

A FILOSOFIA DO ESPAÇO DE HANS REICHENBACH: EMPIRISMO, REALISMO E RELACIONISMO

HANS REICHENBACH'S PHILOSOPHY OF SPACE: EMPIRICISM, REALISM AND RELATIONISM

FILIFE PAMPLONA

Universidade de São Paulo / FAPESP, BRASIL

fpamplona@usp.br

<https://orcid.org/0000-0002-4865-8640>

DENNIS BESSADA

Universidade de São Paulo, Universidade Federal da Fronteira Sul, BRASIL

dennis.bessada@usp.br

<https://orcid.org/0009-0007-8248-414X>

Abstract. We propose in this paper a reassessment of Reichenbach's magnum opus, *The Philosophy of Space & Time* (1958 [1927]), with a particular emphasis on the first part of the work, devoted to the philosophy of space. First, it is necessary to understand the profound significance of the dual distinction between physical space and mathematical spaces (ch.2), and the role of coordinative definitions within the system of geometries (ch.3), in order to grasp the author's radical defense of the principle of geometric relativity (ch.4). Finally, we will examine his coordinative classification of space kinds and his defense of spatial three-dimensionality (ch.5). Questions: (a) In what sense does Reichenbach align with Poincaré's conventionalism, and in which aspects does he diverge? (b) What is the meaning of real geometry for Reichenbach, and how can we understand the concept of *real space* in his work? — Our conclusions are in favor of the relational perspective of physical space defended by the author. Furthermore, we will reclaim the importance of his legacy, purging it of deconstructive criticisms and continuing the developments made by Adolf Grünbaum.

Keywords: physical space • mathematical spaces • relationism • realism • conventionalism • coordinative method

RECEIVED: 01/03/2025

REVISED: 03/02/2026

ACCEPTED: 27/02/2026

1. Introdução

Em 2027, completarão 100 anos da publicação original da obra magna de Reichenbach — *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre* (*The Philosophy of Space & Time*). Para dimensionar a sua relevância, basta memorarmos as palavras de Max Jammer na história dos “Conceitos de Espaço”: “Originalmente publicado em 1927, o livro de Reichenbach (...) só ganhou fama depois de ter sido lançado em inglês, em 1958. Em 1977, ele foi chamado de “a maior obra da filosofia da ciência no século XX”.” (Jammer 2010 [1993], p.278). Quem considerou o livro de Reichenbach “a maior obra da



filosofia da ciência” no século anterior, ao ponto de defender isto publicamente, foi Wesley C. Salmon (1977), mas Jammer soube, de modo perspicaz, levar este veredito adiante em um período no qual a repercussão da obra se encontrava em crise. A edição referida é a estadunidense (Dover, 1958), traduzida pela esposa do autor, Maria Reichenbach, e por John Freund. Hans Reichenbach faleceu em 1953, logo, não testemunhou a ampla repercussão que seu trabalho alcançou, sendo esta edição a mais citada e, por consequência, tornou-se o texto padrão para o estudo da obra até a atualidade. Nela, há uma célebre introdução de Rudolf Carnap, na qual o próprio endossa as ideias defendidas no livro e o destaca entre os principais contributos da sua geração: “*Este trabalho foi um marco importante no desenvolvimento da concepção empirista da geometria. Na minha opinião, ainda é o melhor livro na área.*” (Carnap in Reichenbach 1958, p.vi)¹

A concepção empirista defendida por Reichenbach é radical e se afasta de qualquer iniciativa conciliadora em face das correntes neokantianas: a teoria do espaço intuitivo de Kant é rejeitada. A classificação dos tipos de espaço é reduzida à dual distinção entre *espaço físico* e *espaços matemáticos*: as geometrias se distinguem entre a *geometria física* (que investiga as propriedades do espaço físico “real”) e as *geometrias matemáticas* (que investigam os possíveis espaços matemáticos “ideais”). A perspectiva relacional e empirista do espaço físico se insere em uma forte interpretação realista e causal da física, na qual a causalidade desempenha um papel fundamental nas relações entre o tempo e o espaço: o tempo é *logicamente* anterior ao espaço. Em suma, eis algumas características principais do seu trabalho — um autêntico “divisor de águas” na Filosofia do Espaço.

O relacionismo de índole empirista, com base na teoria da relatividade geral, teve o seu auge entre as décadas de 1950 e 1970, especialmente pela mega influência de Reichenbach e do seu sucessor, Adolf Grünbaum (cujo tratado monumental se equipara em relevância: *The Philosophical Problems of Space and Time*, 1973 [1963]). Neste artigo, propomos uma releitura valorativa da obra de Reichenbach e antagônica à “leitura ortodoxa” estabelecida no final do século XX, por parte de autores críticos do convencionalismo empirista (como Michael Friedman) e defensores da perspectiva oposta (o *substantivismo*, como Lawrence Sklar e John Earman). Infelizmente, é comum cometer-se duas “injustiças” com o autor: a primeira é generalizá-lo como um “positivista lógico” (Bunge 2004 [1967] comete este erro diversas vezes e isso se propaga entre muitos filósofos da ciência); a segunda é reduzir sua interpretação do espaço físico a um “convencionalismo clássico” (nos moldes de Poincaré). Por ora, deve-se estar atento que ele não compartilhava do radicalismo antimetafísico do Círculo de Viena:² compreendê-lo como um empirista lógico é correto, mas como “neopositivista” é extremamente equivocado. Apesar de compartilhar da contundente crítica à doutrina kantiana, o autor jamais elevou sua crítica a um posicionamento antimetafísico geral. Pelo contrário, demarcou-se do positivismo por amplas razões,

e uma delas foi a sua defesa do *realismo*:

Não propomos expor aqui todos os detalhes envolvidos na decisão entre positivismo e realismo. Que seja simplesmente notado que uma série de outros argumentos ponderáveis contra o positivismo pode ser enumerada e que o autor decidiu a favor do realismo. Por outro lado, o positivismo e o realismo podem, em considerável medida, seguir um curso paralelo. (Reichenbach 1978 [1929], II, p.147)

Infelizmente, este “caminho paralelo” tolerado pelo autor legou para si uma série de más interpretações históricas. É preciso saber distinguir as particularidades do Círculo de Berlim (“A Sociedade para Filosofia Científica”, da qual Reichenbach foi fundador), das do Círculo de Viena (“A Sociedade Ernst Mach”, liderada por Schlick). Os dois movimentos partilhavam de algumas orientações em comum (expressas na criação da revista *Erkenntnis* e nos congressos da Ciência Unificada que promoveram), mas Reichenbach expressou por cartas a sua profunda decepção com a generalização errônea que ele e seu movimento sofreram ao serem identificados redundantemente com o movimento de Viena. A abordagem de Dieter Hoffmann (2008) destaca bem as epístolas de Reichenbach e nos ajuda a compreender tais contrastes. Em geral, a designação por “empirismo lógico” abarca melhor os aspectos em comum dos dois movimentos, mas quando nos referimos ao “neopositivismo” devemos nos restringir ao Círculo de Viena e sua orientação antimetafísica. Sobre o problema da natureza do espaço físico, a componente metafísica do pensamento de Reichenbach não pode ser ignorada (autores críticos ao positivismo lógico costumam fazer uma leitura “neopositivista” dele, equivocada).

A segunda “injustiça” que sofreu, a de ser reduzido a um “convencionalista clássico”, pode ser rebatida se ousarmos reler sua magna obra atentos à profundidade da perspectiva ontológica do espaço físico que ele defende. Primeiramente, é preciso ter atenção à sua dual distinção, separando com rigor a “dual natureza” do problema: com relação às *geometrias matemáticas*, Reichenbach é um convencionalista convicto e atualiza o posicionamento de Poincaré ao advento da teoria da relatividade geral, propondo algumas modificações mediante a sua interpretação empirista; mas com relação à *geometria física*, que ele compreende como a verdadeira “geometria do espaço real”, por que Reichenbach não admitiu uma interpretação puramente convencionalista? O que ele quis dizer ao defender a existência de uma real geometria do espaço físico?

Por ora, antecipamos essas inquietações como estímulo ao leitor e um convite: este artigo busca retomar o legado de Reichenbach para a audiência luso-brasileira, depurando-lhe das críticas desconstrutivas e lançando luz sobre o melhor de seus trabalhos. Esta retomada não tem como enfoque a sua filosofia da ciência em geral. Interessa-nos sobretudo o seu legado para a *filosofia da física*. Por muitos anos, Reichenbach foi visto como um autor “filosófico demais” para os físicos e “físico demais”

para os filósofos (a sua abordagem internalista da física matemática combinada com profundo conhecimento lógico e epistemológico é difícil de ser conciliada na formação de diversos pesquisadores). Após o século de Popper, Kuhn e Lakatos, podemos discordar do veredito de Wesley Salmon e reconhecer que houve trabalhos na filosofia da ciência cuja repercussão foi além dos de Reichenbach, voltados à abordagem filosófica da ciência em geral. Acreditamos que a relevância dele se sobressai enquanto filósofo da física; é nesta especialidade que a resiliência de sua obra supera a de seus pares. Por excelência, temos na sua *Filosofia do Espaço & Tempo* um modo de praticar a filosofia da física que é aspirado atualmente.

2. Espaço físico *versus* espaços matemáticos

A obra “The Philosophy of Space & Time” de Reichenbach é dividida em três unidades: a primeira se dedica à *Filosofia do Espaço*, a segunda à *Filosofia do Tempo*, e a terceira à *Filosofia do Espaço-tempo*. Neste artigo, focaremos na primeira. O seu ponto de partida é a questão do *relativismo geométrico do espaço*, inaugurada pelo advento das geometrias não euclidianas: trata da impossibilidade de se determinar *a priori* qual das geometrias matemáticas corresponde univocamente à geometria do espaço físico. Para Reichenbach, tal impasse divide de uma vez por todas a investigação sobre a natureza do espaço nos dois respectivos ramos do conhecimento: é necessário distinguir o problema dos espaços matemáticos do problema do espaço físico.

Enquanto houve apenas um tipo de geometria matemática aplicada ao sistema da física (a euclidiana), o problema da escolha das geometrias obviamente não existia — a matemática fornecia apenas um sistema de relações espaciais entre os objetos; a física, então, assumia os axiomas da geometria euclidiana como a estrutura “autoevidente” e necessária na abordagem do espaço físico; contudo, a análise dos fundamentos axiomáticos da geometria euclidiana — em particular, a tentativa de se deduzir o famoso quinto postulado de Euclides a partir dos demais axiomas — permitiu o desenvolvimento de outras geometrias consistentes sob o ponto de vista matemático. Diante deste novo quadro, uma vez que a geometria euclidiana deixa de ter uma validade universal apodítica, por que então dever-se-ia assumi-la como a “real” geometria do espaço físico?

Quando diferentes sistemas geométricos da matemática se provam consistentes e equivalentes para a descrição do sistema físico, não há critério *a priori* que determine qual deles é o correspondente — esta é uma questão que deve ser resolvida *a posteriori*, com base na experiência. Os espaços matemáticos são possibilidades teóricas cuja decisão de qual deles corresponde melhor ao espaço físico é uma tarefa da física (particularmente, da geometria física), com base em observações e experimentos; logo, trata-se de um conhecimento *a posteriori*. Na física anterior à Relatividade Geral, a geometria euclidiana era adotada como representante do espaço físico; con-

tudo, como Reichenbach deixará claro em sua obra — e que será desenvolvido neste trabalho nas seções posteriores — a escolha da geometria matemática dá-se por meio de uma *definição coordenativa*, e por meio desta deduz-se enunciados que podem ser confrontados com a experiência. Distintas definições dão origem a distintos enunciados físicos, e o enunciado físico que corresponderá à geometria “verdadeira” do espaço será aquele que melhor se adequar às medidas espaciais realizadas. Consequentemente, aquela pressuposição kantiana do espaço enquanto intuição *a priori*, condição de possibilidade dos fenômenos, é negada:

A matemática revela os espaços possíveis; a física decide qual deles corresponde ao espaço físico. Em contraste com todas as concepções anteriores, em particular com a filosofia de Kant, torna-se agora uma nova tarefa da física determinar a geometria do espaço físico, assim como a física determina a forma da Terra ou o movimento dos planetas, por meio de observações e experimentos. (Reichenbach 1958, p.6)

Na obra predecessora (*The Theory of Relativity and a priori Knowledge*, 1965 [1920]), Reichenbach defende que o método de análise crítica da razão elaborado por Kant deve ser suplantado pela análise lógica do conhecimento. O problema do método de Kant em oferecer uma análise crítica da razão é que isto sempre o leva ao critério de *autoevidência*, ou seja, de um conhecimento *a priori* que se pressupõe válido universalmente e independente da experiência, apreendido a partir da “pura intuição” — este seria o caso dos axiomas da geometria euclidiana. Para Reichenbach, os axiomas das geometrias matemáticas são *relações estabelecidas arbitrariamente*,³ portanto não são verdadeiros nem falsos; é o sistema teórico deduzido a partir deles que deve se provar consistente. Analiticamente, os teoremas são “verdadeiros” ou “falsos” mediante o critério lógico-dedutivo de consistência (trata-se da “verdade” como *coerência*).

O espaço físico, por sua vez, não está subordinado a nenhuma noção de espaço intuitivo, pelo contrário: são os espaços matemáticos que devem ser submetidos ao critério de validação empírica, que seleciona qual deles corresponde adequadamente à descrição do sistema físico. Neste caso, os axiomas da geometria matemática são válidos somente enquanto expressam relações fundamentais, e é a inserção de tal geometria na teoria física subjacente (seja a Relatividade Geral ou alguma alternativa) o que permite deduzir consistentemente resultados teóricos *correspondentes* à experiência; sem a validação empírica, os sistemas geométricos deduzidos a partir dos axiomas das geometrias matemáticas se limitam ao critério de consistência e não se pode inferir nada além disso.

Deve-se salientar que *corresponder* não significa *identificar* o espaço físico com uma das possíveis estruturas matemáticas — de acordo com o autor: “O espaço matemático é uma estrutura conceitual e, como tal, é ideal. A física tem a tarefa de coordenar

uma dessas estruturas matemáticas à realidade.” (Reichenbach 1958, p.287) — Não se deve confundir, portanto, a estrutura ideal de um espaço matemático com a estrutura real do espaço físico; o máximo que um modelo conceitual pode oferecer é uma melhor coordenação dos dados da experiência em comparação a outro modelo — o critério de “correspondência” se limita ao de “coordenação” entre teoria e experiência. Para Reichenbach é um claro equívoco identificar a estrutura do espaço físico com uma possível estrutura do espaço matemático — tal é o posicionamento “idealista” — e esta identificação implica em confundir a dupla natureza do problema; a física tem a tarefa de *coordenar* uma dessas estruturas matemáticas à realidade, o que não significa assumir algo ideal (a geometria matemática) como real (a geometria física).

Dando ênfase ao avanço experimental da física que impôs novas condições para o conhecimento científico, Reichenbach afirma que os princípios deste conhecimento devem ser determinados pela experiência, mas sua validade não depende apenas do julgamento de experiências particulares, sim da possibilidade de todo o sistema de conhecimento: “*A priori*’ significa ‘prévio ao conhecimento’, mas não ‘por todo tempo’ e nem ‘independente da experiência.’” (Reichenbach 1965, p.105). Ou seja, o que se entendia como um “conhecimento *a priori*” continua desempenhando um papel fundamental na construção de teorias, porém jamais é “autoevidente”, pois não valida uma verdade universal e independente da experiência; pelo contrário, é através dela que sua validade é alcançada com base no método coordenativo.

3. Definições coordenativas

Em que consiste essa tarefa de coordenação? Como é possível descrever a base factual a partir de modelos conceituais que não se identificam com a realidade, porém são capazes de coordenar os dados da experiência? Ao confrontar tais questões, Reichenbach introduz o papel das *definições coordenativas*, ferramenta central da sua epistemologia. Elas se diferem das *definições conceituais*, que são amplamente utilizadas em todos os ramos do conhecimento, e consistem em reduzir um conceito a outros mais elementares; exercem assim um papel explicativo e elucidativo, articulando o sistema de conhecimento com base em uma rede de conceitos definidos mutuamente (ou hierarquicamente). Um exemplo clássico se encontra nos axiomas da geometria: eles estabelecem as relações fundamentais entre os conceitos mais simples, a partir dos quais se constrói o sistema lógico-dedutivo que articula definições conceituais mais elaboradas. No caso específico da matemática, *todas* as definições encontradas são conceituais. Ao contrastar o conhecimento da matemática com o da física, Reichenbach alega que o conhecimento físico é caracterizado não apenas por definições conceituais, mas também por um tipo de definição mais elementar que consiste em estabelecer que um *conceito específico* está coordenado a um *objeto particular*: são as definições coordenativas.

Em geral, a coordenação entre experiência e teoria não é arbitrária — uma vez que os conceitos estão interligados por relações testáveis, a coordenação pode ser verificada como verdadeira ou falsa, desde que se adicione a ela o requisito de *unicidade*: ou seja, a regra de que o mesmo conceito deve sempre denotar o mesmo tipo de objeto — o método da física consiste em estabelecer a unicidade desta coordenação, mas para isso certas *coordenações preliminares* devem ser determinadas para que o método possa ser levado adiante; este é o papel das “definições coordenativas”, sendo que, enquanto “definições”, há arbitrariedade na sua escolha, mas delas depende o sistema conceitual que se desenvolve adiante.⁴ Reichenbach diferencia as *coordenações preliminares*, arbitrárias (fornecidas pelas definições coordenativas), das *coordenações verificáveis*, que podem ser testadas como verdadeiras ou falsas (dependem tanto das definições coordenativas iniciais quanto das definições conceituais que conduzem aos resultados teóricos); normalmente, as primeiras são relações empíricas básicas que fornecem as unidades de medida, regras e parâmetros experimentais necessários no princípio da construção teórica (o que justifica a arbitrariedade de sua escolha); já o segundo tipo de coordenação se estabelece, normalmente, na verificação experimental dos resultados previstos pela teoria.

Para ilustrar, o autor aborda algumas noções de medida espacial: utiliza o exemplo da definição conceitual de ‘unidade de comprimento’ para contrastá-la com a definição coordenativa de ‘metro’. A primeira é um conceito geral que só pode ser definido com base em outros conceitos (define-se o que é ‘unidade de comprimento’ com base nos conceitos de ‘distância’ e ‘medida’); entretanto, a unidade específica chamada *metro* é uma definição coordenativa, pois está coordenando um conceito específico a um padrão material também específico, fornecido pela instituição: *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) [mais conhecida como: *The International System of Units*, SI], cuja sede é em Paris. Note-se que tal padrão material é arbitrário, uma vez que outras unidades de medida de comprimento — como a ‘jarda’ e a ‘légua’, por ex. — ainda são empregadas; deste modo, não faz sentido dizer que “um *metro* é mais verdadeiro que uma *jarda*”, já que se trata aqui de definições arbitrárias. Contudo, uma vez estabelecida por definição a unidade de comprimento, todas as medidas subsequentes referir-se-ão a ela, e assim os enunciados delas decorrentes poderão ser testados como “verdadeiros” ou “falsos”.

Dentre as definições coordenativas aplicadas ao estudo do espaço físico, temos as relações métricas estabelecidas pelo SI: atualmente, o ‘metro’ é definido como “o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299.792.458$ de segundo” (BIPM, 2019, p.131); por sua vez, o ‘segundo’ é definido como “ $9.192.631.770$ períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio-133” (Reichenbach 1958, p.130), já a velocidade da luz no vácuo, c , é definida conceitualmente como uma constante universal de valor exato ($c = 299.792.458$ m/s). Analogamente, todas as

demais unidades de medida também constituem *definições coordenativas métricas*, fornecidas pelo SI: o quilograma (kg , unidade de massa), o ampere (A , unidade de corrente elétrica), o kelvin (K , unidade de temperatura termodinâmica), entre outras. Reichenbach enfatiza a importância deste tipo de definição, pois a construção teórica, a seu ver, depende de tal coordenação tanto no seu “ponto de partida” quanto na sua “linha de chegada”.

A experiência deve estar na base da construção das teorias e também no seu critério de validação final, conseqüentemente, os resultados teóricos são sempre relativos às definições coordenativas que foram assumidas inicialmente. É de suma importância a tarefa epistemológica de saber distinguir quais definições têm fundamento empírico e quais são puramente conceituais, quais coordenações são verificáveis e quais são arbitrárias. Um dos méritos da teoria da relatividade, segundo o autor, foi o de demonstrar a necessidade das *definições coordenativas métricas* em muitas relações que antes eram assumidas previamente, como pressuposições teóricas, sem recorrer aos experimentos: “... *pseudo-problemas surgem se buscarmos a verdade onde definições são necessárias. A palavra ‘relatividade’ pretende expressar o fato de que os resultados das medições dependem da escolha das definições coordenativas.*” (Reichenbach 1958, p.15)

Em seguida, Reichenbach trata do problema da comparação do comprimento em posições distintas no espaço. O processo de medida de comprimento de um dado objeto — a altura de um muro, por exemplo — compreende a comparação entre esta dimensão e o comprimento de uma barra rígida graduada, como uma régua. Para que a altura do muro em outro local seja medida com a *mesma* régua, faz-se necessário transportá-la até tal ponto, para então repetir o mesmo processo de comparação de comprimentos. Ora, neste transporte da régua está implícita a condição de que a régua não sofreu nenhuma alteração de comprimento; por que pensaríamos diferentemente? Neste quesito, Reichenbach nos chama a atenção para o seguinte ponto: como poderíamos *provar* que não houve nenhuma alteração do comprimento da régua? Se duas réguas têm o mesmo comprimento em um dado local no espaço, e se após serem transportadas para um lugar distante continuarem apresentando o mesmo comprimento, não seria essa uma prova de que não houve alteração de comprimento ao longo do transporte? Reichenbach afirma que não: a observação nos garante apenas que as réguas são iguais em comprimento no local em que são comparadas entre si. Se no ponto x_0 do espaço as duas réguas apresentam o mesmo comprimento quando comparadas, se mantivermos uma delas em x_0 e transportarmos a outra para o ponto x_1 , não poderemos dizer que esta tem o mesmo comprimento que aquela, já que a comparação de dimensões somente se pode fazer em um mesmo local do espaço. Por que as réguas não teriam o mesmo comprimento, mesmo estando distantes entre si?

Para responder esta pergunta, suponhamos a existência de uma *força universal* F que age igualmente sobre todos os corpos, e que varie segundo a distância; assim,

no exemplo dado, sob a ação de F a régua que foi transportada para o ponto x_1 teria um comprimento *diferente* da que ficou em x_0 ; como ambas se encontram em locais distintos do espaço, não poderiam ser comparadas, logo, não poderíamos distinguir tal diferença em seus comprimentos. Como F age igualmente sobre os demais corpos, não adiantaria comparar as dimensões entre o observador e a régua em x_1 , pois elas seriam igualmente alteradas; não saberíamos do mesmo modo se esta teve seu comprimento alterado. Para Reichenbach, então, o problema da *igualdade* de comprimentos de objetos em locais distintos do espaço não é *cognitivo*, mas sim depende de uma *definição*: “Para esse fim, deve-se utilizar uma *definição coordenativa*, uma vez que dois objetos físicos distantes um do outro são definidos como tendo o mesmo comprimento.” (Reichenbach 1958, p.16) Destarte, a *congruência* de objetos situados em pontos distantes do espaço — ou seja, a *igualdade de comprimento* entre eles — é também uma *definição coordenativa*.

Além das *forças universais*, Reichenbach introduz também o conceito de *forças diferenciais* (capítulo §6): uma força universal afeta todos os materiais com base em uma mesma lei geral e não é isolável (não é possível construir barreiras que anulem seu efeito), já o outro tipo não possui necessariamente estas duas características conjuntas. Com isso, forças diferenciais poderiam ser observadas quanto a seus efeitos, ao passo que as forças universais, não. Tal fato terá uma implicação fundamental no desenvolvimento das ideias do autor, conforme discutiremos na próxima seção.

4. A relatividade da geometria

Na seção §8 da obra, as consequências epistemológicas extraídas do *relativismo geométrico do espaço* são acentuadas. A questão de “qual geometria corresponde ao espaço físico?” é reavaliada sob um novo prisma: Reichenbach demonstra que a escolha da geometria deve ser coordenada à experiência, porém tal decisão não depende apenas da coordenação preliminar que associa a geometria ao sistema métrico experimental; há uma outra definição coordenativa implícita na teoria da relatividade geral, da qual o autor extrai consequências notórias – trata-se da relação entre a geometria e o campo de forças.

4.1. Congruência e campo de forças

Para compreender tal relação, tornemos ao exemplo dado pelo autor no capítulo “§3. O problema da geometria física”, ilustrado pelo seguinte esquema:

Considere G uma superfície imaginária feita de vidro, plana em quase toda sua gigantesca extensão, exceto em uma região onde se encontra um grande hemisfério. Por sua vez, E é uma superfície plana opaca, situada paralelamente a G , e que se

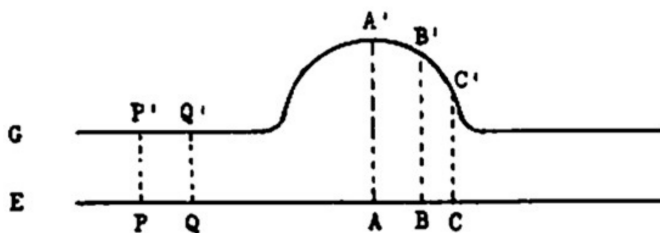


Figura 1: Projeção de uma geometria não euclidiana em um plano (Fig.2 in Reichenbach 1958, p.11)

encontra logo abaixo. Consideremos que G e E sejam mundos habitados por seres humanos, e que estes usem réguas rígidas para medidas de comprimento. Por hipótese, os habitantes do mundo G desconhecem os habitantes do mundo E (chamados de G -habitantes e E -habitantes, respectivamente), e não há nenhum observador externo aos mundos G e E ; ademais, as réguas empregadas tanto por uns quanto por outros estão conformadas à geometria euclidiana (a qual denotaremos por G_0). Dito isso, tanto os G -habitantes quanto os E -habitantes poderiam descobrir a geometria da superfície de seu respectivo mundo por meio de medidas feitas com o uso da régua: os primeiros verificariam que, devido a diferenças entre suas medidas e a geometria euclidiana bidimensional, o mundo G seria um imenso plano com um grande hemisfério em seu centro; já os segundos constatariam que o mundo E é plano. Pois bem, suponhamos agora que raios de luz incidam verticalmente sobre a superfície de vidro de G , e que as réguas usadas neste mundo projetem sombra sobre E ; assim, as distâncias $A'B'$, $B'C'$ e $P'Q'$ sobre G projetam sobre E sombras de comprimentos AB , BC e PQ , respectivamente. Para os G -habitantes sobre o hemisfério, suas medidas fornecem $A'B' = B'C'$, ao passo que as sombras projetadas sobre E satisfazem $AB \neq BC$. É válida também a relação $P'Q' = PQ$.

Consideremos agora a seguinte situação: uma misteriosa força universal F atua sobre o mundo E , alterando *igualmente* os comprimentos de todos os objetos que se movem sobre a superfície – réguas, instrumentos de medida, os corpos das pessoas –, de modo que, neste cenário, os E -habitantes, ao medirem as projeções das sombras das réguas de G sobre E , obtêm como resultado das medidas $AB = BC$ e, como na situação anterior, $P'Q' = PQ$, *exatamente* os mesmos resultados obtidos em G . A ação universal e equitativa de F sobre todos os corpos implica que as mudanças de comprimento não podem ser detectadas; deste modo, baseado apenas nas medidas realizadas, qual seria a conclusão aduzida pelos E -habitantes quanto à geometria de seu mundo? — Concluiriam que E seria um imenso plano com um hemisfério no centro, exatamente como em G , uma vez que os resultados das medidas são *iguais* em ambos os mundos. Ora, partimos do pressuposto que G era um plano com um hemisfério no centro, e E , um plano; agora, E ‘parece’ ser um mundo plano com

um hemisfério no centro, já que as medidas assim o indicam; porém, cingindo-nos *somente* nos resultados das medidas, poderíamos também inferir que é G que possui hemisfério ‘aparente’ em seu centro e E com um hemisfério ‘real’! Qual seria então a diferença entre G e E ? Eis aqui um problema: se a geometria do espaço físico é obtida a partir de medidas, e tais medidas podem ser alteradas mediante a ação de uma força universal F , como então podemos conhecer a ‘real’ geometria do espaço, dado que F não pode ser conhecida?

A solução dada por Reichenbach centra-se na questão da *congruência* que, tal como discutimos na seção precedente, é matéria de uma *definição coordenativa*. Assim, se os E -habitantes *definirem* a congruência $\underline{AB} = \underline{BC}$ (tal como se dá em G), a geometria de E é a de um plano com um hemisfério no centro, obtida empiricamente; caso definam de modo *contrário*, $\underline{AB} \neq \underline{BC}$, então a geometria de E é a de um plano, G_0 : “A forma geométrica de um corpo não é um dado absoluto da experiência, mas depende de uma definição coordenativa prévia; dependendo dessa definição, uma mesma estrutura pode ser denominada um plano, uma esfera ou uma superfície curva.” (Reichenbach 1958, p.18)

Para Reichenbach, do mesmo modo que a medida da altura de um objeto não constitui um número absoluto por si só, pois depende da escolha de uma unidade de comprimento, a forma geométrica de um objeto só pode ser determinada após uma definição prévia. Assim, sem fazer menção a uma definição coordenativa de congruência, não faz sentido afirmar que a geometria do mundo E é uma ou outra. A afirmação de que uma determinada geometria se aplica ao espaço, por si só, é destituída de significado; ela adquire sentido quando acrescentamos a definição coordenativa utilizada na comparação de comprimentos amplamente separados (a mesma regra se aplica à forma geométrica dos corpos). A sentença “a Terra é uma esfera” é uma afirmação incompleta e se assemelha à declaração “este cômodo tem sete unidades de comprimento”. Ambas as afirmações dizem algo sobre estados objetivos de coisas apenas se forem adicionadas as definições coordenativas assumidas, e tais sentenças devem ser modificadas caso se utilizem outras definições. Eis o que se entende por relatividade da geometria.

4.2. O princípio da relatividade geométrica

Há arbitrariedade na escolha de determinadas definições geométricas (são as *coordenações preliminares* necessárias); mas quando combinadas com as *coordenações verificáveis* (que testam as previsões teóricas com base nos dados experimentais), ambas fornecem declarações objetivas sobre a “geometria do espaço real”. Assim, por exemplo, se adotamos como *coordenação preliminar* a definição coordenativa métrica “um metro” para medidas de comprimento — note-se que esta é arbitrária, visto que poderíamos definir igualmente “um pé” como unidade de comprimento — logo, a

declaração “a sala tem sete metros de comprimento” é uma *coordenação verificável*, uma vez que pode ser confirmada ou infirmada por medidas. O reconhecimento de tal arbitrariedade permite Reichenbach combater velhos argumentos a favor da geometria euclidiana (o caso clássico) ou a favor de quaisquer geometrias, pois demonstra não haver uma única geometria verdadeira: “[...] *todas as geometrias devem ser equivalentes; formula-se o princípio da relatividade da geometria. Disto decorre que não tem sentido afirmar que uma dada geometria seja a verdadeira geometria* [do espaço físico].” (Reichenbach 1958, p.33)

O *princípio da relatividade da geometria* é o ponto fulcral na obra de Reichenbach. Podemos expressá-lo simbolicamente do seguinte modo: seja G' a geometria teórica adotada (coordenada ao sistema métrico do experimento), e F a força universal que atua sobre o sistema físico (que pode ser expressa como a causa das mudanças geométricas que identificamos no experimento); e, por fim, G é a “geometria resultante” do sistema físico descrito; ou seja, para uma dada geometria G' à qual se adiciona uma força F temos um sistema geométrico resultante G , dado pela fórmula:

$$G' + F = G.$$

Assim, o princípio da relatividade da geometria, expresso pela relação acima, mostra que nenhuma geometria matemática é “mais verdadeira” do que outra. Segundo Reichenbach, para obtermos uma afirmação sobre a realidade física do espaço, além da geometria G' adotada, também é preciso especificar o campo universal de forças F . As forças podem ser identificadas através das mudanças geométricas que causam: “Quando uma força existe? Por força entendemos algo que seja responsável por uma mudança geométrica.” (Reichenbach 1958, p.27). Tal relação pode ser expressa em termos da álgebra tensorial⁵:

A força F é um tensor no caso geral. Se $g'_{\mu\nu}$ são as componentes da métrica associada à geometria G' e $g_{\mu\nu}$ as de G , as componentes $F_{\mu\nu}$ da força F são dadas por

$$g'_{\mu\nu} + F_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}, \quad \mu, \nu = 1, 2, 3.$$

As réguas rígidas fornecem diretamente $g'_{\mu\nu}$; as componentes $F_{\mu\nu}$ são os “fatores de correção” por meio dos quais os $g'_{\mu\nu}$ são corrigidos de modo que resultem os valores $g_{\mu\nu}$. A força universal F que influencia a régua rígida depende usualmente da orientação espacial desta mesma régua. (Reichenbach 1958, p.33)

Os “fatores de correção” expressos nos coeficientes do tensor da força F são os que justificam as “mudanças geométricas” com relação ao sistema G' , resultando no sistema geométrico G . Normalmente, a força F atua em uma determinada direção, o que justifica a influência sobre a régua depender da orientação espacial em que se

realiza a medida. O interessante desta definição coordenativa é que a força universal pode ser expressa como um *fator de correção* a mais, ou pode ser descrita como uma força que atua diretamente na própria geometria resultante. Em outras palavras, podemos escolher uma dada geometria G' e acrescentar uma força F , ou podemos descrever esta força como parte da própria geometria resultante G (caso optemos por $F = 0$, a geometria resultante passa a ser aplicada diretamente no próprio sistema geométrico escolhido: $G' = G$).

Portanto, há diferentes *definições coordenativas geométricas* possíveis, entre as quais destacamos duas: (i) o exemplo clássico: pode-se adotar a geometria euclidiana como o sistema correspondente na abordagem do espaço físico ($G' = G_0$) e considerar que a força gravitacional — que é uma força universal — atua como um fator de correção ($F \neq 0$) no espaço euclidiano predefinido; daí o sistema geométrico resultante é descrito por: $G = G_0 + F$. Ou (ii) o exemplo da teoria de Einstein: pode-se considerar que a força gravitacional não atua como um fator de correção (não é uma “força a mais” entre os corpos no espaço), mas sim que ela se manifesta na própria geometria do espaço; neste caso, $F = 0$ e $G' = G$. Ressalte-se que $F = 0$ não significa dizer que a força gravitacional seja nula, mas sim que pode ser anulada *por definição* enquanto for tomada como “fator de correção”. Caso esta coordenação preliminar seja escolhida, o sistema geométrico resultante G coincide diretamente com a geometria G' adotada, assim o efeito da força gravitacional (causado pela distribuição de massa / energia dos corpos físicos) manifesta-se na própria métrica espacial resultante do sistema $G' = G$.

É com base nesta definição ($F = 0$, logo $G' = G$) que se pode declarar que a geometria resultante nas proximidades de corpos supermassivos, por exemplo, possui curvatura intrínseca diferente de zero, e é “não euclidiana”. Logo, a trajetória geodésica da luz sofre deflexão nas proximidades de campos gravitacionais muito intensos — e isto sim é uma declaração testável, passível de ser verificada experimentalmente, no caso, através de observações astronômicas. Testável, portanto, é a previsão teórica que se faz com base nas definições assumidas, o que envolve o modelo teórico que se está a propor.

4.3. Convencionalismo empírico

Reichenbach defende epistemologicamente a definição adotada por Einstein, não por ela conduzir à escolha da “geometria mais simples”, sim por se tratar da escolha da definição coordenativa mais simples (uma diferença sutil, mas muito significativa). A física não busca elucidar qual geometria é a mais simples, sim a *definição coordenativa* que possa ser a mais simples. Logo, a definição coordenativa $F = 0$ acaba por simplificar o sistema, pois através dela a expressão $G' + F$ se reduz a G' . Mas este não é um resultado essencial, uma vez que: “... simplicidade não é critério para a verdade.”

(Reichenbach 1958, p.34)

O autor reforça que o critério de simplicidade descritiva não valida uma geometria como “verdadeira”, pois não deve ser aplicado diretamente à escolha da geometria, mas sim à escolha das definições coordenativas; ainda assim, este não é um resultado essencial, pois trata-se apenas de uma convenção. Einstein demonstrou que a utilização de uma geometria não euclidiana às vezes pode simplificar a descrição do sistema físico; ganha-se complexidade na geometria, mas o sistema teórico da física é simplificado: *“Este resultado não havia sido antecipado, e Helmholtz e Poincaré ainda acreditavam que não era possível provar que a geometria obtida fosse diferente da geometria euclidiana.”* (Reichenbach 1958, p.36)

Com relação às geometrias matemáticas, não há “reticência” por parte do autor em aceitar o convencionalismo, desde que salvguarde o aspecto empírico (a escolha da geometria não é totalmente determinada pela experiência, mas também não pode ser independente dela: uma deve ser coordenada à outra). Até aqui, o foco dele não foi o problema da *geometria física* propriamente dita, sim a questão dos sistemas da geometria matemática que podem ser coordenados à experiência (sempre que a palavra ‘geometria’ for mencionada por si só, leia-se “geometria matemática”). O autor acentua o papel das definições coordenativas e reforça sua crítica com relação ao critério de simplicidade: *“O significado de tal simplicidade não deve ser exagerado; tal tipo de simplicidade, o qual denominaremos simplicidade descritiva, nada tem a ver com a verdade.”* (Reichenbach 1958, p.35)

A partir da escolha de determinadas definições coordenativas, afirmações sobre a geometria do espaço físico podem ser confrontadas com a experiência e verificadas se “verdadeiras” ou “falsas” — ou seja, a *coordenação verificável* depende da *coordenação preliminar*: entretanto, é a combinação de ambas, como vimos, que oferece uma declaração objetiva do mundo, no caso, da real estrutura do espaço. Reichenbach se “auto” demarca do convencionalismo por defender a possibilidade de um conhecimento objetivo sobre a natureza do espaço:

A partir do convencionalismo foi derivada como consequência a impossibilidade de se fazer uma afirmação objetiva acerca da geometria do espaço físico, e que, portanto, estamos a lidar com uma arbitrariedade subjetiva somente; assim, o conceito de geometria do espaço real ficou desprovido de sentido, o que é um equívoco. Apesar da declaração acerca da geometria basear-se em determinadas definições arbitrárias, a declaração em si mesma não se torna arbitrária: uma vez formuladas as definições, a **real geometria** é determinada por meio da realidade objetiva somente. (Reichenbach 1958, p.36-7)

Atenção: ao levarmos em consideração a abordagem do próprio Poincaré sobre a *relatividade do espaço* (por exemplo, em “Science and Method”, 2003 [1913], pp.93-116), somado aos estudos contemporâneos que ajudam a esclarecer a fidedigna com-

preensão do seu convencionalismo (Paz & DiSalle 2014), é importante ressaltar que as consequências que Reichenbach extrai da *sua* leitura do convencionalismo são distintas das de Poincaré, das quais Reichenbach deseja se “auto” demarcar. Quão melhor se compreende ambos, mais se reconhece que Reichenbach (1958 [1927]) é “pró-Poincaré”, e não o contrário (como talvez ele mesmo pensasse). A necessidade de se demarcar da linhagem do mestre francês não provinha da sua concepção das *geometrias matemáticas* (em parte, muito alinhada), sim da *geometria física*, pois Reichenbach leva adiante a perspectiva relacional do espaço físico para uma interpretação realista e causal⁶ — isto sim o diferencia de Poincaré e faz com que seja “reducionista” toda tentativa de compreendê-lo como puro “convencionalista”, ou julgar que seu “relacionismo ontológico” deriva do seu parcial “convencionalismo epistemológico” (conforme julga erroneamente Friedman 1983, p.304) — antes de tudo, Reichenbach é *relacionista* porque é *empirista* — neste sentido, aproxima-se epistemologicamente mais de Mach⁷ do que de Poincaré.

Eis chegado o ponto crucial que, em respeito à perspectiva do autor, é preciso saber distinguir rigorosamente a dual natureza do problema. O sistema de conhecimento pode se valer de convenções, mas isto não significa que todo ele se torne convencional. Reichenbach defende que a verdadeira geometria do espaço físico, seu conhecimento não é puramente “convencional”. É preciso levar a sério sua distinção para compreender o “porquê” de o autor defender o convencionalismo com relação às geometrias matemáticas — estas decorrem das definições coordenativas de congruência, como discutimos — mas não admiti-lo completamente com relação à geometria física, visto que a articulação entre as *coordenações preliminares* e as *coordenações verificáveis* fornecem declarações objetivas sobre a geometria do espaço físico. Isso significa dizer que são as medidas espaciais (sejam elas realizadas diretamente, mediante réguas rígidas, ou indiretamente, por meio de instrumentos ópticos) os fatores que determinam a “real” geometria do espaço.

Assim, escolhas são feitas inicialmente para abordar o experimento e haver coerência entre ele e o sistema teórico; ao final, as “coordenações verificáveis” testam as previsões teóricas lhes confrontando com os dados experimentais (as medições finais). O conhecimento objetivo defendido por Reichenbach assenta no fato de que, ao se estabelecer um padrão de medida, um sistema métrico e uma geometria correspondente, toda medida realizada nesse sistema expressa uma relação objetiva do mundo, uma comparação. Caso se realize a medida em outro sistema, a transformação de um para o outro deve ser preservada — o valor da medida muda de acordo com o sistema, mas a *relação* se preserva e deve ser compatível entre as diferentes formas de abordagem.

A relação espacial tem um caráter objetivo, e toda medida é feita com base em relações. Para o autor, é errado pensar que, por se adotar convenções, todo o sistema de conhecimento então assume um caráter convencional⁸. Neste sentido, julgamos que

a melhor interpretação da obra de Reichenbach foi fornecida por Grünbaum (1973). Embora tenha sido crítico à resistência do primeiro em aceitar o seu parcial “convencionalismo”, soube separar com rigor o aspecto físico da abordagem de Reichenbach do aspecto matemático do problema. Através disso, Grünbaum desenvolveu a sua tese mais promissora — a tese do *amorfismo métrico intrínseco do espaço* (que por fim fortalece a perspectiva de Reichenbach; e inclusive tal tese, em linhas gerais, já havia sido apresentada por Poincaré 2003 [1913], p.99). O espaço físico (relacional) não tem necessariamente forma métrica intrínseca alguma; ou seja, independente de poder ser estudado através de um *espaço métrico* específico, isto não significa que ambos se identifiquem. Pode-se atribuir ao espaço determinadas propriedades “topológicas”, mas a metrificação depende de estipulações arbitrárias, convencionais, sendo um erro achar que tais características se atribuem ao espaço — pertencem às decisões que tomamos na escolha do sistema métrico e da geometria teórica.

No contexto da teoria da relatividade geral, uma confusão muito comum pode ocorrer caso se interprete a gravidade como uma espécie de “força métrica” (“*metric power*”) que “distorce” ou “curva” a geometria do espaço-tempo; deve-se ter claro em mente que a gravidade não é uma “força métrica”, mas uma interação entre os corpos físicos que promove mudanças nas propriedades topológicas das relações espaciais entre eles — o tensor métrico $g_{\mu\nu}$, por si só, é apenas uma forma de expressar esta interação e seus efeitos nas relações “espaço-temporais”; tal “métrica”, conforme apontamos, depende sempre das definições iniciais que são adotadas.

5. Classificação coordenativa e espaço físico tridimensional

A classificação defendida por Reichenbach se reduz à dual distinção entre *espaço físico* e *espaços matemáticos*, centrada na radical diferença entre os dois tipos, o que permite esquematizá-la de modo que eles estejam diametralmente opostos um ao outro. Contudo, em tal classificação preserva-se as interconexões “cíclicas” estabelecidas pelo método coordenativo — método este que articula as relações entre experiência e teoria, entre o espaço real da física e os espaços ideais da matemática. Por um lado, a investigação experimental fornece as definições coordenativas; e, por outro lado, os espaços matemáticos fornecem os modelos de “espaços possíveis” para a coordenação dos dados da experiência.

A defesa pela dual distinção é possível mediante duas unificações: 1ª) o “espaço perceptivo” (fisiológico) não deve ser considerado um terceiro “tipo de espaço” a mais, propõe-se que seja incorporado ao “tipo físico”. Portanto, podemos entender o conceito de espaço físico enquanto *espaço real* (no seu significado ontológico), de modo mais abrangente; e ele pode ser conduzido tanto à abordagem *experimental* (da geometria física), quanto à abordagem *experencial* (os estudos da percepção espacial,



Figura 2: Classificação de Reichenbach dos Tipos de Espaço, com base no *Método Coordenativo*

conforme investigados por Helmholtz e Mach, por ex., e atualmente pelas Ciências Cognitivas⁹). 2ª) Os espaços matemáticos podem ser conduzidos tanto à abordagem axiomática formal (como no *formalismo* de Hilbert), quanto à abordagem da teoria das relações da lógica formal (o estudo do espaço formal, como no *logicismo* de Russell, seguido por Carnap). Para Reichenbach, os espaços matemáticos constituem os espaços formais, ao passo que o espaço físico (experimental) e o espaço perceptivo (experiential) constituem o espaço empírico: “*Não existe um terceiro tipo de espaço [além do formal/empírico]...*” (Reichenbach 1958, p.86).¹⁰

Deve-se atentar a três importantes aspectos da dual distinção: (i) o espaço físico é o “espaço real”, logo não está subordinado a nenhum modelo teórico ideal, pelo contrário, a abordagem experimental do espaço físico que valida tais modelos; (ii) os espaços matemáticos, estes sim puramente teóricos e ideais, englobam todos os modelos de espaços da topologia, da geometria projetiva e das geometrias métricas, *n*-dimensionais; (iii) todos os modelos de espaços matemáticos que se provam consistentes são “espaços *matematicamente* possíveis”, mas isto não significa que sejam “fisicamente correspondentes” — tal designação feita por Reichenbach se restringe aos modelos de espaços matemáticos que podem ser aplicados na investigação do espaço físico, ou seja, devem satisfazer a determinados critérios na tentativa de corresponder à experiência.

Nem tudo nas geometrias matemáticas tem aplicação prática na geometria física. Dentre os possíveis espaços matemáticos, qual (ou quais) deles pode(m) corresponder ao espaço físico? Quais critérios que a física deve empregar em prol desta decisão? — A obra é majoritariamente dedicada a tais questões, abordando tanto os critérios epistemológicos quanto os critérios físicos. Entre os critérios epistemológicos, um exemplo básico é o da *simplicidade descritiva* que, conforme abordamos, não se aplica

diretamente à escolha da geometria, sim à escolha das definições coordenativas que simplificam a descrição do sistema físico. Entre os critérios físicos, aqueles que assentam na experiência delimitam grande parte das possibilidades teóricas: muitos são os espaços possíveis fornecidos pela matemática, mas para a geometria física interessa apenas os modelos teóricos capazes de coordenar os dados da experiência, ou seja, os que fornecem uma representação válida e fisicamente correspondente ao “espaço real” — neste sentido, um critério físico que já exclui grande parte das possibilidades teóricas é o da *tridimensionalidade espacial*.

Ao compreender o espaço físico, empiricamente, como um sistema de relações entre os corpos físicos, segundo Reichenbach, a dimensionalidade também é uma característica fornecida diretamente pela experiência; não se deve confundir os modelos n -dimensionais dos espaços matemáticos, ideais, com a base factual das relações espaciais que, nas nossas escalas de observação, demonstram que a tridimensionalidade é um “*fato fundamental do mundo objetivo*” (Reichenbach 1958, p.279). Conclui-se que, entre os “espaços possíveis” da matemática, somente os modelos tridimensionais podem ser correspondentes. Basta este único critério para restringir grande parte das possibilidades teóricas; exclui todos os espaços matemáticos n -dimensionais, para $n \neq 3$. Não significa que tais espaços não tenham aplicação na física teórica, significa apenas que eles não correspondem ao espaço físico, logo não se aplicam à geometria física entendida como “a geometria do espaço real”, embora possam ser ferramentas úteis aos modelos teóricos.

Por exemplo, os espaços matemáticos uni- ou bi-dimensionais possuem notória aplicação teórica, pois no estudo de trajetórias aproximadamente retilíneas, superfícies, etc., eles podem representar teoricamente o sistema físico envolvido — mas isto deve ser compreendido precisamente como uma “simplificação teórica”. Objetos tridimensionais podem ser representados matematicamente em espaços com número maior ou igual de dimensões ($n \geq 3$), portanto modelos espaciais cuja dimensionalidade é superior a três ($n > 3$) também podem ter aplicação na física teórica, entretanto, isto não deve ser compreendido como uma representação correspondente ao espaço físico. Reichenbach utiliza outro exemplo para elucidar tal questão: o “espaço paramétrico $3n$ -dimensional” — termo pouco usual, mais comumente designado por “espaço de configurações”, mas define bem a sua natureza teórica: “... *consideramos o espaço paramétrico meramente uma ferramenta matemática sem referência objetiva, ao passo que concebemos o espaço tridimensional como o espaço real.*” (Reichenbach 1958, p.275)

O autor ilustra com um exemplo básico da termodinâmica, no qual a descrição teórica do estado físico de um gás (uma nuvem de n moléculas) pode ser feita a partir das três coordenadas espaciais de cada uma das n moléculas, ou através de n pontos no espaço paramétrico $3n$ -dimensional. Ambas as descrições são equivalentes, pois podem ser “traduzidas” uma na outra, entretanto, Reichenbach enfatiza que o espaço

paramétrico é apenas uma ferramenta matemática, pois considera tridimensional o *espaço real*. Embora reconheça que os objetos 3D possam pertencer matematicamente a espaços de dimensões maiores que 3, fisicamente a tridimensionalidade espacial só poderia ser colocada em causa caso algum experimento demonstrasse a existência de dimensões extras ($n > 3$).

Espaço físico distinto do Espaço-tempo. A tridimensionalidade espacial também é um dos critérios básicos que torna evidente a diferença entre o espaço físico 3D e o espaço-tempo 4D. Tanto na formulação de Minkowski (na teoria da relatividade especial) quanto na formulação de Einstein (na teoria da relatividade geral), não se deve confundir a representação matemática do “espaço-tempo” diretamente com o espaço físico; isto recairia no mesmo erro discutido anteriormente, de considerar algo abstrato como real. O “espaço-tempo” é, para Reichenbach, uma poderosa ferramenta matemática; antes de se atribuir significação física a cada uma das quatro coordenadas (x, y, z, t), trata-se puramente de modelos de *espaços matemáticos quadridimensionais*, construídos a partir de diferentes estipulações métricas. A significação física espacial é atribuída apenas às três coordenadas espaciais — (x, y, z) — estas são abordadas pela *geometria física*, enquanto a coordenada temporal t está relacionada experimentalmente à *cronometria*.¹¹

6. Conclusões

Neste trabalho, defendemos o ponto de vista do próprio autor nos seguintes aspectos: (1) deve-se respeitar a sua separação da dual natureza do problema; ter um posicionamento convencionalista com relação ao papel das geometrias matemáticas não caracteriza a sua interpretação da geometria física também como um conhecimento puramente convencionalista; (2) o *princípio da relatividade da geometria* adquire na obra um sentido **libertador**: não mais o espaço físico está condicionado a corresponder apenas a um espaço matemático possível, pelo contrário, há múltiplos espaços possíveis e nenhum deles é “mais verdadeiro” que outro. Adotar uma geometria matemática não encerra o problema da geometria física, apenas dá início à sua investigação:

- a) Por um lado, há o aspecto teórico e instrumental do problema, que lida com a escolha da geometria matemática G' coordenada ao sistema métrico — trata-se de uma decisão puramente convencional, associada também à def. coordenativa geométrica ($G = G' + F$). Por esse lado, com relação ao papel das geometrias matemáticas, pode-se compreender Reichenbach como um “convencionalista empírico” (reformula o convencionalismo de Poincaré e tem uma postura crítica com relação ao critério de simplicidade descritiva, mas não promove uma ruptura, sim o seu aprimoramento).

- b) O segundo e mais relevante aspecto é o que se aprofunda na “outra natureza do problema” — “Qual a verdadeira geometria do espaço real?” — eis o que interessa a Reichenbach. Uma vez que o *princípio da relatividade geométrica* atesta que nenhuma geometria matemática é a “verdadeira”, o espaço físico jamais deve ser identificado com a estrutura ideal dos espaços matemáticos; a resposta assenta nas complexas relações espaciais da experiência.

Portanto, Reichenbach se aproxima mais de Poincaré com relação ao papel das geometrias matemáticas. Já o relacionismo empirista de Reichenbach se aplica ao conceito de espaço físico, objeto de estudo da geometria física; por este lado, Reichenbach se aproxima mais de Mach (conforme abordamos na nota 7). Deve-se compreender que o autor encara o problema das geometrias matemáticas como diferente do problema da geometria física, e para cada um desses ramos ele apresenta um posicionamento diferente, embora de modo complementar um ao outro.

Ao questionar a natureza do espaço e sua “verdadeira geometria”, o autor transgride o patamar científico e epistemológico de investigação para se aprofundar na perspectiva ontológica do problema: inaugura a sua *teoria realista e causal do espaço físico relacional*, associando as propriedades da ordem espacial à ordem temporal e, por fim, ao conceito de série causal (eis o ápice da obra, no qual Reichenbach vai ao encontro das ideias de Leibniz — tema que esperamos explorar em futuros artigos¹²). Relacionismo, realismo e causalidade compõem o referencial metafísico que o autor se vale ao enfrentar corajosamente o problema do espaço físico; julgá-lo como um puro “convencionalista” é mais do que injusto, trata-se de um reducionismo atroz praticado por aqueles que tentaram ofuscar o ímpeto filosófico da sua magna obra, geralmente motivados por orientações metafísicas e epistemológicas adversárias (basta-se antever o idealismo neokantiano de Friedman ou o substantivismo por parte de Sklar e Earman).

A “relatividade da geometria” se expressa justamente no fato de que os resultados das medidas dependem da escolha de definições coordenativas, ou seja, são “relativos” a elas. Reichenbach defende uma articulação indissociável entre o relativismo geométrico e o empirismo com a perspectiva relacional do espaço: o caráter objetivo do mundo físico nos é fornecido através das relações; as medições físicas são sempre relativas; o espaço físico enquanto objeto de experiência jamais é absoluto e independente dos objetos físicos, pois somente através das relações entre os corpos físicos é que podemos investigá-lo. Conclui-se que o espaço físico, do ponto de vista empírico, é relacional; as geometrias matemáticas são interpretadas apenas como “linguagens” que abordam de diferentes maneiras o sistema de relações espaciais; é justamente a consciência do relativismo dessas “linguagens” que permite inferir o conhecimento objetivo do espaço físico, não a partir de modelos matemáticos ideais, mas com base nas relações espaciais da experiência:

O caráter objetivo do enunciado físico assume, então, a forma de um enunciado relacional. [...] Há um enunciado objetivo similar acerca da geometria do espaço real: trata-se da relação existente entre o universo e os corpos rígidos. A geometria escolhida para caracterizar esta relação é tão-somente um modo de expressão; contudo, nossa consciência acerca da relatividade da geometria nos habilita a formular o caráter objetivo de um enunciado da geometria do mundo físico como um enunciado sobre relações. É neste sentido que nos é lícito falar de uma geometria física. (Reichenbach 1958, p.37)

O espaço real é entendido como o sistema de relações entre os corpos físicos, relações estas empíricas e nomeadamente “espaciais” — a geometria física investiga tais relações através dos atributos da extensão, localidade, escala, posição, movimento, ordem e situação — todos estes conceitos compreendidos a partir das relações dos objetos físicos entre si. Para um empirista como Reichenbach, não faz sentido inferir os atributos da espacialidade a partir de uma entidade abstrata, “inexperenciável”, supostamente substancial, absoluta e independente, na qual os objetos “ocupam” e em relação à qual possuem seus atributos “espaciais” — uma espécie de “palco absoluto” e “fantasmagórico”, à margem da experiência sensível.

Reichenbach segue lançando luz na discussão sobre a “real” natureza do espaço. Tornou-se lugar comum, mesmo entre os físicos, de considerar que “a matéria curva o espaço-tempo”, e como justificativa para tal enunciado aponta-se que: (i) a variedade espaço-temporal cuja métrica é solução das equações de Einstein, associada com dado conteúdo de matéria e energia que caracteriza certo fenômeno, apresenta curvatura não-nula; (ii) as observações corroboram as previsões teóricas para tal fenômeno; logo, destas premissas conclui-se que o espaço-tempo “real” (na presença de matéria / energia) é curvo. Aqui há uma confusão entre as propriedades matemáticas de uma estrutura ideal (a variedade matemática) e as propriedades ontológicas do espaço: atribui-se as primeiras às segundas, indevidamente. A análise percutiente de Reichenbach faz exatamente a clivagem entre as estruturas ideais das variedades (os espaços matemáticos) e o espaço físico. Portanto, não se pode confundir um com o outro; a geometria física simplesmente coordena os dados da experiência aos modelos teóricos e, como já discutimos acima, tal coordenação não é unívoca (há múltiplas possibilidades de representação).

Podemos ilustrar o que dissemos acima por meio do caso da deflexão gravitacional da luz na presença de corpos massivos. Os dados observacionais ditam que a luz segue uma *trajetória curva* nas imediações do Sol, mas *não que o espaço é curvo*. O espaço em si não é observável! Se afirmarmos que o espaço é curvo em decorrência das observações, novamente estaremos fazendo uma extrapolação para além dos limites da experiência. A geometria física resultante do método coordenativo tão somente dita as relações entre a luz e a massa do corpo celeste, mediadas pela interação gravitacional, e *não* que o espaço “real” é curvo (como vimos, no método coordenativo,

nenhuma geometria é “mais verdadeira” que outra). Dizer que o espaço se comporta como se fosse uma “substância” dotada de propriedades “elásticas” que se deformam na presença de massas, significa extrapolar o âmbito da experiência.

Ademais, a abordagem do autor é aberta e propícia de ser melhor desenvolvida adiante; afinal, a *relatividade da geometria do espaço físico* traz em seu bojo, como possibilidade, eventuais revisões que se façam necessárias à medida que novos dados observacionais, a serem obtidos de futuros empreendimentos astronômicos, vierem à lume. Estes últimos irão refinar as definições coordenativas, pois trarão, em tese, novos elementos para se justificar esta ou aquela escolha no que concerne à coordenação de medidas a objetos físicos. Por fim, a perspectiva relacional de Reichenbach foi aprimorada por Adolf Grünbaum e, no nosso entender, segue sendo uma formulação profundamente fértil para levarmos a investigação sobre a natureza do espaço físico adiante; o que, indubitavelmente, insere a sua obra no rol das mais relevantes contribuições feitas à filosofia da física no século XX.

Referências

- BIPM. 2019. *Le Système international d'unités / The International System of Units (SI)*. 9e édition. Paris: Bureau International des Poids et Mesures.
- Bunge, Mario. 2004 [1967]. *La Investigación Científica. Su estrategia y su filosofía*. Trad.: Manuel Sacristán. 3ª ed., Buenos Aires: Siglo XXI Editores.
- Carnap, Rudolf. 2019. *The Collected Works of Rudolf Carnap, Vol. I: Early Writings*. Ed. by M. Friedman et al. New York: Oxford University Press.
- Carnap, Rudolf; Hahn, Hans; Neurath, Otto. 1986 [1929]. *A Concepção Científica do Mundo — O Círculo de Viena*. Trad. Fernando Pio de Almeida Fleck. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência [Publicações CLE, Unicamp]* 10: 5-20.
- Chibeni, Silvio. 1997. *Aspectos da Descrição Física da Realidade*. Campinas: Coleção CLE.
- Earman, John. 1989. *World Enough and Space-Time: Absolute vs Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press.
- Fraassen, B. C. 2015 [1970]. *An Introduction to the Philosophy of Time and Space*. Nousoul Digital Publishers.
- Frank, Philipp. 1941. *Between Physics and Philosophy*. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press.
- Friedman, M. 1983. *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton: at University Press.
- Grünbaum, A. 1973. *Philosophical Problems of Space and Time*. 2nd Ed. Dordrecht: D. Reidel.
- Helmholtz, Hermann von. 1977 [1921]. *Epistemological Writings* [Hertz and Schlick Centenary Edition]. Trans. M. F. Lowe. Dordrecht: D. Reidel.
- Hoffmann, Dieter. 2008. The Society for Empirical/Scientific Philosophy. In: A. Richardson; T. Uebel (eds.), *The Cambridge Companion to Logical Empiricism*, p.41-57. New York: Cambridge University Press.
- Jammer, M. 2010. *Conceitos de Espaço: A História das Teorias do Espaço na Física*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto & Ed. PUC-Rio.
- Kant, I. 2013. *Crítica da Razão Pura*. Trad. A. Morujão. 8ª Ed. Lisboa: F. Cal. Gulbenkian.

- Mach, E. 1943. *Space and Geometry in the Light of Physiological, Psychological and Physical Inquiry*. Trans. T. McCormack. La Salle, Illinois: The Open Court Publishing Co.
- Maudlin, T. 2012. *Philosophy of Physics. Space and Time*. Princeton: at University Press.
- Pamplona, F. 2023. *Espaço & Meio Subquântico: A Filosofia do Espaço Físico à Luz da Hyperphysics*. Tese de Doutorado em Lógica e Filosofia da Ciência (PhD-FCTAS). Orientador: Prof. José Croca *et al.* Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10451/64194>
- Paz, M.; DiSalle, R. (eds.). 2014. *Poincaré, Philosopher of Science. Problems and Perspectives*. Dordrecht: Springer.
- Poincaré, Henri. 2003. *Science and Method*. Trans. F. Maitland. London: Thomas N&S.
- Reichenbach, Hans. 1928. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Berlin: Walter Gruyter & Co.
- Reichenbach, Hans. 1958 [1927]. *The Philosophy of Space & Time*. New York: Dover.
- Reichenbach, Hans. 1965 [1920]. *The Theory of Relativity and a priori Knowledge*. Berkeley, Los Angeles: University of California Press.
- Reichenbach, Hans. 1969 [1924]. *Axiomatization of the Theory of Relativity*. Berkeley, Los Angeles: University of California Press.
- Reichenbach, Hans. 1978. *Hans Reichenbach: Selected Writings 1909-1953. Vol. I and Vol. II*. Edited by Maria Reichenbach & R. S. Cohen. Dordrecht: D. Reidel.
- Reichenbach, Hans. 2006. *Defending Einstein: Hans Reichenbach's Writings on Space, Time and Motion*. Edited by S. Gimbel & A. Walz. New York: Cambridge University Press.
- Salmon, W. C. 1977. The Philosophy of Hans Reichenbach. *Synthese* 34(1): 5-88.
- Sklar, L. 1974. *Space, Time and Spacetime*. Berkeley and L.A.: Univ. California Press.
- Sklar, L. 2021. *A Filosofia da Física*. Trad. P. Galvão, P. Mateus e D. Murcho. RJ: Contraponto.
- Snapper, Ernst. 1979. The Three Crises in Mathematics; Logicism, Intuitionism and Formalism. *Mathematics Magazine* 52(4): 207-216.
- Wagner, Mark. 2006. *The Geometries of Visual Space*. Mahwah (New Jersey): Lawrence E.A.

Notas

¹Lembremos que Carnap, na juventude, defendeu uma teoria neokantiana dos tipos de espaço (*formal, intuitivo e físico*), em sua tese doutoral: *Der Raum: Ein Beitrag zur Wissenschaftslehre* [1922]. A Filosofia do Espaço foi tema central dos seus mais relevantes trabalhos no início da carreira (ver: Carnap 2019 [1922; 1924; 1925]). O interessante é ele ainda reconhecer a prevalência do trabalho de Reichenbach, mesmo três décadas após a sua publicação original.

²O Círculo de Viena foi um movimento extremamente plural que abrigava diferentes orientações e posicionamentos diante da metafísica; portanto, por “radicalismo antimetafísico” podemos entender o posicionamento expresso no famoso manifesto coletivo de Carnap, Hahn e Neurath [1929], atentos de que nem todos os membros do movimento partilhavam necessariamente desta mesma orientação (*e.g.* Frank 1941).

³Após apresentar a “Geometria como uma Teoria das Relações” (Reichenbach 1958, §14), o autor afirma explicitamente: “Portanto, a questão da verdade de um axioma não surge na geometria matemática. Axiomas são relações estabelecidas arbitrariamente...” (Reichenbach 1958, p.100)

⁴A requisição de unicidade que Reichenbach está a tratar não deve ser confundida com a noção de unicidade associada à evolução temporal de um sistema físico. Nesta parte da obra, tal unicidade se refere tão somente à coordenação de um conceito a um objeto particular, por meio de uma definição coordenativa (por ex., o conceito de *metro* deve sempre se referir ao mesmo padrão definido pelo BIPM). Esta requisição é comum a todas as áreas da física que articulam conceitos teóricos a objetos de experiência. Já o requisito de unicidade ligado à evolução temporal de um sistema físico é necessário ao determinismo da física clássica e comum à mecânica relativística. Contudo, o mesmo não vale para a física quântica, visto que o determinismo se aplica somente à evolução temporal da função de onda do sistema, e não para os resultados observáveis que são probabilísticos.

⁵Grande parte do aparato lógico e matemático subjacente às ideias defendidas em *The Philosophy of Space & Time* é apresentado na obra predecessora: *Axiomatization of the Theory of Relativity* (1969 [1924]), o que a torna complementar e de suma importância. Trata-se de uma elegante e econômica exposição da teoria da relatividade a partir do enfoque empírico. Foi confrontada por H. Weyl, mas apreciada por Einstein e Max Planck (concebendo à Reichenbach uma indicação que lhe valeu o cargo de professor de filosofia natural na Universidade de Berlim, em 1926). Para uma abordagem histórica detalhada, consultar: *Defending Einstein* (editado por S. Gimbel & A. Walz 2006).

⁶O tema da causalidade em Reichenbach requer adentrar na 2ª parte de sua obra, dedicada à *Filosofia do Tempo*, portanto não será abordado neste artigo. Sobre o tipo de realismo que Reichenbach advoga, apesar das possíveis interseções, não se identifica com o “realismo científico” contemporâneo (como abordado por Chibeni 1997, cap.2); e também não recai em um “realismo transcendental” conforme criticado por Kant (*Crp*, A 369-370). Acreditamos que Reichenbach seja um *realista empírico* que nega toda e qualquer dualidade possível com o idealismo transcendental, mas isto é matéria para um artigo de discussão à parte.

⁷O empirismo de Mach (1943) precede o seu relacionismo, no sentido de que o conceito de “espaço físico” (na sua obra entendido como o espaço das “experiências métricas físicas”) é sobretudo um conceito experimental, não tolerando uma compreensão do mesmo à margem da experiência. Ora, a abordagem de Reichenbach segue um caminho análogo, ao identificar o significado ontológico do espaço físico “real” com seus possíveis significados físicos “experimentais” e “experienciais” — assim como Mach, Reichenbach não admite uma compreensão de tal conceito à margem da experiência. Logo, o espaço físico, por ser um conceito experimental, é relacional, pois é fornecido pelo sistema de relações da experiência.

⁸Este é um dos pontos de discórdia entre os críticos da sua obra; infelizmente, não cabe aqui uma abordagem exaustiva do problema. Pode ser encontrado no debate entre Schlick e Reichenbach (consta nos seus artigos e ensaios em “Selected Writings”, 1978); foi minuciosamente abordado por Grünbaum (1973) e amplamente explorado pelos críticos do convencionalismo, especialmente por Friedman (1983) e pelos defensores da perspectiva oposta, o substantivismo — dentre eles, os principais são Sklar (1974) e John Earman (1989).

⁹Uma excelente obra na interface entre a nossa abordagem e a das Ciências Cognitivas é: *The Geometries of Visual Space* (2006), de Mark Wagner. Ali se diferencia o espaço visual (experiencial) do conceito de espaço físico (experimental). Na classificação de Reichenbach, ambos pertencem ao tipo “físico” (empírico), mas seus conceitos podem ser diferenciados por pertencerem a abordagens distintas — o espaço físico *experiencial* (no qual o espaço visual se insere) e o espaço físico *experimental* (da geometria física).

¹⁰Entre 1930 e 1931, Kurt Gödel publicara os trabalhos sobre o *teorema da incompletude*, a partir de então uma crise se estabeleceu nos projetos de fundamentação da matemática (especialmente no programa formalista de David Hilbert); e, por outro lado, a ideia de que toda a matemática poderia ser incorporada à lógica (o programa logicista de Bertrand Russell) também encontrou seus limites. É preciso reavaliar em que medida este lado da distinção de Reichenbach permanece válido após as derrocadas dos programas logicista, formalista e intuicionista (Snapper 1979). Os espaços matemáticos e os espaços formais podem ser considerados do mesmo “tipo”? — Abordamos este problema em outro trabalho (Pamplona 2023, p.95-101), no qual reformulamos este lado da classificação, preservando a autenticidade do método coordenativo.

¹¹Foi ao longo do século XX que se tornou cada vez mais claro as múltiplas possibilidades de interpretação da relatividade geral e, mais adiante, encontramos no trabalho de Tim Maudlin (2012) uma ótima abordagem para compreender os diferentes *tipos de espaço-tempo*, tanto nos seus significados puramente matemáticos, como também no hodierno significado de “espaço-tempo físico”. No geral, a máxima que adverte — *não confundir o conceito de espaço físico diretamente com o de espaço-tempo* — é didaticamente prudente e válida, o que não significa excluir as possíveis relações entre tais conceitos. Caso se trabalhe com o conceito de “espaço-tempo físico”, aí sim pode-se considerar o *espaço físico* como pertencente a essa estrutura conceitual, e o mesmo procede com o *tempo físico* (ver: Maudlin 2012, pp.33; 63-65; 161).

¹²**Perspectivas Futuras:** estabelecidas as importantes distinções entre o espaço físico e os espaços matemáticos; entre o espaço, o tempo e o espaço-tempo; o autor aprofunda sua análise epistemológica nas relações entre tais conceitos, desenvolvendo sua teoria com base nas noções de *ordem* e *causalidade*: eis a *Teoria Causal do Espaço e Tempo* de Reichenbach. Nos limites deste artigo, convém abordá-la sucintamente, como um promissor convite ao leitor. . . Nada é mais fundamental nesta teoria do que o conceito de *série causal* (“causal chain”), isto o possibilita compreender a *ordem temporal* como consequência direta da causalidade: as relações ordenadoras de “anterior”, “posterior”, “coincidência” e “simultaneidade” dependem, em última instância, da estrutura causal entre os eventos. O espaço, consequentemente, também é compreendido com base na causalidade: sendo a velocidade da luz no vácuo c definida como uma constante universal de valor exato, as medições espaciais podem se reduzir a medições temporais (no caso, mede-se a distância percorrida pela luz em um determinado meio através do intervalo de tempo da sua propagação). Afirmar que um objeto está mais próximo ou distante está relacionado ao tempo de propagação causal da interação física que se estabelece com tal objeto (a unidade de comprimento que se aplica às distâncias astronômicas é um belo exemplo deste procedimento: o “ano-luz”) — a *ordem espacial* é estabelecida a partir da *ordem temporal* que, por fim, depende da *série causal* entre os eventos. É com base nesta compreensão que o autor afirma a máxima mais citada da sua obra: “. . . *Time is therefore logically prior to space. [. . .] The topological neighborhood relations of space are therefore reduced to temporal relations and thus to causal relations*” (Reichenbach 1958, p.169). Deste modo, o autor estabelece uma importante hierarquia entre os conceitos de *série causal*, *ordem temporal* e *ordem espacial*. A “ordem espaçotemporal” é dada pela relação de dependência da ordem espacial com a ordem temporal e, sobretudo, é delimitada para uma determinada escala (macrocósmica), tendo como fundamento primeiro a causalidade. A compreensão do “espaço físico” nesta perspectiva (empirista, relacional, realista e causal) torna-se ainda mais

particular por estar delimitada a uma determinada *escala espacial* de observação dos fenômenos. Esperamos tratar desses tópicos tão interessantes em futuros trabalhos, sobre a *Filosofia do Tempo* e a *Filosofia do Espaço-tempo* de Reichenbach.

Agradecimentos

F. Pamplona: ao Prof. José Croca, por ter orientado os primeiros passos desta pesquisa na Universidade de Lisboa, que contou com o apoio da Bolsa de Doutorado Pleno no Exterior da CAPES. Atualmente, o trabalho conta com o apoio da FAPESP, com base na Bolsa de Pós-Doutorado em curso na USP (no âmbito do projeto: 2025/07651-4).

D. Bessada: agradecimento à Universidade Federal da Fronteira Sul, pela concessão do afastamento para o Programa de Pós-doutoramento (PIACD, proc. nº 23205.033684/2025-91).

Os dois autores agradecem, em especial, ao Prof. Osvaldo Pessoa Jr., por ter nos apresentado um ao outro, além de viabilizar a continuidade desta pesquisa como supervisor do nosso *pós-doc* em curso, no Dpt. de Filosofia da FFLCH-USP.