso.

Aceitando-se o argumento de Jackson, o dilema resultante é ou admitir que o fisicismo é falso, ou considerar que os qualia são físicos (escapando da hipótese de Chalmers). Esta segunda alternativa resulta no fisicismo qualitativo, ou “tese do encéfalo colorido”.<sup>27</sup> Um ponto semelhante é salientado por Owen FLANAGAN (1993, p. 98), que considera que o experimento mental do quarto de Mary refuta um fisicismo linguístico, mas não um fisicismo metafísico (ou ôntico).

Essa discussão ilumina o lugar das qualidades subjetivas no mundo material, apontando para uma “lacuna explicativa” (na expressão de Joseph Levine) entre a descrição linguístico-quantitativa da ciência e as qualidades subjetivas. Colocado brevemente: qualidades não são deriváveis de quantidades (o fisicismo qualitativo exprime isso dizendo que “materialidade e forma são distintas”). A neurociência do futuro terá que se contentar em estabelecer “leis de ponte” (termo usado por Feigl e Chalmers) entre estados encefálicos descritos quantitativamente (e manipulados experimentalmente) e estados mentais qualitativos, sendo que parte dessas leis serão *princípios não-explicados* (como ocorre em toda teoria física baseada em princípios, como a Teoria da Relatividade Restrita, onde os princípios não são explicados pela teoria, mas aceitos por causa das consequências observacionais deduzidas a partir deles). As qualidades subjetivas não poderão ser derivadas ou explicadas inteiramente de maneira mecanicista, ou seja, matemática e quantitativa; a natureza das qualidades envolve algo que está para além da representação ou modelização: a própria realidade, ou sua “materialidade”.

## 5. O que é a Física?

O que é a Física? Como se diferencia de outras áreas? Podemos apontar três maneiras de caracterizar o que é a Física.

1) Quanto ao seu *objeto de estudo*. A Física estuda sistemas inanimados (não-vivos), mas excluem-se aí sistemas envolvendo reações químicas (que é domínio da Química), a história e estrutura dos astros celestes e da Terra (Astronomia e Geologia), objetos da engenharia etc. Claro está que se pode aplicar métodos físicos para o estudo desses objetos, havendo áreas de interface: Geofísica, etc. Mesmo sistemas biológicos, tratados em seus aspectos “gerais” (por exemplo, um corpo humano que mergulha de um trampolim), são estudados pela Física Clássica, e quando analisados em escalas micro e nanoscópicas, são estudados pela Biofísica e Físico-Química.

2) Quanto aos *métodos utilizados*. Teoricamente, a Física trabalha com um conjunto de métodos, envolvendo modelagem teórica com equações diferenciais, equações de diferença, modelagem computacional, etc. Assim, em uma área como a “Econofísica”, o que se tem são técnicas matemáticas usadas em Física que são aplicadas à Economia e ao mercado de ações. Experimentalmente, os métodos de medição da Física envolvem a obtenção de valores numéricos associados a processos físicos e a construção de instrumentos cada vez mais

<sup>27</sup> PESSOA JR., O. (2019), “How to measure a quale”, *Sofia* 8: 187-98.

sensíveis para a obtenção desses números. Tais instrumentos são aplicados na maioria dos campos científicos, como nas técnicas de imagem da Neurociência.

3) Quanto à sua *visão de mundo*. A Física tende a encarar o mundo como sistemas de “coisas” sem intenções, distribuídos no espaço (espaço 3D, espaço de fase, etc.), no tempo e em diferentes escalas. Mecanismos de outros campos científicos, como a seleção natural em Biologia e os sistemas de controle (por retroalimentação) em Engenharia, são consistentes com a visão de mundo física. O fisicismo (seção II.4) é a concepção que estende a visão de mundo física para toda a natureza.

## 6. Schlick e a Questão de o que é Físico

Na seção II.4, ao nos perguntarmos se a mente é uma entidade física, ou se pode haver conhecimento físico completo sobre os estados subjetivos, discutimos implicitamente os limites do objeto de estudo da Física (ponto 1, acima). Tradicionalmente, separa-se o físico (objetivo) e o mental (subjetivo), de tal maneira que o “físico” se referiria apenas ao mundo dos objetos externos à nossa mente. Mas isso impossibilitaria a descrição física da mente, que pode ser almejada pela visão de mundo física (ponto 3). O fisicismo gostaria de incorporar as “qualidades” dentro da visão de mundo física, mas isso parece envolver métodos de conhecimento (ponto 2) que estão fora da abordagem linguístico-quantitativa da física.

Moritz Schlick foi um aluno de Planck que se tornou um importante filósofo da ciência, assassinado por um simpatizante do nazismo em 1936. Em seu primeiro livro<sup>28</sup>, publicado em 1918, antes de aderir ao nascente movimento do positivismo lógico (que ajudou a fundar oficialmente como o “Círculo de Viena”, em 1922), já tinha estudado filosoficamente a teoria da relatividade restrita de Einstein. Caracterizou a física como uma descrição espaço-temporal:

[...] a realidade é chamada “física” na medida em que ela é designada por meio do sistema conceitual quantitativo espaço-temporal da ciência natural. [...] Assim, o espaço da física, como vimos, não é representável de maneira intuitiva, mas é uma estrutura inteiramente abstrata, um mero esquema de ordenamento (p. 294).

Schlick enfatiza a importância da descrição espaço-temporal para a visão de mundo física, mas na passagem acima ele adota uma perspectiva bastante “antirrealista” (ver seção III.1) com respeito ao espaço, que seria “um mero esquema de ordenamento”. Mas a seguir ele apresenta uma visão “realista” com relação às qualidades, defendendo que a natureza é plena de qualidades, e rejeitando a noção *mecanicista* de que a natureza consiste apenas de corpos em movimento (ver seção X.4). No entanto, apenas uma parte dessas qualidades reais pode ser conhecida diretamente, justamente aquela que vivenciamos como fenômenos conscientes.

[...] devemos distinguir três domínios [...]: (1) a realidade em si mesma (o complexo de qualidades, as coisas em si); (2) os conceitos quantitativos das ciências naturais, correlacionados com a realidade e formando em sua totalidade a concepção de mundo da física; e (3) as imagens intuitivas por meio das quais as grandezas mencionadas em (2) são representadas em nossa consciência. É claro aqui que (3) é parte de (1), ou seja, é uma subdivisão da parte da realidade, que designamos como consciência.

Em qual desses reinos devemos buscar o físico? [...] Ninguém negará que quando falamos do físico, temos sempre em mente algo *atual*. Assim, a palavra “físico” está

<sup>28</sup> SCHLICK, M. (1974), *General theory of knowledge*, trad. A.E. Blumberg, Springer, New York (tradução da 2ª edição em alemão, de 1925; 1ª ed. de 1918).

sem dúvida ligada a objetos do primeiro domínio. Mas a ligação não é direta ou incondicional. Pelo contrário, o “físico” está ligado apenas àqueles objetos reais aos quais os conceitos do *segundo* domínio estão ou podem estar correlacionados. (p. 295)

Na visão fisicista de Schlick, “conceitos espaço-temporais podem ser usados para descrever *qualquer* realidade arbitrária, sem exceção, incluindo a realidade da consciência” (p. 295).

A formulação de Schlick permite fazer uma distinção entre dois tipos de propriedades físicas.<sup>29</sup> O primeiro tipo são as propriedades *descritas pelas teorias físicas*, como posição relativa, velocidade, massa, momento magnético, número de Reynolds, que são passíveis de quantificação e de simulação computacional, e que correspondem a aspectos relacionais da realidade (proporções entre grandezas reais) mas não a propriedades intrínsecas. O segundo tipo são as *propriedades reais dos objetos físicos*, que seriam propriedades intrínsecas ou essenciais (“inescrutáveis” ou “qüididades”), e que Schlick chamou de “qualidades”.<sup>30</sup>

A tese de que a física só tem acesso às propriedades relacionais das coisas é chamada de *estruturalismo na física*, sendo que por “estrutura” entende-se o conjunto de relações (causais e de outras espécies) envolvendo um objeto. Esta tese também é chamada de “realismo estrutural” (ver seção IV.4).

## 7. O Vácuo

Outro domínio que às vezes parece desafiar nossas intuições é o “nada”, o vazio, ou o *muitíssimo rarefeito*. Existe o nada? Ele é observável, é cognoscível? Na filosofia, os existencialistas Søren Kierkegaard e Martin Heidegger argumentaram que o nada não pode ser conhecido de maneira racional, mas que ele surge como o objeto da *angústia*, daquele sentimento de tristeza e pavor que não é dirigido a nenhuma coisa em particular. Nas ciências físicas, a discussão sobre o nada é associada à questão de se há um vazio absoluto.

A discussão a respeito de se é possível atingir o vazio absoluto ou, pelo contrário, se a natureza tem “horror ao vácuo”, iniciou-se na Grécia Antiga: de um lado, atomistas como Demócrito (seção X.2) defendiam que havia espaço totalmente vazio de matéria, enquanto do outro, Aristóteles e os estoicos argumentavam que não. No século XVII, Descartes concebia o Universo como um “pleno”, ou seja, sem espaços vazios, mas outros filósofos da natureza já começavam a produzir o vácuo, como Evangelista Torricelli (1643) e Blaise Pascal (1646), com uma coluna de mercúrio em um tubo selado invertido. Em 1654 Otto von Guericke construiu a primeira bomba de vácuo, e em 1660 Robert Boyle usou um tubo evacuado para mostrar que uma moeda e uma pena felpuda caem com a mesma aceleração.

O vácuo atingido nos laboratórios de Física, é claro, é um vácuo parcial. O recorde atingido em uma câmara de vácuo na Terra é de 100 mil moléculas por centímetro cúbico (cm<sup>3</sup>), o que equivale à situação na superfície da Lua. Entre os planetas há uma “densidade de número” de 10 moléculas por cm<sup>3</sup>. Entre as estrelas de uma galáxia, 1 molécula por cm<sup>3</sup>, e no espaço entre as

<sup>29</sup> Esta distinção é referida como “propriedades t-físicas” (teóricas) e “propriedades o-físicas” (do objeto) por STOLJAR, D. (2001), “Two conceptions of the physical”, *Philosophy and Phenomenological Research* 62, pp. 253-81. A concepção de Schlick é semelhante às de Ernst Mach (1886) e Bertrand Russell (1927). Ela tem recebido bastante atenção ultimamente na Filosofia da Mente, sob o nome de “monismos russellianos”; ver ALTER, T. & NAGASAWA, Y. (orgs.) (2015), *Consciousness in the physical world*, Oxford U. Press.

<sup>30</sup> Esse uso do termo é distinto daquele feito quando falamos em uma “descrição qualitativa”, como em um diagrama de transição de fase. Este caso de QUALIDADE<sub>1</sub> envolve descrição verbal ou diagramática, em oposição a uma descrição numérica. Já a QUALIDADE<sub>2</sub> não é capturável por meio de nenhuma descrição, quer matemática, verbal ou diagramática, mas só pode ser direta e subjetivamente vivenciada, ou postulada (por analogia) como um inescrutável nas coisas físicas externas (fora do encéfalo).



galáxias há em média somente 1 molécula por metro cúbico! Se pudéssemos lançar um vidrinho vazio e destapado para longe de nossa galáxia, tapá-lo (lá longe) hermeticamente, e trazê-lo de volta, teríamos uma boa chance de não termos nenhuma molécula dentro da garrafa! Teríamos assim o vácuo absoluto, com pressão zero! E agora, o que haveria dentro do vidrinho? Nada?

Nada disso! À temperatura ambiente, as paredes do vidrinho emitem radiação eletromagnética infravermelha, que permeia o interior do vidro. Além disso, há a radiação de fundo do Universo, ou seja, a radiação eletromagnética remanescente do *Big Bang*, associada a uma temperatura de 3 kelvin (ao invés dos 300 kelvin na superfície da Terra), na faixa de microondas. E haveria também a radiação provinda das estrelas, a gravidade da Terra e das estrelas, e os neutrinos que estão por toda parte.

Mas poderíamos talvez isolar o vidrinho de toda radiação eletromagnética, e abaixar a temperatura para próximo do zero absoluto. E aí? Teríamos nada? Plenamente não! O espaço vazio está sujeito a flutuações quânticas! Ele contém uma energia residual, mesmo no limite da temperatura de zero absoluto, energia esta descrita pela primeira vez por Einstein & Otto Stern em 1913, e que recebe o nome de “energia de ponto zero”.

Em 1930, o físico inglês Paul Dirac estava tentando entender as equações que havia obtido para o elétron, ao juntar Mecânica Quântica e Teoria da Relatividade Restrita. Imaginou que haveria um mar de elétrons de energia negativa, preenchendo todos os níveis de energia abaixo de  $-m_0c^2$  (Fig. II.1), de maneira que um elétron de energia positiva não poderia decair para um nível de energia negativa, não havendo assim maneira de observar tal mar de energia negativa. Poderia acontecer de um elétron ganhar energia (por exemplo, absorvendo um fóton de raio gama, com energia maior do que  $2m_0c^2$ ) e pular para fora do mar, como uma gotinha de água que às vezes sai voando. Neste caso, ficaria um buraco no mar de energia negativa, e este buraco acabou sendo interpretado como a “antipartícula” do elétron, o chamado “pósitron” (que tem todas as propriedades idênticas às do elétron, a menos da carga elétrica). Esse modelo visual simples daria conta, então, do surgimento de um par elétron-pósitron a partir da absorção de energia. O processo inverso, a aniquilação de um elétron por um pósitron (resultando em um par de fótons de raio gama), corresponderia, no modelo de Dirac, ao retorno da gotinha de água para dentro do mar.

O estado de vácuo seria o de ausência de elétrons de energia positiva, correspondendo a um mar calmo, com todos os elétrons abaixo da superfície do mar. No entanto, este mar conteria flutuações de energia (pequenas marolas), e poderia acontecer de uma gotinha pular para fora, criando um par elétron-pósitron. Esta energia do vácuo é a “energia de ponto zero” mencionada acima.

Na década de 1930, buscou-se conciliar a Teoria da Relatividade com a Teoria Quântica de Campos (indo além do que conseguira Dirac), e uma das chaves para conseguir isso foi perceber que o vácuo quântico podia ser “polarizado”, como se fosse um fluido dielétrico. O pósitron, descoberto em 1932 por Carl Anderson, passou a ser considerado uma partícula, e o modelo do mar de Dirac foi abandonado. Com a consolidação desta teoria da Eletrodinâmica Quântica por Tomonaga, Schwinger, Feynman e Dyson (seção I.3), após a 2ª Guerra Mundial, o conceito de vácuo quântico passou a ser parte integrante do nosso retrato do Universo. No entanto, tal teoria apresenta energias infinitas de vácuo, que passaram a ser tratadas pelo método da “renormalização”.

Em 1948, Hendrik Casimir previu um fascinante efeito cuja explicação envolve o conceito de vácuo quântico. O efeito envolve duas placas perfeitamente condutoras (mas sem carga elétrica) que são colocadas próximas e paralelas. A previsão é que haverá uma atração

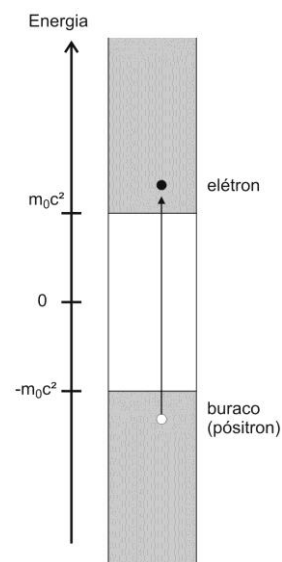


Figura II.1. O mar de elétrons de Dirac.

entre as placas, bem maior do que a atração gravitacional entre elas. A explicação é que a cavidade criada entre as placas suprime certas frequências de oscilação do vácuo, de forma que a pressão que o vácuo externo exerce sobre as placas acaba se tornando maior do que a pressão interna (onde certas ondas foram suprimidas pelas placas). Em 1997, Steven Lamoreaux confirmou experimentalmente o efeito Casimir. Tal efeito é hoje uma dificuldade para a construção de dispositivos de nanotecnologia.

O primeiro efeito explicado pela eletrodinâmica quântica, a partir da noção de vácuo quântico, foi o chamado “deslocamento de Lamb” em raios espectrais de átomos (1947). Outro fenômeno que é parcialmente explicado pelo vácuo eletromagnético é a força intermolecular de van der Waals. As flutuações do vácuo podem ser vistas também como as causas do decaimento espontâneo de elétrons em átomos.<sup>31</sup>

A energia contida no vácuo pode estar associada à “energia escura” prevista pelas teorias cosmológicas atuais, apesar de os cálculos divergirem em ordens de grandeza imensas. Tal energia se manifestaria em uma “constante cosmológica” na Teoria da Relatividade Geral, e explicaria porque a expansão do Universo é acelerada.

Discute-se também se seria possível extrair energia do vácuo para fins humanos, mas o consenso entre a maioria dos cientistas é que isso não é possível.

No final das contas, quem tinha razão entre os pensadores antigos? Os “vacuístas” (atomistas) ou os “plenistas”? Como geralmente acontece em controvérsias filosóficas que acabam sendo resolvidas pela ciência, ambos acertaram parcialmente. Os vacuístas tinham razão em poder pensar um espaço sem moléculas, mas os plenistas talvez tenham ganho o debate, já que mesmo o espaço sem átomos é carregado de energia, e de “partículas virtuais” (que, numa leitura realista, são criadas e absorvidas antes de serem detectadas).

---

<sup>31</sup> Algumas discussões filosóficas e conceituais modernas a respeito do vácuo são: SAUNDERS, S. & BROWN, H.R. (orgs.) (1991), *The philosophy of vacuum*, Clarendon, Oxford. AITCHISON, I.J.R. (1985), “Nothing’s plenty: the vacuum in modern quantum field theory”, *Contemporary Physics* 26, pp. 333-91. MILONNI, P.W. (1988), “Different ways of looking at the electromagnetic vacuum”, *Physica Scripta T21*, pp. 102-9. CLOSE, F. (2009), *Nothing: a very short introduction*, Oxford U. Press. A Fig. II.1 foi baseada em figura no site <https://universe-review.ca/R15-25-DiracEq03.htm>. A sonda epistemológica invocada para esvaziar o vidrinho de moléculas, indo para o vácuo intergaláctico e voltando rapidamente, pode ser chamada de “demônio transportador”.