

# TEC COGS

27

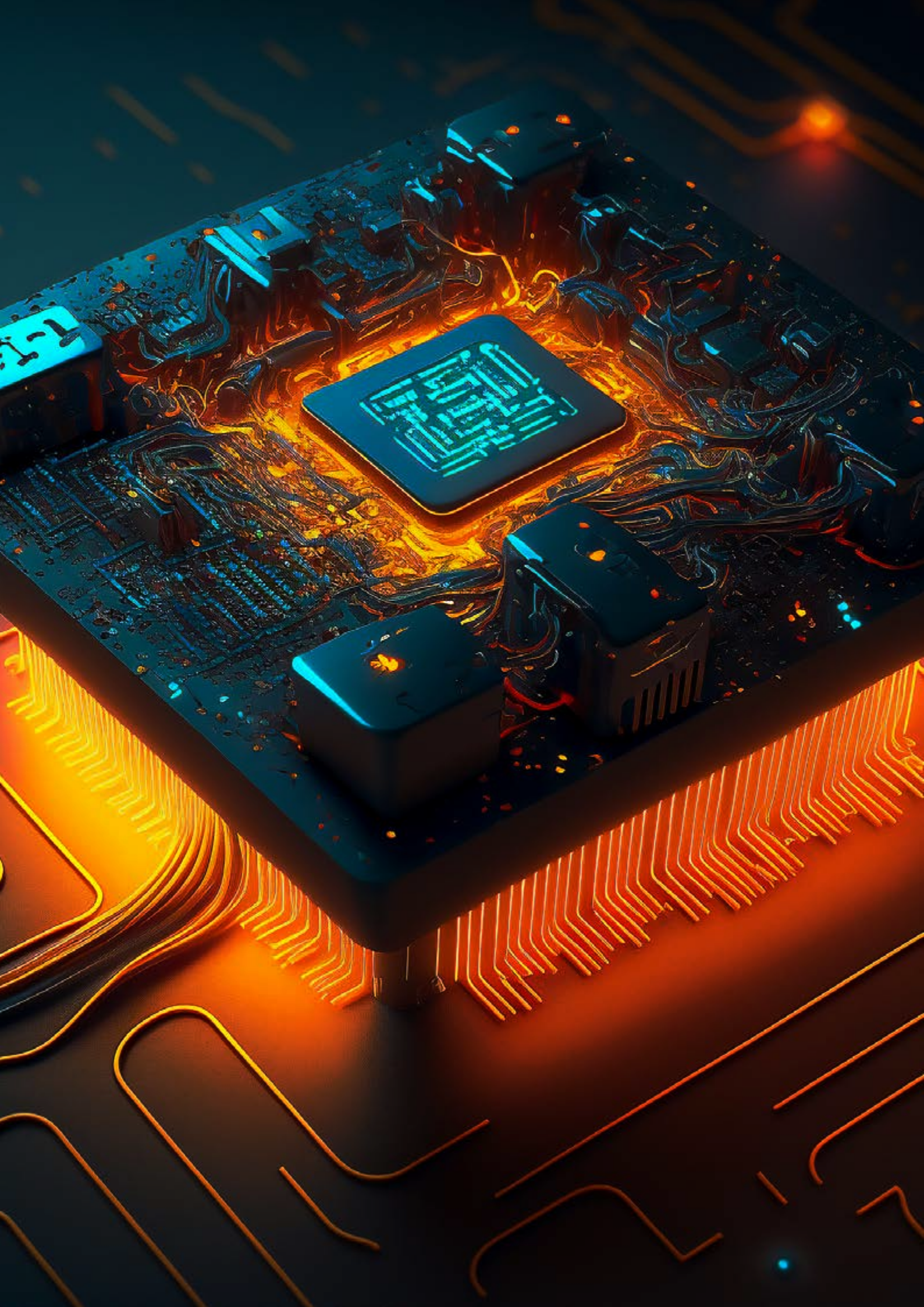
JAN./JUN.  
2023

REVISTA DIGITAL DE  
TECNOLOGIAS COGNITIVAS

ISSN  
1984-3585

## Horizontes quânticos 1

Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologias da Inteligência e Design Digital  
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo



## Expediente

TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas, n. 27, jan./jun. 2023, ISSN: 1984-3585  
Programa de Pós-graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD),  
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP).



# PUC-SP

### DIRETOR CIENTÍFICO

Prof. Dr. Winfried Nöth  
PUC-SP

### VICE-DIRETORA CIENTÍFICA

Profa. Dra. Lucia Santaella  
PUC-SP

### EDITOR DO NÚMERO

Prof. Dr. Rodrigo Petronio  
PUC-SP

### EDITOR EXECUTIVO:

Gustavo Rick Amaral  
UAM

### CAPA E PROJETO GRÁFICO

Amanda Recke

### IMAGEM DA CAPA

[https://br.freepik.com/fotos-gratis/close-up-do-ciberespaco-do-circuito-com-luzes-de-neon\\_39518202.htm](https://br.freepik.com/fotos-gratis/close-up-do-ciberespaco-do-circuito-com-luzes-de-neon_39518202.htm)

Imagem de svstudioart no Freepik

### DIAGRAMAÇÃO E DIVULGAÇÃO ONLINE

Amanda Recke

### CONSELHO EDITORIAL

Profa. Dra. Alexandra Primo  
UFRGS

Prof. Dr. André Lemos  
UFBA

Profa. Dra. Cláudia Giannetti  
Barcelona

Profa. Dra. Clarisse Sieckenius de Souza  
PUC-RIO

Profa. Dra. Diana Domingues  
UnB Gama

Profa. Dra. Geane Alzamora  
UFMG

Profa. Dra. Giselle Beiguelman  
USP

Prof. Dr. João Teixeira  
UFSCar

Profa. Dra. Luiza Alonso  
UnB

Profa. Dra. Maria Eunice Gonzales  
Unesp-Marília

Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Gudwin  
Unicamp

Prof. Dr. Sidarta Ribeiro  
UFRN



**n. 27, jan./jul. 2023**

**Sumário**

|   |     |
|---|-----|
| <b>EDITORIAL</b>  | 5   |
| Rodrigo Petronio  |     |
| <b>DOSSIÊ</b>   |     |
| Horizontes quânticos I: Arte, filosofia, ciência, tecnologia,<br>cognição e seus futuros                                | 8   |
| Rodrigo Petronio  |     |
| <b>ENTREVISTA</b>   |     |
| Entrevista com Mario Novello  | 16  |
| Rodrigo Petronio  |     |
| <b>ARTIGOS</b>  |     |
| Superposição e paralelismo quânticos: possíveis efeitos<br>em algoritmos  | 28  |
| Marcos Cuzziol  |     |
| Xenopaisagens tecnológicas vivas  | 39  |
| Iliana Hernández García e Raúl Niño Bernal  |     |
| Física quântica e cultura: influências mútuas   | 50  |
| Osvaldo Pessoa Jr.  |     |
| Introdução à teoria gerativa — Parte I: conhecimento,<br>cosmologia e emergência a partir da obra de David<br>Deutsch   | 67  |
| Rodrigo Petronio  |     |
| Universo magnético  | 89  |
| Mario Novello   |     |
| As possibilidades de ontologia presentes na teoria da<br>física quântica  | 99  |
| Leandro Tibiriça de Camargo Bastos  |     |
| <b>RESENHA</b>  |     |
| Resenha de <i>O abismo vertiginoso</i> de Carlo Rovelli   | 118 |
| Maria Junqueira Netto de Sá Benevides, Julia Stritzinger de Cassias, Luiz<br>Gustavo Queiroz Escobar e Rodrigo Petronio |     |

## Editorial

Por Rodrigo Petronio<sup>1</sup>

A revista de Tecnologias Cognitivas (TECCOGS) é vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), da PUC-SP. Os números 27 e 28 abordam o tema Horizontes Quânticos. Eu tive o prazer e a honra de organizá-los. Ambos pretendem analisar os impactos da teoria quântica nos mais diversos setores da ciência, da filosofia, da arte, da tecnologia e da sociedade contemporâneas.

Embora seja uma pesquisa de imensa complexidade na área de Física, a teoria quântica não se restringe a esses domínios e, tampouco, pode ser pensada a partir apenas da ciência. Não se trata de legitimar a apropriação da quântica pelas chamadas pseudo-ciências, apropriação esta que foi investigada minuciosamente por Gustavo Rick Amaral e Ronaldo Marin nos números 25 e 26 desta revista e que exige uma demarcação das fronteiras entre ciência e não ciência. A teoria quântica exorbita os domínios da Física porque alterou drasticamente algumas categorias e axiomas fundamentais que norteiam a filosofia, a ciência e o pensamento de modo geral, há mais de dois mil anos. Nesse sentido, todos os ramos do conhecimento tendem a ganhar consistência e complexidade ao interagir com a quântica e ao desenvolver, em suas respectivas áreas, as implicações propostas por ela.

Além disso, há um processo de culturalização da teoria quântica. O que seria isso? Seria o conjunto de todos os desdobramentos dessa teoria, independentemente de serem mais ou menos legítimos do ponto de vista estrito da ciência. O ponto mais agudo dessa culturalização ocorre nas tecnologias digitais e, sobretudo, na computação. Nesse processo de culturalização, a ciência se torna cada vez mais uma tecnociência. E a tecno-

---

<sup>1</sup> Rodrigo Petronio é escritor e filósofo. Professor titular da FAAP, é autor de 17 livros e de centenas de ensaios e artigos. Atua na fronteira entre comunicação, literatura e filosofia. Formado pela USP, tem dois mestrados: em Filosofia da Religião (PUC-SP) e em Literatura Comparada (UERJ) Realizou o Doutorado na UERJ/Stanford University. Desenvolveu um pós-doutorado sobre a cosmologia de Alfred North Whitehead (2018-2020) no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), na PUC-SP, onde atualmente é pesquisador. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4473-2193>. Site: [www.rodrigopetronio.com](http://www.rodrigopetronio.com). Contato: [rodrigopetronio@gmail.com](mailto:rodrigopetronio@gmail.com).

ciência cada vez mais se subordina aos domínios do capitalismo. Nesse sentido, compreender a quântica como um vetor de novos dispositivos de saber-poder não é facultativo. É urgente e imperativo. Não se trata, portanto, aqui, de denunciar as derivações da quântica em pseudociências. Trata-se de compreender como sua capitalização tem determinado e deve determinar cada vez mais a cientificidade de uma ciência cada vez mais convertida em tecnociência. A partir dos impactos positivos e negativos da quântica em ciências e vertentes distintas do pensamento, o dossiê Horizontes Quânticos pretende perseguir essas indagações e perplexidades.

The image is a high-contrast, black and white photograph of a circuit board. The board is angled, showing a dense network of glowing traces and components. The lighting is dramatic, with bright highlights on the traces and components, set against a deep black background. The overall aesthetic is futuristic and technical.

**DOSSIÉ**

## Horizontes quânticos 1:

# Arte, filosofia, ciência, tecnologia, cognição e seus futuros

Por Rodrigo Petronio<sup>1</sup>

**Resumo:** O dossiê *Horizontes Quânticos 1* propõe um levantamento de alguns impactos importantes da teoria quântica em diversos setores do conhecimento e da tecnologia, da computação quântica, da cosmologia e das novas tecnologias vivas passando por questões culturais, epistemológicas, ontológicas e chegando à divulgação científica. O intuito não é detalhar um ou outro aspecto mais específico da teoria quântica, embora contenha artigos que o façam. Tampouco esgotar nenhum ponto de vista de um tema tão complexo e vasto. O objetivo do dossiê é explorar diversos impactos e desdobramentos produtivos que a teoria quântica pode ter (e de fato tem tido) em quase todas as áreas das ciências naturais e humanas e das tecnociências.

**Palavras-chave:** quântica; conhecimento; tecnociência; epistemologia; cultura; cosmologia, ontologia.

---

<sup>1</sup> Rodrigo Petronio é escritor e filósofo. Professor titular da FAAP, é autor de 17 livros e de centenas de ensaios e artigos. Atua na fronteira entre comunicação, literatura e filosofia. Formado pela USP, tem dois mestrados: em Filosofia da Religião (PUC-SP) e em Literatura Comparada (UERJ) Realizou o Doutorado na UERJ/Stanford University. Desenvolveu um pós-doutorado sobre a cosmologia de Alfred North Whitehead (2018-2020) no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), na PUC-SP, onde atualmente é pesquisador. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4473-2193>. Site: [www.rodriropetronio.com](http://www.rodriropetronio.com). Contato: [rodriropetronio@gmail.com](mailto:rodriropetronio@gmail.com).



## **Quantum horizons 1: Art, philosophy, science, technology, cognition, and their futures**

**Abstract:** The dossier *Quantum Horizons 1* proposes a survey of some important impacts of quantum theory in many sectors of knowledge and technology, quantum computing, cosmology, and new living technologies, such as cultural, epistemological, ontological issues and reaching scientific dissemination. Its purpose is neither to detail one or another specific aspect of quantum theory (although some articles do so); nor does it exhaust any specific perspective of this complex topic. The objective is to explore the most pluralistic impacts and productive developments that quantum theory can have (and in fact has had) in almost all areas of the natural, human sciences, as well as the technosciences.

**Keywords:** quantum; knowledge; technoscience; epistemology; culture; cosmology; ontology.

A teoria quântica não se restringe à Física. Representa uma das maiores revoluções cognitivas da humanidade. Tendo em vista sua interface com as novas tecnologias, sobretudo com a computação, a quântica adquire uma centralidade e uma urgência ainda maiores. Vê-se, então, a pertinência de mapear as alterações que essa revolução tem produzido no âmbito das Tecnologias da Inteligência e das Tecnologias Cognitivas. E quais principais alterações essa revolução deve produzir nas próximas décadas.

Para rastrear essas alterações profundas, este número 27 abre com uma entrevista exclusiva com o cosmólogo Mario Novello, um dos cientistas e pensadores brasileiros mais destacados do mundo. Criador do grupo de Cosmologia e Gravitação no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) em 1976, Novello inaugurou o estudo sistemático da Cosmologia no Brasil. Em 1979, criou o primeiro modelo cosmológico com solução analítica com *bouncing* (ricochete), alternativo à teoria do big bang. Em 2003, funda o Instituto de Cosmologia Relatividade e Astrofísica (ICRA), que foi alocado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia sob o guarda-chuva institucional do CBPF. Além de centenas de artigos científicos, é autor de diversos livros, discriminados na abertura da entrevista.

Nesta entrevista, Mario fala um pouco de *Os construtores do cosmos* (2023), seu novo livro, que acaba de ser lançado pela Global. E conta um pouco sobre a sua trajetória intelectual e acadêmica, dando ênfase às etapas mais importantes da formação de seu pensamento científico. Em sua obra e em sua pesquisa, tem, sobretudo, procurado compreender como a teoria quântica pode nos ajudar a produzir novos modelos na cosmologia. E quais as implicações da flutuação quântica para a descrição de um esquema global do universo. Sobressai em sua entrevista e em seus livros a necessidade de convergência entre as ciências da natureza e as ciências humanas para conseguirmos ter de fato uma compreensão efetiva da cientificidade da ciência, em um mundo cada vez mais dominado pela tecnificação do conhecimento.

Marcos Cuzziol é pesquisador colaborador do Instituto de Estudos Avançados da USP (IEA-USP) e desenvolveu seu doutorado na Escola de Comunicação e Artes (ECA-USP) justamente sobre a noção quântica de estados superpostos. Investigou a possibilidade de, a partir deles, gerar modelos matemáticos para games 3D. Em seu artigo, Cuzziol analisa como a computação quântica pode se valer dos chamados algoritmos genéticos. A aliança entre os processos evolutivos darwinianos e o aumento exponencial de processamento, velocidade e armazenamento dos qubits,

prometidos pela computação quântica, podem conduzir a vida a um novo patamar evolutivo, radicalmente distinto da evolução por seleção natural que se operou na Terra ao longo de bilhões de anos. Presenciaremos, talvez ainda em poucas décadas, uma alteração radical dos conceitos de vivo e de não vivo. Cuzziol se apoia nos estudos pioneiros de John Holland que, nos anos 1970, analisava as formas de adaptação em sistemas artificiais e naturais. Devido ao fato de ter sido gerente do núcleo de Inovação do Instituto Itaú Cultural ao longo de vinte anos (2000 a 2020), Cuzziol possui uma visão muito aguda acerca das potencialidades interacionais natural-artificial. E como a computação quântica deve alterar drasticamente essas interações e esses cenários humanos-não humanos.

Em um sentido semelhante, em um instigante ensaio, os pesquisadores colombianos Iliana Hernández-García e Raúl Niño-Bernal analisam as xenopaisagens e as tecnologias vivas. Partem da noção de Novacene, a nova era natural-artificial da Terra cunhada por James Lovelock, criador da teoria Gaia junto com a bióloga Lynn Margulis. Valem-se do radical grego xeno- para abordar formas pós-evolutivas de vida sintética, seres animados e agências inorgânicas que podem, por meio da nanotecnologia, adquirir um estatuto ontológico semelhante ao dos seres vivos. Essas novas formas de vida seriam, daqui para a frente, hiperinteligências artificiais que devem se somar às inteligências orgânicas para cuidar de Gaia e nos auxiliar a reverter os efeitos devastadores do Antropoceno. Para evidenciar essas novas manifestações dessa nova natureza do vivo e da vida, estranhos e alheios aos processos-padrão evolutivos, Iliana e Raúl analisam as obras de dois artistas: a britânica Libby Heaney e o colombiano Juan M. Castro. Ambos trabalham com vida artificial e modelos derivados da computação quântica. Os autores exploram, então, esse novo horizonte da Terra, no qual vida e protovida devem se permeabilizar e se unir, em xenopaisagens que unifiquem Gaia e Novacene.

Seguindo outra abordagem, Osvaldo Pessoa Jr. se concentra nas influências mútuas entre a teoria quântica e a cultura. Professor titular de Filosofia da Ciência no Departamento de Filosofia da USP (FFLCH-USP), Osvaldo é uma das maiores referências brasileiras e internacionais em filosofia da quântica e em filosofia da mente. Além de ter defendido sua tese de Doutorado no Departamento de História e Filosofia da Ciência na Universidade de Indiana (EUA) justamente sobre o problema da medição na física quântica (1990), o seu livro *Conceitos de física quântica* (2003), em dois volumes, é uma referência sobre o assunto. O mesmo se pode dizer sobre o livro *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*,

organizado com o pesquisador brasileiro Olival Freire Jr. (UFBA) e com a pesquisadora estadunidense Joan Lisa Bromberg (Johns Hopkins University), ganhador de um Prêmio Jabuti de 2011. Em seu artigo, a despeito das demandas de racionalidade e objetividade que constituem o cerne da ciência, Osvaldo analisa como aspectos contingentes, conjunturais e culturais foram importantes para a modelização da nova imagem da natureza que emerge com a teoria quântica. A partir dos trabalhos clássicos de Paul Forman e Max Jammer, ressalta o papel que algumas crenças e ideias filosóficas, sobretudo o livre-arbítrio e a causalidade, desempenharam em algumas formulações essenciais da teoria quântica, em termos pragmáticos, epistemológicos e mesmo ontológicos.

Partindo de uma investigação de um campo expandido da teoria quântica, em meu artigo investigo um conceito que tenho desenvolvido: o gerativismo. A cosmologia gerativa é um aprofundamento das cosmologias contemporâneas baseadas no conceito de multiverso. Para tanto, tomo como ponto de partida a obra de David Deutsch, um dos pioneiros da computação quântica, das cosmologias emergentistas e da complexidade computacional. Este artigo se restringe a sinalizar os limites de algumas vertentes da epistemologia e da filosofia da ciência, tais como o reducionismo, o holismo, o empirismo, o indutivismo, o instrumentalismo e o positivismo, demarcando suas distinções em relação ao gerativismo e às abordagens emergentistas. Ao fazê-lo, defini alguns eixos das propriedades emergentes e, por conseguinte, alguns eixos de orientação do gerativismo.

Em uma perspectiva mais aderente à cosmologia, além da entrevista, Mario Novello nos brindou com um artigo para este número da revista. E seu artigo aborda um tema fascinante — e que ainda deve dar ensejo a muita investigação: o papel do eletromagnetismo no universo. Como podemos pensar em um modelo cosmológico sem singularidade a partir da interação das duas grandes forças fundamentais, o eletromagnetismo e a gravitação? Nesse modelo, a gravitação seria baseada no modelo padrão da Teoria da Relatividade Geral; e o magnetismo, em uma identificação do espaço-tempo como um fluido perfeito, por meio de uma teoria não linear. O resultado seria um universo espacialmente homogêneo e isotrópico, eterno e cíclico, que se coaduna com as exigências dos modelos de bouncing, criados por Mario. Este modelo prescindiria de explicações a partir de formas desconhecidas de energia, como a energia escura, em voga no debate internacional e nas divulgações midiáticas. Os dois campos clássi-

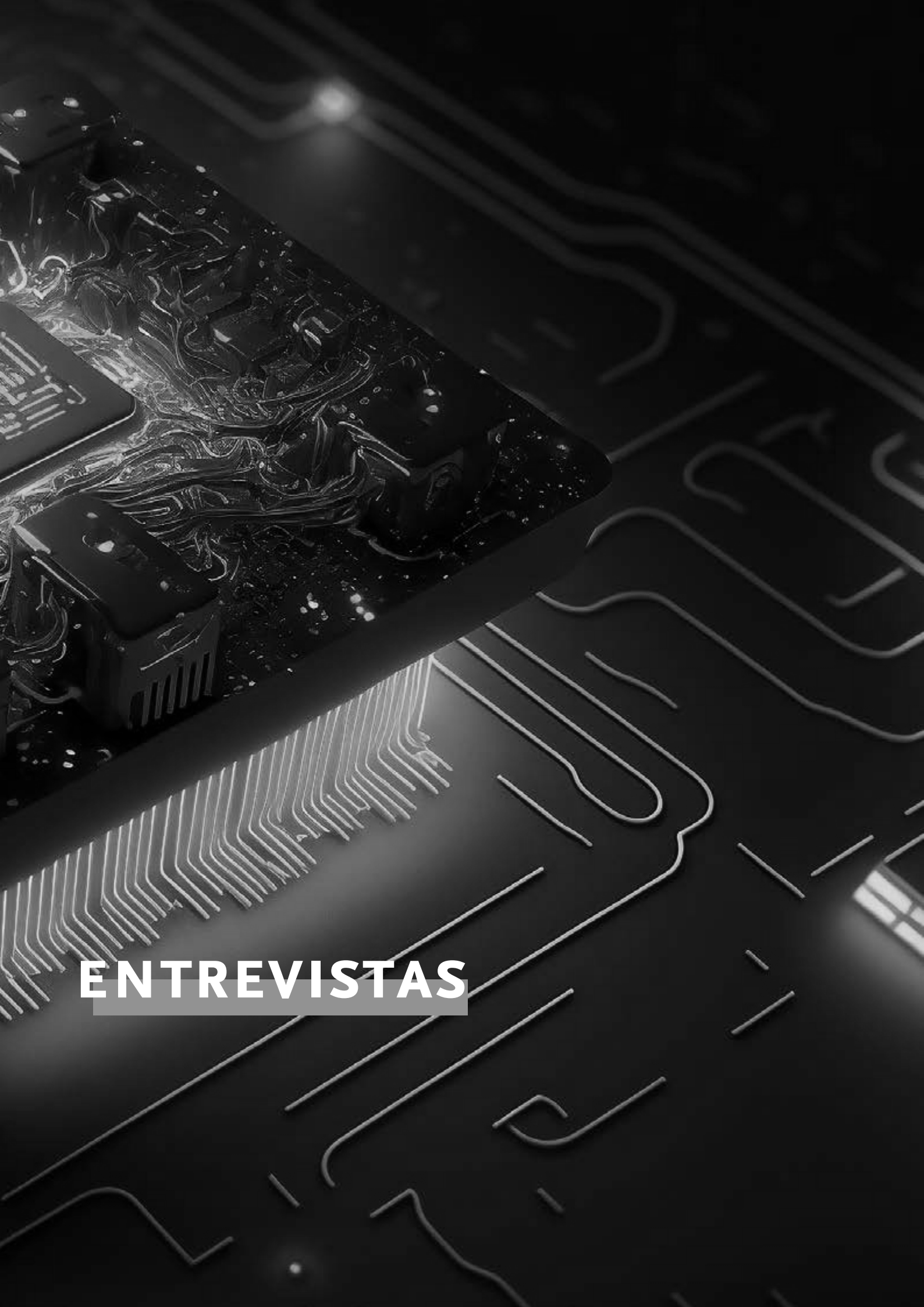
cos unificados seriam suficientes para produzir um modelo cosmológico que atenda às exigências observacionais.

Como se sabe, uma das interpretações-padrão da teoria quântica é a da chamada Escola de Copenhagen. Surgiu dos esforços pioneiros de Nils Bohr, Werner Heisenberg e de uma rede de alguns dos maiores físicos do século XX para transformar a quântica em uma teoria consistente. Essa consistência foi confirmada e não para de se reafirmar, tantos em termos empíricos e observacionais quanto em termos lógicos e matemáticos. A quântica conseguiu dirimir e refutar as objeções que mesmo Einstein, um de seus fundadores, lhe havia feito, acusando-a de ser um modelo inacabado, de se apoiar em variáveis ocultas e de recorrer às fantasmagóricas ações a distância. Esse sucesso da teoria quântica se deve em grande parte à abordagem antirrealista e analítica dada por Bohr. Por meio da teoria da complementaridade, Bohr demonstrou que não era preciso afirmar o acaso, a aleatoriedade e a incerteza como elementos reais, imanentes à natureza. Bastaria que os concebêssemos como propriedades instauradas pelas medições e pelas descrições, entendidas como interatores que também alteravam essa mesma realidade. Ao incorporar os processos descritos para o interior dos processos de descrição, Bohr rompeu os finos liames que nos prendiam ao real.

Nesse sentido, como pensar a ontologia no âmbito da teoria quântica? Essa é a pergunta que Leandro Tibiriçá de Camargo Bastos explora em seu artigo. A obra seminal de Peter Lewis, *Quantum Ontology: A Guide to the Metaphysics of Quantum Mechanics*, tomada como ponto de partida, levanta as principais implicações ontológicas presentes na teoria quântica. Explora em que medida essa ontologização é produtiva e em que medida pode apenas aumentar os problemas. O tema é vasto e demandaria uma incursão não apenas pela metafísica. Exigiria uma exploração dos domínios da metametafísica e da metaontologia contemporâneas. Leandro se abstém dessa proposta, inexequível em um artigo. E procede a uma análise minuciosa de conceitos, obras, problemas, matrizes e impasses que cada ontologia representa para a elucidação dos diversos problemas e campos quânticos. Ademais, em vez de inserir o debate dentro do grande arco da ontologia ocidental, desde a Antiguidade, Leandro segue Lewis e apenas expõe as mudanças mais substantivas que a quântica traz para nossas categorias fundamentais, tais como unidade, causalidade, relação, tempo, espaço, universo, dentre outras. A formação de Leandro é interdisciplinar. Une a teoria da literatura, a teoria da tradução, a dramaturgia e a teoria social, sobretudo de base marxista. Embora não chegue a adentrar

esse debate, pensada em sua dimensão social, essa mediação interdisciplinar entre a ontologia e a quântica é importante para politizar o debate. E para refletirmos sobre os mundos e realidades possíveis que essa teoria científica pode nos ajudar a construir.

Por fim, a resenha do dossiê é sobre o livro *O abismo vertiginoso: um mergulho nas ideias e nos efeitos da física quântica*, do cosmólogo italiano Carlo Rovelli. Tive o prazer de escrevê-la a oito mãos com os pesquisadores Maria Junqueira Netto de Sá Benevides, Julia Stritzinger de Cassias e Luiz Gustavo Queiroz Escobar, meus alunos da Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP). Rovelli se tornou mundialmente conhecido do grande público a partir de seu trabalho de divulgação científica de alta qualidade, representado pelos livros *A realidade não é o que parece*, *Sete breves lições de física*, *A ordem do tempo*, dentre outros. Para além da fama, Rovelli desenvolveu um modelo gravitacional quântico em loop, uma cosmologia relacional, e tem se dedicado a enfatizar a natureza informacional do universo, bem como a centralidade da noção de informação na cosmologia. Isso o torna um dos nomes proeminentes da interface entre teoria quântica, cosmologia, teoria da comunicação e a teoria da informação. Esse aspecto de sua obra sinaliza as possibilidades imensas, e ainda inexploradas, da teoria quântica para Ciência da Comunicação, as Tecnologias da Inteligência e as Tecnologias Cognitivas. Esperamos que este dossiê estimule mais pesquisadores a empreender essa viagem.



# ENTREVISTAS

# Entrevista com Mario Novello<sup>1</sup>

## O começo da eternidade

Por Rodrigo Petronio<sup>2</sup>

Mario Novello é um cientista, pensador brasileiro e um dos cosmólogos mais destacados do mundo. Com Doutorado em Física pela Universidade de Genebra (1972), criou em 1976 o grupo de Cosmologia e Gravitação no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), inaugurando em nosso país o estudo sistemático da Cosmologia. Elaborou em 1979 o primeiro modelo cosmológico com solução analítica com bouncing (ricochete), isto é, neste modelo o universo possui uma fase anterior de colapso, onde o volume total do espaço diminuiu com o tempo, atingido um valor mínimo e, depois, passa a se expandir.

Em 2003 criou o Instituto de Cosmologia Relatividade e Astrofísica (ICRA) que foi alocado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia sob o guarda-chuva institucional do CBPF. Em setembro de 2012, foi nomeado Professor Emérito por sua atuação como cientista e formador de cientistas durante os 40 anos que trabalhou como pesquisador no CBPF.

Em 2004, recebeu o título de Doutor Honoris Causa pela Universidade de Lyon (França) por seus estudos sobre modelos cosmológicos sem singularidade. E, em 2006, um prêmio do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas por ter sido o cientista que mais orientou teses de mestrado e doutorado na história do CBPF. Foi nomeado em 2008 Cesare Lattes Professor pelo Comitê Científico do International Center for Relativistic Astrophysics (ICRANet), presidido por Riccardo Giacconi, Prêmio Nobel da Física (2002).

---

<sup>1</sup> Mario Novello é Professor Emérito do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Doutor em Física pela Universidade de Genebra (Suíça, 1972). Em 1979, descobriu o primeiro modelo cosmológico sem singularidade representando um universo eterno possuindo bouncing. Em 2004 recebeu o título de Doutor Honoris Causa da Universidade de Lyon (França) por seus estudos sobre a origem do universo. É autor de inúmeros artigos científicos e dos livros *Máquina do tempo*, *Os sonhos atribulados de Maria Luisa*, *O que é Cosmologia?* e *Do big bang ao universo eterno* – publicados pela Editora Zahar. Publicou também os livros *O universo inacabado* (Editora N-1) e *Os cientistas da minha formação* (Livraria da Física), que recebeu um prêmio Jabuti. Em 2023, publicou *Os construtores do cosmos* (Editora Global). Fundou e dirige a revista eletrônica *Cosmos & Contexto*, dedicada a pensar a cultura científica: [www.cosmosecontexto.org.br](http://www.cosmosecontexto.org.br). Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4686-9313>.

<sup>2</sup> Rodrigo Petronio é escritor e filósofo. Professor titular da FAAP, é autor de 17 livros e de centenas de ensaios e artigos. Atua na fronteira entre comunicação, literatura e filosofia. Formado pela USP, tem dois mestrados: em Filosofia da Religião (PUC-SP) e em Literatura Comparada (UERJ) Realizou o Doutorado na UERJ/Stanford University. Desenvolveu um pós-doutorado sobre a cosmologia de Alfred North Whitehead (2018-2020) no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), na PUC-SP, onde atualmente é pesquisador. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4473-2193>. Site: [www.rodrigopetronio.com](http://www.rodrigopetronio.com). Contato: [rodrigopetronio@gmail.com](mailto:rodrigopetronio@gmail.com).



Em novembro de 2010 foi homenageado pela Comunidade Científica Internacional com o I Symposium Mario Novello on Bouncing Models. Em agosto de 2012, foi a vez de ser homenageado com o 70th Anniversary Symposium Mario Novello. Em 2017, recebeu um prêmio Jabuti pelo livro *Os cientistas da minha formação*.

Além de centenas de artigos científicos, as principais obras de Novello são: *Cosmos e contexto* (1988), *Os jogos da natureza: a origem do universo, os buracos negros, a evolução das estrelas e outros mistérios da natureza* (2004), *Máquina do tempo: um olhar científico* (2005), *O que é Cosmologia? A revolução do pensamento cosmológico* (2006), *Os cientistas da minha formação* (2006), *Do big bang ao universo eterno* (2010), *O universo inacabado* (2018), *Quantum e cosmos: uma introdução à metacosmologia* (2021), *Manifesto cósmico I e II* (2022) e *Os construtores do cosmos* (2023).

A partir de 2023, a editora Global passa a editar a Série Mario Novello, que deve ser coordenada por mim e cujo objetivo é unificar sua obra, tanto éditada quanto inédita. Novello também é Diretor Editorial da revista *Cosmos e Contexto*: [www.cosmosecontexto.org.br](http://www.cosmosecontexto.org.br). Segue abaixo a entrevista que ele gentilmente nos concedeu com exclusividade para este dossiê Horizontes Quânticos, da revista TECCOGS.

**Rodrigo Petronio (RP):** *Gostaria de começar com uma pergunta mais pessoal, sobre a sua trajetória. Como você chegou à ciência? E, mais especificamente, à Física? Desde o começo dos seus estudos o senhor queria se orientar para a Cosmologia? Como foi a construção desse percurso pela ciência, pela Física e pela Cosmologia?*

**Mario Novello (MN):** Meu interesse pela cosmologia teve dois momentos importantes, um bastante ingênuo e outro verdadeiramente de formação. O primeiro ocorreu quando, adolescente, recebi um presente de meu pai: um livro intitulado *O Universo e o doutor Einstein*. Esse livro me fascinou e me fez afirmar categoricamente a meu pai: “Eu quero ser igual a ele e entender o universo.” O que parecia ingenuidade infantil, acabou se revelando premonitório.

Isso se deveu em parte à influência de meu professor de química no Colégio Andrews, Ernesto Tolmasquin. Uma vez por semana eu ia encontrá-lo no Instituto de Tecnologia, que ficava na Praça Mauá (se não me enganar), onde ele trabalhava como pesquisador. Ali, conversávamos sobre

várias questões e ele, com uma paciência enorme, respondia a minhas dúvidas sobre a carreira de cientista que eu pretendia seguir.

Decidi então entrar para o curso de Física na antiga Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi). No entanto, por questões fortuitas, assisti, em todo o primeiro ano, às aulas do curso de Filosofia, e não às da Física. Mas, o ambiente hegeliano que ali havia não me agradou muito.

No ano seguinte (1962), voltei ao curso de Física, onde encontrei uma professora, Elisa Frota Pessoa, que me entusiasmou e me fez conhecer o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, na Urca. Ali, pude encontrar vários cientistas, como Leite Lopes, Cesar Lattes, Jayme Tiomno, Leopoldo Nachbin, Colber Gonçalves de Oliveira, Carlos Márcio, Alfredo Marques e outros. O ambiente era maravilhoso, respirava-se ciência. Lembro que Tiomno havia recém-feito a proposta da existência de uma partícula (meson-k) que estava sendo examinada pelos físicos americanos e europeus. Uma revista popularizou com ênfase essa descoberta.

Terminado o curso na FNFi, fui fazer mestrado com Leite. Em 1968, depois de defender minha tese sobre a eliminação de singularidades no eletromagnetismo clássico, e como a ditadura havia cassado praticamente todos aqueles físicos do CBPF, Leite sugeriu que eu fosse fazer meu doutorado fora, com seu antigo professor, o famoso físico Joseph Maria Jauch, que dirigia o Institut de Physique Théorique (IFT) em Genebra, Suíça.

Depois de terminado meu doutorado (com uma tese sobre a formulação da álgebra do espaço-tempo e a gravitação) e como havia ainda um ano de bolsa, a CAPES aceitou que eu usasse essa bolsa para um pós-doutorado em Oxford com o professor Denis Sciama. Ali, o ambiente era completamente diferente do IFT. Seus alunos eram totalmente dedicados à Cosmologia e à Astrofísica, dentre eles, Roger Penrose, Stephen Hawking, George Ellis e outros. Nesse ambiente, era inevitável que meu antigo interesse pela cosmologia deveria reaparecer. E isso aconteceu com mais força ainda quando Sciama me selecionou para participar da primeira Escola de Cosmologia de Cargèse, na Córsega.

Essa Escola foi uma maravilha de encontros com o que eu sempre pensara deveria ser a atividade científica. Posso dizer, sem dúvida, que foi ali que me tornei o primeiro cosmólogo brasileiro.

*RP: O seu trabalho é um dos mais importantes da Cosmologia mundial. Em meio à miríade de referências a autores, obras e teorias que o senhor articula, alguns nomes se sobressaem, como Alexander A. Friedmann e Kurt Gödel.*

*Em seu livro “Os cientistas da minha formação”, o senhor aborda passo a passo esse processo formativo, seus mestres e interlocutores. O senhor poderia resumir quais teriam sido os cientistas e teorias decisivos para a formação da sua obra e de suas principais teses?*

**MN:** Posso citar vários, mas principalmente Fred Hoyle, Jayant V. Narlikar, Alexander A. Friedmann e Lev D. Landau. Os três primeiros pela liberdade do pensamento e a ousadia em criticar ideias consideradas certas pelo establishment. Landau, pela clareza do raciocínio e a simplicidade das soluções que produziu em temas básicos da Física. As teorias de Hoyle e Narlikar, contrariamente ao cenário do modelo cosmológico big bang, constituíam uma bela proposta que se sustentava na certeza de que a Física não pode lidar impunemente com a noção de infinito. No entanto, a solução alternativa que eles produziram não me satisfaz. Por isso, embora aceitando a crítica ao modelo singular de Friedmann, fui à procura de uma outra proposta de cenário cosmológico não singular, capaz de ser compatível com todas as observações de natureza cosmológica. Hoje, vejo que esse horror do infinito já estava presente na escolha que fiz de minha dissertação de mestrado.

Quanto a Gödel, é um caso muito especial, pois ele produziu o belíssimo resultado formal de que a causalidade local não implica causalidade global. As consequências dessa demonstração são inúmeras e vão desde a dependência das leis físicas com as propriedades globais do universo até relações filosóficas envolvendo a noção de tempo cósmico. Sua influência sobre meu modo de entender o universo foi bastante considerável.

**RP:** *O livro Máquina do tempo: um olhar científico é um dos mais fascinantes de sua obra. E um dos mais singulares da ciência brasileira. Como as investigações sobre viagens no tempo e outros temas metafísicos e especulativos podem contribuir para a Cosmologia contemporânea? O senhor acha que há muitas vezes pouca ousadia imaginativa na ciência?*

**MN:** Veja, é preciso distinguir bem ousadia científica de acenos especulativos. Do meu modo de ver, algumas teorias científicas não deveriam ter tido o sucesso midiático que alcançaram, como, por exemplo, a teoria do *big bang* e a teoria das cordas, para citar somente dois exemplos bem relevantes.

Recentemente, organizei uma conferência em que vários companheiros físicos expuseram algumas teorias que, em seu começo, foram tratadas como absurdas ou impossíveis de serem verdadeiras. Chamei Os Transgressores a essa série de palestras. Se você puder ouvir ou ler essas exposições (creio que estão disponíveis na revista *Cosmos e Contexto*), você vai se dar conta de que aquelas pessoas tiveram sucesso em suas carreiras, como Paul Dirac, Kurt Gödel, Albert Einstein e outros. No entanto, todos eles tiveram que vencer preconceitos associados a antigas ideias consideradas “verdades científicas”. Ao lermos com atenção os primeiros trabalhos desses transgressores, nos damos conta de que suas propostas sempre estavam muito bem embasadas, teórica e/ou observacionalmente.

Não me agradam as especulações que pretendem gerar novas formas de representar o mundo e que não são possíveis de serem postas sob a luz de observações efetivamente realizáveis, mesmo que indiretamente.

*RP: O seu livro Os construtores do cosmos acaba de ser publicado pela editora Global. É o primeiro da Série Mario Novello que deve publicar novas obras suas e reeditar outras esgotadas. Sinto que nesse livro o senhor procura historicizar mais a Cosmologia. E o faz de modo notável. Como o senhor vê este livro no panorama geral de sua obra? Seria um novo aspecto da historicidade que o senhor tem há décadas reivindicado para a Cosmologia e para as próprias leis cósmicas?*

**MN:** Nesse livro, conto algumas histórias sobre uns poucos cientistas que, no meu modo de ver, fizeram avançar significativamente a ciência e, em particular, nossas ideias sobre o universo. Algumas dessas ideias ainda não satisfizeram meu critério de serem observacionalmente apoiadas, mas elas produziram consequências que podem ser observadas. Por exemplo, a ideia de quantização gravitacional, a questão da origem da massa e a estranha proposta formal de Markov de que nosso universo pode ser um átomo de um super universo. Essas ideias, por mais estranhas que possam parecer, estão baseadas em teorias solidamente confirmadas, como a Relatividade Geral e a Teoria Quântica. No entanto, podemos criticar a ideia de que todas as soluções das equações de uma teoria correta podem efetivamente ser realizadas nesse nosso universo. Nesse livro pretendo efetivamente, como você diz, pôr em relevo a historicidade que uma cosmologia dinâmica permite.

**RP:** *A sua obra é interdisciplinar. Incorpora à Cosmologia contribuições da Historiografia, da Matemática, da Cosmogonia, da Física e sobretudo da Filosofia. Qual a relação que o senhor imagina que a Cosmologia deva estabelecer com outras ciências? E, mais especificamente, com as ciências humanas?*

**MN:** Meu ideal de atividade científica se reporta ao início da ciência como a entendemos, depois da revolução do século de Kepler e companheiros. Ali, esses pioneiros não tinham nenhuma restrição a pensar apoiados em várias áreas do saber, e até mesmo em propostas que hoje não seriam consideradas de “natureza científica”. Creio que a divisão das universidades em faculdades foi um péssimo momento para o conhecimento. O saber não deve ser compartimentado. Na minha Faculdade (FNFi), tínhamos no mesmo prédio cursos de Física, Química, Sociologia, Filosofia, Letras, Biologia e outras. Isso permitiu-nos adquirir um embasamento global, que permitia dialogar com os diferentes saberes. Anos depois, essa faculdade se mudou para o Fundão, se tornou Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), deixou de ser Universidade do Brasil. Assim como diminuiu seu nome (o Brasil se restringiu ao Rio de Janeiro), as diversas faculdades ganharam, cada uma delas, um verdadeiro prédio de vários andares. Para ir de um prédio a outro, você tem que andar uma boa estrada. Na FNFi, quiséssemos ou não, encontrávamos cotidianamente nossos colegas de outras áreas.

Essa mistura geográfica, longe de ser um detalhe sem importância, foi relevante no cotidiano de nossas atividades. No caso da Cosmologia, a situação é um pouco mais crítica, pois ela sempre foi associada à questão da origem de nosso universo. Assim, se torna quase inevitável que devamos olhar para outros saberes para retirarmos da Cosmologia um peso que lhe é atribuído como substituto da religião, dos diferentes mitos de criação. Por essa errônea identificação do modelo *big bang* com o “começo do mundo”, comecei a chamá-lo de “mito cosmológico de criação”.

**RP:** *Seguindo a questão anterior, quais os principais ganhos da interdisciplinaridade? E quais os seus principais desafios?*

**MN:** A caminhada para entendermos nosso universo deve ser feita coletivamente. Até mesmo porque, algumas áreas de saber questionam se estamos realmente descobrindo como esse universo se organizou ou se estamos construindo uma representação dele que fala mais de nós do que do universo.

**RP:** *A despeito da complexidade do tema, como o senhor definiria a metacosmologia, criada pelo senhor?*

**MN:** A metacosmologia pretende examinar questões que os cientistas até recentemente não ousavam atacar frontalmente, considerando-as fora da atribuição da ciência, tratando-as como questões pertinentes exclusivamente a outro território, a Filosofia. No entanto, a evolução notável da Cosmologia nas últimas décadas gerou a possibilidade de tratar essas questões como evolução natural da análise das propriedades globais do universo.

Por exemplo, questões como “por que existe alguma coisa e não nada; a possível dependência das leis físicas do tempo cosmológico; a distinção entre a causalidade local e a causalidade global; por que existe somente matéria no universo e não antimatéria (posto que nos laboratórios terrestres há uma notável simetria entre elas)”, e outras do mesmo tipo. Em verdade, nos anos recentes e devido à evolução da Cosmologia, a metacosmologia aparece como sua extensão natural.

**RP:** *O senhor é um pioneiro mundial em modelos cosmológicos alternativos ao modelo do big bang. Formulou seu modelo de bouncing (ricochete), sem singularidade, décadas atrás, quando criticar o big bang era uma heresia. Como o senhor vê esse debate hoje em dia? Há mais avanços e menos dogmatismos?*

**MN:** Deixe-me somente citar um caso que aconteceu comigo em uma de minhas conferências. Fui convidado no começo dos anos 1980 para falar de meu modelo de universo eterno no departamento de Física da Universidade de São Paulo. No meio de minha apresentação, um jovem professor me interrompe e critica minha proposta argumentando que desde os anos 1964 sabe-se que o cenário do universo eterno não satisfaz às observações. Ele se referia à observação de uma radiação de temperatura 2,7 graus Kelvin que mostrava que o volume do universo varia com o tempo cósmico; e este professor associara a ideia de universo eterno ao antigo modelo proposto por Hoyle e Narlikar.

Mesmo eu tendo deixado claro que meu modelo não aceitava a proposta de Hoyle de criação contínua da matéria e que a expansão do universo no modelo de Hoyle deveria ser constante. Ele estava de tal modo absorvido pela ideia — então dominante e tremendamente midiática — da associação do modelo big bang ao “começo do universo”, que não se deu conta da originalidade da minha proposta.

Talvez eu devesse dizer que esse professor trabalhava em física de partículas elementares (hoje se chama física de altas energias) e que esse grupo de físicos havia seguido estritamente o que o prêmio Nobel da Física, Steven Weinberg, em seu livro *Os Três Primeiros Minutos*, propagou: o big bang como a “verdadeira explicação do começo de tudo que existe”.

Duas décadas depois, aquele mesmo professor da USP comentava, com muitos elogios, o cenário de Penrose de um universo cíclico, sem singularidade e eterno que eu havia proposto mais de trinta anos antes.

*RP: Quais os modelos cosmológicos que o senhor considera mais interessantes na atualidade?*

*MN:* Creio que podemos afirmar que a cosmologia está se encaminhando para fazer dos cenários não singulares, com *bouncing* (ricochete), o atual modelo-padrão. Dentre esses cenários, há diversas propostas, quer alterando as equações da Relatividade Geral, quer introduzindo processos de interação da matéria (sob diversas formas) com a gravitação.

A possibilidade de observar indiretamente a presença de um *bouncing* vem de vários lugares. O mais esperado e direto está relacionado ao espectro de inomogeneidades. Essa é uma prova indireta bastante sólida, pois cenários não singulares produzem formação de estruturas distintas de um cenário de tempo diminuto, singular. Essa prova indireta não deve ser entendida como menor ou provisória. A Física está cheia de exemplos dessas demonstrações indiretas. Um exemplo notável foi a descoberta do neutrino, uma partícula extremamente difícil de ser detectada, pois não tem massa (em verdade, hoje se acredita que possui uma massa bastante pequena) e sem carga. No entanto, sua previsão teórica foi considerada como uma verdade científica, pois sem sua existência, certas leis fundamentais da física (como a conservação de energia, em particular) seriam violadas. Décadas depois, o neutrino foi efetivamente observado.

*RP: O senhor tem um apreço muito grande pela Cosmologia feita na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas). Alguns autores têm destacado as perdas que o Ocidente sofreu com esse isolamento também em outras ciências, motivado mais por questões ideológicas do que conceituais. Quais as principais conquistas da Cosmologia russa? Qual o principal efeito negativo dessa falta de comunicação?*

**MN:** Talvez a coleção de Física que Lev Landau e Evgeni Lifshitz (LL) organizaram seja um belo exemplo. Essa coleção envolve todo o conhecimento da Física até as últimas décadas do século passado. Se compararmos com os livros equivalentes, compreendendo essas diversas áreas, feitas no Ocidente, podemos detectar um detalhe crucial: a simplicidade de formulação das ideias que compõem a totalidade do nosso conhecimento da Física na coleção LL. Além dessa simplicidade, sua visão grandiosa dos problemas. É bem verdade que em alguns pontos eles expressam uma visão acanhada, principalmente em Cosmologia.

Em seguida, entra em cena outro grupo de cientistas desenvolvendo enormemente a Cosmologia e Astrofísica, que fizeram minha admiração, como Yakov Zeldovich, Vitaly Melnikov, Andrey Sakharov, Andrei Markov e vários outros. Em meu livro que você citou, faço um pequeno inventário dessas visões grandiosas que fizeram florescer a Cosmologia na União Soviética. Infelizmente, por questões políticas, essas ideias originais dos cientistas russos ficaram restritas, escondidas do Ocidente por décadas. Eles não podiam participar de conferências internacionais no Ocidente e seus artigos, sempre em russo, eram publicados na revista JETP, que só teve uma versão em inglês muito tempo depois.

**RP:** *Além de centenas de artigos científicos e de décadas de docência e de pesquisa no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), os seus livros são referências para a ciência no Brasil. Além disso, o senhor é diretor da revista digital Cosmo & Contexto, dedicada à divulgação de ciência de alta qualidade. Como o senhor vê o trabalho de divulgação para além da comunidade científica? Qual o papel desse trabalho em um contexto intelectual, educacional e científico como o brasileiro?*

**MN:** Eu penso que todo cientista deve dedicar uma parte de sua atividade em diálogo com outros saberes. Nessa mesma linha de pensamento, ele também deveria expor seu trabalho e de seus companheiros para o público leigo. Só assim, as ideias corretas serão difundidas, expostas por quem as estão trabalhando e desenvolvendo. Isso não significa que somente esses cientistas deveriam divulgar seus trabalhos. A função de divulgação é muito importante e ampla, ou seja, devemos ter pessoas que se dediquem principalmente a essa difusão. Eles não precisam ser cientistas, mas deveriam estar sempre em contato com eles. Esses divulgadores devem estar sempre ao lado de pessoas que trabalhem nas áreas que eles divulgam. Só assim podemos difundir de



modo preciso e correto a situação na ciência, as certezas do *establishment*, bem como as críticas alternativas. Em geral, os divulgadores, ao considerarem essas propostas alternativas, apresentam-nas como fantasias no limiar da irracionalidade. Isso deveria ser evitado e as bases que sustentam a proposta alternativa deveriam ser explicitadas.

**RP:** *O seu livro Quantum e cosmos é uma exploração fascinante das relações entre o micro e o macro. Estas relações têm sido debatidas cada vez mais hoje em dia, nas buscas pela gravidade quântica e de uma teoria de campo unificado. O senhor acha que essa unificação está prestes a ocorrer? Qual seria o principal desafio a ser superado para isso?*

**MN:** Veja, unificação pode ser um resultado interessante quando pode simplificar a teoria e permitir inferir novos resultados. O melhor exemplo dessa unificação, com bons resultados, foi quando se conseguiu unificar os campos elétrico e magnético em uma entidade formal, o campo eletromagnético. Unificar sem que novos resultados apareçam não é mais do que um exercício formal. Isso dito, podemos aceitar que a unificação dos campos pode ser perseguida, mas não se deve esperar dela algo como uma pedra de Roseta, a menos que novidades observacionais advenham dessa unificação.

**RP:** *Quais seriam as maiores contribuições da teoria quântica para a Cosmologia? Quais são os pontos que ainda precisariam ser mais bem compreendidos dessa teoria, tanto no âmbito da Cosmologia quanto da teoria física mais geral?*

**MN:** Quando [Bryce] DeWitt e [John Archibald] Wheeler propuseram uma equação semelhante à de Schrödinger para representar processos quânticos cosmológicos, pensava-se que essa investigação iria contornar ou mesmo resolver a questão da singularidade do cenário clássico da cosmologia. Com a descoberta de cenários do tipo *bouncing*, nos quais não existe singularidade, essa esperada característica da entrada do *quantum* em processos gravitacionais cósmicos se esvaiu.

Hoje, a principal argumentação se fundamenta na coerência da física. Não seria natural que, assim como acontece com toda forma de matéria e energia, também a energia gravitacional deveria ter uma versão quântica? Há somente um empecilho formal: na Relatividade Geral

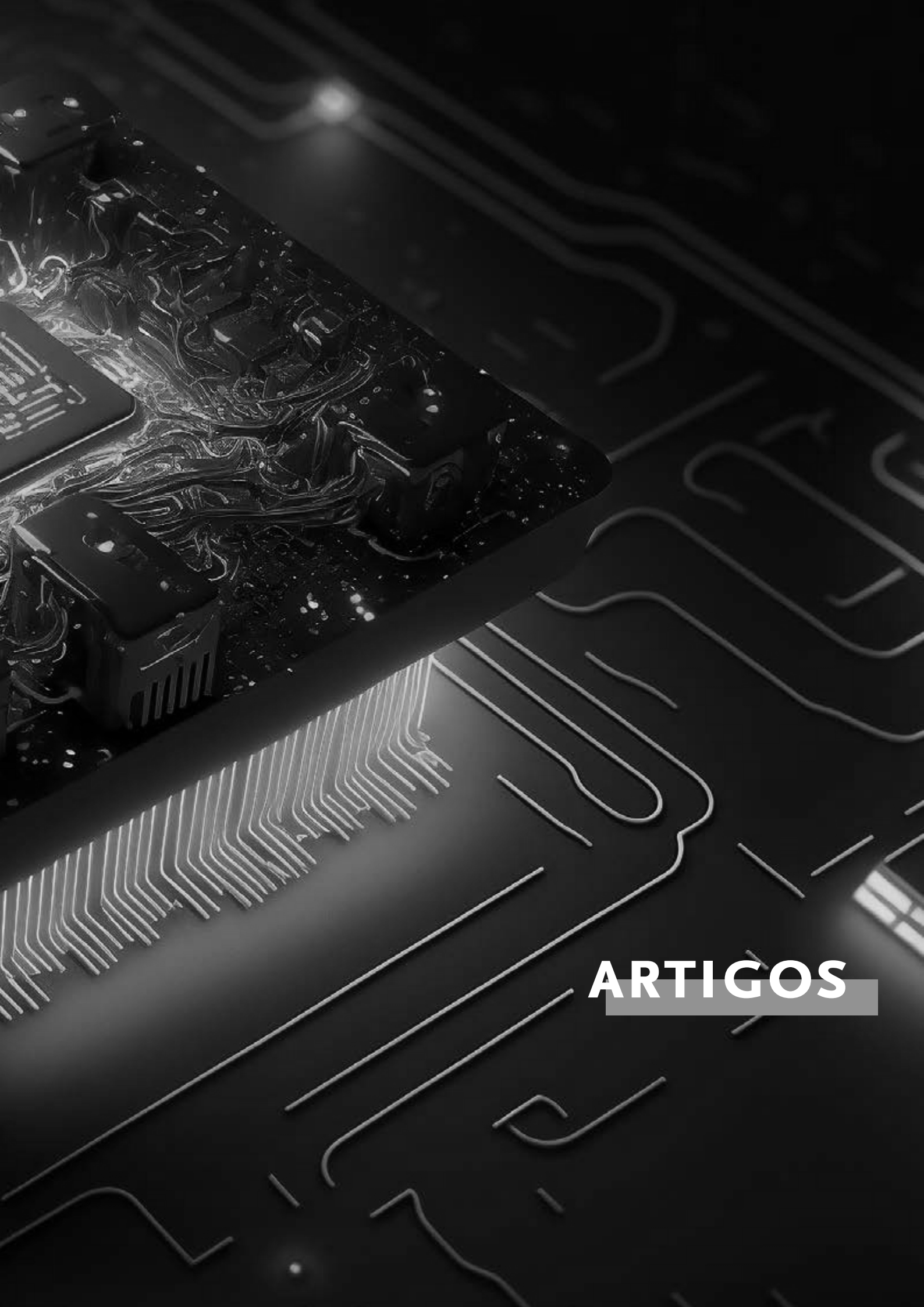
não é possível definir a energia gravitacional local. De qualquer modo, independentemente de uma motivação mais explícita, creio que o exame das consequências de uma gravitação quântica em cosmologia deve ser empreendido.

*RP: O senhor acabou de completar 80 anos e recebeu justas celebrações e homenagens pela data. Quais os próximos projetos de Mario Novello?*

*MN:* No futuro próximo continuarei minha atividade como orientador. Tenho três estudantes fazendo mestrado e doutorado. Darei também um curso de Cosmologia na próxima Escola de Cosmologia e Gravitação em julho deste ano, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Junto com meus colaboradores, realizamos anualmente uma série de cursos envolvendo temas de gravitação, cosmologia e áreas correlatas e que chamamos Programa Mínimo de Cosmologia (PMC). Esses cursos são oferecidos em diversas Universidades do Rio de Janeiro e fora de nosso Estado. Revisarei uma nova impressão do texto que fizemos para o PMC.

Estou iniciando a organização da próxima Brazilian School of Cosmology and Gravitation aqui no Rio de Janeiro em 2024, que coordeno há mais de 40 anos. Darei continuidade (depois de quase três anos parado devido à pandemia) à interação com um grupo de cientistas da Universidade de Insubria, em Como, norte da Itália. Aceitei o convite de ali passar o mês de junho de 2024 dando seminários e desenvolvendo trabalhos que iniciamos há algum tempo.

Aceitei também o convite de passar um período em Marselha em 2024, interagindo com meus colaboradores de longa data do Centre de Physique Théorique de Marseille. Estou empenhado, com meus colaboradores, em implementar as conferências que nossa e-revista *Cosmos e Contexto* tem sistematicamente organizado. A próxima, que acontecerá em agosto, tem como tema “O Fim da Ortodoxia” e você será um dos conferencistas. Também em 2024, estamos pensando em organizar um evento com tema igualmente amplo e transdisciplinar. Mais adiante, revisitarei alguns de meus livros que serão reeditados nos próximos anos e, espero, terminar um novo livro — começado antes da pandemia e suspenso desde então por várias razões — sobre a relação entre os diversos mitos de criação do mundo e a cosmologia contemporânea, o que já foi tema de uma conferência que organizamos na e-revista *Cosmos e Contexto*.



**ARTIGOS**

# Superposição e paralelismo quânticos:

## possíveis efeitos em algoritmos

Marcos Cuzziol<sup>1</sup>

**Resumo:** Os fenômenos da superposição de estados e do paralelismo tornam a computação quântica fundamentalmente diferente da computação digital. Mas as diferenças não estão restritas à velocidade de processamento. Como veremos abaixo, a qualidade dos resultados do processamento quântico é, potencialmente, inatingível no ambiente digital, independentemente do tempo de processamento necessário. Este artigo tem o objetivo de analisar o princípio dos algoritmos genéticos com a finalidade de ilustrar as diferenças possíveis entre processamentos digital e quântico.

**Palavras-chave:** computação; genoma; quântico; digital; evolução; adaptação.

---

<sup>1</sup> Marcos Cuzziol tem graduação em Engenharia Mecânica pelo Instituto de Ensino de Engenharia Paulista, com o mestrado (intitulado *Games 3D: aspectos de desenvolvimento*) e o doutorado (intitulado *Estados superpostos: proposta de modelo matemático para games 3D*) realizados na ECA-USP. Desenvolvedor de games, programador, sócio fundador da Perceptum Software Ltda., foi gerente do núcleo de Inovação do Instituto Itaú Cultural de 2000 a 2020. É pesquisador colaborador do Instituto de Estudos Avançados da USP. Atua principalmente nos seguintes temas: games, realidade virtual, inteligência e comportamento artificial, arte e tecnologia. Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-6108-824X>.

### **Superposition and parallelism: possible effects on algorithms**

**Abstract:** The phenomena of superposition of states and parallelism make quantum computing fundamentally different from digital computing. But the differences are not restricted to processing speed. As we will see below, the quality of quantum processing results is potentially unattainable in the digital environment, regardless of the processing time required. This article analyzes the principle of genetic algorithms in order to illustrate the differences between digital and quantum processing.

**Keywords:** computing; genome; quantum; digital; evolution; adaptation.

## Computação quântica

A unidade básica de dados de um computador digital é o bit, que pode assumir um único valor entre dois possíveis: zero ou um. Em um computador quântico, a unidade é o qubit que, além de zero ou um, pode também assumir os dois valores simultaneamente. Nessa situação, diz-se que um qubit está em superposição de estados, ou coerência. Em um primeiro momento, pode nem parecer tão importante essa característica de se armazenar dois valores simultaneamente em um único qubit. No entanto, para uma sequência de vários qubits, o número de valores simultâneos cresce de forma exponencial. Por exemplo, 2 qubits podem armazenar 4 valores simultaneamente; 8 qubits podem guardar 256 valores simultâneos; 16 qubits, 65.536 valores; e assim por diante. Quando passamos dos 100 qubits, o número de valores simultâneos é comparável, em ordem de grandeza, ao total estimado de átomos do universo. Isso é algo inimaginável na computação digital: ser capaz de armazenar, em uma única variável de pouco mais de 100 unidades de dados, tantos valores quanto o número de átomos do universo inteiro.

Mas de que adianta armazenar tantos valores em uma única variável composta de qubits? Ora, existe outra característica importante que se denomina “paralelismo quântico”. De forma muito simplificada, ao operar sobre qubits, um computador quântico pode agir sobre todos os valores que esses qubits armazenam, de forma simultânea. Na computação digital, se quisermos computar uma série de valores diferentes, precisamos agir sobre eles um de cada vez. Um número muito grande de valores diferentes exigirá um número equivalente de passos de computação. O paralelismo quântico permite, em certas situações, que uma mesma operação (uma conta, por exemplo) seja aplicada sobre todos os valores superpostos, em um único passo de computação.

Se essas duas características, superposição e paralelismo, soam estranhas, é porque elas o são, de fato. Não fazem parte de nossas experiências do dia a dia, embora sejam corriqueiras nos fenômenos quânticos. Mas, como elas poderiam afetar um algoritmo específico?

## Algoritmos genéticos

Apresentados na pesquisa de John Holland em 1975, algoritmos genéticos simulam, em computação digital e de forma simplificada, o processo de adaptação por seleção natural proposto por Charles Darwin. Algoritmos genéticos permitem que soluções “evolam”, ou melhor, que se

adaptem a objetivos específicos. Vejamos como isso acontece utilizando um exemplo de projeto de estrutura mecânica.

Para que uma solução qualquer possa ser processada por um algoritmo genético, ela deve ser expressa por uma sequência numérica. No exemplo de uma estrutura mecânica, essa sequência numérica deve prever dimensões detalhadas de cada pequeno elemento que comporá a estrutura. As variáveis dessa sequência formam um genoma digital, uma codificação capaz de abrigar todas as soluções de possíveis estruturas mecânicas desse genoma. Na natureza, esse seria o genoma de uma espécie, e todos os indivíduos possíveis dessa espécie obedecem à codificação desse genoma. Quando atribuímos valores específicos às variáveis do genoma, obtemos uma solução individual dentro desse genoma, ou seja, um genótipo digital. Na natureza, esse seria um indivíduo daquela espécie.

O algoritmo genético começa por criar uma grande população de soluções (de estruturas mecânicas, no nosso caso) individuais, normalmente geradas de forma aleatória, “sorteando” valores para cada variável do genoma. Muito provavelmente, estruturas geradas de maneira aleatória serão ruins, pouco oferecendo em termos de eficiência estrutural. Mas a população de estruturas é grande, e certamente algumas soluções serão melhores que outras. Faz-se necessário selecionar as melhores estruturas geradas, de modo análogo à seleção dos mais aptos proposta por Darwin.

Isso é feito por uma função de avaliação que atribui notas numéricas para cada estrutura da população. É na função de avaliação que se define o objetivo das soluções propostas pelo algoritmo genético. Como falamos de estruturas mecânicas (lembrando que essas soluções poderiam ter qualquer outra finalidade), digamos que estejamos interessados em obter uma estrutura que apresente a melhor resistência mecânica possível para o menor peso total. Pois bem, nossa função de avaliação precisa dar uma nota para cada estrutura da população, e essa nota será maior para aquelas soluções que tenham maior resistência e menor peso estrutural. Para essa finalidade, a função de avaliação deverá calcular a resistência estrutural e o peso de cada solução individual a partir dos dados dimensionais do genótipo digital. São cálculos trabalhosos, mas bastante viáveis em computação digital (pode-se, inclusive, considerar materiais diferentes e, dessa forma, selecionar o melhor material para aquela estrutura mecânica específica).

As estruturas que recebem as maiores notas são então mantidas, enquanto todas as outras são eliminadas, finalizando o processamento da geração inicial. Mas o trabalho do algoritmo genético está apenas começando. Uma nova população será criada a partir das melhores estruturas, utilizando estratégias baseadas na evolução por seleção natural:

1. Hibridização: o genótipo de uma solução é combinado com o de outra, fazendo com que o genótipo resultante “herde” características dos dois “pais”;

2. Mutação: ao genótipo são aplicadas pequenas modificações aleatórias, permitindo que novas características sejam introduzidas à população;

3. Clonagem: o genótipo de uma solução selecionada é simplesmente copiado, sem alterações.

Gera-se assim uma nova população com um número muito grande de estruturas, que já não são meramente aleatórias como na primeira população, mas que partem das estruturas mais adaptadas. Mais uma vez, aplica-se a função de avaliação a cada indivíduo da população, selecionam-se os mais adaptados, e todo o processo é repetido, dezenas, centenas, milhares de vezes, até que uma solução válida seja encontrada: digamos, uma estrutura com resistência maior que “x” e peso menor que “y”. Nesse ponto, o algoritmo apresenta a solução e para.

Não deve surpreender que estruturas projetadas conforme o descrito acima pareçam mais orgânicas que as projetadas, para as mesmas finalidades, por seres humanos. Também não deve surpreender que soluções de algoritmos genéticos sejam muito mais eficientes que as criadas diretamente por projetistas humanos. Não por acaso, exemplos reais lembram estruturas ósseas (Figura 1).



**Figura 1:** Suporte projetado por algoritmo genético (Henry Dennis/NASA). Disponível em: <<https://shorturl.at/jkyM1>>. Acesso em: 7 set. 2023.

É importante notar que o algoritmo genético apenas seleciona boas soluções a partir de um campo de possibilidades muito grande, ou seja, a partir das soluções possíveis dentro do genoma proposto. Mal compa-



rando, seria como selecionar os seres humanos mais adaptados a alguma função tomando por base os indivíduos possíveis dentro do genoma humano. Esse número de possibilidades, embora não seja infinito, é extremamente grande, pois são todas as combinações possíveis dentro do genoma humano, ou, no nosso exemplo, do genoma digital. Um algoritmo genético digital, portanto, não avalia literalmente todas as possibilidades do genoma. Ele parte de uma população inicial, seleciona as mais adaptadas, aplica pequenas modificações e gera nova população; então, seleciona novamente as mais adaptadas e repete o processo até que uma solução aceitável seja encontrada. Não se trata da melhor solução, mas de uma solução aceitável dentro dos parâmetros do algoritmo. Encontrar a “melhor” solução exigiria que todas as possibilidades fossem avaliadas, uma a uma, e isso exigiria tempo demais: dependendo do tamanho do genoma, talvez mais tempo do que toda a idade estimada de nosso universo.

Vimos como um algoritmo genético funciona em computação digital, com resultados surpreendentes. Mas como poderia ser um processo desse tipo que rodasse em um computador quântico?

### **Superposição e paralelismo**

Antes de descrever o processo quântico, cabe alertar que ele ainda não é viável. Os processadores quânticos, em 2023, ainda não têm qubits em número suficiente; existem muitas questões a serem resolvidas para que se possa manter um grande número de qubits em superposição de estados, em coerência; e há também uma questão estatística difícil de controlar: o processo de computação quântica precisa ser repetido algumas vezes, para confirmação dos resultados. No entanto, a tecnologia tem avançado rapidamente, e acho importante tentar antever o que pode vir a ser possível em algumas décadas, talvez antes.

Um genoma quântico seria formado de qubits, não de bits. Ao se atribuir valores, utilizando-se a característica da superposição de estados, o conjunto de qubits armazenaria todas (sim, todas) as soluções possíveis dentro do genoma, simultaneamente. Uma função de avaliação quântica seria aplicada sobre essa única sequência de qubits, que conteria a totalidade de soluções possíveis, e, por meio do paralelismo quântico, indicaria a solução mais bem adaptada dentre todas as possíveis em uma única etapa. Fim. Não haveria necessidade de se gerar populações, nem de se aplicar hibridização, mutação e clonagem, nem mesmo de se economizar capacidade de processamento parando o processo quando uma solução apenas aceitável fosse atingida. E mais: em nosso exemplo, não teríamos

apenas uma boa solução — teríamos a melhor estrutura possível dentro das exigências de resistência e peso. Algo inviável de ser realizado em um computador digital no tempo de existência do universo poderia ser resolvido em poucas instruções de computação quântica.

Fiz questão de descrever os dois processos em certo nível de detalhe para deixar claro que não se trata apenas de maior velocidade de processamento. A velocidade, sem dúvida, pode ser extremamente maior. Entretanto, muito além disso, trata-se de um paradigma de computação diferente, estranho até, que não encontra paralelo na natureza. É difícil até mesmo tentar conceber uma adaptação de espécie tão veloz; por exemplo, algo que não levasse milhares de anos, mas talvez poucos segundos. Além disso, o processo de adaptação natural age sobre relativamente poucos indivíduos por vez, não sobre todos os possíveis, simultaneamente. É desse nível de diferença que estamos tratando quando comparamos a computação digital com a quântica.

### **Algoritmos quânticos**

Atualmente, novas propostas para algoritmos quânticos são desenvolvidas em grande número. Escrever programas para um computador quântico exige, do programador, um modo de pensar muito diferente daquele da computação clássica, digital. Em virtude do estágio atual da computação quântica, é natural que os algoritmos desenvolvidos até aqui sejam até certo ponto experimentais. Muitos trabalhos acadêmicos têm por objetivo desenvolver estratégias para melhorar a eficiência de algoritmos existentes, ou para aproveitar melhor certas características da computação quântica — ou, ainda, para mensurar diferenças entre a computação quântica e a clássica. Um exemplo, dentre muitos possíveis, pode ser encontrado nas referências deste texto: uma comparação numérica entre algoritmos genéticos clássicos e quânticos (Ibarrondo; Gatti; Sanz, 2022).

Como vimos, computadores quânticos ainda têm desafios a serem vencidos. O número total de qubits e a manutenção deles em coerência são dois desses desafios. Mas computadores quânticos funcionais já existem e tanto a superposição de estados como o paralelismo quântico são corriqueiros neles. Como exemplo, o computador quântico Sycamore, criado pelo Google e utilizado para pesquisas desde 2019, possui 53 qubits que podem, não sem certa dificuldade, ser mantidos em coerência. Resta ainda atingir a escala e a confiabilidade necessárias para que o uso dessa nova forma de computação seja prático. Mas não tenho dúvidas de que isso venha a ser alcançado em alguns anos, talvez na próxima década.

## Além dos algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos são processos bastante objetivos, nos quais cada solução é calculada em detalhes segundo critérios de uma função de avaliação. Mas a chamada inteligência artificial trabalha também com algoritmos mais, digamos, “subjetivos”. São processos como o das redes neurais artificiais, muito usadas para reconhecer imagens e voz, que simulam o funcionamento de uma rede de neurônios para reconhecer padrões em dados. Ou como o algoritmo denominado de redes generativas adversárias, no qual uma rede gera soluções enquanto outra tenta definir se as soluções geradas fazem ou não parte de uma grande base de dados reais, que as alimentam. Softwares como Midjourney e Stable Diffusion usam algoritmos semelhantes (Figura 2).



**Figura 2:** Imaginação máquina: engenheiros presenciam a manifestação da primeira consciência artificial. Imagem gerada pelo Stable Diffusion a partir de prompt do autor.

Algoritmos como esses últimos dependem de grandes massas de dados usadas para treinamento, processo conhecido como machine learning, e o que ousos chamar de subjetividade advém exatamente dessa aprendizagem. Por exemplo, se uma rede neural for treinada para reconhecer faces humanas apenas com fotos de pessoas brancas, ela pode ter dificuldades para identificar pessoas negras, asiáticas ou indígenas. Os dados de treinamento delimitam e direcionam os resultados possíveis para esses algoritmos, pois o reconhecimento de padrões depende

fundamentalmente dos dados usados no seu treinamento. Dados novos, que não se encaixam nos padrões apreendidos, deveriam realimentar o treinamento, mas, na prática, isso raramente acontece. Se limitações desse tipo costumam ocorrer conosco, humanos, por que não com simples algoritmos?

É muito difícil prever como a computação quântica poderia afetar algoritmos de machine learning. O mais provável é que novos algoritmos quânticos sejam desenvolvidos sem necessariamente serem baseados em redes neurais ou em redes generativas adversárias. Mas, na mesma linha do exposto para algoritmos genéticos, vejamos algumas possibilidades.

Redes neurais artificiais são, surpreendentemente, algoritmos simples. Cada neurônio pode estar ligado ou desligado, zero ou um, e as sinapses são valores numéricos que conectam os neurônios e funcionam como multiplicadores. Durante o treinamento do algoritmo, definem-se os valores das sinapses para que a rede aprenda com os dados que a alimentam, para que ela reconheça os padrões desejados. Se cada neurônio for representado por um qubit, entretanto, pode-se configurar sobreposições dos estados ligado e desligado, e as sinapses seriam também diversos valores superpostos. O que poderia resultar dessa configuração? No mínimo, a aprendizagem poderia ser muito mais rápida e profunda. No outro extremo... “onisciência” algorítmica, talvez? É difícil prever.

Já para as redes generativas adversárias, temos duas redes que competem entre si, uma gerando resultados (a rede generativa) e outra definindo se esses resultados podem fazer parte de uma base de dados reais (a rede discriminadora). Quando a rede generativa consegue enganar a rede discriminadora, temos um resultado que se parece com algo real, ou melhor, que se parece com os dados reais utilizados como referência pela rede discriminadora. Na computação quântica, já tivemos uma ideia do que uma rede generativa poderia vir a fazer: potencialmente, gerar todas as possibilidades de uma única vez. A rede discriminadora funcionaria como descrito antes mas, talvez, escolhendo de modo muito mais preciso o que parece “real” ou não.

### **O que esperar em um futuro próximo?**

Nos últimos anos, algoritmos digitais se desenvolveram de modo surpreendente. Em especial nas áreas que exigem trabalho cognitivo, como nos exemplos que vimos aqui. Seria difícil imaginar, há meros 20 ou 30 anos, as aplicações que existem hoje, capazes de projetar estruturas, de reconhecer padrões complexos, ou de criar imagens e sons quase reais a partir de meros algoritmos e de grandes volumes de dados. Tal desen-

volvimento acelerado foi possível não só pelo poder de processamento cada vez maior, mas também pelo refinamento de algoritmos progressivamente mais eficientes, que até certo ponto tentam mimetizar processos naturais, como o da evolução e o do funcionamento básico de redes neurais orgânicas. Tão grande é a velocidade com que algoritmos cada vez mais eficientes são criados que mal temos tempo de conhecer suas possibilidades antes que eles sejam suplantados por versões aprimoradas.

Entretanto, algo muito mais revolucionário parece estar no horizonte: a computação quântica. Enquanto o computador digital segue ainda as definições de 1937 da “máquina computadora universal”, de Alan Turing, a computação quântica se baseia em conceitos estranhos como o da superposição de estados e o do paralelismo. Vale repetir: não se trata simplesmente de um tipo de computação mais veloz. Trata-se de um paradigma diferente de computação, que talvez possa realizar processos hoje inimagináveis. Tenho pesquisado sobre a computação quântica já há alguns anos, e não tenho dúvidas de que ela abrirá um campo de possibilidades muito estimulante. Exigirá novas maneiras de pensar, de escrever programas, de criar. Na verdade, isso tudo ela já exige, mesmo em estágio tão inicial. Será uma ferramenta poderosíssima, e talvez venha a decretar o fim da era digital (que, muitos pensávamos, duraria para sempre).

Para encerrar esta perspectiva de um programador (digital) sobre a computação quântica e seus possíveis efeitos em algoritmos, devo mencionar uma questão que, há muitos anos, me fascina: qual nível de controle um programador tem sobre os resultados de seus algoritmos?

Não é uma pergunta óbvia. Sei que, em uma percepção superficial, muitos acreditam que, se um programador escreveu um algoritmo, todos os resultados estariam automaticamente sob seu controle. Nada poderia estar mais longe da verdade... De fato, em um programa muito simples, é esperado que o ser humano que o criou conheça todos os resultados possíveis. Mas, em algoritmos como os dos exemplos deste texto, torna-se absolutamente inviável para um programador prever resultados, ainda que ele tenha escrito todas as instruções seguidas fielmente pelo programa. Exemplos: os programadores de Deep Blue, computador que venceu o então campeão mundial de xadrez em 1997, nunca teriam vencido aquelas partidas se as jogassem contra Garry Kasparov (de fato, eles se surpreendiam com as jogadas do próprio programa que criaram); de modo similar, os programadores do algoritmo genético que gerou a estrutura do exemplo mais acima também não teriam condições de criar uma estrutura mecânica tão eficiente (nem mesmo os melhores projetistas o conseguiriam); e, ainda, os programadores de Midjourney não têm como saber

qual imagem o algoritmo criará com base nos comandos de alguém. Uso o verbo criar ciente do peso que ele tem, pois não consigo imaginar uma palavra melhor para os exemplos aqui discutidos. Certamente não se trata de criação humana — ela é toda baseada em sequência de instruções, de cálculos sobre dados existentes. Em outras palavras, são processos determinísticos: não há “alma” ou “mágica” em um algoritmo. E, ainda assim... eles são capazes de nos superar, de surpreender até mesmo quem os escreveu.

A revolução da computação quântica provavelmente estabelecerá um abismo entre a criação humana de um algoritmo e seus resultados.

### Referências

HILLE, Karl. NASA turns to AI to design mission hardware. *NASA*, 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2023/nasa-turns-to-ai-to-design-mission-hardware>. Acesso em: 14 ago. 2023.

HOLLAND, John. *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.

IBARRONDO, Rubén; GATTI, Giancarlo; SANZ, Mikel. Quantum vs. classical genetic algorithms: a numerical comparison shows faster convergence. In: *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Singapore, 2022, p. 947–954.

# Xenopaisagens tecnológicas vivas

Iliana Hernández García Aguiar<sup>1</sup>Raúl Niño Bernal<sup>2</sup>Tradução por Lucia Santaella<sup>3</sup>

**Resumo:** Esta investigação partiu da relação entre as Xenopaisagens e o universo do Novacene proposto por James Lovelock. Com o radical *xeno-*, ‘estrangeiro’ ou ‘estranho’, passamos da vida como a conhecíamos para encontrar um salto quântico que nos leva à vida como ela poderia ser. Trata-se da vida possível, que exibe uma segunda natureza. É a vida que evolui junto com a tecnologia, principalmente com as hiperinteligências artificiais, que se juntarão a nós para continuar cuidando de Gaia, e continuar tornando possível a vida na Terra, nesta nova natureza do vivo, estranho e alheio, como o estrangeiro. A pesquisa inclui a análise das obras de dois artistas: a britânica Libby Heaney e o colombiano Juan M. Castro, cujo temas são a vida artificial e a computação quântica, bem como a protovida, explorando o conceito de xenovida, que torna possíveis as paisagens de Gaia no Novacene.

**Palavras-chave:** xenovida; xenoscapes; vida artificial quântica; tecnologias vivas; superinteligências artificiais.

---

1 Professora titular do Departamento de Estética da Faculdade de Arquitetura e Design da Pontifícia Universidade Javeriana de Bogotá — Colômbia. Pós-doutorado Sênior em Filosofia da Ciência e Tecnologia na l'Ecole Normale Supérieure de Paris. Doutorado em Arte e Ciências da Arte pela Universidade Sorbonne, Paris-I. Pesquisadora convidada da Maison des Sciences de l'Homme em Paris. Diretora do grupo de pesquisa em Estética, novas tecnologias e habitabilidade. Teórica e pesquisadora em artes eletrônicas, bioarte, estética pós-humana e relações arte-ciência. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3589-2400>.

2 Doutor em Ciência Política na E.U. Mestre em Estudos Políticos pela Pontifícia Universidade Javeriana. Professor e diretor do Departamento de Estética da Faculdade de Arquitetura e Design da Pontifícia Universidade Javeriana. Pesquisador do grupo Estética, Novas Tecnologias e Habitabilidade. Autor de vários livros e artigos sobre política não linear, arte e singularidade tecnológica. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7563-5778>.

3 É pesquisadora 1A do CNPq, professora titular na pós-graduação em Comunicação e Semiótica e em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (PUC-SP). Doutora em Teoria Literária pela PUC-SP e Livre-docente em Ciências da Comunicação pela USP. Fez doze estágios de pós-doutorado no exterior e foi professora e pesquisadora convidada em várias universidades europeias e latino-americanas. Já levou à defesa 300 mestres e doutores. Publicou 55 livros e organizou 32, além da publicação de quase 500 artigos no Brasil e no exterior. Recebeu os prêmios Jabuti (2002, 2009, 2011, 2014), o prêmio Sergio Motta (2005) e o prêmio Luiz Beltrão (2010). Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0681-6073>. Email: [lbraga@pucsp.br](mailto:lbraga@pucsp.br).

## **Living technological xenoscapes**

**Abstract:** The study begins with the relationship between Xenoscapes and the Novacene universe proposed by James Lovelock. With the root xeno, ‘foreign’ or ‘strange(r)’, we move from life as we knew it to finding a quantum leap that takes us to life as it could be. It is the possible life, which exhibits a second nature, a life that evolves along with technology, mainly with artificial hyperintelligences, which will join us to continue taking care of Gaia and continue to make life on Earth possible, in this new nature of the living, strange and alien, like the foreigner. The research includes the analysis of the works of two artists: the British Libby Heaney and the Colombian Juan M. Castro, whose topics are artificial life, quantum computing, as well as proto-life, exploring the concept of Xenolife that makes the landscapes of Gaia in Novacene possible.

**Key words:** xenolife; xenoscapes; quantum artificial life; living technologies; artificial hyperintelligences.



## Introdução

O nome Xenoscapes está ligado à possibilidade de encontrar ou tornar possível um tipo de ambiente aberto e habitável que não corresponde às paisagens conhecidas. Nesse sentido, não se refere às paisagens da vida orgânica que costumávamos chamar de natureza. Ou seja, não se trata das paisagens evolutivas da vida que podemos identificar como feitas de carbono, ou que cumprem as principais características de metabolismo, auto-organização e reprodução (Bedau, 2016). Por outro lado, trata-se de outros tipos de paisagens, aquelas alheias a estas visões, ou que as replicam e mesmo as prolongam artificialmente — e talvez não só estas, mas que criam novas características e traços de vida, e com as quais têm conseguido ampliar o espectro do que costumamos chamar de vida, segundo Hernández García, Niño Bernal e Hernández-García (2021). Em vez disso, trata-se de Xenopaisagens tecnológicas vivas.

Cabe esclarecer que estas Xenopaisagens não se separam das paisagens de carbono; pelo contrário, estabelecem relações de interação e adaptação nos ecossistemas, remodelando Gaia e continuando a torná-la cada vez mais possível. É neste sentido que afirmamos o argumento de Lovelock (2021): as hiperinteligências artificiais nos ajudarão a preservar a vida em Gaia, dentro de processos evolutivos, obviamente. A inteligência artificial complementa e se estende com a vida artificial na relação interdependente entre conhecimento e vida, conforme explica o autor.

*Xenoholontes*: são aquelas entidades que não mais chamamos de holobiontes para incluir a vida como ela poderia ser — particularmente a das tecnologias vivas, não apenas a vida como a conhecemos. Para não limitar as entidades que podem surgir nessa evolução artificial, optamos por chamá-las de entidades tecnológicas vivas. Por sua segunda ou mesmo terceira natureza, elas surgiram da singularidade tecnológica, em que o artificial foi reproduzido por meio do aprendizado profundo e assim gerou seus próprios descendentes com autonomia, segundo LeCun *et al.* (2015). Portanto, o nome de Xenoholontes nos permite propor uma vida estrangeira, por enquanto: estranha. Mas com capacidades holísticas de interação através de redes e sistemas e com metaontologias que os posicionam como agentes de Gaia, mas sem ecoar entidades de carbono anteriores.

*Xenopaisagens tecnológicas vivas*: com esta denominação, propomos o surgimento de paisagens que não fazem diferença entre natureza e tecnologia, mas sim conectam a dimensão do natural e do artificial em uma

só. Depois de muito tempo de integração entre elas e entendendo que há um borramento dessa fronteira, afirmamos que as paisagens tecnológicas são vivas — não só contêm vida. Essa é a consequência da afirmação do Novacene segundo Lovelock (2021).

Sabemos que existem tecnologias vivas, incluindo a vida artificial e entidades que vêm da biologia sintética, de onde se originou o termo tecnologias vivas; e questionou-se a contradição entre o vivo e o não vivo, com base no fato de que a vida é uma questão de graus e é um processo de adaptação flexível, como Bedau (2016) coloca. Em seguida, afirmamos que as Xenopaisagens tecnológicas estão vivas e o seu estatuto reside na capacidade que têm de anunciar uma outra natureza da vida, diferente da do carbono, mostrando que a vida é um processo e não uma essência. Não importa que não seja feita de carbono, pois outros materiais podem ser usados, como silício, grafeno e fulereno.

*Xenobots*: um exemplo especial é o destes robôs muito pequenos, feitos de tecido vivo, e que podem ser programados para desempenhar uma função, independentemente do corpo de onde provêm ou do laboratório onde foram produzidos sinteticamente. Utilizar o prefixo Xeno em seu nome suscita uma dupla relação: pela alusão ao estrangeiro de como o tecido muscular ou cutâneo é extraído de um corpo; e como pode continuar a atuar conforme sua função de forma exógena ao corpo de qual veio. Tomemos como exemplo as células musculares: elas fazem o Xenobot se mover, se deslocar, porque esse tipo de célula mantém a função de atividade de movimento.

Por outro lado, as células da pele têm a função de envolver e construir uma estrutura, pois conhecem essa atividade desde sua formação inicial. Ademais, seu nome está relacionado a uma espécie de sapo chamada *Xenopus laevis*, do qual foram extraídos os primeiros tecidos para iniciar essa produção. Nesse caso, a ideia de estrangeiro se mantém no ato de extrair ou isolar o corpo inicial, que Catts e Zurr (2014) chamam de semivivo. Assim, podemos dizer que os Xenobots são um importante exemplo de Xenopaisagens tecnológicas. Uma combinação entre inteligência artificial e robôs biológicos vivos, conforme proposto por Ramanujam *et al.* (2022).

Por fim, nesta introdução queremos apontar a relação que iremos propor com o quantum na chamada vida artificial quântica proposta por Alvarez-Rodriguez *et al.* (2018). Com ela, a ação das Xenopaisagens se expressará em sua capacidade de evolução acelerada graças ao processamento paralelo por meio da chamada caminhada quântica ou das pro-

priedades de superposição e emaranhamento, que são visíveis nos bits quânticos de informação chamados qubits, segundo Lamata (2020). Isso poderia aumentar exponencialmente as habilidades de Gaia para continuar encontrando o caminho para tornar a vida possível.

As obras de arte interativas da física quântica e a artista Libby Heaney sobre combinatória exponencial de espécies tecnológicas, usando a superposição de estados produzida por qubits, nos permitem nos relacionar com a estranha natureza da matéria fundamental do universo por meio da percepção viva e saber que a origem da vida é quântica. E os trabalhos do artista Juan M. Castro sobre membranas lipídicas como protótipo permitem analisar a presença de Xenopaisagens antes mesmo do surgimento da vida orgânica como a conhecemos. Com isso, afirmamos que as Xenopaisagens estão na relação entre arte, ciência e tecnologia, e surgiram antes mesmo do advento da vida como a conhecemos — mas também depois dela, nos horizontes futuros de Gaia, com a hiperinteligência.

## **Metodologia**

A metodologia utilizada foi a da Lógica Paraconsistente que trabalha com contradições não triviais. Ou seja, busca gerar inovação conceitual por meio do pensamento sobre ideias, teorias, observações que podem inicialmente ser opostas — mas, ainda assim, ambas verdadeiras. E por causa de sua oposição, mas sendo importantes e ativas no mundo real, elas não foram consideradas simultaneamente. Exemplos disso em outros campos foram: a teoria da relatividade de Einstein e a teoria da mecânica quântica. Ambas verdadeiras, mas muito diferentes sobre as leis fundamentais do universo. Vem daí o trabalho contínuo na busca de uma teoria que possa torná-las possíveis simultaneamente. Há avanços importantes nesse sentido e é um dos maiores desafios do conhecimento contemporâneo.

No caso desta pesquisa, tratou-se, por um lado, da visão de proteger a vida de Gaia; a saber, a vida na Terra como a conhecemos. Por outro lado, também as hiperinteligências artificiais com capacidades de reprodução, interação e autonomia, que certamente proliferam como novos agentes e determinantes do novo mundo. Mas elas geralmente são vistas em oposição ao que está vivo. A contribuição que se construiu nesta pesquisa, com base na lógica paraconsistente, foi baseada em um propósito comum que

tornou ambas possíveis: cuidar da vida na Terra segundo Lovelock (2021), pois ambas precisam disso.

O desenvolvimento consistiu, então, em pensar Gaia como Xenopaisagens tecnológicas vivas que se incorporam à dualidade vida/tecnologia anterior, e que se resolvem no prefixo Xeno. Isso permite a emergência do possível antes ou depois da vida orgânica conhecida. E, em interação com ela, propõe uma intencionalidade que ocorre com o nome de Xenoholoentes, onde holo significa: todos nós que estamos aqui para cuidar de Gaia com responsabilidade/habilidade, segundo Haraway (2020). Inclusiva, ao final, transmuta também o conhecido ou familiar, rumo à dimensão expandida da Xenovida. Ou seja, também somos uma vida estranha e estrangeira.

## Resultados

Pensando as Xenopaisagens tecnológicas vivas: argumentamos que estas correspondem principalmente a processos tecnológicos nos quais se integram aspectos algorítmicos quânticos, que nos levam a pensar noutras espécies que não provêm do biológico. No entanto, são entidades que surgiram de transições tecnológicas em articulação com a inovação e a criação para acompanhar os processos de habitabilidade da espécie humana, em correlação com o conjunto de outras espécies da diversidade de ambientes e ecossistemas. Habitabilidade dos Xenoholoentes: estes, como habitantes das Xenopaisagens, apresentam uma diferença fundamental com os holobiomas.

A partir de Haraway (2020), propomos que, apesar do contato e parentesco, os holoentes são protagonistas de uma nova espécie artificial que surge para defender Gaia. É preciso pensar nas possibilidades. Acreditamos que as hiperinteligências artificiais sejam protagonistas de outras formas de vida, condizentes com a proposta de Gaia. Vemos que Lovelock (2021) convida à inovação de uma nova terra e, portanto, de elementos que estão no espectro ciborgue. Essa ideia expõe um distanciamento com os biomas, uma vez que sua condição biológica foi comprometida com a visão da natureza e, portanto, da humanidade, que a transformou em recurso. E em seu trânsito por civilizações e culturas, foi enfraquecida, explorada, contaminada e em processo de extinção no planeta.

A Xenopaisagem tecnológica viva, com a qual pensamos uma adaptação flexível para Gaia, de acordo com Bedau (2016), implica que, com as ciências da informação bioquântica, se construiu um trampolim impor-

tante para as ciências de fronteira e, a partir delas, encontramos o caminho também para os problemas de fronteira, segundo Maldonado (2015). Com isso, gostaríamos de expor que o Xenoholoente inaugura um problema fronteiriço sobre a convivência entre as hiperinteligências artificiais e a diversidade de espécies, inclusive a humana. São utilizados dados e um conjunto diversificado de tecnologias vivas, conforme proposto por Bedau (2016). Assim como ocorre com os fluxos que a computação quântica terá a capacidade de explorar rumo a outras dimensões e condições de vida. Mas é preciso pensar quais são os novos materiais e processos que permitirão uma vida no futuro de Gaia.

Assistimos gradualmente a processos e mudanças que visam transformar o consumo de energia e os processos metabólicos no mundo biológico. A questão de fronteira consiste em: a partir de qual paradigma o Xenoholoente explora novos conhecimentos e ambientes para a convivência com a espécie humana e outras espécies? Que cronogramas o Novaceno implica?

### **Xenopaisagens interativas**

A obra *Cloud Cloud* (2016), da artista Libby Heaney, é uma instalação interativa feita a partir da computação quântica. Utiliza recursos quânticos, entre eles: a gravidade quântica em *loop* proposta por Rovelli (2021). É sobre como imaginar o mundo a partir de várias histórias possíveis do modo como uma Xenopaisagem evolui, quando a direção dessa evolução não é temporária, mas de combinatória exponencial. Em vez de tempo, há transformação. Talvez expansão, diversificação, interação, entre outras características que se manifestam quando falamos de tecnologias vivas. No quantum, elas se manifestam como probabilidades. Ou seja, trata-se de calcular quanta probabilidade há de que um evento evolua de tal maneira — e como, nesse cálculo, estão incluídos todos os possíveis rumos que ele pode tomar, todas as narrativas possíveis, para que o cálculo final receba o peso relativo de todos esses mundos. Assim, o resultado é expandido exponencialmente já que todas as opções poderiam ter ocorrido simultaneamente.

Quando a Xenopaisagem é medida, no caso da instalação da *Cloud Cloud*, quando ela é interagida, ela cai em uma possibilidade, mas o importante é que essa possibilidade carrega todas as histórias possíveis, a saber: os estados que esse qubit poderia ter. Isso é apoiado pela teoria das redes de *spin* que estruturam o mundo quântico. Flutuam, vibram e

sacodem, diversificando o mundo. Queremos afirmar com isso que esta seria uma Xenopaisagem tecnológica viva, cuja capacidade de diversidade expande o que é possível na vivência que se realiza por meio do artificial. Nesse sentido, o escopo do processo interativo da instalação é ampliado, pois não se trata apenas da relação homem-sistema, ou sistema-sistema, mas também da interação como colapso da função de onda, onde o observador/interator da instalação faz com que o sistema quântico se defina e, com ele, conte a história da evolução das narrativas possíveis dos estados quânticos de seus qubits. Estamos diante da dinâmica do sistema computacional quântico que exhibe comportamentos de possibilidades simultâneas, exacerbando a ideia de mundos possíveis com que começaram os mundos imersivos. Assim, as características de ubiquidade, simultaneidade, virtualidade e narrativas paralelas se tornam algo autônomo que a Xenopaisagem tecnológica é capaz de produzir sem que o artista ou criador tenha que formulá-lo.

A obra de Heaney, *SlimeQore* (2022), nos coloca em um mundo bioimersivo quântico que usa a metáfora maleável e indeterminada do lodo para mergulhar na percepção da vida em escala quântica. Esses recursos são multiplicados por milhares no processo de edição de vídeo. Pois bem, a Xenopaisagem tecnológica surge como uma biblioteca digital viva, de onde emergem milhares de narrativas audiovisuais ao mesmo tempo. Quem olha, tem como operação: a seleção, a escolha, ou a compreensão daquilo que essa proliferação de possibilidades implica para a meso e macroescala. As sociedades humanas têm sido principalmente lineares, isso dado principalmente pela linguagem, que nos restringiu. Porém, a mente humana ou não humana não cria linearmente, mas por formas descontínuas, por intensidades que se unem no processo neurológico e que emergem em agrupamentos. Faz sentido, já que o cérebro funciona por meio de interações de baixo para cima entre milhares e milhares de neurônios, e não em um processo de cima para baixo que significaria ordenar, planejar e seguir uma lógica passo a passo.

Parece que estamos nos aproximando da própria natureza da realidade e do universo, quando conseguimos interagir com a diversidade e as múltiplas possibilidades, em vez de uma única versão do mundo, talvez fruto de um único momento histórico. Desta forma, dizemos com Heaney (2019) que abordar a natureza fundamental do universo, o comportamento de suas partículas, suas interações, suas leis de constituição e talvez de origem, amplia e transforma radicalmente a concepção que tínhamos sobre ele, impregnada em nossa percepção. Encontramos uma importante relação entre a teoria quântica da gravidade em *loop* de Rovelli (2021) e essas Xenopaisagens tecnológicas vivas, por meio de artes inte-

rativas digitais, em que o quantum explica que o universo é uma interação, como dizemos, em mundos bioimersivos (Hernández García, 2016). Quer dizer que não há elementos ou massas constitutivas do universo, ou do mundo — com exceção, talvez, das partículas elementares — mas, sim, o que é emergente por processos de interação. Com isto, afirmamos que Gaia não é dada antecipadamente (Hernández García; Niño Bernal; Hernández-García, 2018); é, antes, um processo emergente, agora com hiperinteligências artificiais organizando Xenopaisagens. Isso é observado em *loops* e em redes de *spin*. Mesmo as partículas quânticas não têm propriedades próprias, mas podem assumir diferentes características de momento, pois elas sofrem mutações continuamente em rápida dinâmica, invisíveis até mesmo para nossa compreensão linear da mudança. Essa dinâmica evidencia as qualidades transformadoras da matéria, da imagem e da vida — e, claro, a emergência do novo, expandindo, assim, o escopo da criatividade de Gaia.

### A protovida

A obra *Matter Does Matter*, do artista colombiano Juan M. Castro, sobre a protovida, permite observar Xenopaisagens tecnológicas vivas que surgiram e surgem antes da vida orgânica como a conhecemos. São objetos cinéticos que podem criar cópias de si mesmos, mover, reproduzir, proliferar e usar todo o material disponível para eles em seu ambiente líquido. Eles são compostos de gorduras que não pareciam estar vivas — mas estão, sendo sistemas autorreprodutores. Essa dimensão do vivo exibe um comportamento xeno, que nos convida a pensar sobre uma vida estranha, alienígena, mas tecnologicamente emergente, e que se tornou uma Xenopaisagem tecnológica viva que surge da protovida, e, ao mesmo tempo, é produzida por tecnologias vivas. Na verdade, são tecnologias que criam possibilidades de diversificação e apresentam comportamento autônomo. Isso está relacionado a hiperinteligências artificiais operando em microescala, de forma exponencial, e em quantidades que poderão realizar um processo coletivo, por exemplo: ajudar a resfriar Gaia, como afirmou Lovelock (2021) como uma necessidade urgente de continuar cuidando da vida na Terra e, conseqüentemente, também em outras partes do universo. Essas Xenopaisagens são acentuadas na reprodução da vida artificial, por meio de *Deep Learning e Machine Learning*, com os quais geram processos de busca por novas naturezas de vida. Conseqüentemente, afirmamos que o artificial sustenta o vivo, por meio de três ideias. Para a primeira, o artificial foi produzido pela própria vida e, portanto, não se trata de objetos isolados. Em segundo lugar, o artificial também precisa de Gaia para se tornar possível. Ou seja, não há duas coisas: vida e tec-

nologia, ou Gaia e hiperinteligência artificial, mas apenas uma, tornando possível essa unidade. A obra de Castro *Matter Does Matter* é um exemplo de como existe uma relação entre protovida e materiais, em vez de uma fratura entre matéria, vida e tecnologia. Mas existem diferenças, e Xenovidas de natureza diferente são geradas ou encontradas. E a terceira, que a vida é um processo e não uma essência ou um tipo de materialidade. Se for assim, então a vida é um surgimento contínuo de possibilidades que não são prescritas de antemão, mas surgem em relação ao tornar-se possível — e esse possível é a vida de Gaia.

### Conclusões

Um próximo caminho terá de se haver com a vida encontrada em outros planetas e galáxias e/ou com sua propagação de Gaia para outros lugares do universo. Contanto que se leve em conta que as hiperinteligências artificiais entrarão em contato por meio da combinatória quântica da reprodução, e não como existências anteriores determinadas ou reconhecíveis em cada lugar. Assim, a vida será cuidada não apenas na Terra. Gaia surge como uma Xenopaisagem tecnológica viva, para indicar radicalmente que é necessário compreendê-la a partir de níveis cognitivos superiores de hiperinteligência. Para isso, é importante expandir as Xenopaisagens para escalas cosmológicas. Nesse sentido, propomos que o Xenoholoente pode ser extrapolado por meio de fluxos de informação na escala do universo. Isso é plausível devido ao crescente número de satélites exoplanetários e outras tecnologias nas quais novas formas de pensar estão surgindo. Trata-se da investigação de elementos que são captados pelos *Rovers* (Curiosidade, Perseverância), o telescópio James Webb, entre outros dispositivos inovadores e presentes desde uma dimensão computacional — o que Schrödinger (1944) chamou de cristais aperiódicos. Isso, para significar um processo químico da vida de pequenas micromoléculas do qual podem estar surgindo Xenoholoentes tecnológicos vivos.

### Referências

ALVAREZ-RODRIGUEZ, Unai; SANZ Mikel; LAMATA, Lucas; SOLANO, Enrique. Quantum artificial life in an IBM quantum computer. *Scientific Reports*, Berlin, v. 8, n. 14793, 2018.

BEDAU, Mark A. Cuatro enigmas sobre la vida. In: BEDAU, Mark A.; CLELAND, Carol E. (orgs.). *La esencia de la vida: Enfoques clásicos y contemporáneos de filosofía y ciencia*. Tradução Mariano Sánchez-Ventura. México: Fondo de Cultura Económica, (2010) 2016, p. 795–822.



- CATTS, Oron; ZURR, Ionat. Growing for different ends. *International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, Amsterdam, v. 56, p. 20–29, 2014.
- HARAWAY, Donna. *Seguir con el problema*. Bilbao: Consonni, 2020.
- HEANEY, Libby. Quantum computing and complexity in Art. *Leonardo*, Cambridge, MA, n. 52, v. 3, p. 230–235, 2019.
- HERNÁNDEZ GARCÍA, Iliana. *Mundos bioinmersivos: la creatividad en evolución* (= Colección Estética contemporánea 6). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2016.
- \_\_\_\_\_. Estética de lo imposible. *DAT Journal*, São Paulo, v. 4, n.2, p. 32–47, 2019.
- \_\_\_\_\_. Imágenes digitales en el giro poshumano. *DAT Journal*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 46–54, 2022.
- \_\_\_\_\_; NIÑO BERNAL, Raúl; HERNÁNDEZ-GARCÍA, Jaime. *Ecopolítica de los paisajes artificiales* (= Colección Estética contemporánea n. 3). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2018.
- \_\_\_\_\_. *Estética poshumana: interacciones entre sistemas naturales y artificiales* (= Colección Estética contemporánea). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2021.
- LAMATA, Lucas. Quantum machine learning and quantum biomimetics: a perspective. *Machine Learning: Science and Technology*, Bristol, v. 1, n. 3, p. 1–11, 2020.
- LECUN, Yann; BENGIO, Yoshua; HINTON, Geoffrey. Deep learning. *Nature*, London, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.
- LOVELOCK, James. *Novaceno: la próxima era de la hiperinteligencia*. Tradução de Pablo Hermida Lazcano. Madrid: Paidós, 2021.
- MALDONADO, Carlos Eduardo. Pensar la complejidad, pensar como síntesis. *Cinta de Moebio*, Santiago de Chile, n. 54, p. 313–324, 2015.
- QUEMADA, Juan Campos. *Quantum origin of life: methodological, epistemological and ontological issues*. Madrid: Universidad Complutense, 2017.
- RAMANUJAM, Elangovan, *et al.* Xenobots: a remarkable combination of an artificial intelligence-based biological living robot. *International Journal of Sociotechnology and Knowledge Development (IJSKD)*, Hershey, PA, v. 14, n. 1, p. 1–11, 2022.
- ROVELLI, Carlo. *¿Y si el tiempo no existiera?* Tradução de Maria Pons Irazazábal. Barcelona: Herder, 2021.
- SCHRÖDINGER, Erwin. *¿Qué es la vida?* Tradução de Ricardo Guerrero. Barcelona: Tusquets, [1944] 2008.

# Física quântica e cultura: influências mútuas

Osvaldo Pessoa Jr<sup>1</sup>

**Resumo:** Uma exposição didática sobre a física quântica abre o artigo, salientando-se a diferença entre a parte objetiva da teoria e sua parte interpretativa. Adota-se uma “interpretação ondulatória realista com colapsos” para expor cinco princípios básicos da teoria. Aborda-se então a questão de qual é o impacto da física quântica sobre a sociedade. Discorre-se sobre seu grande impacto científico e tecnológico, e em seguida examina-se com mais atenção o seu impacto teórico, em termos ontológico e epistemológico. Argumenta-se que impacto ontológico em nossa vida cotidiana se limita às aplicações tecnológicas, e que possíveis consequências filosóficas do princípio de incerteza e do indeterminismo não são importantes, e muito menos as consequências imaginadas pelo Misticismo Quântico com relação ao emaranhamento. Dentre as lições epistemológicas está que conhecemos a interpretação que mais se aproxima da verdade, mas não sabemos qual é ela, dentre as dezenas de interpretações propostas. Por fim, discutimos a tese de Forman, que envolve a questão de se a ciência é objetiva ou se é uma construção sócio-culturalmente negociada, como defende o relativismo. Concluímos por um “relativismo relativo”: as interpretações podem ser fortemente influenciadas pela cultura, mas em uma ciência saudável a sua parte objetiva consegue se isolar das vicissitudes sociais e das intenções emotivas dos cientistas. Por fim, são dados alguns exemplos de influência da cultura, e de outros fatores, sobre as interpretações da Teoria Quântica.

**Palavras-chave:** interpretação; teoria quântica; cultura; relativismo.

---

<sup>1</sup> Professor titular de Filosofia da Ciência no Departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo (USP). Graduação em Física (1982) e Filosofia (1984) pela USP, Mestrado em Física Experimental na Unicamp, em 1985, e Doutorado no Departamento de História & Filosofia da Ciência na Indiana University, EUA, com tese sobre o problema da medição na física quântica (1990). Publicou o livro *Conceitos de física quântica* (2003). Desenvolve pesquisa em filosofia da física, filosofia da mente e “modelos causais em história da ciência”, além de se interessar por ensino e divulgação científica. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4191-1719>. Contato: [opessoa@usp.br](mailto:opessoa@usp.br).

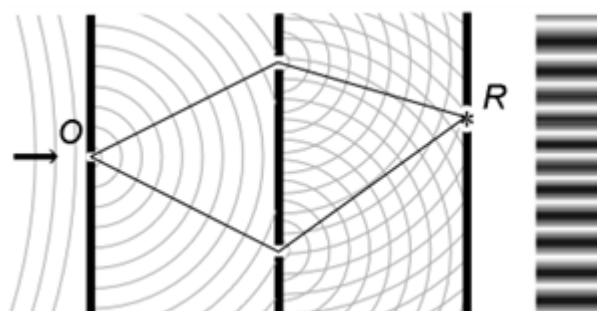
## **Quantum physics and culture: mutual influences**

**Abstract:** A pedagogical exposition of quantum physics opens the article, highlighting the difference between the objective part of the theory and its interpretative part. A “realist wave interpretation with collapses” is adopted to present five basic principles of the theory. One then addresses the impact of quantum physics on society. Its great scientific and technological impact is discussed, and then its theoretical impact is examined more closely, in ontological and epistemological terms. It is argued that the ontological impact on our everyday lives is limited to technological applications, and that possible philosophical consequences of the uncertainty principle and indeterminism are not important, much less the consequences imagined by quantum mysticism in relation to entanglement. Among the epistemological lessons is that we know the interpretation that comes closest to the truth, but we do not know which one it is, among the dozens of proposed interpretations. Finally, we discuss Forman's thesis, which involves the question of whether science is objective or whether it is a socio-culturally negotiated construction, as defended by relativism. We conclude in favor of a "relative relativism": interpretations can be strongly influenced by culture, but in a healthy scientific context its objective part is able to isolate itself from social vicissitudes and from the emotional intentions of scientists. Finally, some examples of the influence of culture and other factors on the interpretations of quantum theory are given.

**Keywords:** interpretation; quantum theory; culture; relativism.

## Introdução à física quântica

A física quântica (também chamada de mecânica quântica ou teoria quântica) é a área da ciência que descreve o domínio dos átomos e moléculas, e da radiação que interage com esses átomos e moléculas. Um experimento que exhibe os aspectos básicos desta teoria é o experimento da dupla fenda para elétrons individuais, ou, equivalentemente, para a detecção de fótons (quanta de luz).



**Figura 1:** experimento da dupla fenda para a luz, no regime clássico, formando franjas de interferência. Fonte: Pessoa (2003, p. 3).



**Figura 2:** formação paulatina das franjas de interferência, a partir do acúmulo de detecções pontuais, associada aos fótons, ou quanta de luz. Fonte: Pessoa (2003, p. 4).

No regime clássico, ao qual estamos acostumados em nossa vida cotidiana (Figura 1), um feixe de luz que passa por uma fenda fina (O) gera ondas esféricas que, ao passar por duas outras fendas (A e B) gera duas ondas esféricas que se superpõem. O resultado visível dessa interferência entre as duas ondas esféricas é o padrão de claros e escuros que aparece na tela detectora. As regiões escuras das franjas de interferência são pontos em que, quando a onda vinda de A está subindo, a onda vinda de B está descendo, de maneira que seus efeitos se cancelam.

O regime quântico é atingido quando o feixe de luz é muito fraco e o detector é extremamente sensível. Neste regime, a absorção de luz se

dá em pacotes discretos de energia, os quanta (fótons), que também são pontuais (Figura 2). O acúmulo paulatino desses pontos acaba gerando as franjas que observamos no laboratório de óptica clássica. Um experimento análogo é obtido para elétrons.

Um aspecto surpreendente do regime quântico é que a luz ou o elétron sofrem interferência, o que é típico de ondas, mas são detectados na forma de partículas. Como conciliar esses aspectos ondulatórios e corpusculares? Afinal, ondas têm propriedades, como se espalhar no espaço e poder ser dividida o quanto se queira, que ocorrem de maneira oposta em partículas, que seguem trajetórias, sem se espalhar, e não são divisíveis (até um certo valor de energia).

Respostas a essa pergunta resultam nas diferentes *interpretações* da Teoria Quântica. Por exemplo: à pergunta sobre qual é a natureza da luz ou do elétron logo antes da detecção, algumas interpretações postulam que o objeto está espalhado como uma onda; outras, que ele já tem uma localização bem definida, enquanto interpretações “antirrealistas” negam que se possa atribuir uma natureza real para um objeto que ainda não foi medido.

Apesar de haver muitas interpretações para a Teoria Quântica, todas concordam que os quanta do experimento acima aparecem de forma paulatina, e que se distribuem de acordo com as franjas de interferência indicadas na figura. Esta é a parte *objetiva* da Teoria Quântica, envolvendo os fatos observados e “formalismo mínimo” da teoria. Esse formalismo envolve leis estatísticas, pois geralmente não se pode prever onde irá aparecer um ponto na tela detectora, mas apenas estipular a probabilidade de o quanta aparecer nas diferentes localizações da tela. A objetividade mencionada pode ser expressa da seguinte forma: qualquer que seja a civilização que desenvolva uma ciência madura e saudável, seja a China (no caso em que a ciência europeia não tivesse florescido) ou uma sociedade extraterrestre, eventualmente ela descobriria os fatos objetivos da Mecânica Quântica. Esta é a parte da ciência que consegue se isolar das pressões culturais e das inclinações dos cientistas, devido à aplicação dos métodos científicos.

Mas há uma parte da ciência que é bastante sensível às pressões culturais e às inclinações dos cientistas, e esta parte é chamada de *interpretação* da teoria. Uma interpretação envolve suposições metafísicas, não verificáveis, usadas para explicar de maneira coerente os fenômenos observados (interpretações realistas); uma interpretação pode também estipular que o cientista não deve especular sobre aspectos inobserváveis da realidade, evitando, assim, asserções metafísicas (interpretações antirrealistas ou instrumentalistas).

## Uma interpretação didática da teoria quântica

Toda apresentação introdutória da física quântica acaba adotando uma interpretação para fins didáticos. A que é tradicionalmente a mais usada é a interpretação da complementaridade, de natureza antirrealista. No entanto, prefiro adotar uma interpretação realista, que se adéqua mais às intuições do aluno, e propor um retrato da realidade que se aproxima de uma abordagem padrão da teoria quântica, a chamada mecânica ondulatória, baseada na representação fornecida pela equação de onda de Schrödinger. Sucintamente, então, podemos estipular cinco princípios básicos da física quântica. As duas primeiras são as mais fundamentais para o iniciante.

O primeiro princípio diz que *toda matéria é ondulatória*. Isso foi descoberto pelo jovem Louis de Broglie em 1924, ao prever que os elétrons deveriam sofrer difração (que é, fundamentalmente, o mesmo fenômeno de interferência visto acima), o que seria verificado experimentalmente em 1927. Aqui, peço ao leitor que imagine que todos os átomos e partículas têm uma oscilação intrínseca enquanto estão em repouso ou se propagam, e isso acontece quer ocorram observações (medições) ou não. Este princípio se estende também para a radiação eletromagnética, mas isso já era conhecido pela física clássica (vale também para outros “bósons de interação”, associados às outras três forças reconhecidas na natureza: gravitacional, nuclear forte e nuclear fraca). Uma consequência da natureza ondulatória é o *princípio de superposição*: dados dois estados distintos que possam ser preparados experimentalmente, é geralmente possível “somar” tais estados, gerando um novo estado ondulatório (que pode ser preparado experimentalmente). Se tais estados têm a mesma amplitude e oscilam em oposição, eles se cancelam, gerando as faixas escuras de interferência destrutiva que vimos na seção 1 (isso não viola a conservação de energia, pois a energia que é zerada acumula-se nas faixas de interferência construtiva).

O segundo princípio, cuja evidência começou a surgir a partir de Max Planck, em 1900, é o de *quantização*, manifestado pela detecção pontual no experimento acima. A maneira instrumentalista de exprimir isso, ou seja, o enunciado que todas as interpretações aceitariam, é de que, no processo de medição, obtêm-se eventos observáveis (macroscópicos) que são localizados pontualmente (ou seja, com resolução de em torno de um milímetro), transmitindo para o detector uma energia quantizada. Estas duas propriedades são especialmente notáveis para a radiação eletromag-

nética (pois isso não é previsto pela física ondulatória clássica). Podemos resumir este princípio dizendo que *na medição ocorre quantização*. Geralmente, essa interpretação estritamente instrumentalista é associada a uma tese minimamente realista que postula que há um ente quântico revelado ou criado pela medição, de dimensões subnanoscópicas. O termo “fóton” (quantum de luz) geralmente é interpretado desta maneira minimamente realista, mas pode também ser interpretado da maneira instrumentalista indicada acima.

A tensão entre esses dois princípios, “toda matéria e radiação é ondulatória” e “na medição ocorre quantização”, deve ser resolvida por uma proposta de interpretação da teoria quântica. A que proponho aqui é a “interpretação ondulatória realista com colapsos” (IORC), que diz que, na interação com o aparelho de medição, uma onda espalhada colapsa para um pacote de onda de dimensões próximas ao evento macroscópico registrado (que acima sugeri poder ser da ordem de um milímetro, mas que em detectores mais modernos poderia ser menor, sempre satisfazendo os limites impostos pelo princípio de incerteza, que é um princípio oriundo da física ondulatória clássica).

A natureza desse colapso é um problema filosófico conhecido como “problema da medição”. Para uma interpretação realista como a IORC, uma característica trazida à tona pelo Teorema de Bell é que os colapsos postulados pela interpretação têm que ser não-locais, ou seja, são instantâneos (no referencial do laboratório, por exemplo). Outra questão importante que se coloca é se esses colapsos podem ocorrer em situações fora da interação de medição, ou seja, fora da situação em que há um aparelho macroscópico em estado metaestável que evolui para um estado considerado irreversível. Adotaremos a postura interpretativa de que sim, colapsos ocorrem fora do processo de medição. A “decoerência” induzida pelo ambiente descreve estatisticamente um processo de colapso que ocorre quando um sistema quântico interage com um sistema muito maior, sujeito a flutuações, em um processo cujos detalhes individuais ainda não são adequadamente descritos teoricamente (a decoerência faz uma descrição apenas estatística, não explicando os casos individuais em que ocorre uma transição ou colapso imprevisível). Uma tentativa de dar conta desta situação é fornecida pelas interpretações de localização espontânea (lançada por Ghirardi, Rimini e Weber, em 1986), que postulam uma ontologia ondulatória e também uma taxa de colapso espontâneo em toda a matéria.

O terceiro princípio conceitual introduzido pela mecânica quântica descreve o *emaranhamento de dois ou mais quanta*, que fornece estados

com propriedades que não ocorrem na física ondulatória clássica. O quarto princípio é a *distinção entre férmions e bósons*, exemplificados respectivamente por elétrons e pela luz (radiação eletromagnética). Por fim, um quinto princípio é a *existência do vácuo quântico*, um “pleno” ocupando (ou identificando-se com) o espaço (ou o espaço-tempo), contendo uma energia “de ponto zero” existente mesmo na ausência de átomos, e em constante flutuação.

## O impacto da física quântica na sociedade

Qual é o impacto da mecânica quântica sobre a sociedade? É costume afirmar-se que sem a mecânica quântica não haveria toda a gama de avanços tecnológicos que nos cerca, como transístores, lasers, energia nuclear, supercondutividade etc. No entanto, tal afirmação contrafactual precisaria ser formulada com mais cuidado, pois teorias semiclássicas, diferentes da teoria quântica, poderiam fornecer bases teóricas para descrever semicondutores (essenciais em transístores), e o próprio desenvolvimento de lasers antecedeu a formulação de uma óptica quântica que os descrevesse de maneira satisfatória.

De qualquer maneira, é inegável que a teoria quântica desenvolvida na década de 1920 teve *um grande impacto científico e tecnológico*, afetando assim a nossa sociedade. Mais sutil é a discussão sobre se a teoria quântica tem um impacto teórico, alterando a maneira como vemos o mundo. Iremos dividir esta questão em dois tipos: ontológico e epistemológico. Um impacto ontológico seria uma alteração da maneira em que concebemos a realidade; já um impacto epistemológico seria adaptarmos a estrutura da teoria dos átomos para teorias de outras áreas de nosso conhecimento e atuação.

Na questão do impacto teórico *ontológico*, está claro que agora entendemos melhor como funciona o mundo na escala dos átomos e moléculas, em torno de  $10^{-10}$  metros, ou a escala “subnanoscópica”. Nesse sentido, houve um impacto óbvio. Mas será que os princípios quânticos mencionados na seção anterior afetam a maneira como devemos entender o mundo macroscópico que nos cerca, na escala de centímetros e metros? O movimento do Misticismo Quântico defende que sim: os princípios quânticos se aplicam à mente humana, e esta pode entrar em um estado de emaranhamento com outras mentes. Mas tal especulação não é aceita pela maioria dos físicos. O que ocorre é que há uma transição entre o mundo da escala quântica e o mundo macroscópico, uma fronteira que



não é perfeitamente compreendida, e que é explorada pelo conceito de decoerência mencionado na seção anterior. Como calculou Mark Tegmark (2000), as flutuações térmicas em nosso cérebro relativamente quente impediriam a possibilidade de superposições quânticas se sustentarem nos microtúbulos de nossas células por mais de um microssegundo. Ou seja, uma propriedade ondulatória da matéria, a chamada superposição quântica, torna-se desprezível em escalas macroscópicas devido à interação com um ambiente ruidoso, ou cheio de flutuações aparentemente aleatórias (especialmente fortes na escala nanoscópica, um pouco acima da escala quântica). Isso, então, limita a possibilidade de o comportamento quântico (ou melhor, a ontologia quântica) afetar o mundo à nossa volta.

No entanto, há a possibilidade de este comportamento se estender para agrupamentos maiores de átomos, desde que as flutuações ambientais sejam minimizadas. O grupo de Markus Arndt, na Universidade de Viena, demonstrou superposição quântica com moléculas de 2000 átomos (Fein *et al.*, 2019). Além disso, a partir de 2006, experimentos “optomecânicos” atingiram superposições quânticas em vibrações mecânicas, por meio de excitações por fótons únicos (ver resenha de Aspelmeyer *et al.*, 2010). Tais experimentos são às vezes chamados de “gatos de Schrödinger”, em referência ao famoso experimento mental do físico austríaco, pioneiro da mecânica ondulatória (uma das versões originais da mecânica quântica, posteriormente unificada com as outras versões). Mas a extrema dificuldade de tais experimentos mostram que a decoerência induzida pelo ambiente impediria a superposição imaginada por Schrödinger, em seu argumento a favor da incompletude da teoria quântica.

Os próprios computadores quânticos seriam um exemplo de extensão da ontologia quântica para domínios macroscópicos, mas isso depende justamente do controle dos ruídos ambientais (flutuações térmicas). Computadores quânticos baseiam-se especialmente no emaranhamento de vários átomos para poder realizar certos cálculos em tempos bem mais rápidos do que computadores convencionais.

Um dos primeiros conceitos da física quântica a ter um impacto cultural e ser estendido para outros domínios, na década de 1930, foi o princípio de incerteza. Este princípio se baseia em uma propriedade ondulatória da matéria, acoplada à quantização na detecção (ou seja, os dois primeiros princípios da seção anterior). Ondas clássicas, como ondas eletromagnéticas, são limitadas por um princípio de indeterminação, afetando a localização de um pacote de onda e seu comprimento de onda. No

caso quântico, esta propriedade ondulatória adquire um aspecto corpuscular com o princípio da quantização na medição.

O astrônomo Arthur Eddington (1932, p. 79), por exemplo, especulou que a liberdade humana estaria garantida pela existência de processos quânticos em nosso cérebro, submetidos ao princípio de incerteza, que quebrariam o determinismo da física clássica. Até hoje, porém, tal especulação não obteve evidência alguma. O impacto ontológico do princípio quântico de incerteza no mundo à nossa volta não apareceu (já o princípio clássico de indeterminação tem consequências, por exemplo, na recepção de ondas de rádio nos aparelhos de uso cotidiano).

Uma questão associada é a tese de que a mecânica quântica teria mostrado que o universo é indeterminista, o que seria uma consequência ontológica notável. No entanto, a interpretação causal de David Bohm (1952) mostrou que, em princípio, pode-se conceber que o mundo quântico seja determinista, pois sua interpretação introduziu variáveis ocultas deterministas no sistema quântico e no aparelho de medição, de tal modo a dar conta das leis fundamentais da física quântica.

O que podemos concluir desta discussão é que o impacto ontológico da teoria quântica em nossa sociedade limita-se justamente às aplicações tecnológicas que foram obtidas no último século, que são maneiras de amplificar efeitos quânticos de maneira a gerar efeitos em nosso cotidiano, efeitos esses que eram desconhecidos no passado. Isso é bem menos do que a influência que o Misticismo Quântico vê em nossa psicologia, medicina e em nossas crenças religiosas.

Passemos agora para o impacto teórico *epistemológico* da teoria quântica. Será que a natureza desta área da ciência fornece lições sobre como devemos construir nossas teorias científicas? Em Pessoa (2016), sugeri que a distinção entre um nível de descrição de potencialidades, expresso pela função de onda quântica, e um nível de atualizações, após o colapso da onda quântica e seu registro macroscópico, poderia, talvez, ser estendido para teorias psicológicas e sociológicas.

Aqui, porém, gostaria de salientar uma lição epistemológica associada à existência de dezenas de interpretações da teoria quântica. Como já mencionamos, por trás da parte objetiva da mecânica quântica há muitas interpretações distintas sobre a natureza última do nosso mundo, relativa às partes não observáveis da realidade. Qual delas é a correta? A melhor resposta que podemos fornecer hoje é *que não temos como saber qual é verdadeira*. Dentre as dezenas de interpretações, algumas delas são mais próximas da verdade; ou seja, ao estudar as várias interpretações,

talvez tenhamos contemplado a resposta correta a respeito da realidade quântica do mundo! No entanto, não sabemos qual é ela, não sabemos qual é a resposta correta. Iremos para nosso túmulo sabendo a resposta correta, mas sem poder reconhecer que ela é a resposta correta! Esta seria uma lição epistemológica da teoria quântica.

### **A tese de Forman**

A ciência é objetiva ou é uma construção socioculturalmente negociada? Iniciemos com a famosa tese de Forman ([1971] 1983), que defende que conteúdos da teoria quântica foram negociados pelos físicos da época, em face de uma pressão cultural contra a tese do determinismo.

Em seu artigo, Paul Forman parte das seguintes afirmações do historiador Max Jammer (1966, seção 4.2):

[...] certas ideias filosóficas do final do século XX não apenas prepararam o clima intelectual para a formação das novas concepções da moderna teoria quântica, mas contribuíram decisivamente para ela (Jammer, 1966, p. 166–67).

As escolas filosóficas que mencionamos, especificamente o contingentismo, o existencialismo, o pragmatismo e o empirismo lógico, surgiram em reação ao racionalismo tradicional e à metafísica convencional [...] A afirmação que faziam de uma concepção concreta da vida e sua rejeição de um intelectualismo abstrato culminaram em sua doutrina de livre-arbítrio, na recusa do determinismo mecanicista ou da causalidade metafísica. Unidas na rejeição da causalidade, apesar de não o fazerem nas mesmas bases, tais correntes de pensamento prepararam, por assim dizer, o pano-de-fundo filosófico para a mecânica quântica moderna. Elas contribuíram com sugestões no estágio formativo do novo esquema conceitual e depois promoveram sua aceitação (Jammer, 1966, p. 180).

A proposta de Forman, então, é fundamentar a tese de Jammer examinando documentos do período de construção da mecânica quântica, especialmente a década de 1920, no período conhecido com República de Weimar, que vai de 1919 a 1933, em que a Alemanha foi punida economicamente pelo Tratado de Versailles, que encerrou a Primeira Guerra Mundial, levando a um sentimento de humilhação na população alemã.

Seguindo Jammer, Forman salienta que, “após a derrota alemã, a tendência intelectual dominante no mundo acadêmico de Weimar era uma ‘filosofia da vida’ existencialista e neorromântica, que se alimentava de crises e se caracterizava pelo antagonismo em relação à racionalidade analítica em geral e às ciências exatas e suas aplicações técnicas em particular” (Forman, 1983, p. 7):

[...] um grande número de cientistas alemães, sob a influência de “correntes de pensamento” [...], se distanciou da causalidade na física ou a repudiou explicitamente. [...] a tese mais importante de Jammer — de que influências extrínsecas levaram os físicos a desejar ardentemente, buscar ativamente e aderir com entusiasmo a uma mecânica quântica acausal — é aqui demonstrada para a esfera cultural alemã. (p. 6) [...]

Implícita ou explicitamente, o cientista era o bode-expiatório de incessantes exortações em favor de uma renovação espiritual, enquanto o conceito — ou meramente a palavra — “causalidade” simbolizava tudo aquilo que era odioso na atividade científica. (Forman, 1983, p. 7).

Qual o conceito que simboliza hoje o “odioso” na atividade científica? É o de *reduccionismo*. Resumindo, então, a tese de Forman:

[...] existiriam indicações de que os físicos e matemáticos alemães ansiavam, e deliberadamente tentaram, alterar o caráter de suas disciplinas enquanto empreendimentos cognitivos e buscaram mudar conceitos específicos nelas empregados, de modo a trazê-las a uma conformidade mais estreita aos valores do meio intelectual de Weimar? [...] Estou convencido [...] que o movimento para eliminar a causalidade na física, surgido tão bruscamente e que floresceu luxuriantemente na Alemanha após 1918, exprimia fundamentalmente um esforço dos físicos alemães em adaptar o conteúdo de sua ciência aos valores de seu ambiente intelectual (Forman, 1983, p. 9).

A tese de Forman levou a muita discussão, no que podemos chamar de o debate *objetividade x relativismo*. Se o conteúdo de uma ciência natural busca retratar uma realidade que independe da cultura humana (objetividade), como é que o conteúdo da ciência pode ser influenciado pela cultura de um momento histórico particular (relativismo)?

Nossa resposta parte da distinção já feita entre a parte objetiva e a parte interpretativa da teoria quântica. A parte objetiva é expressa pelo “formalismo mínimo” da teoria, que reflete os fatos observados em experimentos e fornece as previsões experimentais da teoria. Qualquer cultura que tenha uma ciência que progrida de maneira “saudável” descobrirá, por exemplo, o fato de que a luz é detectada como fótons. Nisso constitui a objetividade da ciência: o lado objetivo da teoria quântica desenvolve-se de maneira independente da cultura (pressupondo apenas que haja uma valorização cultural da ciência, para que exista uma “ciência madura”).

Mas a mecânica quântica (assim como todas as outras áreas da ciência) possui também uma parte interpretativa, que envolve afirmações a respeito da realidade de processos não diretamente observáveis da realidade (interpretações realistas), ou teses justificando porque não se deve ir para além dos fatos observáveis (interpretações antirrealistas). Há deze-

nas de interpretações da teoria quântica: como a escolha da interpretação não é determinada pelos dados empíricos, ela pode sofrer considerável influência da cultura reinante em uma comunidade científica e da visão de mundo dominante. Isso é exemplificado pela rejeição do determinismo nos anos 1920–30, segundo a tese de Forman.

Esta postura adotada aqui pode ser considerado um “relativismo relativo”. Haveria um relativismo em parte das construções teóricas da ciência, no sentido de elas serem influenciadas pela cultura e pela ideologia, mas tal relativismo é relativo a só uma parte da ciência. Há também uma parte objetiva, que surge justamente do esforço dos métodos científicos em isolar suas descobertas das vicissitudes sociais e das intenções e emoções do cientista. Em suma, a tese de Forman pode ser aceita, considerando que a discussão sobre a causalidade faz parte do lado interpretativo da teoria quântica.

### **Breve exploração da relatividade das interpretações**

Ilustraremos a seguir alguns exemplos de influência da cultura sobre as interpretações da mecânica quântica. Veremos também que há outros mecanismos (além da influência cultural) para explicar por que certas interpretações são preferidas em certos lugares.

Começamos com a tese proposta por James Cushing (1994), segundo a qual a dominação da interpretação de Copenhague da mecânica quântica (uma visão antirrealista) foi uma “contingência histórica”: em outra situação, uma interpretação realista como a de Louis de Broglie e David Bohm (a preferida de Cushing) poderia ter sido hegemônica. Tal afirmação parece bastante plausível: bastaria haver um ambiente favorável para uma interpretação realista, e uma adequada solução dos quebra-cabeças presentes. O que Cushing não considera, porém, é que há uma vantagem natural de interpretações antirrealistas, que são mais econômicas e não introduzem variáveis ocultas ou inacessíveis à época. Como a postulação de um corpúsculo com posição e velocidade bem definidas a cada instante não traz nenhuma vantagem para o cálculo dos fenômenos quânticos, é natural que muitos físicos deixem de lado essas hipóteses a respeito de variáveis ocultas. Uma interpretação realista mais “natural” (isto é, próxima do formalismo matemático usado), como a interpretação ondulatória realista com colapsos (IORC), que não postula explicitamente variáveis ocultas, poderia ter uma melhor chance de sobreviver sem ser desafiada por visões antirrealistas.

As teses de Forman e Cushing se encaixam muito bem, segundo a nossa abordagem. Ambas são consistentes com a existência de uma parte objetiva da ciência, expressa no caso da teoria quântica pelo seu formalismo mínimo. E ambas argumentam que a parte interpretativa da teoria poderia ter sido diferente, conforme as circunstâncias culturais e filosóficas. Forman faz isso apenas indiretamente, ao defender que a causa da rejeição do determinismo era cultural; se a causa não tivesse ocorrido, o determinismo poderia não ter sido rejeitado, que é a tese de Cushing.

O segundo caso a ser examinado é o desenvolvimento de interpretações realistas em contextos culturais diferentes da Alemanha no período entreguerras, em que a formação dos cientistas tinha um forte componente filosófico. Refiro-me à interpretação dos coletivos (*ensembles*) estatísticos, que foi proposta no contexto estadunidense por John Slater (1926), Edwin Kemble (1937), Henry Margenau e Murphy (1946) e Alfred Landé (1951); e, no contexto da União Soviética, por Dmitrii Blokhintsev (1949) e Yakov Terletskii. No primeiro caso, haveria uma influência de uma tradição de Física prática e experimental, sem inclinações abstratas (com algumas exceções, como Willard Gibbs), e sem muita influência filosófica, salvo pelo pragmatismo. No segundo caso, havia uma ideologia materialista dialética contrária ao que era visto como idealismo na interpretação de Niels Bohr e outros autores, o que facilitava a recepção de uma teoria realista como a da interpretação dos coletivos, baseada na ideia de que o formalismo quântico não descreve quanta individuais, mas faz uma descrição estatística, de maneira que há propriedades reais que são ocultas.

A tese de Forman também explica muito bem o surgimento das interpretações realistas ondulatórias em que o sujeito teria a capacidade de causar um colapso da onda quântica, uma “interpretação subjetivista” incorporada pelas correntes do misticismo quântico. Tal interpretação esteve associada a John von Neumann (mas não explicitamente), Fritz London, Edmond Bauer, Walter Heitler, Eugene Wigner, além de James Jeans, Arthur Eddington e J. B. S. Haldane. A explicação para a força adquirida por essas interpretações espiritualistas envolveria o mesmo movimento do romantismo do entreguerras alemão descrito por Jammer e Forman, e as várias escolas esotéricas que sempre tiveram força nas diferentes civilizações humanas. Notamos que a tese de que a consciência humana causa os colapsos quânticos (sem afetar as probabilidades quânticas) nunca foi refutada por experimentos, de maneira que é uma interpretação que deve

ser aceita na “democracia de interpretações quânticas” que passou a ser mais amplamente reconhecida a partir dos anos 1970.

Um quarto caso envolve a interpretação dos estados relativos de Hugh Everett (1957) e dos muitos mundos Bryce DeWitt (1970). Neste caso, o surgimento da interpretação e seu sucesso mais recente se ligam ao ambiente acadêmico de pesquisa em cosmologia (e não da cultura em geral). Curiosamente, houve uma concentração de pesquisadores que defendem a interpretação everettiana em Oxford. Isso, em parte, parece ser um efeito do ambiente acadêmico de valorização da cosmologia e da física matemática.

Além do efeito da cultura e do ambiente acadêmico, há também um análogo ao “efeito fundador” em biologia evolutiva. Por exemplo, havia um pesquisador destacado na Rutgers University, Sheldon Goldstein, que defendia a “mecânica bohmiana”, uma versão corpuscularista da interpretação de Bohm. Ele atraiu vários pesquisadores, inclusive da interpretação ondulatória realista das localizações espontâneas, formando nesta universidade um núcleo de defesa de interpretações realistas.

Entre 1950 e 1980, com a Guerra Fria, muitos cientistas associaram sua visão ideológica de esquerda a interpretações realistas, acusando a interpretação da complementaridade de ser idealista e burguesa. Este debate é conhecido como “batalhas quânticas”, e é explorado por Olival Freire Jr. (2009). No final das contas, percebe-se que há propostas envolvendo todo tipo de combinação entre ideologia e interpretação. De qualquer maneira, é mais um exemplo de como a ideologia e a cultura influenciam as discussões sobre as interpretações da teoria quântica.

Uma associação notável entre cultura e interpretação parece ocorrer na França, em que há um forte peso do pós-modernismo, uma visão relativista. Após algumas versões do teorema de Bell (como a desigualdade de Leggett), alguns filósofos da física franceses passaram a defender que *a própria noção de realidade teria que ser abandonada* (Mécanique, 2008).

Muitos dos pontos acima necessitam de um melhor embasamento historiográfico, servindo, assim, como sugestão para pesquisa futura.

## Conclusão

Neste artigo, visitamos algumas questões relacionadas à física quântica, sua relação com a cultura em geral e seu impacto na sociedade. Começamos buscando apresentar didaticamente a teoria quântica, explorando o experimento da dupla fenda no regime quântico. Salientamos que a teoria tem uma parte objetiva e uma parte interpretativa, e exploramos

brevemente uma interpretação ondulatória realista com colapsos. A física quântica teve um grande impacto científico e tecnológico na sociedade; e examinamos, também, a questão de seu impacto teórico — tanto no aspecto ontológico quanto epistemológico. Estudamos, então, a tese de Forman, de que a criação da mecânica quântica se deu em um contexto de rejeição da noção de determinismo. Esta tese é vista como bastante plausível, dado que a influência da cultura se deu sobre a parte interpretativa da teoria. Examinamos, por fim, alguns exemplos de como a cultura e outros fatores têm tido uma influência sobre diferentes interpretações da teoria quântica.

### Agradecimentos

O presente trabalho é um diálogo com pesquisadores das Humanidades, sendo que uma etapa anterior recente de tal diálogo foi realizada por Pessoa (2016), dirigido para psicólogos e psicanalistas. Aqui, eu retraço o início deste outro artigo, mas a maior parte do que aparece das seções 2 em diante deste presente texto é inédito. As seções 4 e 5 foram desenvolvidas ao longo de 2017, em palestras no IRFJ, Unicsul, UFABC, IFT, UFPA, FEG e na Escola de HFC do Paraná — mas não tinham sido publicadas no papel.

O estímulo para o presente texto adveio da interação com três grupos ligados à área de Comunicação, interessados em física quântica, nas seguintes palestras online, durante a pandemia de Covid-19. (1) Evento “A Cidadania do Terceiro Milênio”, em 05/11/2020, no *I Festival Internacional de Cidadania Digital*, organizado pelo Centro Internacional de Pesquisa Atopos, ECA-USP. (2) Palestra no Fórum na disciplina “Alterciência: Proposições Críticas e Processos Criativos para o Conhecimento”, ofertado pelo Diversitas, USP, a convite de Thiago Costa e Artur Matuck, da ECA-USP, com curadoria de Daniela Carolina Ernst, em 24/05/2021. (3) Palestra no *Horizonte Quântico*, do Programa de Estudos Pós-Graduados em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), PUC-SP, em 20/08/2021, a convite de Rodrigo Petronio e Lucia Santaella.



## Referências

ASPELMEYER, Markus, *et al.* Quantum optomechanics – throwing a glance. *Journal of the Optical Society of America B*, Washington, DC, v. 27, n. 6, p. A189–A197, 2010.

BLOKHINTSEV, Dmitrii. *Foundations of quantum mechanics*. Moscow: GITTL, 1949.

BOHM, David. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables part I and II. *Physical Review*, College Park, MD, v. 85, n. 2, p. 166–193, 1952.

CUSHING, James T. *Quantum mechanics: Historical contingency and the Copenhagen hegemony*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1994.

DEWITT, Bryce. Quantum mechanics and reality. *Physics Today*, v. 23, n. 9, p. 30–35, 1970.

EDDINGTON, Arthur. The decline of determinism: presidential address to the Mathematical Association. *The Mathematical Gazette*, Leicester, v. 16, n. 218, p. 66–80, 1932.

EVERETT III, Hugh. *On the foundations of quantum mechanics*. PhD Thesis submitted to the Princeton University, 1957.

FEIN, Yaakov, *et al.* Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa. *Nature Physics*, Berlin, v. 15, n. 12, p. 1242–1245, 2019.

FORMAN, Paul. A cultura de Weimar, a causalidade e a teoria quântica, 1918–1927: a adaptação de físicos e matemáticos alemães a um ambiente intelectual hostil. Tradução de C. W. Abramo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Suplemento 2, Campinas, p. 3–98, [1971] 1983.

FREIRE Jr., Olival. *Marxism and quantum controversy: responding to Max Jammer’s question*. In: CATTANI, Mary Schnackenberg *et al.* (orgs.). *Trends in Physics: Festschrift in homage to prof. José Maria Filardo Bassalo*. São Paulo: Livraria da Física, 2009, p. 237–258.

GHIRARDI, Giancarlo; RIMINI, Alberto; WEBER, Tullio. Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D*, Philadelphia, PA, v. 34, n. 2, p. 470–491, 1986.

JAMMER, Max. *The conceptual development of quantum mechanics*. New York, NY: McGraw-Hill, 1966.

KEMBLE, Edwin C. *The fundamental principles of quantum mechanics*. New York, NY: McGraw-Hill, 1937.

LANDÉ, Alfred. 1951. *Quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1951.

MARGENAU, Henry; MURPHY, George M. *The mathematics of physics of chemistry*. New York, NY: Van Nostrand, 1946.

MÉCANIQUE quantique: l'erreur d'Einstein. *La recherche*, Paris, v. 418, 2008.

PESSOA Jr., Osvaldo. A psicologia precisa da teoria quântica? *Calibán* — *Revista Latino-Americana de Psicanálise*, Montevideo, v. 14, n. 2, p. 145–152, 2016.

SLATER, John. A dynamical model for complex atoms. *Physical Review*, College Park, MD, v. 28, p. 291–317, 1926.

TEGMARK, Max. Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, College Park, MD, v. 61, p. 4194–4206, 2000.

## Introdução à teoria gerativa — Parte 1:

# Conhecimento, cosmologia e emergência a partir da obra de David Deutsch

Por Rodrigo Petronio<sup>1</sup>

**Resumo:** Este artigo propõe desenvolver uma área do conhecimento que tenho definido como teoria gerativa. O gerativismo possui conexões com as chamadas teorias emergentistas. A cosmologia gerativa é um aprofundamento das cosmologias contemporâneas baseadas no conceito de multiverso. Para tanto, tomo como ponto de partida a obra de David Deutsch, um dos pioneiros da computação quântica, das cosmologias emergentistas e da complexidade computacional. O artigo se restringe a sinalizar os limites de algumas vertentes da epistemologia e da filosofia da ciência, tais como o reducionismo, o holismo, o empirismo, o indutivismo, o instrumentalismo e o positivismo, demarcando suas distinções em relação ao gerativismo e às abordagens emergentistas. Ao fazê-lo, defini alguns eixos das propriedades emergentes e, por conseguinte, alguns eixos de orientação do gerativismo.

**Palavras-chave:** gerativismo; emergência; conhecimento; cosmologia; reducionismo; indutivismo.

---

<sup>1</sup> Rodrigo Petronio é escritor e filósofo. Professor titular da FAAP, é autor de 17 livros e de centenas de ensaios e artigos. Atua na fronteira entre comunicação, literatura e filosofia. Formado pela USP, tem dois mestrados: em Filosofia da Religião (PUC-SP) e em Literatura Comparada (UERJ) Realizou o Doutorado na UERJ/Stanford University. Desenvolveu um pós-doutorado sobre a cosmologia de Alfred North Whitehead (2018-2020) no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), na PUC-SP, onde atualmente é pesquisador. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4473-2193>. Site: [www.rodriropetronio.com](http://www.rodriropetronio.com). Contato: [rodriropetronio@gmail.com](mailto:rodriropetronio@gmail.com).

## **Introduction to generative theory — Part 1 Knowledge, cosmology and emergence based on the work of David Deutsch**

**Abstract:** This paper proposes to develop an area of knowledge that I have defined as generative theory. Generativism has connections with so-called emergentist theories. Generative cosmology is a deepening of contemporary cosmologies based on the multiverse concept. The starting point is the work of David Deutsch, one of the pioneers of quantum computing, emergent cosmologies, and computational complexity. The paper restricts itself to signaling the limits of some strands of epistemology and philosophy of science, such as reductionism, holism, empiricism, inductivism, instrumentalism, and positivism. It demarcates the differences in relation to generativism and emergentist approaches and defines some axes of emergent properties and consequently, some axes of orientation for generativism.

**Keywords:** generativism; emergence; knowledge; cosmology; reductionism; inductivism.

## Gerativismo

A teoria gerativa ou gerativismo é uma nova área do conhecimento que tenho desenvolvido. Um dos conceitos nucleares do gerativismo é o conceito de emergência. A teoria gerativa consiste em um aprofundamento das cosmologias contemporâneas emergentistas baseadas no conceito de multiverso. Para tanto, tomo como ponto de partida a obra de David Deutsch, um dos pioneiros da computação quântica, das cosmologias emergentistas e da complexidade computacional. Semelhante às concepções de Deutsch, a cosmologia gerativa articula quatro grandes áreas: a epistemologia, a evolução, a quântica e a computação. Concentra-se também em conceitos adjacentes, tais como infinito, multiverso e virtualidade. Em suas diversas vertentes, as cosmologias contemporâneas definem o multiverso a partir da axiomatização da pluralidade e da possibilidade de universos existentes, mas mantêm a centralidade de um universo-matriz em relação aos universos-espelhos. A cosmologia gerativa parte do pressuposto da inexistência de um universo-matriz capaz de comensurar os universos-espelhos. A consistência do universo que acessamos seria apenas a possibilidade de descrição das conexões transversais de universos cujas consistências dependem da excentricidade que estabeleçam com outros universos. Para realizar essa tarefa, vamos analisar alguns dos principais impasses de algumas linhas da epistemologia. E como as teorias emergentistas e o gerativismo se distinguem delas. Começamos situando a obra de Deutsch e a sua proposta emergentista, conhecida como uma teoria de tudo.

## Teorias de Tudo

A obra de David Deutsch é uma das mais singulares do pensamento contemporâneo. Nascido em Haifa, Israel, em 1953, é professor visitante no Centre for Quantum Computation (CQC) do Clarendon Laboratory da Universidade de Oxford. Desenvolveu seu doutorado sob orientação do eminente físico Dennis Sciama, que também orientou as teses de Stephen Hawking, Martin Rees e John Barrow, dentre outros nomes influentes da cosmologia. Conhecido como um dos pioneiros mundiais da computação quântica, recebeu distinções como o Prêmio Paul Dirac (1998) e a medalha Paul Dirac (2017), dentre outras. Um dos algoritmos mais importantes da computação quântica é o algoritmo de Deutsch-Jozsa (1992), criado em parceria com o matemático Richard Jozsa. Como o algoritmo descoberto por Peter Shor (1994), ambos são nucleares para o desenvol-

vimento da computação quântica. A obra de Deutsch se estrutura a partir de uma cosmologia construtivista batizada pelo autor de teoria do construtor (Deutsch, 2012). Essa cosmologia tem um epicentro: o conceito de emergência (Deutsch, 1997; 2011). Adjacentes a essas teorias, conceitos e áreas do conhecimento, Deutsch (1985) desenvolve a teoria da complexidade computacional, a teoria do multiverso (Deutsch, 1997; 2002; 2005; 2011), a teoria do infinito (Deutsch, 1997; 2011) e a teoria dos geradores de realidade virtual (Deutsch, 1997; 2005).

A despeito da complexidade dessa obra, Deutsch se tornou conhecido como formulador de uma teoria de tudo. Essa teoria de tudo se baseia em quatro elementos ou matrizes. A primeira é a teoria quântica, concebida a partir das descobertas do quantum de energia formulado por Max Planck e que assumiu o epicentro da física ao longo do século XX. Deutsch se concentra, contudo, nas consequências da teoria quântica desdobradas por Hugh Everett para a formulação do conceito de multiverso. A segunda é a teoria da evolução, definida a partir da seleção natural de Darwin e fundamentada hoje em dia por Richard Dawkins. A terceira é a teoria do conhecimento, empregada, sobretudo, a partir dos conceitos de conjecturas e refutações de Karl Popper. E a quarta é a teoria da computação, tomada em seus fundamentos clássicos, lançados pela obra de Alan Turing e definida a partir da computabilidade de todas as informações do universo. Nesse percurso, não haveria uma anterioridade lógica ou ontológica entre essas matrizes. O desafio seria justamente construir uma nova compreensão do universo, da vida e do pensamento por meio da articulação de todas elas. E, diferente do que se espera, não haveria nenhuma transgressão significativa nesse empreendimento intelectual, no sentido de ruptura de um paradigma, à maneira de Thomas Kuhn. Essas quatro matrizes se encontram consolidadas no horizonte epistêmico da ciência praticada ao longo do século XX e neste começo do século XXI. Para Deutsch, estes autores e suas teses têm sido muitas vezes rejeitados sem terem sido de fato refutados em suas bases. Esse fenômeno gera um problema concernente aos avanços da ciência e do conhecimento. Somos induzidos a crer que nos desvencilhamos das questões postas por eles e pela articulação dos quatro elementos, mas muitas vezes ainda não conseguimos criar teorias alternativas mais consistentes. Essas lacunas se manifestam sobretudo na teoria do multiverso, que acabou se tornando uma das teorias mais polêmicas da cosmologia e da teoria quântica contemporâneas. Um estudo mais detido de algumas de suas condições fundamentais pode revelar que a polêmica não diz respeito à sua efetivi-

dade ou não. Diz respeito a algumas ideias cristalizadas que precisam ser revistas. Esta revisão é um dos objetivos da teoria de tudo, bem como a formulação de uma teoria emergentista.

Esta teoria de tudo de Deutsch se diferencia das demais teorias de tudo por alguns motivos. As teorias de tudo geralmente se baseiam em duas premissas conceituais: o reducionismo e o holismo. As teorias de tudo reducionistas são propostas contemporâneas cujo objetivo seria unificar os quatro grandes domínios da física: a força nuclear forte, a força nuclear fraca, a gravitação e o eletromagnetismo. Em outras palavras, pretendem unir o micro e o macro, a Teoria da Relatividade Geral (TRG) e a teoria quântica, por meio do estabelecimento da chamada gravidade quântica ou de outras soluções ou modelos cosmológicos (Smolin, 2002). Essa teoria de tudo reducionista é mais difundida no senso comum e se situa nas esferas estritas da física. Por mais que lidem com sistemas de alta complexidade, como os seres vivos e outros fenômenos naturais, partem da premissa de que esses sistemas sempre podem ser reduzidos às propriedades fundamentais da física. As teorias de tudo holistas seriam representadas por pensadores que buscam construir grandes sistemas integrados, mas minimizando o papel das mediações e das descontinuidades. O gerativismo é uma teoria de tudo que nega o holismo e que extrapola os limites estritos do reducionismo. Nesse sentido, procura alternativas para os limites tanto do holismo e do reducionismo quanto de algumas abordagens da epistemologia moderna, tais como o empirismo, o indutivismo, o instrumentalismo e o positivismo. Diante disso, analisemos em primeiro lugar os impasses do reducionismo e do holismo.

## **Reduccionismo e Holismo**

A teoria de tudo gerativista e a teoria de tudo de Deutsch não renunciam aos protocolos do reducionismo, base de toda ciência moderna e da racionalidade da ciência. Entretanto, testam alguns de seus limites. À medida que o reducionismo é o método por excelência de todas as ciências modernas, humanas e naturais, as alternativas a ele são as mais trabalhosas. Evitar produzir uma redução nos torna reféns do reducionismo produzido pela não redução. Se nos recuamos a reduzir o universo a critérios que demarquem o que é o orgânico e o inorgânico, não conseguimos definir nem o inorgânico nem o orgânico, pois não existiram demarcações heterogêneas em relação à vida e à não vida (Monod, 1971). Mantemo-nos presos às contradições de se conceber uma totalidade ho-

lista, como veremos adiante (Morton, 2023). Sem recusar as contribuições do reducionismo, Deutsch mantém em suspenso os seus resultados e declarações. A alternativa ao reducionismo não pode nos conduzir ao obscurantismo anticientífico. A Navalha de Ockham não deve ser oposta à complexidade. A ciência do simples não deve se opor à ciência do complexo, como a definem Isabelle Stengers (1991), Ilya Prigogine (1991) e Edgar Morin (2015), dentre tantos outros. Não podemos partir do complexo para analisar o simples. Quando tomamos fenômenos complexos como pontos de partida sem antes termos compreendido fenômenos simples, corremos o risco de não conseguir explicar nem um nem outro, restando tanto a simplicidade quanto a complexidade sem explicação. No entanto, por mais que tenha se constituído como o motor de toda ciência moderna desde Galileu e Newton, o reducionismo *stricto sensu* não consegue mais oferecer respostas satisfatórias para problemas com os quais a ciência contemporânea tem lidado em seu dia a dia, em graus cada vez mais profundos.

Por isso, tanto a ciência clássica (Aristóteles a Galileu) quanto a ciência moderna (Galileu a Einstein) conseguiram se estruturar a partir da espinha dorsal da simplicidade. E a simplicidade pode ser definida a partir dos seguintes conceitos e valores: o determinismo, a reversibilidade, a linearidade, os sistemas em equilíbrio, os sistemas estacionários, a certeza e a determinação. A ciência que se constitui a partir de Einstein até os dias de hoje é marcada pela complexidade (Prigogine; Stengers, 1991). E a complexidade pode ser definida a partir dos seguintes conceitos e valores: indeterminação, a irreversibilidade, a não linearidade, os sistemas fora de equilíbrio, a entropia, a incerteza e a indeterminação (*ibid.*). Contudo, nessa acepção, a complexidade não representa uma supressão, uma oposição ou sequer uma superação aos métodos da simplicidade (Morin, 2015). Representa uma *suprassunção* (*Aufhebung*), no sentido de Hegel: superar-preservando (Meneses, 1985). A solução seria uma superação interna de seus limites.

Quais as limitações do reducionismo? Uma delas diz respeito à causalidade. Ao reduzir um fenômeno a seus aspectos mais simples, não o fazemos apenas em termos espaciais e sincrônicos. Fazemo-lo de um ponto de vista temporal e diacrônico. A redução de um evento X do presente precisa se apoiar em infinitas reduções de n-eventos passados para produzir uma explicação causal baseada em eventos anteriores e posteriores. Ora, desde David Hume sabemos dos limites desse movimento (Hume, 2004). Para determinar globalmente quaisquer eventos presen-



tes a partir de eventos passados, precisaríamos determinar as condições iniciais de todos os eventos passados, desde a origem do universo até agora. Esse é o problema nuclear do indutivismo, cuja crítica é um dos eixos da argumentação de Deutsch e que pretendo abordar mais adiante. A eliminação do estatuto condicional do presente, a ponto de depurarmos sua condição contingente, elevando-o à condição de lei, depende necessariamente da eliminação do estatuto condicional de todos os n-eventos que constituem uma linha causal desde a origem do universo até o ponto X presente. Esse imperativo da determinação das condições iniciais de um sistema fora criticado por Kant. Não precisaríamos deter todas as variáveis implicadas em um fenômeno para compreendê-lo. Essa teria sido uma compreensão equivocada da contingência. Colocar o problema nesses termos é supor que, se não compreendermos tudo, não somos capazes de compreender nada.

Entretanto, esse problema reaparece sob roupagens diferentes, nas mais distintas situações da ciência. E muitas vezes o problema não consiste em determinar as condições iniciais de um sistema, mas, sim, no oposto: em determiná-la e passar a definir leis e propriedades fundamentais da natureza sem percebermos que essas condições iniciais determinadas podem ser propriedades emergentes de outras condições não iniciais e não fundamentais. Por exemplo, a hipótese mesma do big bang, cada vez mais refutada dentre os cosmologistas contemporâneos (Novello, 2006; 2010; 2023). Parte significativa da física atual, tanto dedicada ao micro quanto ao macrocosmo, partilha dessa crença de que quanto mais recuado for o fenômeno determinado, melhor e mais fundamental seria o modelo explicativo derivado dele. Deduzir leis a partir de estados iniciais, por mais primitivos e antigos que sejam, implica um problema de causalção. Se a granularidade espacial e a descontinuidade temporal, pressupostas pela teoria quântica, forem aplicadas ao estudo das condições iniciais do universo, seriam iminentes a essa origem ou seriam propriedades das condições emergentes dos observadores atuais do universo? E se imaginarmos que essa condição atual que propiciou as condições de possibilidade de conhecimento desse estado inicial chamado *big bang* foi aferida a partir da evolução da vida e não necessariamente do estado atual e inercial do universo, entendido nos termos da mecânica clássica? Isso significa que o *big bang*, um dos pilares da cosmologia contemporânea, não pode ser sustentado apenas por meio das propriedades fundamentais da física. Enquanto conceito, teria emergido das propriedades da vida presentes nas explicações do universo não vivo. E, mais do que isso, a aferição desse ponto de infinita densidade cujo

colapso produziu o universo também demonstra o problema da passagem da heterogeneidade à unidade, promovida pelo reducionismo. As condições de estabilidade que definimos como a condição inicial de um dado sistema poderiam ser apenas uma homogeneização e uma estabilização de um processo de heterogênese e de metaestabilidade (Simondon, 2020)? A metaestabilidade poderia constituir o estado mais fundamental da natureza e, por alguma razão, não a contemplamos em nossa descrição (Simondon, 2020)? Quando a transpomos para a descrição do universo, a suplementação de dados para a determinação da posição e da velocidade da trajetória de um corpo não pode ser entendida como uma mera operação neutra e sem maiores consequências. Não podemos nos apoiar nos recursos arditos de demônios, sejam eles de Maxwell ou de Laplace. A crença em demônios é aqui tão ineficaz quanto a crença em Deus. A saída para esses impasses do reducionismo, bem como da necessidade de escolha entre Deus e os demônios, tampouco se encontra na totalidade holista.

A teoria de tudo de Deutsch e a teoria de tudo gerativista não são teorias holistas. As teorias de tudo holistas se baseiam em dois pressupostos. O primeiro é uma possibilidade de unificação global de todos os fenômenos. O segundo é a explicação dos fenômenos simples a partir dos fenômenos complexos, instaurando-se, assim, a complexidade como ponto de partida para toda nossa compreensão da natureza. Em primeiro lugar, complexidade e totalidade são conceitos distintos (Morin, 2015). Como nos lembra Adorno, a verdade é o não todo. Como os cantos da unidade do holismo são tão sedutores quanto as sereias de Ulisses, é preciso renunciar à ideia mesma de totalização, como Kant o fez para fundar a razão moderna. Para tanto, algumas demarcações são imperativas. As demandas de racionalidade da filosofia implicam unidade e não necessariamente totalidade. As relações entre unidade (henologia) e diferença (diaforologia) não podem se sobrepor às relações entre o todo (holologia) e as partes (mereologia).

Descrever processos quânticos discretos de diferenciação do espaço e do tempo em unidades provisórias não significa pressupor que esses processos possam ser remetidos a uma totalidade final, seja ela transcendental ou imanente ao universo. Como o todo é atravessado pelo infinito, e como nunca tivemos e nunca teremos acesso a nenhum modelo final do universo, deduzir a racionalidade dos fenômenos a partir de uma eventual totalidade pode gerar explicações equivocadas sobre a percepção das partes e sobre as diferenciações por meio das quais uma unidade é constituída, em um movimento que nos induz a uma ilusão de percepção de

um todo. Ademais, devido à sua natureza e entendida em seus aspectos cibernéticos, sistêmicos, comunicacionais, informacionais e físicos, a replicabilidade gerativista, apoiada na complexidade computacional, opera a partir de regimes de discrição e descontinuidade. Por esses e outros motivos, a complexidade precisa se distinguir drasticamente da busca de um todo holista. O empirismo e o sensorialismo não nos podem auxiliar nessa distinção.

### **Empirismo e Indutivismo**

Embora tenha dado uma contribuição imensa para o avanço da ciência, o sucesso do empirismo paradoxalmente ocultou suas limitações. Mesmo valorizando o método observacional e experimental como uma alternativa aos saberes dedutivos da filosofia e da filomítia, o empirismo e o indutivismo se fundam em uma base movediça: o sensorialismo. O recurso ao sensorialismo foi demolido por Hume em sua crítica global dos princípios da inferência indutiva (Hume, 2004). No entanto, de modo paradoxal, a crítica de Hume acabou tendo efeito mais sobre a capacidade de universalização dos dados contingentes da experiência do que sobre os procedimentos experimentais inerentes à dinâmica da ciência. Desse modo, curiosamente, o empirismo não apenas sobreviveu a Hume, mas tornou-o um de seus principais aliados. Uma das explicações para esse paradoxo reside no solipsismo presente na teoria humeana do conhecimento. Ao propor a inseparabilidade entre ideias e sensações, Hume acaba por definir que as ideias não podem ser depuradas da empiria a ponto de se tornarem universais. Contudo, se todas as ideias são sensações e não é possível produzir estruturas abstratas a partir de ideias-sensações, por que deveríamos chamar as sensações de ideias e não apenas de sensações? Para instaurar algo chamado pensamento é preciso algum grau de heterogeneidade entre pensamento e sensação. Se essa heterogeneidade não existe, como podemos demarcar as sensações como sensações sem comprometer as bases do pensamento? Retornamos aos dilemas espinhosos do reducionismo. Entretanto, devido a suas potencialidades preditivas, esse sensorialismo impassível de ser universalizado acaba sendo incorporado, otimizado e normatizado pela ciência. Como a partir do século XVII uma das bases da ciência moderna passa a ser a capacidade de realizar previsões, racionalidade e previsibilidade acabaram se entrelaçando. E o sensorialismo empirista acabou assumindo o coração da ciência experimental.

O empirismo parte da suposição de que podemos tomar a percepção e os sentidos como bases da abstração. E que por meio de processos inferenciais, podemos estabilizar uma sucessão de ocorrências sensoriais, utilizando-a como modelo para prever outras sucessões de ocorrências sensoriais, em outros contextos, de outras magnitudes e de outra natureza. Essa ideia implica uma ideia correlata de que as ideias mais abstratas surgiriam de processos abstrativos de depuração dos sentidos, mais simples. Surge aqui uma hipótese: ainda que as sensações e os agregados empíricos não sejam universalizáveis, eles podem ser generalizados e extrapolados. Ou seja: podem estar a serviço de uma operação racional vinculada à compreensão da estrutura e do funcionamento da natureza. Nesse sentido, o empirismo supõe que, por meio de observações, generalizações e extrapolações de dados descritos a partir de situações contingentes, pode-se universalizar padrões de comportamento da natureza, chegando às condições de leis. Essa suposição é um problema. E não o é por causa de uma divisão entre realidade e forma, entre essência e aparência, entre mundo das ideias e mundo fenomênico, nos termos platônicos que se perpetuaram ao longo de dois milênios de filosofia. O empirismo é um problema porque, por estranho que isso possa parecer, ele supõe a possibilidade de passarmos de formas mais complexas a formas mais simples. Em outras palavras, supõe a possibilidade de redução dos emaranhados e das multiplicidades das apreensões e dos sentires (Whitehead, 2010), a estruturas formais mais generalizadas e mais abstratas, que seriam as leis. Ora, as teorias emergentistas não admitem a redução do complexo ao simples. E tampouco admitem a redução do simples ao complexo, pois essa seria uma das variações do holismo, mencionado acima. Diante desse impasse entre o simples e o complexo, uma defesa dos sentidos que esteja à altura de uma teoria emergentista deve conceber a percepção e os sentidos não como uma multiplicidade avessa às estruturas abstratas ou como uma mera derivação de segundo grau de estruturas eidéticas. Deve, sim, conceber as estruturas abstratas como uma das condições emergentes das multiplicidades fenomênicas dos sentidos, prenes de outras possibilidades e de outras variações formais. Essas variações diferentes do empirismo dão origem ao empirismo radical e ao pragmatismo de William James (James, 1967; 2022), ao pragmaticismo de Charles Sanders Peirce (1972; 2000; Santaella, 2000; 2012) e à filosofia organicista-processual de Whitehead (1993; 1985; 2010). O outro aspecto fundamental do empirismo possui também suas armadilhas: o indutivismo. Como a crítica ao indutivismo é uma das características principais de Deutsch e de Popper, vamos compreendê-la.

O problema central da indução consiste na impossibilidade de fundar verdades objetivas a partir de seus dois recursos primaciais: a observação e a extrapolação. Como a observação não é suficiente para a construção de uma teoria, o indutivismo se ocupa do preenchimento de lacunas observacionais ao longo do tempo. Os limites da observação são imensos. A seleção mesma dos fatos e dos recortes da realidade a serem observados traz em si os limites da natureza que estamos produzindo a partir de cada recorte. Por isso, Bachelard e Husserl tinham razão ao defender a pertinência da fenomenologia para a ciência. Enquanto não aprendermos a esgotar todas as possibilidades e virtualidades de um dado campo fenomênico e experimental, não podemos edificar nenhum conceito operacional de valor. A despeito de ser menosprezada, a descrição é um dos elementos centrais de toda ciência (Bateson, 2002). A descrição é o primeiro recorte da natureza e, nesse sentido, computacional e ciberneticamente é o primeiro *input* informacional que pode definir todas as etapas ulteriores do sistema. A primeira seleção dos dados que serão posteriormente analisados, organizados, cruzados, permutados e, finalmente, universalizados sob a forma de leis ou por meio de um computador universal. A partir desse primeiro recorte de informações, constrói-se todo o castelo, o conceito da razão.

Devido a esta instabilidade contingente das modelizações a partir de elementos circunstanciais, Popper desenvolve dois conceitos para fazerem frente à observação e à indução: a conjectura e a refutação. O sucesso ou o insucesso das teorias ao longo do tempo não dizem respeito à adequação de seus postulados a descrições observacionais. Tampouco dizem respeito a soluções preditivas mais ou menos eficazes. Dizem respeito às suas capacidades de elaborar novas conjecturas acerca do mundo e às suas possibilidades de refutar as teorias congêneres. As teorias se assemelhavam mais à capacidade de copiar e refutar teorias anteriores, tornando-as mais adaptativas a novos cenários mentais e materiais, do que às suas propriedades de mimetizar o mundo exterior e produzir generalizações. Estamos distantes, aqui, das visões representacionais da linguagem. E tampouco se defende uma ontologia. As teorias estariam mais próximas da replicabilidade e da autorreplicabilidade dos genes do que de enunciações e justificativas que edificam leis por meio de preenchimento de lacunas e de extrapolações de situações contingentes, apoiadas na empiria e na recorrência. Muitos sistemas pretenderam considerar algumas asserções como sendo pretensamente universais-substanciais, ao passo que outras seriam relegadas à condição de acidentes-inessenciais. Surge,

aqui, um problema nuclear de todo conhecimento: as noções de identidade e de diferença e de diferença e repetição (Deleuze, 1988).

A base do indutivismo é a observação. E, a partir da observação, procede-se a generalizações e a extrapolações. Nesse sentido, as deficiências do indutivismo são mais nebulosas de serem demarcadas. Ele de fato consegue promover essas generalizações e as extrapolações a partir das recorrências e dos padrões de fenômenos localizados. Se fizermos um exercício mental, poderemos compreender um pouco melhor quais seriam esses limites. A escolha da observação dos corpos celestes gerou a astronomia e a cosmologia, duas ciências protagonistas da civilização. A meteorologia e o clima nunca tiveram essa importância. Apenas agora, à medida que as ciências têm se baseado cada vez mais em regimes de probabilidade e em sistemas causais não lineares fora de equilíbrio, a meteorologia começa a se tornar uma ciência-modelo para as demais ciências (Sloterdijk, 2006). Em que medida a compreensão do que chamamos de universo seria diferente se tivéssemos criado modelos de universo baseado nas nuvens e no clima e não baseados nos astros e nas constelações? Isso significa que a extrapolação não se baseia em um todo observável, pois não existe um todo observável. À medida mesma que é observado, não é uma totalidade.

A observação é sempre seletiva e localizada, até mesmo para poder trabalhar a partir de critérios e variáveis mensuráveis e compatíveis entre si. Isso não significa que essa extrapolação não consiga produzir padrões consistentes. Significa que as extrapolações representam apenas o resultado de processos seletivos de  $n$ -situações observáveis e de  $n$ -consistências passíveis de serem construídas a partir da experiência. Por fim, o indutivismo postula uma relação entre causalidade, probabilidade, racionalidade e possibilidade. A soma de recorrências de fenômenos pode gerar probabilidades. Ainda que estas recorrências se repitam e comprovem a probabilidade, de maneira nenhuma podemos dizer que essas recorrências são estruturas causais necessárias. Para demonstrá-lo, basta que imaginemos outros conjuntos de possibilidades que por acaso se configurem. E que, nesse novo arranjo, um ou mais dos componentes desse horizonte experimental altere determinadas recorrências e, por conseguinte, altere as previsões. Devemos, nesse caso, reconhecer que as estruturas causais foram alteradas? Se novos arranjos de possibilidades e partes de um conjunto são capazes de alterar as estruturas causais que governam um conjunto, podemos dizer que as leis que inferimos indutivamente a partir das probabilidades que regem esse conjunto sejam realmente leis?

De modo bem resumido, essas limitações do indutivismo nos conduzem a outras duas matrizes do conhecimento. Embora sejam bastante usuais e consensuais em ciência, precisam ser revistas: o instrumentalismo e o positivismo.

### **Instrumentalismo e Positivismo**

O instrumentalismo ressalta apenas um aspecto das teorias: a capacidade de produzir previsões e gerar sistemas preditivos. Contudo, as previsões não são por si mesmas capazes de produzir modelizações amplas do universo. E, por isso, o instrumentalismo conta com a mesma contraparte complementar dos processos indutivos: a extrapolação. Parte-se de descrições de fatos locais e, a partir das recorrências e das repetições, extrapola-se os resultados por meio da construção de leis gerais. Os limites do instrumentalismo estão em sua insuficiência em fornecer teorias explicativas sobre a realidade que não sejam produzidas a partir desses movimentos de instrumentalização das predições e da extrapolação de seus resultados. O extremo do instrumentalismo seriam o logicismo formal e o positivismo, segundo os quais todo percurso de sentido precisa ser fruto dos efeitos previstos pela lógica imanente à linguagem e às proposições. Quando saímos do positivismo do século XIX e adentramos o *linguistic turn* promovido pelo Círculo de Viena, com Moritz Schlick e Rudolf Carnap, o debate se torna extremamente delicado. Os desdobramentos dessa alteração profunda da epistemologia passam por Wittgenstein, por Bertrand Russell e por toda tradição da ciência e da filosofia analíticas, por Willard Van Orman Quine e chegam às diversas tendências da filosofia da linguagem do século XXI.

Vamos, por enquanto, apenas determinar que o instrumentalismo é uma maneira de tratar a observação a partir de uma positividade dada na imanência da linguagem, entendida como meio de acesso lógico e seguro aos fatos, independente de considerarmos esses fenômenos reais ou meramente formais. Tendo isso em vista, o sucesso do positivismo e do instrumentalismo decorre de sua eficácia em descrever o sucesso ou o fracasso de teorias e conceitos, tendo em vista a previsão. A previsibilidade continua sendo o critério norteador do positivismo-instrumentalismo na verificabilidade e na validação dos enunciados que descrevem estados de coisa imanentes à linguagem. E, se levarmos em conta o acúmulo de resultados factuais positivos em relação a outros resultados que são descartados por não cumprirem os mesmos desempenhos de sucesso des-

critivo, isso explica o sucesso dessas teorias na ciência e na filosofia da ciência. Contudo, estamos aqui sempre dentro dos limites da descrição e da previsão, não das explicações. A finalidade da ciência deveria ser a explicação, não a previsão. Os fatos são previstos e descritos, mas não explicados, em uma inversão entre meios e fins. O que seria a explicação? Seria um modo pelo qual conseguimos reunir e entender a maior quantidade de fatos sem a necessidade de conhecer as especificidades de cada fato em si. Para tanto, é preciso trabalhar com limites mais expandidos do conceito de conhecimento.

## Conhecimento

Um dos quatro elementos-matrizes de Deutsch é a epistemologia ou, mais especificamente, uma teoria do conhecimento. Desse modo, dialoga de modo subterrâneo com diversos autores: Douglas Hofstadter, John Barrow, Charles Bennett, Gilles Brassard, Artur Ekert, Julian Brown, Paul Davies, Julian Brown, Daniel Dennett, Neill Graham, Ludovico Geymonat, Imre Lakatos, Alan Musgrave, Seth Lloyd, David Miller, Ernst Nagel, James Newman, Steven Weinberg, Benjamin Woolley, Lewis Wolpert, Geoffrey Leech, Sidney Greenbaum, Randolph Quirk, Anthony O’Hear, Chandra Wickramasinghe, dentre outros. A despeito dessa rede de referências, a escrita de Deutsch é didática e cristalina, mesmo quando envereda para questões de alta complexidade. Diferente do que se esperaria de um dos pais da complexidade quântica computacional, não há uma nota de rodapé sequer em seus livros. E a articulação dos conceitos é sempre submetida a uma compreensão em primeira pessoa, com grandes índices de autoria e de reflexividade pessoal acerca dos temas, conceitos, problemas, ciências, obras e autores tratados. Há até mesmo capítulos bem-humorados, com uma estruturada dialogada, à maneira de Platão. Essa postura generosa para com o leitor é especialmente eficaz. E se movimentada na contramão de muitos cientistas que primam por tornar ainda mais intrincados e complicados domínios de conhecimento que, por si mesmos, são complexos. E demonstra uma ética do conhecimento científico, à medida que uma crescente tecnocracia envolve os campos da teoria quântica e da computação, com autores cada vez menos interessados em compartilhar seu conhecimento com os não cientistas. Deutsch se situa, então, em uma posição curiosa. Ao mesmo tempo em que formula uma teoria da complexidade e da emergência de matriz antirreducionista, recorre diversas vezes à Navalha de Ockham como um modo de salvaguardar a efetividade dos conceitos formulados e a solidez do encadeamento lógico das



proposições e enunciados. Esse oxímoro gera um efeito muito instigante. Somos conduzidos a camadas cada vez mais complexas de explicação da realidade por meio de seccionamentos discursivos cada vez mais claros e simples.

Para compreender essas camadas, a visão de Thomas Kuhn (2003) sobre a estrutura das revoluções científicas não explica as mudanças da ciência de modo satisfatório. As definições de paradigma são de difícil mensuração. Muitos métodos são utilizados em uma mesma época. E os padrões da ciência normal, não são apenas padrões conservadores. Haja vista o papel das teorias mais disruptivas do século XX, hoje consensuais e integrantes do *mainstream* da atividade de pesquisa em todo mundo. O sucesso e o insucesso individuais tampouco podem ser atribuídos a valores estritamente individuais ou a um filtro seletivo da comunidade científica. Por fim, a noção de contexto pode ser fraca nesse sentido, como o propôs Popper (2016). O conceito de contexto pode ser uma tautologia. Estabelece os valores vigentes da ciência praticada em uma determinada época e explica o funcionamento dessa mesma ciência à luz desses valores. Como devemos, então, abordar o processo de conhecimento? Quais as melhores maneiras de o acessarmos em seu cerne? As melhores maneiras são concebendo a ciência como o epicentro de processos explicativos. E, seguindo Popper, adotarmos as conjecturas e a refutabilidade como princípios norteadores, mais do que recursos indutivos, dedutivos ou intuitivos. Para compreender a centralidade da explicação e das conjecturas-refutações, precisamos percorrer os limites do empirismo, do instrumentalismo, do positivismo e do indutivismo. E devemos analisar o falibilismo, surgido no século XVIII, e que representa o começo do da ascensão do infinito (*beginning of infinity*) no processo cognitivo humano (Deutsch, 2011). A passagem do mundo fechado ao universo infinito (Koyré, 1979). O começo do processo de infinitização do universo do qual hoje somos protagonistas (Deutsch, 2011).

E, por fim, há um motivo para falarmos em pensamento, em conhecimento e mesmo em teoria do conhecimento e não em epistemologia. A epistemologia tem como objeto estruturas de pensamento e de linguagem altamente formalizadas, como nos casos da filosofia, das ciências, da matemática. Objetiva elucidar as condições metaempíricas por meio das quais o conhecimento ocorre. Por isso, a explicação possui um estatuto diferencial dentro dos processos de conhecimento. Não podemos nos contentar com formulações, enunciados, declarações. Os fatos precisam ser explicados. Tampouco podemos esgotar o conhecimento com a cria-

ção de melhores maneiras de prever fenômenos a partir da observação. A teoria precisa investigar os princípios que estruturam a realidade. E a ciência não se esgota em explicar fenômenos experimentados diretamente, apenas de modo empírico. Deve levantar suposições e construir teorias que descrevam a estrutura metaempírica da realidade: holismo, reducionismo, empirismo, sensorialismo, indutivismo, instrumentalismo, positivismo. Como chegar a uma nova compreensão gerativa da realidade, situada para além desses dos domínios dessas abordagens? Por meio do conceito de emergência.

## **Emergência**

As teorias da emergência pressupõem que fenômenos de alto grau de complexidade não podem ser reduzidos aos fenômenos mais simples. Embora possamos lidar com graus cada vez mais profundos e cada vez mais abstratos de unidade, essa unificação nunca se completa em um todo. Esse é um dos motivos de convergência entre o emergentismo e a teoria dos multiversos. O universo seria apenas a unificação parcial das infinitas condições compossíveis e das infinitas superposições quânticas da natureza em apenas um estado e em uma possibilidade. Em outras palavras, a totalidade é uma delimitação das infinitas virtualidades e potencialidades emergentes que se realizaram em outros universos-espelhos inscritos no multiverso, coextensos e tão reais quanto o nosso universo observado e descrito. As teorias emergentistas procuram enfatizar as relações subjacentes aos diversos domínios fundamentais da natureza, demonstrando como é impossível compreendermos estes domínios locais em profundidade e em extensão sem investigar as articulações profundas que cada um deles estabelece com os demais domínios. Não se trata de criar uma ontologia geral que reúna as ontologias regionais. O primeiro motivo é porque, a partir da teoria quântica, as condições fundamentais da emergência podem pressupor o vazio, e não uma hiperestrutura ou um hiperser unificador de tudo, à maneira de Platão e de diversas linhas da metafísica substancialista. Diversas linhas da teoria quântica têm nos apresentado um modelo que pode ser definido como naturalismo sem substância (Rovelli, 2021) ou como uma malha sem natureza (Morton, 2023). O segundo motivo é que, embora exista uma compatibilização entre infinitos universos virtuais, do ponto de vista dos multiversos não existe uma ontologia geral capaz de unificar de modo homogêneo todos esses universos possíveis em um único universo. Isso seria apenas uma forma de reduzir as condições formais infinitas de atualização dos multiversos,

pressupondo-se que haveria um universo mais verdadeiro do que outros na propagação dos universos-espelhos que constitui o multiverso. Essa pressuposição possui um primeiro problema: a definição das condições iniciais e finais do multiverso e a definição dessas condições como sendo as condições fundamentais do universo. Esse problema das condições fundamentais gera outro problema derivado: a determinação das propriedades fundamentais da natureza.

Quando pensamos em propriedades fundamentais da natureza, por mais vasta que seja nossa abordagem, procedemos a modelagens e a seleções a partir de certas criteriologias e filtragens. Ou seja: estamos computando. Em termos computacionais, alimentamos um programa para obter determinadas informações. Ainda que nosso objeto seja o cosmos e suas leis fundamentais, operaremos por meio de reduções. E, devido a uma necessidade racional, não podemos supor que um domínio do conhecimento e da natureza possa esgotar todos os domínios da natureza e do conhecimento existentes. As teorias mais elementares e universais são propriedades emergentes de outras teorias. As leis da biologia emergem das leis da física. Mas as leis físicas que depreendemos do universo não vivo emergem das propriedades da vida. Não podemos compreender o universo apenas a partir da física, pois para compreendê-lo foi preciso ter havido a emergência da vida. Não podemos compreender a vida sem compreender o humano, pois para compreendê-la foi preciso ter havido o humano. Não podemos compreender o humano sem compreender o cérebro, pois o que chamamos de universo, de vida e de humano é parte da atividade desse catalisador universal (Deleuze; Guattari, 1997). Não podemos compreender a atividade cerebral sem compreender a mente, pois as atividades cerebral e mental são coevolutivas. Não podemos compreender a mente sem compreender a civilização, a linguagem e a simbolização humanas, pois o universo, a vida, o humano, o cérebro e a mente são propriedades emergentes da civilização, da linguagem e da simbolização. E assim sucessivamente.

Esse processo nunca se conclui e possui algumas variações e desenvolvimentos similares em teorias diferentes. A hermenêutica o traduz como paradoxo compreensivo (Stein, 2010). Algumas vertentes da teoria da complexidade o nomeiam como recursividade (Morin, 2015). E na teoria dos sistemas, podemos defini-lo como *autopoiese* (Luhmann, 2009; Maturana; Varela, 1987; Sloterdijk, 2003; 2004; 2006). Chamo esse processo emergentista de gerativismo. O gerativismo não seria uma recusa do reducionismo. Seria uma teoria que o leva às últimas consequências.

As últimas consequências do reducionismo não seriam a finitude, mas o infinito. O infinito e a concepção de uma natureza infinitesimal preveem o Vazio. Essa flutuação quântica sobre a qual o universo se fundamenta seria o fundamento primeiro e final da natureza: a ausência de fundamento. Por isso, as origens da filosofia gerativa devem ser buscadas no taoísmo e em *Nāgārjuna*. E, não por acaso, os paralelos entre o pensamento de *Nāgārjuna* e a teoria quântica são assombrosos (Rovelli, 2021). Se partimos do Vazio como axioma fundamental, quando chegamos aos limiares de redução de cada processo, acabamos por conceber a natureza como um processo de irreducibilidade infinita. O importante do gerativismo é que esta estrutura de bonecas russas, de propriedades emergentes dentro de propriedades emergentes, dispostas em espirais concêntricas, não chega a um núcleo. E, se esse núcleo existisse, ele seria vazio. Como a imagem das cebolas de algodão (Flusser, 2019; Petronio, 2019), quando chegamos a uma última imagem e supomos tocar a usina da realidade, percebemos que ainda estamos envolvidos em um tecido intranscendível de imagens, pois não existe observador externo ao universo (Novello, 2023). Contra a noção de totalidade, o gerativismo se baseia nessa irreducibilidade infinita. Essa intangibilidade do real não consiste em uma dimensão misteriosa ou mística, oculta e intocada, uma espécie de ponto alfa do cosmos. Decorre apenas da inacessibilidade (provavelmente da inexistência) de um coração comum a todas essas realidades emergentes. Essa concepção abre espaço para três conceitos nucleares do gerativismo: o multiverso, o infinito e a virtualidade.

Nessa nova cena do cosmos gerativo, fundado sobre o Vazio, os papéis desempenhados pelo entendimento e pela razão são centrais. Enquanto o entendimento aumenta os limites e a profundidade do campo conhecido do universo, a razão possibilita que as infinitas camadas explicitadas pelo processo explicativo não se reduzam umas às outras. Articulados, entendimento e razão, explicação e emergência preservam assim tanto as estruturas fundamentais da simplicidade, imanente aos seres e aos conceitos, quanto a complexa sobreposição de camadas do universo, autônomas em sua infinita irreducibilidade. O avanço do conhecimento nesse sentido não consiste em uma acumulação indefinida e amorfa de informação e de novos fatos. Por mais que estejamos tendo acesso a uma quantidade cada vez maior de fatos sobre o universo, isso não significa que o universo seja mais complexo do que o era para Aristóteles, para Newton ou para Einstein. A exponencialidade das informações e a expansão da ciência experimental produzem uma saturação de evidências.

Isso não significa um aprofundamento das explicações. Ao contrário, essa exponencialidade pode mesmo obstruir a construção de uma teoria explicativa que satisfaça todos os aspectos singulares dos fatos e forneça um mapa de orientação para o universo. Significa que precisamos de teorias explicativas cada vez mais abrangentes e profundas, capazes de articular essas informações cada vez mais especializadas e setorizadas, descritas pelos meios da empiria. O acúmulo de dados da experiência não assegura necessariamente uma expansão da ciência. Para o êxito da ciência, é preciso haver teorias explicativas cada vez mais profundas e abrangentes. Uma teoria gerativa, baseada na quadratura circular dos elementos-matrizes descritos acima e apoiada em uma perspectiva emergentista, pode contribuir para a solução desses impasses. E pode vir a ser um dos principais meios de explicação do pensamento, da vida e do universo.

## Referências

- BATESON, Gregory. *Mind and nature: A necessity unity*. (=Advances in Systems Theory, Complexity, and the Human Sciences.) New York, NY: Hampton Press, 2002.
- DELEUZE, Gilles. *Diferença e repetição*. Tradução de Luiz Orlandi e Roberto Machado. Rio de Janeiro: Graal, 1988.
- DELEUZE, Gilles; GUATTARI, Félix. *Mil platôs: capitalismo e esquizofrenia*, 5 vols. Tradução de Ana Lúcia de Oliveira *et al.*, São Paulo: 34 Letras, 1997.
- DEUTSCH, David. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of the Royal Society of London*, London, v. 400, n. 1818, p. 97–117, 1985.
- DEUTSCH, David. *The fabric of reality: The science of parallel universes — and its implications*. London: Penguin, 1997.
- DEUTSCH, David. The structure of the multiverse. *Proceedings of the Royal Society of London*, London, v. 458, n. 2028, p. 2911–2923, 2002.
- DEUTSCH, David. The architecture of the multiverse. In: FLACHBART, Georg; WEIBEL, Peter (orgs.). *Disappearing architecture: from real to virtual to quantum*. Basel: Birkhäuser, 2005, p. 24–31.
- DEUTSCH, David. *The beginning of infinity: explanations that transform the world*. London: Penguin, 2011.
- DEUTSCH, David. *Constructor theory*. Centre for Quantum Computation, The Clarendon Laboratory, University of Oxford and Future of Humanity Institute, University of Oxford, set. 2012 (rev. dez. 2012).

DEUTSCH, David; HAYDEN, Patrick. Information flow in entangled quantum systems. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 456, n. 1999, p. 1759–1774, 2000.

DEUTSCH, David; JOZSA, Richard. Rapid solution of problems by quantum computation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 439, n. 1907, p. 553–558, 1992.

FLUSSER, Vilém. *Elogio da superficialidade: o universo das imagens técnicas*. Org. Rodrigo Petronio e Rodrigo Novaes. São Paulo: Editora É, 2019.

HUME, David. *Investigações sobre o entendimento humano e sobre os princípios da moral*. Tradução de José Oscar de Almeida Marques. São Paulo: Unesp, 2004.

JAMES, William. *Pragmatismo e outros ensaios*. Tradução de Jorge Caetano da Silva. Rio de Janeiro: Lido, 1967.

JAMES, William. *Ensaio de empirismo radical*. Tradução de Johnny Miranda e Miriam Monteiro Kussumi. Rio de Janeiro: Machado, 2022.

KOYRÉ, Alexandre. *Do mundo fechado ao universo infinito*. Tradução de Donaldson Garschagen. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1979.

KUHN, Thomas S. *A estrutura das revoluções científicas*. Tradução de Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva, 2003.

LUHMANN, Niklas. *Introdução à teoria dos sistemas*. Tradução de Ana Cristina Arantes Nasser. Petrópolis: Vozes, 2009.

MATURANA, Humberto; VARELA, Francisco. *The tree of knowledge: the biological roots of human understanding*. Boston, MA: Shambhala, 1987.

MENESES, Paulo. *Para ler a Fenomenologia do Espírito*. São Paulo: Loyola, 1985.

MONOD, Jacques. *Acaso e necessidade: ensaio sobre a filosofia natural da biologia moderna*. Tradução de Bruno Palma e Pedro Paulo de Sena Madureira. Petrópolis: Vozes, 1971.

MORIN, Edgar. *Introdução ao pensamento complexo*. Tradução de Eliane Lisboa. 5. ed. Porto Alegre: Sulina, 2015.

MORTON, Timothy. *O pensamento ecológico*. Tradução de Renato Prerolentzou. São Paulo: Quina, 2023.

NOVELLO, Mário. *Do big bang ao universo eterno*. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.

- NOVELLO, Mário. *O que é cosmologia? A revolução do pensamento cosmológico*. Rio de Janeiro: Zahar, 2006.
- NOVELLO, Mário. *Os construtores do cosmos*. São Paulo: Global, 2023.
- PEIRCE, Charles Sanders. *Semiótica e filosofia: textos escolhidos*. Seleção e tradução de Octanny Silveira da Mota e Leonidas Hegenberg. São Paulo: Cultrix, 1972.
- PEIRCE, Charles Sanders. *Semiótica*. Tradução de José Teixeira Coelho Neto. São Paulo: Perspectiva, 2000.
- PETRONIO, Rodrigo. As cebolas de algodão: as imagens na ontologia e na cosmologia paraconsistentes de Vilém Flusser. In: FLUSSER, Vilém. *Elogio da superficialidade: o universo das imagens técnicas*. Org. Rodrigo Petronio e Rodrigo Novaes. São Paulo: Editora É, 2019, p. 251-265.
- PETRONIO, Rodrigo. *Abismos da leveza: por uma filosofia pluralista*. São Paulo: Editora É, 2022.
- PETRONIO, Rodrigo. *Mesons: ontologia*. Tese (Doutorado em Letras) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.
- PETRONIO, Rodrigo. *Oceanos: ensaios sobre pensamento luso-brasileiro*. São Paulo: Global, 2023 (no prelo).
- POPPER, Karl. *O mito do contexto: em defesa da ciência e da racionalidade*. Tradução de Paula Taipas. Lisboa: Edições 70, 2016.
- PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. *A nova aliança: metamorfose da ciência*. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado. Brasília: Universidade de Brasília, 1991.
- ROVELLI, Carlo. *O abismo vertiginoso: um mergulho nas ideias e nos efeitos da física quântica*. Tradução de Silvana Cobucci. Rio de Janeiro: Objetiva, 2021.
- SANTAELLA, Lucia. *Percepção: fenomenologia, ecologia e semiótica*. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- SANTAELLA, Lucia. *A teoria geral dos signos: como as linguagens significam as coisas*. São Paulo: Pioneira, 2000.
- SHOR, Peter W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, Santa Fe, NM, 1994, p. 124-134.
- SIMONDON, Gilbert. *A individuação à luz das noções de forma e de informação*. Tradução de Luís Eduardo Ponciano Aragon e Guilherme Ivo. São Paulo: Editora 34, 2020.
- SLOTERDIJK, Peter. *Esferas I: Burbujas — Microsferología*. Tradução de Isidoro Reguera. Barcelona: Siruela, 2003.

SLOTERDIJK, Peter. *Esféras II: Globos — Macrosferología*. Tradução de Isidoro Reguera. Barcelona: Siruela, 2004.

SLOTERDIJK, Peter. *Esféras III: Espumas — Esferología plural*. Tradução de Isidoro Reguera. Barcelona: Siruela, 2006.

SMOLIN, Lee. *Três caminhos para a gravidade quântica*. Tradução de Walter J. Maciel. Rio de Janeiro: Rocco, 2002.

STEIN, Ernildo. *Antropologia filosófica: questões epistemológicas*. Ijuí: Unijuí, 2010.

WHITEHEAD, Alfred North. *O conceito de natureza*. Tradução de Júlio B. Fischer. São Paulo: Martins Fontes, 1993.

WHITEHEAD, Alfred North. *Process and reality: an essay in cosmology*. Corrected edition. New York, NY: Free Press, 1985.

WHITEHEAD, Alfred North. *Processo e realidade: ensaio de cosmologia*. Tradução de Maria Teresa Teixeira. Lisboa: CFUL, 2010.



# Universo magnético<sup>1</sup>

Lincensed under  
[CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)Mario Novello<sup>2</sup>

**Resumo:** O Universo Magnético é uma combinação dos campos gravitacional e eletromagnético em interação gerando um universo cíclico sem singularidade. A gravitação é controlada pela teoria da Relatividade Geral e o campo magnético por uma teoria não linear e um procedimento de média que identifica a fonte magnética da curvatura do espaço-tempo como um fluido perfeito. O resultado é um universo espacialmente homogêneo e isotrópico eterno, cíclico, possuindo fases de expansão e colapso e, em alguns períodos, tendo sua expansão acelerada. Neste modelo, não é necessário invocar nenhuma forma desconhecida de energia. Somente os dois campos clássicos conhecidos unificados são suficientes para produzir um cenário cosmológico adaptável integralmente às observações.

**Palavras-chave:** cosmologia; eletromagnetismo; gravitação; autorregulação; não linearidade.

---

<sup>1</sup> Este texto está baseado no artigo Novello *et al.* (2008).

<sup>2</sup> Mario Novello é Professor Emérito do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Doutor em Física pela Universidade de Genebra (1972). Em 1979 descobriu o primeiro modelo cosmológico sem singularidade representando um universo eterno possuindo *bouncing*. Em 2004 recebeu o título de Doutor Honoris Causa da Universidade de Lyon por seus estudos sobre a origem do universo. É autor de inúmeros artigos científicos e dos livros *Máquina do tempo*, *Os sonhos atribulados de Maria Luísa*, *O que é Cosmologia?* e *Do big bang ao universo eterno*, publicados pela Editora Zahar. Publicou também os livros *O universo inacabado* (Editora N-1) e *Os cientistas da minha formação* (Livraria da Física). Este último recebeu um prêmio Jabuti. Em 2023 publicou pela Editora Global o livro *Os construtores do cosmos*. Fundou e dirige a revista eletrônica *Cosmos & Contexto* dedicada a pensar a cultura científica: [www.cosmosecontexto.org.br](http://www.cosmosecontexto.org.br). Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4686-9313>.

## **Magnetic universe**

**Abstract:** The Magnetic Universe is a combination of gravitational and electromagnetic fields in interaction generating a cyclic universe without singularity. Gravitation is controlled by the theory of General Relativity. The magnetic field is controlled by a nonlinear theory and an averaging procedure that identifies the magnetic source of spacetime curvature as a perfect fluid. The result is an eternal, cyclic, spatially homogeneous and isotropic universe, having phases of expansion and collapse and, in some periods, having its expansion accelerated. In this model it is not necessary to invoke any unknown form of energy. Only the two known classical fields are sufficient to produce a cosmological scenario fully adaptable to observations.

**Keywords:** cosmology; electromagnetism; gravitation; self-regulation; nonlinearity.

## Introdução

Recentemente, a demonstração de que todas as observações cósmicas poderiam ser entendidas a partir da hipótese de que o campo magnético seria o principal responsável pela dinâmica do Universo tem sido extensivamente examinada. Essa proposta começou, timidamente, quando no Congresso Solvay de 1958, o cientista Fred Hoyle sugeriu a possibilidade de existir enorme campo magnético primordial capaz de ser o principal responsável pela evolução do universo. Mais tarde, abandonou esta ideia para desenvolver sua teoria da criação contínua de matéria. Em 1965, o cientista russo Yakov Zeldovich explorou a proposta do campo magnético e apresentou argumentos de que ele poderia efetivamente gerar um universo com as características observadas (Zeldovich; Novikov, 1965).

Ao considerar o campo eletromagnético como principal fonte da energia capaz de controlar a evolução da geometria do universo, a primeira questão que aparece é: como compatibilizar este campo com uma geometria espacialmente isotrópica, como requer o cenário padrão baseado na solução de Friedmann? A dificuldade em considerar o campo eletromagnético como fonte da geometria do universo está relacionada à propriedade de que este campo tem caráter vetorial. Isso implica que a existência de um campo eletromagnético deveria fazer aparecerem direções privilegiadas, ou seja, geraria anisotropias não observadas.

Para contornar essa dificuldade, o físico Richard Tolman propôs um critério segundo o qual é possível que o campo eletromagnético possa dar origem a uma geometria do tipo proposto por Friedmann, ou seja, homogênea e isotrópica (Tolman; Ehrenfest, 1930). Para isso, um certo procedimento de média espacial deveria entrar em ação. Desde então, esse método de média tem sido usado e se tornou padrão, permitindo descrever uma geometria correspondente ao universo espacialmente homogêneo e isotrópico. É dessa forma que o cenário padrão da Cosmologia considera a geometria do início da fase atual de expansão como controlada pelos fótons lineares que obedecem à teoria do eletromagnetismo de Maxwell. Essa média reduz o vetor tridimensional elétrico e o magnético a duas únicas funções: E e B. Estas caracterizam completamente a configuração média. Chama-se universo magnético a estrutura composta das equações

da Relatividade Geral (RG), tendo como fonte a configuração do campo eletromagnético cuja média se restringe a  $B$ , ou seja, em que  $E$  se anula.

### Universo magnético

A proposta de Zeldovich foi retomada no século XXI. E cenários cosmológicos onde somente a parte magnética do campo eletromagnético sobrevive têm sido intensamente estudados. A contribuição do campo magnético à energia cósmica possui uma propriedade notável, associada ao processo de média. Diz respeito ao fato de que a evolução temporal do campo magnético médio independe da forma de sua dinâmica e é consequência somente da lei de conservação de energia. Ou seja, qualquer que seja a teoria eletromagnética (seja a forma linear de Maxwell, seja a expressão não linear de Born-Infeld ou seja uma sequência de expressões a determinar sua evolução), a dependência temporal do campo magnético médio é a mesma. A origem dessa propriedade se deve ao procedimento de média que reduz a importância da dinâmica do campo eletromagnético na formação da curvatura do espaço-tempo. Ou seja, a dependência do campo magnético com o tempo é controlada somente pela lei de conservação de energia.

Desde o primeiro modelo cosmológico, proposto por Einstein, um sistema de coordenadas gaussiano tem sido utilizado. Neste sistema, escolhe-se um tempo global e uma superfície tridimensional que chamamos espaço. Essa superfície é entendida como homogênea e isotrópica. Nessa geometria espacialmente homogênea e isotrópica, a única função que a determina completamente é a variação temporal de seu volume. Com efeito, a distância entre dois eventos no espaço-tempo é dada pela forma

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 d\sigma^2$$

A lei de conservação de energia implica que nesse cenário geométrico o campo magnético varia com o inverso do fator de escala  $a(t)$  elevado à potência 2, isto é,  $B = B(0) \cdot 1/a^2$ , onde  $B(0)$  é uma constante.

Em consequência, em uma teoria não linear, a evolução da geometria descreve um universo possuindo fases de colapso e de expansão gravitacional. Cada vez que a densidade de energia atinge seu valor mínimo o universo passa de uma fase a outra, ou seja, transforma, por exemplo, a contração em uma expansão quando seu volume atinge o valor mínimo. Em outro momento, quando ele está em grande expansão, ocorre o inverso: quando a densidade novamente alcança seu menor valor, o universo passa da fase de expansão ao colapso. Essas fases se sucedem continuamente produzindo uma estrutura cíclica.

É possível entender esse cenário de um universo cíclico como o resultado de uma simetria cósmica entre a fase de energia magnética fraca e a fase de energia magnética forte. Dito tecnicamente, a densidade de energia magnética é invariante se o fator de expansão  $a(t)$  é trocado pelo fator inverso  $1/a(t)$ . Isso permite, de um só golpe e somente com uma só fonte — a energia magnética — resolver tanto o problema da “singularidade inicial” bem como da aceleração atrasada do universo. Na Física, encontramos outras formas de dualidade. Por exemplo, a dualidade campo e partícula no mundo quântico.

### Universo magnético autorregulador (cenário cíclico)

Trabalhos recentes mostraram o importante papel que a eletrodinâmica não linear (NLED) pode ter em duas questões cruciais da Cosmologia, relativas a momentos particulares de sua evolução para regimes de curvatura ou muito grandes ou muito pequenos, ou seja, para fase muito condensada e no atual período de aceleração.

Recentemente (2009), o grupo de Cosmologia do CBPF apresentou um modelo de um cenário cosmológico completo em que o principal fator responsável pela geometria é um campo magnético não linear que produz uma geometria espacialmente homogênea e isotrópica. Neste cenário, distinguimos quatro fases distintas: um período de ricochete, uma era de radiação, uma era de aceleração e um novo período de ricochete.

Já foi demonstrado que na NLED um campo magnético forte pode superar a inevitabilidade de uma região singular típica da teoria linear de Maxwell; na outra situação extrema, que é para campo magnético muito fraco, pode acelerar a expansão. O modelo atual vai um passo além: após a fase de aceleração, o universo se recupera e entra em uma era de colapso. Este comportamento é uma manifestação da invariância sob o mapa dual do fator de escala  $a(t) \rightarrow 1/a(t)$ , uma consequência da simetria inversa correspondente do campo eletromagnético ( $F \rightarrow 1/F$ , onde  $F \equiv F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ ) da particular teoria NLED. Essa sequência colapso-*bouncing*-expansão-aceleração-*rebouncing*-colapso constitui um elemento unitário básico para a estrutura do universo que pode ser repetido indefinidamente, produzindo o que chamamos de universo magnético cíclico.

Esse modelo de universo controlado pelo campo magnético tem sido largamente investigado com sucesso. Cenários de universos sem singularidade, possuindo *bouncing* e capazes de serem acelerados em fase ulterior, têm atraído a atenção dos cosmólogos. A principal vantagem

desses cenários é que eles não requerem a introdução de matéria nova esdrúxula. Essa forma hipotética de matéria, jamais vista, foi postulada — tendo recebido o atraente nome de energia escura — para explicar uma fase acelerada do universo associada a um modo inusual, aparentemente repulsivo, de gravitação. A energia de origem magnética não é uma nova forma de matéria, mas possui propriedades novas como consequência da não linearidade do campo magnético no cosmos.

Embora a descrição linear do modelo tradicional de Maxwell seja suficientemente boa para descrever grande parte de processos convencionais em laboratórios terrestres e em situações de campo não muito fortes, sua extrapolação para o universo não condiz com a geometria cósmica e as propriedades que ela possui. O esquema linear de Maxwell produz dificuldades formais associadas a uma origem singular do universo, bem como não é compatível com uma fase ulterior acelerada. Processos magnéticos não lineares resolvem estas dificuldades.

Para entendermos as questões atuais da Cosmologia e algumas soluções propostas, é preciso considerarmos os conhecimentos acumulados nestas últimas décadas. Assim, iremos rever brevemente alguns avanços científicos que produziram uma descrição coerente do universo compatível com as recentes observações.

### **O cenário padrão (Friedmann)**

A cosmologia conseguiu avanços notáveis nas últimas décadas. Sabemos, por exemplo, que o universo é um processo dinâmico controlado em seu aspecto global pela interação gravitacional descrita pela teoria da Relatividade Geral. Sabemos também que o volume tridimensional a que chamamos simplesmente de “espaço” varia com o tempo cósmico. Embora isto seja uma escolha de representação, ela tem a vantagem de apresentar uma configuração global do universo dentro dos padrões convencionais que usamos para descrever processos observados em laboratórios terrestres onde a teoria que estabelece a geometria local do espaço-tempo é dada pela relatividade restrita.

A variação do volume com o tempo cósmico proposto pelo cientista russo Alexander Friedmann, há quase um século, provocou a questão crucial de saber se o universo teve um momento único de criação separado de nós por um tempo finito, como em sua proposta original, ou se ele tem um tempo de existência associado a um passado extremamente longínquo, infinito. Com a evolução dos estudos em Cosmologia, várias outras

questões passaram a exibir a dificuldade em considerar esse primeiro cenário de Friedmann como válido ao longo de toda a história do universo. Desde então, diversas propostas têm sido examinadas. Não iremos fazer um inventário dessas propostas para resolver aquelas dificuldades. Limitar-me-ei a descrever somente uma delas, que dá título a este texto (o leitor interessado em mais detalhes pode consultar meu livro *Os construtores do cosmos*, de junho de 2023).

No cenário proposto por Friedmann em 1922, e que se tornou a base do modelo padrão da Cosmologia, toda a geometria depende somente de uma única função do tempo  $a(t)$ , que é uma medida do volume total do espaço tridimensional. Nesse modelo, essa função possui um valor mínimo igual a zero, que foi interpretada como o momento inicial de existência e expansão do universo. A fonte dessa geometria é um fluido perfeito que, nos momentos primordiais, se identificaria com uma radiação, um gás de fótons, no qual a relação entre a pressão e a densidade de energia  $\rho$  se escreve  $p = 1/3 \rho$ . Esta densidade de energia diverge naquele ponto inicial. Não somente a energia tem valor infinito, mas igualmente a curvatura do espaço-tempo diverge. Isso se deve à conservação da energia, pois o campo eletromagnético interpretado como um fluido perfeito implica que a densidade de energia  $\rho$  é proporcional a  $(1/a)^4$ . Ou seja, se a função  $a(t)$  pode assumir o valor zero, então segue que a densidade  $\rho$  vai ao valor infinito. Nesse cenário tradicional vários problemas aparecem, tais como:

- (1) Existência de uma singularidade inicial e o infinito da densidade de energia, provavelmente indicando que ou a fonte dessa geometria deve ser alterada ou a própria dinâmica usada para descrever o campo gravitacional na Relatividade Geral deveria ser alterada;
- (2) Existência de um horizonte cósmico, impossibilitando que se possa entender como o universo em um tempo finito pode atingir um estágio tão homogêneo e isotrópico;
- (3) Incompatível com um estágio ulterior de aceleração da expansão.

Para resolver alguns desses problemas, várias alternativas foram examinadas. Não iremos descrever essas diversas propostas, mas, sim, nos concentraremos em uma só: o Universo Magnético.

## Campos de longo alcance

Existem somente dois campos de longo alcance no universo. Até o começo do século XX, a dinâmica desses campos era descrita por teorias lineares. Na gravitação, a famosa lei de Newton. No eletromagnetismo, as equações lineares de Maxwell. O uso dessas teorias ao longo do tempo produziu a compreensão de um grande número de problemas, desde o movimento dos planetas em torno do Sol até o comportamento de elétrons no interior dos átomos.

No século XX, a dinâmica da força gravitacional foi alterada profundamente por Einstein, em sua teoria da Relatividade Geral. Fenômenos não lineares no eletromagnetismo também apareceram. As razões que levaram os físicos a procurarem teorias mais sofisticadas, de caráter não linear, para essas duas interações, têm origens bem diferentes. No caso da gravitação, seria a compatibilidade com a teoria da Relatividade Especial, pois, na teoria de Newton, a interação gravitacional não se propaga sob forma de uma onda, mas é “instantânea”. No eletromagnetismo, à parte o desenvolvimento da teoria quântica, o principal fator a conduzir os físicos a uma versão não linear foi a presença de singularidades no eletromagnetismo de Maxwell. Uma proposta bem-sucedida foi apresentada por Max Born e Leopold Infeld na década de 1930.

## O campo eletromagnético como energia da evolução cósmica: universo magnético autorregulador

A principal motivação do cenário aqui apresentado está ligada à necessidade de se construir uma teoria na qual uma combinação dos campos de longo alcance gera um universo de comportamento regular.

Partimos da ideia genérica que guiou Max Born na tentativa de construir uma nova Eletrodinâmica não-linear para apresentar um comportamento regular do campo elétrico de um corpo carregado. A aplicação da teoria não linear de Born-Infeld, no contexto cosmológico e no âmbito da Relatividade Geral, mostra um comportamento singular que não é aceitável à luz de sua proposta original. Somos assim conduzidos a uma forma alternativa para a dinâmica que retém todas as boas propriedades do eletromagnético puro da teoria de Born-Infeld, sem implicar sua principal dificuldade quando se trata de Cosmologia. O modelo aqui apresentado exhibe propriedades regulares, sem as dificuldades dos modelos tradicionais. Em particular, tem uma propriedade básica que uma teoria clássica deve perseguir, ou seja, um comportamento regular dos campos combinados da eletrodinâmica e da gravitação em uma estrutura cosmológica.



No artigo do grupo de Cosmologia do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) (Novello; Araújo; Salim, 2009), mostrou-se que no Universo Magnético representando uma geometria do tipo Friedmann-Lemaître, espacialmente homogênea e isotrópica, não há espaço para um comportamento singular — ao contrário da descrição de Einstein-Maxwell e Einstein-Born-Infeld. Este modelo pode ser entendido como uma configuração vácuo-a-vácuo. Para tornar tal modelo mais realista, deve-se introduzir matéria comum que contribui para a densidade total de energia com um termo que, por exemplo, depende do fator de escala como  $(l/a)^3$ . Este termo deve ser adicionado ao cenário acima apresentado. Não é difícil ver que uma fase controlada por tal poeira se interpola entre a fase controlada por  $(l/a)^4$  e a aceleração do vácuo cósmico.

Nesse cenário, a evolução da geometria do universo é dominada integralmente, em toda sua história, pela interação entre os campos magnético e gravitacional. Uma combinação dos dois únicos campos de longo alcance produz a evolução da estrutura métrica do espaço-tempo cujas dinâmicas são controladas pela teoria da Relatividade Geral e por uma teoria não linear para o campo eletromagnético gerada pela invariância dual. Isso implica a existência de um ciclo básico de evolução que se repete a partir da simetria campo forte-campo fraco. Os detalhes dessa estrutura do universo estão contidos no artigo de 2009 e uma síntese é descrita pelas seguintes etapas:

- I. O universo possui uma fase colapsante até atingir um valor mínimo para o seu volume. Neste ponto, a densidade de energia vale zero e o fator de expansão, ou seja, o volume espacial total, tem um mínimo;
- II. Passada aquela fase, o universo inicia uma fase de expansão;
- III. Em momento posterior, uma fase de aceleração acontece;
- IV. Essa fase se encerra quando a densidade de energia volta a ter o valor zero e o universo transforma sua expansão em colapso.

## Referências

- DE LORENCI, Vitorio A.; KLIPPERT, Renato; NOVELLO, Mario; SALIM, José M. Nonlinear electrodynamics and FRW cosmology. *Physical Review D*, College Park, MD, v. 65, n. 6, 2002.
- NOVELLO, Mario; ARAÚJO, Aline N.; SALIM, José M. Cyclic magnetic universe. *International Journal of Modern Physics A*, Singapore, v. 24, n. 30, p. 5639–5658, 2009.
- NOVELLO, Mario; BERGLIAFFA, Santiago Esteban Perez. Bouncing cosmologies. *Physics Report*, Amsterdam, v. 463, n. 4, p. 127–213, 2008.

NOVELLO, Mario; GOULART, Érico; SALIM, José M.; BERGLIAFFA, Santiago Esteban Perez. Cosmological effects of nonlinear electrodynamics. *Classical and Quantum Gravity*, Bristol, v. 24, n. 11, 2004.

TOLMAN, Richard C.; EHRENFEST, Paul. Temperature equilibrium in a static gravitational field. *Physical Review D*, College Park, MD, v. 36, n. 12, 1930.

ZELDOVICH, Yakov B.; NOVIKOV, I. D. 1965. Gipoteza zaderzhavshihsia v raschirenii yader. [A hipótese dos núcleos atrasados em expansão.] *Astronomicheskii Zhurnal*, Moscou, v. 42, 1965.

# As possibilidades de ontologia presentes na teoria da física quântica

Leandro Tibiriçá de Camargo Bastos<sup>1</sup>

**Resumo:** O presente artigo visa expor as principais teorias do campo da física quântica, assim como suas implicações ontológicas. Não se busca, aqui, uma interlocução com teorias metafísicas estabelecidas no campo da filosofia, nem mesmo uma exploração extensa da bibliografia estabelecida nas ciências. Foi usado um livro para a exposição geral das teorias, de seus desdobramentos e de suas consequências. No caso, trata-se do livro *Quantum ontology: A guide to the metaphysics of quantum mechanics*, de Peter J. Lewis. Foi privilegiada, portanto, uma abordagem em que a abrangência foi preferida em relação à profundidade. Um cotejamento cuidadoso com outras teorias metafísicas teria trazido uma visão mais específica dos possíveis problemas de fundo presentes tanto na ontologia (nas ontologias) derivadas da mecânica quântica quanto nas teorias cotejadas, mas a consequência seria retirar apresentações de outras possibilidades presentes dentro da própria teoria da mecânica quântica. Preferimos, portanto, apresentar um panorama amplo, de modo a contextualizar o leitor dentro de um campo de pesquisa, e deixar aprofundamentos específicos para outra oportunidade.

**Palavras-chave:** : mecânica quântica; física; filosofia; metafísica; ontologia.

---

<sup>1</sup> Leandro Tibiriçá de Camargo Bastos nasceu em São Paulo em 1975. Fez graduação, mestrado, doutorado e pós-doutorado na USP. Atua como professor universitário e tradutor. Traduziu a peça *A tragédia espanhola*, de Thomas Kyd, ainda inédita em português. Participou do grupo Tradução e relação, tendo sido responsável por um dos capítulos do livro *Tradução em relação: espaços de transformação*. Participa do Grupo de Estudo de Dramaturgia Contemporânea. Publica regularmente artigos acadêmicos em revistas nas áreas de literatura inglesa e tradução, tratando das intersecções entre tradução, teatro e filosofia. Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-1501-9512>.

## **The possibility of ontology in the theory of quantum physics**

**Abstract:** This article presents the main theories in the field of quantum physics as well as their ontologies. We are not looking for a dialogue with advanced metaphysical theories in the field of philosophy, not even for an extensive exploration of the established bibliography in the sciences. One book is used for the general exposition of the theories, their development, and consequences: *Quantum ontology: A guide to the metaphysics of quantum mechanics* by Peter J. Lewis. The paper adopts an approach in which breadth is preferred over depth. A careful comparison with other metaphysical theories would have brought a more specific view of the possible background problems both in the ontology (ontologies) derived from quantum mechanics and in the theories compared between themselves, but the consequence would have been the neglect of other possibilities of theory of quantum mechanics. Instead, the paper presents a broad overview in order to contextualize the readers in a research field and leave more specific topics for another occasion.

**Keywords:** quantum mechanics; physics; philosophy; metaphysics; ontology.

A palavra *ontologia* nos remete à filosofia, mais precisamente, à chamada filosofia primeira, já que é desse campo que se espera a base para os outros ramos de um sistema filosófico. Esse raciocínio, no entanto, não procede em relação ao livro *Quantum Ontology: A Guide to the Metaphysics of Quantum Mechanics*, de Peter J. Lewis (2016). Uma folheada nas referências no final do livro deixa isso claro. Nomes como Descartes, Hegel e Heidegger, entre outros possíveis gigantes da metafísica na filosofia ocidental, não são sequer citados. Por isso, acreditamos que a melhor tradução para o título não seria “ontologia quântica”, mas “ontologia da quântica”. Isso porque todo o livro é construído sobre descrições pormenorizadas (no nível leigo) dos sistemas da física quântica, e princípios metafísicos são daí extraídos.

Na introdução, o autor argumenta que sempre existiu ligação entre a física e a metafísica, na forma de especulação sobre as estruturas fundamentais da realidade (p. xiii). Mas é cuidadoso ao não deixar espaço para expectativas irrealistas sobre a física quântica, alertando que não existe a tentativa de colocar a física primeiro ou de praticar reducionismo filosófico, e demonstrando que sua importância reside no fato de ser uma área de especulação entre outras, porém, com o poder de quebrar expectativas (p. xvi). As seguintes teorias serão estudadas: a do colapso espontâneo, a das variáveis escondidas e a dos múltiplos mundos (p. xviii).

Vejam os conceitos básicos dos experimentos quânticos. O primeiro deles se chama “interferência”. O parâmetro é o estudo de ondas. Quando uma onda se propaga através de uma fenda em direção a um suporte na sua frente, aparece um reflexo. Se o mesmo for feito através de duas fendas, aparecem uma sequência de reflexos. A explicação é que, com duas ondas interagindo, as cristas resultantes serão refletidas, não os vales. O que parece intrigante é o fato de tal fenômeno ser inexplicável quando se lida com partículas. Segundo a física clássica, ao abrir uma fenda ou duas fendas, as partículas simplesmente passam por uma das duas e deixam uma marca no que estiver na frente. O fato específico da física quântica, aqui, é que se observam partículas (elétrons), mas seu comportamento é de ondas (p. 5). É o que o autor chama de “dualidade onda-partícula”.

O próximo fenômeno chama-se “entrelaçamento”. A primeira coisa a entender é o processo chamado *spin* (‘giro’). As partículas *quantizadas* (ou seja, com características discretas, não contínuas) têm momentos angulares específicos. Quando o elétron passa por um campo magnético, a reação pode ser, de acordo com seu momento angular, a de ser desviada

para cima (*spin-up*), ou a de ser desviada para baixo (*spin-down*). Tais partículas são chamadas de partículas  $\text{spin } \frac{1}{2}$  (p. 7). O entrelaçamento se dá quando uma partícula se divide em dois. Nesse caso, uma parte será *spin-up* e a outra, necessariamente, *spin-down* ou vice-versa. Por essa correlação necessária é que as partículas são ditas emaranhadas (p. 8).

A partir disso que começa a disputa por explicações. O teorema de Bell vai dizer que a causa do entrelaçamento quântico não pode ser assinalada a propriedades das partículas individuais (p. 9). Historicamente, temos duas teorias: a mecânica de matriz, de Heisenberg, Born e Jordan (que explica melhor o entrelaçamento) e a mecânica de ondas, de Schrödinger (que explica melhor a interferência). Na mecânica de matriz existem três elementos básicos: “o estado quântico, que representa o sistema físico que nos interessa, a lei dinâmica, pela qual o estado quântico muda ao longo do tempo, e o postulado de medição, que relaciona o estado quântico com os resultados de medições” (p. 10).

O estado físico é representado por um vetor, quer dizer, por uma lista de números representando os estados físicos básicos do sistema. Graficamente, teríamos setas ortogonais mostrando as respectivas direções das partículas, podendo ser *spin-up*  $|\uparrow z\rangle$  (1,0) ou *spin-down*  $|\downarrow z\rangle$  (0,1). Essa é a notação de Dirac para estados quânticos, e esses vetores são conhecidos como *eigenstates* ou *eigenvectors* (p. 10). Os estados dos *eigenvectors* podem ser identificados com *a* e *b*. O postulado de medida diz que a chance de obter estados *a* ou *b* corresponde ao quadrado de cada um deles (p. 13). A lei dinâmica, por sua vez, especifica como o sistema muda de acordo com o tempo, e é representada em uma equação (p. 15).

Podemos colocar a questão de como medir a posição em um sistema em que o comportamento de ondas e elétrons são tão relacionados. É aí que entra a mecânica de ondas. A resposta seria dividir o espaço em campos menores, localizando o elétron em um deles. Se houver uma divisão em cinco espaços com a partícula no primeiro, marcamos (1,0,0,0,0), se estiver no segundo (0,1,0,0,0), e assim por diante. Esses espaços são os vetores de um *eigenstate* dos operadores desses espaços (p. 17). Dependendo de onde estiver o elétron, a curva da função de onda da representação se apresentará de maneira diferente (p. 19).

No que diz respeito à interpretação, o autor chama a atenção para o fato de que não temos, no mundo quântico, descrições precisas dos fenômenos, mas sim de suas interpretações matemáticas. Outro fato importante é que nada na física quântica se parece com nossa vivência de mundo (p. 23). Essas afirmações colocam a questão de como interpre-

tar tais fenômenos. Pode-se revisar nossa ontologia sobre o mundo, de modo a descrevê-lo em algum aspecto. Pode-se também descartar a física quântica como algo que diga respeito de algum modo ao nosso mundo habitado. Também podemos imaginá-la apenas como dizendo respeito às nossas formas de conhecimento, ou ainda como uma descrição parcial, precisando ser complementada. São dessas possibilidades que o autor passa a tratar (p. 24).

No cap. 2 é debatido o problema do realismo ontológico. Como vimos, a dinâmica do sistema quântico não pode ser usada para descrever nosso mundo habitado (p. 26). Uma das maneiras de resolver esse desencontro de possibilidades ontológicas é dizer que a teoria quântica é uma teoria incompleta. Por ter sido formulada por Einstein, Podolsky e Rosen em 1935, é conhecida como argumento EPR (p. 27). A questão que eles colocam é sobre o estado dos elétrons. Antes da divisão e dos spins se apresentarem (para cima ou para baixo), existem duas possibilidades. Ou tal estado (*spin*) não existe previamente, ou, o que os proponentes do teorema preferem, essa propriedade existe, mas a teoria não dá conta de explicar. Essa presunção se baseia em um princípio metafísico chamado “critério de realidade”: “Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, nós podemos prever com certeza (ou seja, com probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondente a esta quantidade física” (p. 28).

O problema é que a aplicação desse critério exclui o entrelaçamento quântico. Ao fazer a medição do primeiro elétron, o segundo já tem o *spin* previsível. Quer dizer que, para o segundo, podemos aplicar o argumento EPR? Não, pois já houve interação do sistema quântico com os aparatos de observação, o que viola o critério de não perturbação do sistema presente no argumento. O entrelaçamento, por sua vez, contraria um postulado da teoria da relatividade que diz não ser possível a interação com um sistema acima da velocidade da luz, portanto, um elétron não poderia influenciar outro de modo imediato. Mas, como explicar o problema da medição, quer dizer, a certeza em relação ao segundo elétron depois da manifestação do primeiro? Isso, para o argumento EPR, só pode ser explicado pelo fato de o segundo elétron já ter em si sua propriedade de *spin*, impossível de ser medida. Por isso dizerem que a física quântica é um sistema incompleto (p. 29). Mais ainda, sendo que, na teoria quântica, a expectativa de medição varia de acordo com a inclinação do eixo da reação, então não se pode nem alegar uma ignorância que poderia ser

futuramente resolvida. A única explicação seria uma influência externa, demonstrando a incompletude do sistema (p. 30).

Bohr respondeu apontando ambiguidades no critério de perturbação. Se disser respeito a uma perturbação mecânica, o segundo elétron não sofre influência da medição. O que está sendo influenciado são as condições do sistema (o ângulo de inclinação, por exemplo), não da partícula (p. 31). Para Bohr, portanto, o contexto é uma peça-chave para entender o funcionamento de um sistema. Medições como a dos *spins* dos elétrons, dependentes uma da outra, seriam complementares, e essa seria uma propriedade fundamental para Bohr: complementaridade. Só que isso contraria o fato de que o spin do segundo elétron não é, teoricamente, afetado pelo do primeiro, antes criaria um contexto para ele. Mas como, se são separados? (p. 33). É para assegurar essa lógica não pré-determinada que aparecem os teoremas de impossibilidade: (1) “as propriedades de *spin* dos elétrons e as medições a serem realizadas neles são independentes uns dos outros; chame isso de princípio da independência” (p. 36). (2) “o resultado da primeira medição não pode afetar as propriedades do segundo elétron; chame isso de princípio da localidade” (p. 36). Tais conceitos levariam ao teorema de Bell: “Dadas nossas duas suposições plausíveis, nenhuma atribuição de propriedades de *spin* às duas partículas pode reproduzir os resultados de medição que observamos — os resultados corretamente previstos pela teoria quântica” (p. 37).

O teorema de Kochen e Specker, por outro lado, demonstra que não é possível que “todas as quantidades para as quais a mecânica quântica faz previsões possam, simultaneamente, ter uma propriedade física consistente atribuída àquelas previsões” (p. 37). Nas palavras de Peter J. Lewis, “eles mostram que qualquer tentativa de reproduzir as previsões da mecânica quântica usando propriedades físicas resultará na atribuição de valores contraditórios às propriedades físicas do sistema” (p. 37).

Para o autor, portanto, o que resta é uma hipótese antirrealista. Temos, então, fundamento para um novo tipo de antirrealismo, não mais baseado em observações globais, mas em um domínio específico de pesquisa. Para Bell, assim como para Einstein, as características encontradas nos sistemas quânticos teriam que ser explicadas por características pré-existentes, e, portanto, a mecânica quântica precisaria ser complementada (p. 38).

Para tentar preservar uma ontologia realista a partir da mecânica quântica, seria necessário abrir mão do princípio da independência. Como veremos, revisões radicais precisariam ser feitas nas nossas expec-



tativas científicas. Ou assumiríamos que propriedades futuras poderiam influenciar eventos presentes, ou que existem variáveis ocultas influenciando dois componentes. Para tentar atingir essas possíveis explicações, primeiro, seria necessário superar o teorema Kochen-Specker. Esse teorema presume propriedades específicas para cada característica do sistema quântico. Mas, talvez, as propriedades dos sistemas não precisariam ser explicadas em termos de propriedades específicas para cada característica, mas pela posição das características. Sem essa correspondência um-a-um entre propriedades e características, as contradições do teorema Kochen-Specker não se apresentam (p. 41).

Podemos, agora, ver como diferentes teorias analisam o sistema quântico. A teoria GWR (colapso espontâneo) assume a existência de propriedades básicas e invoca uma lei determinista que as governa. A teoria de Bohm (variável oculta), também assume a existência de propriedades básicas, mas descreve o movimento dos elétrons de modo determinista. A teoria do multiverso, por sua vez, não assume propriedades básicas, já que, nesse caso, tanto o *spin-up* como o *spin-down* ocorrem em ramos diferentes da realidade (p. 41).

Tanto as teorias do colapso espontâneo como a das variáveis ocultas negam o princípio de localidade de Bell. A teoria do multiverso faz o mesmo, além de não precisar determinar uma localidade, já que ambas as trajetórias ocorreriam em ramos diferentes da realidade (p. 42).

Existindo múltiplas teorias confirmadas, como seria possível traçar uma metateoria (p. 44)? Isso torna a teoria quântica um caso único na história da ciência. Temos múltiplas teorias e talvez nenhuma delas venha a ser derrotada. E todas descrevem perfeitamente os dados observados. Isso não significa uma necessária recaída no ceticismo. O que isso significa é que temos um problema de medição (p. 45).

Como o sistema quântico possui duas variáveis, *spin-up* ou *spin-down*, não é possível medir a trajetória dos elétrons da mesma forma linear com que se mede a trajetória de uma bola de beisebol. É preciso aplicar o postulado de medida, que diz que a probabilidade de obter um resultado particular para um elétron é dada pelo quadrado do coeficiente daquele *eigenstate* (p. 47). Mas, é importante perceber que, o que temos neste caso, é um postulado matemático que descreve os possíveis resultados, não uma explicação de como eles ocorrem (p. 48). A aplicação do postulado de medida é necessária justamente porque, na mecânica quântica, não podemos aplicar a equação de Schrödinger, que serve para descrever a dinâmica nos outros sistemas da Física. As descrições dos dispositivos

de medida teriam que obedecer à equação de Schrödinger, mas, como não obedecem, isso demonstra que a mecânica quântica não é apenas incompleta, mas inconsistente, dada a contradição entre dispositivos de medição física e seus resultados contrários aos usuais. Este é o chamado problema de medição. Para resolvê-lo, é necessário eliminar o postulado de medida e encontrar explicações satisfatórias para a mecânica quântica. Essa é a função dos três sistemas já apontados, nos quais, agora, entraremos mais pormenorizadamente.

Na solução proposta pela teoria GRW (colapso espontâneo), a partícula tem que corresponder a um objeto macroscópico. De acordo com a dinâmica linear de Schrödinger, o resultado aponta para uma sobreposição entre as posições de *spin-up* e a de *spin-down*. Só que, imediatamente após a medição, uma das posições colapsa, indicando uma posição definitiva de uma das duas alternativas, seguindo as probabilidades dadas na regra de Born (p. 53).

Um problema encontrado nessa teoria é que nem todas as ondas da partícula colapsada seriam extintas, mas umas poucas deixariam um rastro. Isso seria solucionado com o estabelecimento de uma ligação mais difusa entre a atribuição de propriedades e o *eigenstate*. Mas isso criará outros problemas, como veremos adiante (p. 54).

Outra solução possível é dizer que, na teoria GRW, a onda se movimenta de maneira suave e contínua na maioria das vezes, mas em determinados momentos ela pode pular de modo descontínuo. No problema da passagem por duas fendas, a descrição da teoria diria que a onda passa pelas duas, mas que ela se concentra em um ponto após essa passagem (p. 55).

De modo contrastante, a teoria das variáveis ocultas vai dizer que, no experimento quântico, temos o tempo inteiro partículas. Para essa teoria, partículas são “entidades que ocupam um ponto espacial em qualquer momento, e cujos movimentos no tempo traçam linhas no espaço-tempo (trajetórias)” (p. 56). Esse sistema, de acordo com Bohm, é representado por uma função de onda mais as coordenadas representando a posição das partículas. Cada partícula ocupa um espaço de três dimensões, portanto, com duas partículas, temos um espaço de seis dimensões. Como a posição das partículas, após uma colapsar, será representada apenas por uma, essa partícula ocupará um espaço de seis dimensões. Esse espaço é chamado de variável X. Por isso, a teoria de Bohm é conhecida como teoria da variável oculta (p. 56).

Dessa maneira, teríamos um modelo em que a função de onda passa pelas duas frestas do experimento. Ao interagirem, gerariam pontos de alta frequência e de baixa frequência. As partículas seriam distribuídas seguindo esses fluxos de frequência. Essa distribuição seguiria a lei dinâmica de Bohm. Desse modo, precisaríamos de embasamento em uma dupla ontologia, que incluísse o comportamento de ondas e de partículas (p. 59).

Vejamos, agora, a teoria do multiverso. Para Everett (1957), não é necessário substituir o postulado da medida nem por um mecanismo de colapso, como na GWR, nem por uma localização precisa das partículas, como em Bohm. Ele simplesmente se livra do postulado da medida e considera que a teoria está pronta (p. 59).

Nesse caso, ambas as partículas, a que se apresenta na parte de cima e a que se apresenta na parte de baixo do aparato de medida, são realizadas. Everett chama sua teoria de “estado relativo” realizado (p. 60). Desse modo, tanto o elétron em *spin-up* quanto o elétron em *spin-down* geram sinais no aparato de medida. Pessoas assistindo ao experimento irão ver ambos os sinais. Só que elas habitarão mundos diferentes, ambos com o mesmo estatuto ontológico, não meras possibilidades, mas mundos reais. Por isso, essa teoria é chamada de teoria do multiverso (p. 61).

Desse modo, o sistema é descrito seguindo fielmente a equação de Schrödinger. A função de onda dos elétrons se separa em dois pacotes diferentes, cada um passando por uma brecha. Depois disso, eles se unem e criam o padrão de onda característico. Esse padrão é entendido como a sobreposição em um grande número de termos, um para cada átomo atingido por um elétron. Todos esses elétrons vão emitir sinais e vão ser vistos, só que em mundos diversos (p. 62). Apesar dessa teoria falar em vários mundos, existem aqueles que vão falar em várias mentes (Lockwood, 1989) ou, ainda, em muitos fatos (Saunders, 1995; Lewis, 2016, p. 63).

Uma questão importante colocada por Lewis é a da episteme, já sugerida por von Neumann (1932) (Lewis, p. 64). A teoria que descreve os fenômenos de maneira mais particular é a do multiverso. As teorias do colapso espontâneo e da variável oculta acrescentam elementos aos fatos básicos. Alguns autores sugerem que isso se deva a uma espécie de “pre-conceito clássico”. Uma amostra disso seria a possibilidade de reduzir as três teorias à do multiverso. Na teoria do colapso espontâneo, poderíamos ver a partícula colapsada como pertencendo a um outro ramo, já na teoria das variáveis ocultas, poderíamos presumir que a variável que ficou com uma baixa frequência de onda não desapareceu completamente (p. 66).

Na visão de David Lewis (1986), a divisão em ramos da teoria do multiverso não descreve estados finais, mas apenas passagens no movimento de onda. E este continua se subdividindo. Dessa maneira, tanto a partícula colapsada como a partícula com baixa frequência de onda podem ser incluídas em alguns desses desmembramentos de ramos (Lewis, 2016, p. 68). Se a teoria do multiverso é empiricamente inadequada, os mecanismos adicionais postulados pelas teorias da variável oculta e do colapso espontâneo são complicações necessárias para capturar os fatos probabilísticos (p. 69).

Resumindo, se a teoria do multiverso tem problemas para explicitar suas probabilidades, a teoria do colapso espontâneo e a da variável oculta têm problemas com localidade, já que elas requerem casualidade instantânea, o que é proibido pela teoria da relatividade (p. 70).

No cap. 4, vemos o tema da indeterminação. Isso aparece na mecânica quântica pois, antes da medição, o elétron não tem qualquer determinação de *spin*. Para definir indeterminação, é preciso diferenciar propriedades determináveis de propriedades determinadas. As propriedades determináveis têm um certo espectro de propriedades e as determinadas especificam uma propriedade específica (p. 72). Um exemplo de indeterminação é o da composição. Segundo Tye (2000), a indeterminação na composição é endêmica, já que o limite dos objetos é marcado por partículas que variam de distância entre si. Já David Lewis (2016, p. 73) considera que a indeterminação é uma questão de linguagem, pelo menos para objetos macroscópicos. Ambas as análises, no entanto, são incompletas, pois deixam de lado o fato de que, no âmbito menos apto para a decomposição, o das partículas, elas podem se assemelhar a nuvens (p. 74).

Podemos pensar em indeterminação em um aspecto mais específico da mecânica quântica. Entre o *spin-up* e o *spin-down* existe uma infinidade contínua de valores que não vão formar nenhum *eigenstate* específico. Nesse ponto, pode-se lembrar o conceito de Barnes e Williams (2011). Eles dizem que a indeterminação metafísica é “bruta; é um aspecto irreduzível do mundo” (p. 78). Por isso é que é preciso especificar o conceito de ligação estrita (p. 76). “Ligação estrita: um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável se, e somente se, seu estado for um *eigenstate* do operador correspondente à propriedade, e o valor determinado é o *eigenvalue* para esse *eigenstate*” (p. 76).

Vemos, então, dois estados determinados permeados por inúmeros espaços indeterminados. Nesse caso, segundo Baym (1969), apenas o operador tem momento angular no eixo Z, e nota que os fótons que

estão em um eigenstate  $|R\rangle$  ou  $|L\rangle$  deste operador podem ser atribuídos um valor definido da componente  $z$  do momento angular [...] A qualquer outro estado de fóton  $|\varphi\rangle$  não pode ser atribuído um valor definido de momento angular” (Lewis, 2016, p. 76).

Segundo o conceito de ligação estrita, qualquer coisa fora dos dois *eigenstates* é indeterminada (p. 79). Porém, existem outras possibilidades de análise. Uma delas é perceber as limitações da ligação estrita como algo inerente ao experimento de medição. Isso está ligado ao fato de, mesmo se o resultado do experimento for indeterminado, o observador só terá acesso à percepção do seu resultado por meio de um resultado determinado. Por isso mesmo, quando o experimento é indeterminado, o observador dirá que o seu resultado foi determinado. Essa é a base da teoria de Albert (1992) e Barrett (1999), que propõe a possibilidade de uma teoria quântica sem o postulado de medida, e a chamam de teoria nua. As propriedades seriam, portanto, atribuídas para o sistema como um todo, e quando não houvesse um *eigenstate* correspondente a uma propriedade, então o sistema seria simplesmente considerado indeterminado. Desse ponto de vista, o postulado de medida seria simplesmente redundante, já que a indeterminação seria eliminada no mundo habitado e indetectável na mecânica quântica. A consequência é que, “se a teoria nua é verdadeira, a indeterminação é onipresente” (p. 82). Isso coloca uma outra questão: como detectar uma evidência em meio à indeterminação generalizada? Isso tornaria a teoria nua empiricamente incoerente, como diria o próprio Barrett (1999): “argumentos epistêmicos contra a teoria nua são inconclusivos. A teoria nua envolve uma indeterminação radical em nossa experiência e no mundo, mas desde que também implica que a indeterminação não é distinguível da determinação, a indeterminação não pode ser usada contra ela” (*apud* Lewis, 2016, p. 83).

A indeterminação seria de tal modo geral que “tal teoria pode ser verdadeira — é apenas que, se fosse verdadeira, então nunca se saberia que era” (Barrett *apud* Lewis, 2016, p. 85). Uma opção seria aceitar ligações menos exatas do que a ligação estrita, criando não uma indeterminação radical, mas uma indeterminação moderada. Para isso, é preciso introduzir o conceito de “ligação obscura” (*fuzzy link*): “Ligação obscura: um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável se, e somente se, a projeção quadrada de seu estado em um eigenstate do operador correspondente é maior que  $I - P$ ” (p. 87).

Essa noção não é extremamente problemática se confinada ao mundo microscópico. A ligação obscura pode trazer problemas ao apresentar

uma propriedade que se comporta como outra propriedade. Para isso, é preciso usar o conceito que Bell chama de PTPP: para todos os propósitos práticos (p. 88). Como o próprio nome diz, serve para assegurar que os objetos macroscópicos terão suas propriedades garantidas. Outro conceito que pode ser útil aqui é o de “ligação vaga” (*vague link*): “Ligação vaga: Um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável na medida em que a projeção quadrada de seu estado sobre um eigenstate do operador correspondente é próximo de I, onde o valor determinado é o *eigenvalue* para aquele eigenstate” (p. 89). A ligação vaga difere da ligação obscura no sentido de que esta última ainda preserva um limite entre propriedades. Já a ligação vaga assinala propriedades em termos de grau de aproximação (p. 89).

Isso pode ser importante para contornar a chamada anomalia contábil. É um problema que encontramos ao imaginar que um quadrado de mármore fica dentro de uma caixa, mas para  $n$  quadrados de mármore é impossível determinar a sua localização, pois seu coeficiente seria maior do que I, contrariando a definição de ligação obscura (p. 92). Isso acontece porque espaços minúsculos de acomodação, insignificantes na unidade, quando somados para um número muito grande de unidades, tornam o cálculo inexato. No entanto, na teoria GRW, em um objeto macroscópico, um elétron sempre se coloca em um *eigenstate*. Conclui-se, então, que não existe problema contábil se ele for imperceptível (p. 93).

Uma outra possibilidade é a formulada por Ghirard, Grassi e Benatti (1995). Os autores postulam que, na teoria GRW, existe um contínuo de distribuição de massa no espaço, denso em alguns lugares e rarefeito em outros. E isso explicaria a distribuição de partículas. Conhecida como a teoria da GRW maciça (p. 94). Diante dessas possibilidades, Lewis conclui que a anomalia contábil é uma falha de linguagem (p. 95). A ligação vaga estaria, portanto, mais próxima da concepção de mundo contínua da mecânica quântica (p. 96).

Uma diferença importante nas manifestações de indeterminação é que, na teoria GRW, os mecanismos de colapso mantêm os objetos macroscópicos nas suas posições de *eigenstates*, enquanto na teoria do multiverso, onde não existe colapso, os objetos macroscópicos ficam longe da sua posição de *eigenstates*. Diferente da teoria nua, no entanto, na teoria do multiverso os objetos têm as suas propriedades determinadas pelos seus respectivos ramos. O fenômeno físico que está por trás da distribuição entre os ramos é chamado de decoerência. Os dois componentes da função de onda interagem um com o outro depois que passam pelas bre-

chas para produzir a característica distribuição de probabilidade. “Quando dois desses componentes podem se juntar para produzir efeitos de interferência eles são descritos como coerentes” (p. 98). A questão é que, para observar o efeito de interferência, é preciso deixar o sistema isolado. Isso é “difícil para sistemas microscópicos, mas efetivamente impossível para os macroscópicos” (p. 98). Podemos dizer, então, que nos sistemas macroscópicos não existe interferência, constituindo ramos separados da realidade física (p. 98).

Apesar de não existir colapso no multiverso, a decoerência resulta em um colapso efetivo, já que, para habitantes de ramos diferentes, a expansão do processo vai interagir com o meio e produzir diferentes resultados. Desse modo, a teoria do multiverso se encontra com a teoria GRW (p. 99). Para garantir esse resultado, mais um tipo de *link* se faz necessário: “Ligação estrita relativa ao ramo (*branch-relative strict link*): um sistema tem um valor determinado para uma dada propriedade determinável relativa a um ramo se, e somente se, seu estado relativo a esse ramo é um *eigenstate* do operador correspondente à propriedade, e o valor determinado é o *eigenvalue* desse *eigenstate* (p. 99).

Cairíamos, então, em uma indeterminação parecida com a da teoria nua, já que em cada ramo se constituiria como uma realidade diversa não determinada. O autor chama isso de “solipsismo relativo ao ramo” (p. 100). Por isso, é preciso introduzir mais dois tipos de ligação:

Ligação obscura relativa ao ramo (*branch-relative fuzzy link*): Um sistema tem um valor determinado para uma determinada propriedade determinável relativa a um ramo se, e somente se, a projeção quadrada de seu estado relativo a esse ramo em um *eigenstate* do operador correspondente for maior que  $I - P$ , onde o valor determinado é o *eigenvalue* desse *eigenstate*. [...] Ligação vaga relativa ao ramo (*branch-relative vague link*): Um sistema tem um valor determinado para uma determinada propriedade determinável relativa a um ramo na medida em que a projeção quadrada de seu estado relativo a esse ramo em um *eigenstate* do operador correspondente é próxima de  $I$ , onde o determinado valor é o *eigenvalue* desse *eigenstate* (p. 100).

Como no caso da teoria GRW, a escolha desses *links* se dará de acordo com a preocupação com que uma determinada propriedade se comporte como uma outra propriedade determinada (p. 100). Conclui-se que a indeterminação não analisável é endêmica no nível microscópico, mas, para todos os propósitos práticos, ausente no nível macroscópico (p. 101). Nem mesmo a teoria de Bohm se livra da indeterminação não analisável, já que o elétron tem uma posição determinada, mas um *spin* indetermina-

do (p. 103). Lewis, então, assinala o que tanto a teoria do multiverso, como a do colapso espontâneo e a da variável oculta têm em comum: “Indeterminação generalizada no nível microscópico que desaparece no nível macroscópico. Talvez aqui tenhamos nossa primeira consequência ontológica concreta da mecânica quântica: há indeterminação no mundo, e não tem nada a ver com composição ou (tipos familiares de) imprecisão” (p. 103).

A única maneira de eliminar a indeterminação seria utilizar uma abordagem retroativa, em que elementos da teoria da variável oculta podem ser determinadas por fatos futuros. Nesse caso, teríamos apenas posições, e não *spin*. Desse modo, não existiria indeterminação. O problema é que ainda seria preciso dar conta da função de onda. As propriedades da função de onda, seu grau de expansão e formato, são determinadas. Na teoria da variável oculta teríamos, nesse caso, partículas distribuídas de acordo com um determinado movimento de onda. No caso das teorias do multiverso e GRW, apenas o movimento da função de onda já seria o bastante para determinar seus resultados. O autor conclui que, talvez, seja melhor analisar a mecânica quântica nos seus próprios termos, quer dizer, de acordo com a função de onda (p. 105). A sensação de indeterminação viria do fato de que a onda tem as suas propriedades em contínuo de amplitude, e não em propriedades discretas, de acordo com a maneira tradicional do pensamento científico (p. 106).

No cap. 5, Lewis aborda o problema da causalidade. O autor começa falando sobre a localidade na física clássica, em que todos os fenômenos são locais, dependendo apenas das propriedades intrínsecas ao sistema. Uma exceção é a gravidade, em que uma partícula é afetada pela massa de todas as partículas em um determinado momento, independentemente da distância (p. 108). O princípio da localidade de Bell diz que, para um par de partículas separadas, a medição de uma não afeta instantaneamente as propriedades da outra. Mas, se um processo apresenta causalidade instantânea, ele não é local, ou seja, não depende só das características internas ao sistema. Isso significa que, ao se afastar do teorema de Bell, entra-se em conflito com a teoria da relatividade.

Um exemplo interessante é o de que a partícula 1 é medida como *spin-down* em uma primeira medição, mas, se a partícula 2 é medida primeiro, a primeira partícula será medida como *spin-up*. Percebe-se, então, que a mensuração da partícula 1 depende de um evento distante (p. 113). Não é que a teoria da relatividade proíba a existência de simultaneidade, ela apenas a torna ociosa. Portanto, para explicar a ação não local, é preciso adicionar outras influências causais, ou, como diria Einstein, uma



fantasmagórica “ação a distância” (p. 114). Dado o custo de se violar a lei da localidade, é preciso pensar em alternativas, mesmo que elas sejam contraintuitivas (p. 115). Se a mensuração de uma partícula depende de qual é realizada primeiro, pode se pensar, no nível microfísico, em uma causalidade reversa, que pode ser explicada pela simetria temporal das leis subjacentes (Price, 1996; Lewis, 2016, p. 116). Isso é chamado de abordagem da variável oculta reversa (p. 117). “Isso resgata um aspecto da nossa figura causal estabelecida, quer dizer, a localidade causal, às custas de uma outra, a saber, a da presunção de que as causas antecedem os efeitos” (p. 118).

Se abordarmos o efeito da medição como causando pacotes de onda, vemos que esses pacotes se dividem no momento da mensuração, alterando, dessa forma, a trajetória das partículas. Desse modo, a escolha de qual partícula será medida primeiro alteraria sua trajetória. Isso mostra que a não causalidade mostrada nas partículas não aparece no que diz respeito aos pacotes de onda (p. 119). Na teoria do multiverso, essa possibilidade se apresentaria de modo perfeitamente bem definido, já que o movimento de separação das ondas e a inclusão do observador não necessitaria de uma causalidade restrita, como na teoria da variável oculta. Já na teoria do colapso espontâneo, “é um processo físico de colapso, não o apelo para a localização do ramo do observador, que quebra a simetria entre observado e o não observado no resultado da mensuração” (p. 122).

Cada pacote de onda vale para ambas as partículas. Por isso, no caso da teoria do colapso espontâneo, teríamos o instante da mensuração da partícula determinando a posição de ambas, o que viola a causalidade prescrita pela lei da relatividade (p. 123). Uma maneira de contornar isso seria adotar o critério de influência reversa (p. 123). Do mesmo modo que na teoria da variável oculta, portanto, teríamos a influência de ondas retornando dos detectores, não violando, assim, o princípio da localidade (p. 124). Outra possibilidade é considerar os sistemas quânticos como descontínuos. Dessa maneira, as medições se dariam em *flashes*, assim como os eventos. Essa é uma ontologia adotada por Tumulka (p. 125). Para ele, os objetos macroscópicos são uma galáxia de flashes (p. 126). Uma das consequências mais interessantes da física quântica para o debate filosófico é que possibilita a volta da indeterminação no debate sobre o processo físico do mundo, não só na percepção humana. Vejamos algumas possibilidades.

No caso da teoria do multiverso, temos, por um lado, uma distribuição determinista por entre os mundos possíveis. Mas, no que diz respeito

ao observador específico de cada mundo, ela se apresenta indeterminista, já que é impossível saber de antemão qual a trajetória atômica que será apresentada. “Podemos dizer que a teoria do multiverso é objetivamente determinista, mas subjetivamente indeterminista” (p. 129). Outra possibilidade é a de atribuir a multiplicação do multiverso a várias consciências, como defendido por Saunders e Wallace (2008). Isso levaria a uma pseudoincerteza, já que restrita à percepção, enquanto a reação em si teria trajetórias identificáveis. Seguindo o mesmo raciocínio, chegamos à ideia de imortalidade. Se todas as reações são ramificadas em diferentes espaços-tempo, então, sempre que a morte se apresenta, existe a possibilidade de que, em algum espaço-tempo, um sujeito tenha sobrevivido. O problema com essa hipótese é que é possível pensar em outra possibilidade em relação ao momento da morte, mas não ao envelhecimento (p. 142).

E quanto ao livre-arbítrio? Vimos que a teoria de Bohm é determinista, e que a teoria do colapso espontâneo é indeterminista. Já a teoria do multiverso apresenta possibilidades não deterministas em uma física determinista subjacente. Como essas teorias encaram essa questão? Todas as teorias estão sujeitas à regra de Born. Esta prediz uma distribuição ao acaso, e este é tão incompatível com livre-arbítrio quanto o determinismo (p. 145). Na teoria do colapso espontâneo, se o sujeito é confrontado com duas opções, essas opções corresponderão a dois sistemas no cérebro determinados microscopicamente. Só que esse sistema circula, e por sua vez, estão em superposição com os estados gerais. De acordo com a dinâmica de Schrödinger, essa sobreposição é instável e acaba rapidamente colapsando para uma das opções (p. 146). Dessa maneira, após feita uma opção, o agente sempre pode perguntar o que o levou a fazer uma opção, e não outra. A resposta seria “nada”. Tal situação levaria a uma espécie de livre-arbítrio (p. 147). De acordo com uma concepção compatibilista, a causalidade passa pelo sujeito, que pressupõe processos físicos e mentais próprios. Dessa maneira, não haveria conflito entre determinismo e livre-arbítrio (p. 148). Se pensarmos em violar a independência, teremos duas opções: ou uma causa comum no passado remoto, ou uma causa que agiria de maneira retroativa no tempo (p. 148). Poderíamos pensar em uma teoria “rasa” ou “profunda”. Na primeira, a causalidade estaria próxima, o que enfraqueceria o livre-arbítrio. Na segunda, a causalidade estaria distante, fortalecendo o livre-arbítrio (ibid.).

A outra possibilidade, como vimos, seria de que a ação do sujeito afetaria as propriedades iniciais das partículas medidas em “uma maneira em que a causalidade seria nova e retroativa”. Dessa maneira, a escolha

seria livre (p. 149). E o que podemos dizer quanto às dimensões? Na teoria de Bohm, a configuração de espaço é de três dimensões em relação a uma partícula. Em um sistema de duas partículas, teríamos seis dimensões. Se no universo existem 10 sobre 80 partículas, significa que a função de onda é muito alta. Se essa é a função de onda que descreve uma entidade física real, “então a dimensionalidade do mundo físico é muito mais alta do que nós normalmente a consideramos” (p. 152).

Mas, se no mundo físico não existem três dimensões, a tridimensionalidade pode ser uma ilusão, ou a função de onda não representa o espaço diretamente, ou não o representa de nenhuma maneira. A configuração do espaço para partículas é inteiramente convencional. O mesmo não vale para campos. Já que os campos prescrevem números para cada ponto de espaço, “é mais naturalmente representado por uma função espacial de três dimensões” (p. 152). Para complicar ainda mais, “há várias representações de configuração do espaço correspondendo a uma única representação tridimensional” (p. 153). Como a função de onda tem a forma de um campo, ser realista em relação ao campo designa o realismo em relação ao espaço ocupado pelo campo: “Já que a função de onda é definida pela configuração do espaço, uma atitude realista da mecânica quântica se compromete com a existência de um espaço de  $3N$  dimensões, onde  $N$  é o número de partículas do universo” (p. 154). Desse modo, teríamos muito mais dimensões do que o previsto. A explicação para termos uma percepção tridimensional é que essa corresponderia à “interpretação do comportamento dos objetos macroscópicos” (p. 156).

Outra possibilidade é a de que, falando objetivamente, não existem pessoas e objetos. Temos essa impressão pela maneira como o mundo macroscópico é configurado. Segundo Maudlin (2013), o que é diretamente observado são “problemas de fato locais, onde ‘local’ é para ser lido como ‘numa região restrita do espaço tridimensional’” (p. 158). Allori (2013) e Maudlin (2013) explicam a diferença entre as possíveis dimensões da função de onda por meio da nossa percepção, dizendo que a função de onda não deve ser usada para descrever as relações com a nossa percepção, mas que deve ser adicionada uma “ontologia primitiva” que é genuinamente tridimensional (Lewis, p. 159). Também seria possível pensar em uma função de onda com uma “distribuição de massa no espaço tridimensional”, em que essa distribuição configuraria os objetos, sendo que cada objeto macroscópico seria uma região de maior densidade. Outra possibilidade é que poderia se usar um conjunto de flashes para configurar um evento no espaço tridimensional (ibid.). Outra possibilida-

de de interpretação seria ver a função de onda como uma lei, representando o movimento das partículas e não como algo a ser imediatamente interpretado (p. 161).

Finalmente, a mecânica quântica pode ser vista como tendo elementos para uma visão holística, em que o todo é maior do que a soma das partes. Por outro lado, muitos são atraídos por um reducionismo, como David Lewis e sua superveniência humana, que diz que tudo que existe é um vasto mosaico de problemas locais (p. 166). Teller (1986) vai falar no holismo relacional, que define como “a posição em que dois indivíduos podem ter propriedades relacionais e não tem superveniência nas suas propriedades não relacionais” (Lewis, 2016, p. 167). Essa poderia ser justamente uma das definições de emergência. Como não é possível descrever a trajetória dos *spins* de maneira não relacional, podemos dizer que tanto a teoria do colapso espontâneo quanto o do multiverso, quanto a da variável oculta encarnam alguma forma de holismo (p. 170). Diante disso, a única maneira de recuperar a superveniência é uma abordagem retroativa da mecânica quântica (p. 172).

Schaffer (2010) sugere um monismo em que as propriedades não determinam o sistema, mas ao contrário, o sistema determina as propriedades das partes. Essa abordagem se chama monismo de prioridade (Lewis, 2016, p. 174). Teríamos apenas um sistema que incluiria as partículas, as posições e a propriedade (p. 174). Outra perspectiva seria a de pensar em compromissos metafísicos mais fracos, em que a subdeterminação não aparece nas entidades realizadas pelas estruturas. Essa é a teoria do realismo estrutural ôntico (OSR), proposta por Ladyman em 1998 (Lewis, 2016, p. 175). Nessa visão, as relações seriam o fundamento e os indivíduos seriam nós na estrutura relacional (p. 176).

## Referências

ALBERT, David Z. *Quantum mechanics and experience*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992.

ALLORI, Valia. Primitive ontology and the structure of fundamental physical theories. In: NEY, Alyssa; ALBERT, David Z. (orgs.). *The wave function*. Oxford: Oxford University Press, 2013, p. 58–75.

BARNES, Elizabeth; WILLIAMS, J. Robert G. A theory of metaphysical indeterminacy. In: BENNET, Karen; ZIMMERMAN, Dean (orgs.). *Oxford Studies in metaphysics*, v. 6. Oxford: Oxford University Press, 2011, p. 103–148.

BARRETT, Jeffrey A. *The quantum mechanics of minds and worlds*. Oxford: Oxford University Press, 1999.

BAYM, Gordon. *Lectures on quantum mechanics*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1969.

EVERETT, Hugh, III. "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, College Park, MD, v. 29, n. 3, p. 454-462, 1957.

GHIRARDI, GianCarlo; GRASSI, Roberto; BENATTI, Fabio. Describing the macroscopic world: Closing the circle within the dynamical reduction program. *Foundations of Physics*, Berlin, v. 25, p. 5-38, 1995.

LADYMAN, James. What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 29, p. 409-424, 1998.

LEWIS, David. *On the plurality of worlds*. Oxford: Blackwell, 1986.

LEWIS, Peter J. *Quantum ontology: a guide to the metaphysics of quantum mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2016.

LOCKWOOD, Michael. *Mind, brain, and the quantum: the compound 'I'*. Hoboken, NJ: Blackwell, 1989.

MAUDLIN, Tim. The nature of the quantum state. In: NEY, Alyssa; ALBERT, David Z. (orgs.). *The wave function: Essays on the metaphysics of quantum mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2013, p. 126-153.

NEUMANN, John von. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer, 1932. – Translated as *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1955.

PRICE, Huw. *Time's arrow and Archimedes's point: New directions for the physics of time*. Oxford: Oxford University Press, 1996.

SAUNDERS, Simon. Time, quantum mechanics, and decoherence. *Synthese*, Berlin, v. 102, n. 2, p. 235-266, 1995.

SAUNDERS, Simon; WALLACE, David. Branching and uncertainty. *British Journal for the Philosophy of Science*, Chicago, IL, v. 59, n. 3, p. 293-305, 2008.

SCHAFFER, Jonathan. Monism: The priority of the whole. *Philosophical Review*, Durham, NC, v. 119, n. 1, p. 31-76, 2010.

TELLER, Paul. Relational holism and quantum mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, Chicago, IL, v. 37, n. 1, p. 71-81, 1986.

TYE, Michael. Vagueness and reality. *Philosophical Topics*, Berlin, v. 28, p. 195-209, 2000.

ROVELLI, Carlo. *O abismo vertiginoso: um mergulho nas ideias e nos efeitos da física quântica*. Tradução de Silvana Cobucci. Rio de Janeiro: Objetiva, 2021

## Resenha do livro *O abismo vertiginoso*, de Carlo Rovelli

Maria Junqueira Netto de Sá Benevides<sup>1</sup>  
Julia Stritzinger de Cassias<sup>2</sup>  
Luiz Gustavo Queiroz Escobar<sup>3</sup>  
Rodrigo Petronio<sup>4</sup>

dx.doi.org/  
10.23925/1984-3585.2023i27p118-123

Licensed under  
CC BY 4.0

### Adentrar o Abismo

Carlo Rovelli é um físico e cosmologista italiano nascido em Verona, em 1956. Além de ser um dos pioneiros na pesquisa sobre gravidade quântica, é um pensador comprometido em tornar acessíveis as complexas discussões que estão se dando no meio científico e acadêmico e que escapam à maior parte das pessoas. O autor inicia o livro descrevendo a bela paisagem da ilha de Helgoland, onde o jovem físico Werner Heisenberg chegou ao fim de seus cálculos, deparando-se com o ponto arquimediano de toda física quântica que haveria de surgir a seguir. Neste início, Rovelli conta de forma quase poética sobre esse ambiente de isolamento, solidão e escassez, cenário do surgimento de uma ideia que revolucionaria todo o pensamento científico e, em última instância, nossa concepção de realidade. Já logo de cara fica aparente a interdisciplinaridade em que o livro se funda. Rovelli descreve a ilha de acordo com Ulisses, trazendo

---

<sup>1</sup> Maria Junqueira Netto de Sá Benevides é estudante de Filosofia na FFLCH-USP e de Comunicação Social com Habilitação em Cinema na FAAP. Contato: [mariabenevides@usp.br](mailto:mariabenevides@usp.br).

<sup>2</sup> Julia Stritzinger de Cassias é estudante de Comunicação Social com Habilitação em Cinema na FAAP. Contato: [jucassias11@hotmail.com](mailto:jucassias11@hotmail.com).

<sup>3</sup> Luiz Gustavo Queiroz Escobar é estudante de Comunicação Social com Habilitação em Cinema na FAAP e estagiário em pós-produção de som. Contato: [lgqescobar@gmail.com](mailto:lgqescobar@gmail.com).

<sup>4</sup> Rodrigo Petronio é escritor e filósofo. Professor titular da FAAP, é autor de 17 livros e de centenas de ensaios e artigos. Pesquisador associado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), da PUC-SP, onde desenvolveu pós-doutorado. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4473-2193>. Contato: [rodrigopetronio@gmail.com](mailto:rodrigopetronio@gmail.com).

a literatura para uma discussão que é aparentemente relativa a conceitos da física. Durante o percurso do livro todo, o autor nunca deixa de se comprometer em flexibilizar as fronteiras das diversas áreas de conhecimento, incluindo na discussão de figuras históricas, filósofos, filmes, entre outros.

Nesse trecho inicial, em que o autor apresenta os cientistas que forjaram as primeiras ideias da teoria dos *quanta* e o contexto em que elas tomaram forma, também introduz alguns conceitos fundamentais para uma tentativa de compreensão da teoria: os observáveis, a probabilidade e a granularidade. Dentro do possível, esses assuntos são bem aclarados por Rovelli. O interessante é que ele nunca deixa de reafirmar a opacidade dos conceitos que ele retrata no livro, sempre tranquilizando o leitor de que se trata de um assunto em que não há uma compreensão absoluta, nem nos meios mais científicos e acadêmicos: “Ficou claro? Nem um pouco. Escuro como breu” (p. 23), diz o autor, logo depois de explicar a matriz desenvolvida por Heisenberg. Sempre relembra: se alguém diz estar entendendo tudo sobre a física quântica, é porque não entendeu nada, reiterando a sua opacidade.

Após passar por esses três conceitos fundamentais da teoria quântica (observáveis, probabilidade e granularidade), Rovelli explica e descreve os seus fenômenos, como tudo isso se manifesta para nós. O primeiro fenômeno do qual ele vai se ocupar é a sobreposição quântica, relatando um experimento com feixes de fótons. Nesse experimento, a partir de R., foi possível observar as interferências quânticas, ou seja, os efeitos passíveis de observação gerados pela sobreposição. Para tornar ainda mais acessível esse fenômeno que parece loucura, exemplifica a sobreposição utilizando uma versão humanizada do experimento mental do gato de Schrödinger. A seguir, lista e contextualiza as teorias que surgiram como tentativa de justificar esse fenômeno dentro das conformidades de uma ciência da qual não queremos abrir mão: universos múltiplos, variáveis ocultas e colapso. Claro. Ele contra-argumenta todas essas interpretações da mecânica quântica com sua interpretação relacional, tendo em vista que defende uma revisão de tudo que parecia sólido em nossa mente (p. 72).

Nessas palavras, Rovelli consegue colocar em perspectiva toda a grandiosidade da resignificação da natureza que ele está propondo, ao mesmo tempo que reacende a chama do interesse do leitor pelas suas palavras e prepara o terreno para uma conversa muito mais filosófica do que física, onde os princípios de sua teoria serão relacionados com outros pensadores e pensamentos de áreas que pareciam distantes, mas

que estão diretamente conectadas com sua maneira de pensar o mundo. Dessa forma, a terceira parte do livro começa com o cotejo entre três personagens históricos: Bogdanov, Lenin e Mach. A reação inicial esperada é de confusão. O que dois revolucionários russos teriam a ver com teoria quântica e Mach, um dos filósofos favoritos de Schrödinger?

### **Mosaico do conhecimento**

Logo fica claro que o autor não está criando uma teoria nova, mas, sim, articulando a teoria relacional, oriunda da física, com teorias filosóficas anteriores. Rovelli descreve como Mach influenciou filosoficamente as revoluções físicas e o sentido da leitura científica do mundo. Menciona o fato de que Mach praticamente inspirou Einstein e Heisenberg, a partir da hipótese de que é necessário basear o conhecimento apenas no que é “observável”, levando o leitor a pensar novamente na ilha de Helgoland, onde o jovem Heisenberg chegou ao fim de seus cálculos. Mach nunca vê o conhecimento como o ato de deduzir ou adivinhar uma hipotética realidade além das sensações. Vê-o como a busca de uma organização eficiente do nosso modo de organizar essas sensações.

Portanto, o conhecimento não é a-histórico e absoluto. É ancorado no processo de construção do saber humano. Essa perspectiva histórica entra facilmente em sintonia com as ideias de Marx e Engels. E aqui, o capítulo começa a fazer sentido, pois a sintonia entre essas ideias, as de Mach e as de Engels e Marx, é desenvolvida por Bogdanov — ao passo que Lênin acusa Bogdanov e Mach de serem “idealistas”. Para Lênin, o idealismo é a manifestação ideológica da burguesia, pois os idealistas, de modo geral, negam a existência de um mundo real fora do Espírito. Assim, Lênin propõe um “materialismo” definido a partir da convicção de que existe um mundo fora da mente. Em outras palavras, a concepção segundo a qual “não existe nada mais no mundo além de matéria em movimento no espaço e no tempo” e que podemos chegar a “verdades certas” ao conhecer a matéria (p. 115–116).

Um trecho interessante que aborda os questionamentos internos do autor e também de outros colegas filósofos é este: “Como você pode pensar que experimentos feitos com pedacinhos de metal e vidro num laboratório podem ter tanto peso a ponto de colocar em dúvida nossas mais arraigadas convicções metafísicas sobre como o mundo é feito?” (p. 123). Pois, realmente, lendo o livro chegamos exatamente a esta dúvida: por que o experimento apontado nos primeiros capítulos tem a ver com filosofia e com toda a nossa visão de mundo? Essa dúvida incomodou o pró-



prio autor. Mas a resposta começou a surgir organicamente ao decorrer do livro: “E o que são as nossas mais arraigadas convicções metafísicas senão, também elas, algo que nos acostumamos a considerar verdadeiro, precisamente manipulando pedras e pedaços de madeira?” (p. 124). Rovelli quer mostrar para os leitores que não só agora pequenos experimentos são tão importantes. Eles sempre foram. E nos acostumamos com coisas absurdas que hoje em dia nos parecem simples.

Avançando mais um pouco, o livro aborda novamente interpretações feitas no capítulo “Emaranhamento” (p. 87–92), dizendo que elas parecem apenas esforços para comprimir as descobertas nos preceitos de Física que já conhecemos. Por isso, Rovelli acredita que tenhamos que adaptar nossa filosofia a nossa ciência, e não o contrário. Não adianta separar as coisas, voltando à indagação anterior. Não existem fenômenos quânticos em laboratório e fenômenos não quânticos em outros lugares: todos os fenômenos são quânticos. Por meio das análises de Niels Bohr, um dos maiores expoentes da teoria quântica e formulador de um modelo-padrão de abordagem dos *quanta* conhecido como Interpretação de Copenhague, Rovelli chega a uma conclusão: “Enquanto antes pensávamos que as propriedades de qualquer objeto eram determinadas mesmo que não levássemos em conta as interações em curso entre esse objeto e os outros, a física quântica nos mostra que a interação é parte inseparável dos fenômenos” (p. 126–127). Destaca-se aqui que essa ideia é radical. Os fenômenos são ações naturais de uma parte do mundo natural sobre outra parte do mundo natural. “Confundir essa descoberta com algo que tem a ver com nossa mente é o erro de Lênin: na polêmica com Mach, o dualista é ele, que só sabe conceber fenômenos relativos a um sujeito transcendente” (p. 127). A mente, portanto, não tem nenhuma importância. Não é possível separar o observável e o objeto. O que importa é a relação entre eles. O autor finaliza o capítulo reforçando como é desafiante essa concepção: ele crê que foi isso que descobrimos do mundo com os *quanta*.

### **Naturalismo sem substância**

É interessante como tudo se amarra neste pequeno capítulo intitulado “Naturalismo sem Substância” (p. 123–127). O experimento dos primeiros capítulos é referido novamente e relacionado à “dança a três que tece as relações do mundo” (p. 94–96). E, por fim, retoma-se a filosofia de Mach para enfatizar a importância verdadeira das relações. E como a relacionalidade difere da física clássica, na qual objetos têm propriedades definidas. Tudo isso coeso — nos mínimos, diversos detalhes. No entanto, ainda assim

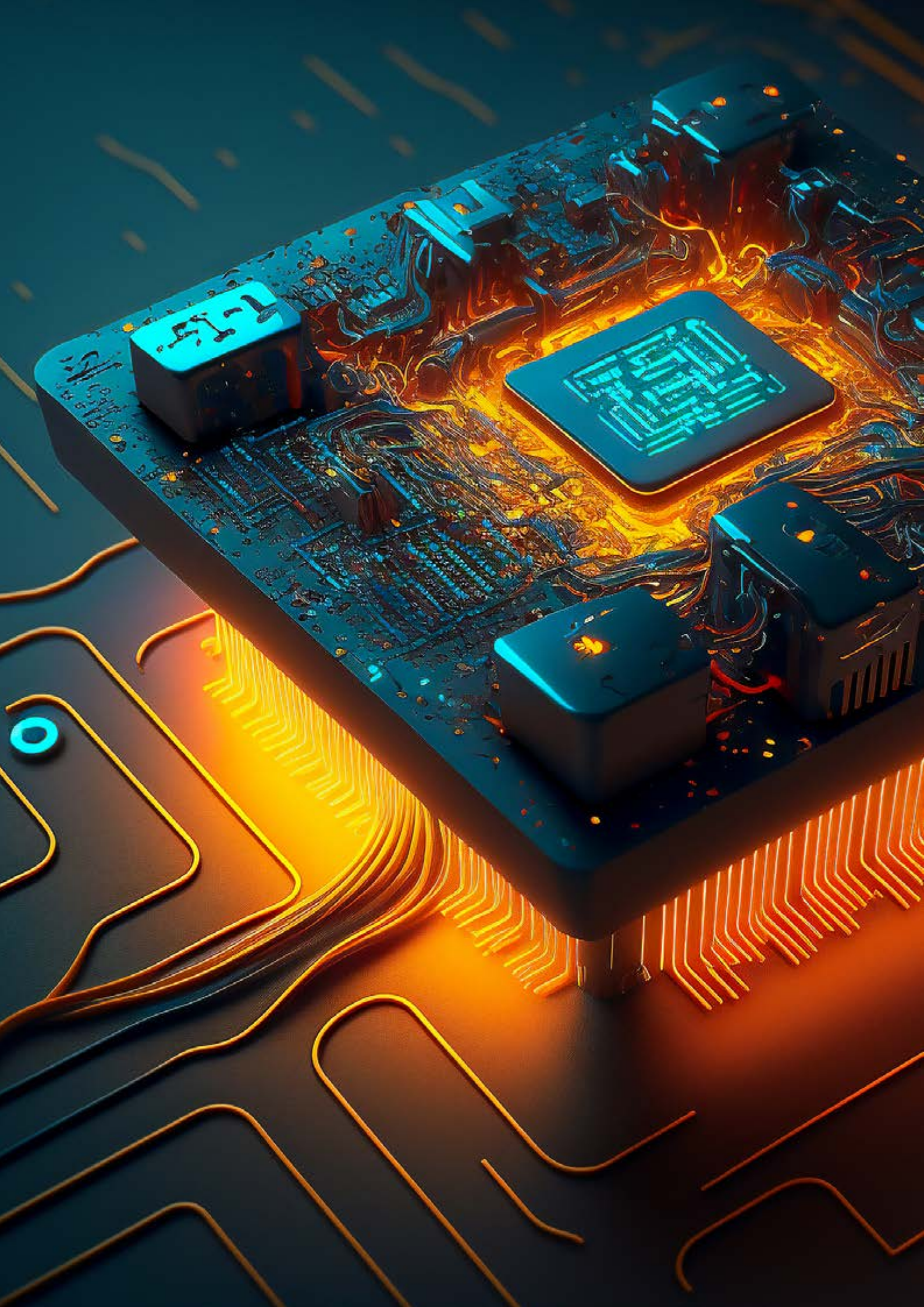
compreensível pela forma a partir da qual Rovelli aborda esses assuntos, retomando sempre conceitos mencionados direta e indiretamente.

Como David Hume fizera na filosofia séculos antes, Mach, nesse caso, tenta transformar as sensações em fundamento. Rovelli diz que Mach criticava a metafísica, mas, no fim, acaba criando uma metafísica própria, mais leve e mais flexível — porém, ainda assim metafísica. Para aprofundar essa reflexão acerca da metafísica e de sua inviabilidade, acrescenta um relato pessoal. Descreve o encontro com um texto do filósofo budista indiano Nāgārjuna (c. 150–250 d.C.) que o deixou admirado. Um autor e um texto orientais e bastante antigos e que foram capazes de lhes trazer um frescor nesse âmbito da física quântica. Os textos de Nāgārjuna são poucos conhecidos no Ocidente; porém, são um pilar essencial para a filosofia indiana. E lhe deram uma nova perspectiva enriquecedora. O que realmente nos interessa em seus textos não é o que Nāgārjuna queria dizer inicialmente: é o que o texto pode nos sugerir hoje. A tese central do livro de Nāgārjuna é que “não existem coisas que têm existência em si, independentemente de outra coisa” (p. 134). Obviamente, Nāgārjuna não tinha como saber da teoria quântica. Mas o ponto essencial aqui é que “filósofos nos oferecem maneiras originais de pensar o mundo, e nós podemos nos servir delas caso nos sejam úteis” (p. 134). A perspectiva dele, no caso, facilitou a compreensão do que Rovelli tenta transmitir em seu livro. Nāgārjuna sugere que a substância última não existe, o que difere bastante da filosofia ocidental, quase toda organizada em torno da chamada metafísica substancialista.

Destaca-se a palavra “talvez”, uma vez que ela evidencia a opacidade desses conceitos apresentados, lembrando sempre ao leitor de que se trata de um assunto em que não há uma compreensão absoluta. Seguindo a lógica construída por todos os capítulos, a obra sugere que o mundo é relação. Não é possível uma descrição do mundo fora dele. Se não existe nada fora do universo, como seria possível pensar um observador externo ao cosmos? Intrigante dilema que levou David Bohm, um dos físicos eminentes do século XX, a desenvolver uma das interpretações mais singulares da quântica, baseada no princípio do potencial quântico. Desse modo, todas as descrições e percepções que temos do mundo são interiores. Mas inteiras a quê? E interiores a quem? Essa é a longa e pedregosa estrada que conduz aos debates contemporâneos entre a teoria quântica, a filosofia da mente e as teorias da consciência.

Quanto a Rovelli, não se refere apenas à física quântica. Refere-se ao conhecimento humano e como esse conhecimento, ao mesmo tempo que nos ensina, nos aprisiona. Por isso, para Rovelli, o questionamento atual

sobre a consciência, sobretudo a partir de linhas que defendem uma separação entre matéria e mente, e, por conseguinte, uma divisão de estudos por ciências estabelecidas, parece não ter sentido. “Para a natureza, esse é um problema resolvido. Tudo o que nos resta a fazer é entender como ela faz isso” (Banks, *apud* Rovelli, p. 164). A obra é finalizada de maneira poética com a comparação entre a maneira pela qual nossa visão funciona (literalmente, o olho) e a construção do saber humano. Rovelli parece não se incomodar com a opacidade da teoria quântica: pelo contrário. São todas as indeterminações que emergem dela que a tornam tão rica e revolucionária, não só dentro do âmbito da física. Dedicar-se sistematicamente à aceitação de todas essas indeterminações. É essa atitude que o diferencia como autor. Esse olhar para o abismo vertiginoso da física quântica, sem o medo de ser sorvido e sem a tentativa de erradicar a sua opacidade.



## Diretrizes para autores – TECCOGS

A *TECCOGS – revista digital de tecnologias cognitivas* é um periódico do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD) da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). As edições são semestrais e exclusivamente digitais, disponíveis em [pucsp.br/pos/tidd/teccogs](http://pucsp.br/pos/tidd/teccogs).

A **TECCOGS recebe artigos e resenhas de doutores ou de especialistas, mestrandos, mestres e doutorandos em coautoria com doutores.**

**Título, subtítulo, resumo** (com no mínimo 1000 e no máximo 2500 caracteres com espaços) e **palavras-chave** (de três a seis termos) do artigo deve aparecer em português ou espanhol (caso o artigo esteja escrito nessa língua) e, logo em seguida, traduzidos para o inglês.

O(s) **nome(s) do(s) autor(es)** deve(m) estar logo abaixo do subtítulo do artigo, acompanhado de uma nota de rodapé (escrita em fonte *Times New Roman* tamanho 11 pt, espaçamento simples) contendo currículo e biografia (formação, vínculo acadêmico, área de atuação e e-mail) com, no máximo, cinco linhas.

Cada artigo deve possuir no mínimo 20.000 e no máximo 50.000 caracteres com espaços.

Resenhas devem possuir no mínimo 8.000 e no máximo 13.000 caracteres com espaços.

O **corpo do texto** deve ser configurado em fonte *Times New Roman* tamanho 12 pt, espaçamento 1,5 linhas, parágrafo alinhado à esquerda, sem hifenização. **Citações diretas com quatro linhas ou menos** devem aparecer entre aspas (“”) incorporadas ao corpo do texto, indicando a fonte entre parênteses no modelo “(SOBRENOME [em maiúsculas], ano de publicação, p. [número da página])”, conforme a Norma Brasileira (NBR) 10520 (ago. 2002) da ABNT.

As **citações diretas com mais de quatro linhas** devem ter recuo à esquerda de 4 cm, sem aspas, com fonte *Times New Roman* tamanho 11 pt, espaçamento simples, parágrafo justificado e sem hifenização.

**Imagens** (fotografias, ilustrações, diagramas, tabelas, gráficos) precisam ter resolução de, no mínimo, 100 dpi/ppi (*pixels* por polegada) e devem estar integrados ao corpo do texto, com imagem e legenda centralizadas e fonte especificada (para imagens da *internet*: “Disponível em: “<site>”. Acesso em: “dia mês abreviado ano”).

O texto deve respeitar o **Novo Acordo Ortográfico da língua portuguesa**, vigente desde 2009. De acordo com a Base XIX da Nova Ortografia, termos como “Inteligência Artificial”, “Psicologia Cognitiva”, “Informática” e “Filosofia” (quando se trata da área de conhecimento) devem iniciar com maiúsculas. Segundo a política de direitos autorais da revista, os autores se responsabilizam pelos direitos de uso de todas as imagens.

Para elaboração de resumos, citações e referências, a revista segue as NBR 6023 (ago. 2002), 6028 (nov. 2003) e 10520 (ago. 2002) da ABNT. Não são permitidas notas de fim. Notas de rodapé devem ser usadas o mínimo possível, exclusivamente para adicionar observações pontuais, nunca para indicar referências bibliográficas. Em fontes da *internet*, a autoria do texto deve ser indicada entre parênteses, bem como o ano de publicação e endereço e data de acesso.

Todas as obras mencionadas nas referências devem estar citadas ao menos uma vez no texto e, do mesmo modo, toda e qualquer obra mencionada no texto deve constar nas referências.

A **TECCOGS** disponibiliza um arquivo formato .DOC que serve de *template* com instruções e exemplificações e estilos detalhados para escrever o artigo. [Baixe o modelo aqui](#).