

O “Espaço-Tempo” sob uma Perspectiva Realista

Parte 1

“Spacetime” from a Realist Perspective

Part 1

Adilson M. Gonçalo

Pesquisador Independente

ORCID: 0009-0007-4957-8355

goncalo.address@gmail.com

(30 de Agosto de 2026)

Resumo

Este artigo inaugura uma série dedicada ao tema *O “Espaço-Tempo” sob uma Perspectiva Realista*. O objetivo da série é realizar uma análise crítica das transformações de Lorentz e, por consequência, da Teoria da Relatividade Especial (TRE), propondo uma abordagem conceitual alternativa do espaço-tempo fundamentada em princípios considerados mais coerentes com a realidade física observável. Nesta primeira parte, examinam-se os fundamentos físicos, matemáticos e lógicos associados às transformações de Lorentz, com ênfase em aspectos conceituais e cinemáticos de sua construção. Apresenta-se inicialmente uma exposição sintética da teoria e de suas equações fundamentais, seguida de uma análise dos pontos que, segundo esta abordagem, suscitam questionamentos quanto à consistência conceitual da formulação relativística. Ressalta-se que esta etapa do trabalho se concentra exclusivamente na estrutura teórica e conceitual da TRE. A discussão dos aspectos experimentais e observacionais será tratada nas terceira e quarta partes da série. Embora as considerações deste trabalho se concentrem na TRE, elas também abordarão alguns aspectos conceituais da Teoria da Relatividade Geral. Cumpre destacar que as considerações aqui apresentadas não têm por objetivo desmerecer as contribuições fundamentais dos criadores da Relatividade Especial e Geral, entre os quais se destacam Poincaré, Lorentz e Einstein.

Palavras-chave: “espaço-tempo”, perspectiva realista, transformações de Lorentz, Relatividade Especial.

Abstract

This article inaugurates a series dedicated to the theme *“Space-Time” from a Realist Perspective*. The aim of the series is to carry out a critical analysis of the Lorentz transformations and, consequently, of the Theory of Special Relativity (SR), while proposing an alternative conceptual approach to space-time grounded in principles considered more consistent with observable physical reality. In this first part, the physical, mathematical, and logical foundations associated with the Lorentz transformations are examined, with emphasis on the conceptual and kinematic aspects of their construction. The article begins with a concise presentation of the theory and its fundamental equations, followed by an analysis of the points that, according to this approach, raise questions regarding the conceptual consistency of the relativistic formulation. It should be emphasized that this stage of the work focuses exclusively on the theoretical and conceptual structure of SR. The discussion of experimental and observational aspects will be addressed in the third part of the series. Although the considerations developed in this work are mainly focused on SR, they will also address certain conceptual aspects of the Theory of General Relativity. It is important to note that the considerations presented here are not intended to diminish the fundamental contributions of the creators of Special and General Relativity, among whom Henri Poincaré, Hendrik Lorentz, and Albert Einstein stand out.

Keywords: “space-time”, realistic perspective, Lorentz transformations, Special Relativity.

Nota ao leitor

O presente trabalho desenvolve-se num nível matemático intermédio, adotado de forma deliberada. Essa opção metodológica não compromete a validade lógica nem o conteúdo físico dos argumentos apresentados, e tem como objetivo privilegiar a clareza conceitual, a explicitação dos pressupostos e a compreensão direta das ideias fundamentais em análise.

As ferramentas matemáticas empregues são adequadas aos objetivos do trabalho e permitem descrever com rigor os fenômenos considerados. A adoção de um formalismo matemático intermédio contribui para tornar transparentes as hipóteses físicas subjacentes, favorecendo a análise crítica e ampliando o alcance do texto a leitores com formação universitária em Física, Engenharia ou áreas afins.

O foco do artigo reside, assim, na consistência interna dos argumentos, na coerência causal das interpretações e na articulação clara entre descrição matemática e significado físico, e não na exploração de formalismos matemáticos mais elaborados. Nesse contexto, a escolha por uma matemática controlada e explícita constitui uma vantagem epistemológica, ao facilitar a leitura, a discussão e a avaliação independente das ideias propostas.

1. Introdução

O tempo, o espaço e outras propriedades fundamentais do Universo têm sido objeto de estudo contínuo ao longo da história da ciência. Diversas teorias foram propostas para descrever esses elementos, algumas amplamente aceitas, embora ainda apresentem questões abertas e desafios conceituais. Assim, surge a pergunta que orienta este trabalho: **são o espaço e o tempo relativos e transformáveis, como estabelece a teoria moderna?** Para responder a essa questão, inicia-se com uma revisão concisa dos fundamentos da Teoria da Relatividade Especial (TRE). A TRE trata da descrição de eventos em referenciais inerciais [1]. Evento é geralmente definido como um acontecimento físico localizado no espaço e no tempo, como, por exemplo, a incidência de um pulso luminoso sobre um espelho. No entanto, o termo “evento” é muitas vezes usado para se referir apenas à localização espaçotemporal da ocorrência num sistema de coordenadas ou a um ponto do espaço-tempo [2, 3, 4]. Cada observador, em seu respectivo referencial, pode representar um evento por três coordenadas espaciais (x, y, z) e uma coordenada temporal (t), que juntas formam as coordenadas espaçotemporais do evento [5]. Um referencial inercial pode ser definido como um sistema no qual as leis de Newton do movimento são válidas [6].

Nota conceitual: A expressão “espaço-tempo” (espaço e tempo considerados conjuntamente) é empregada neste trabalho apenas para enfatizar que nenhum acontecimento físico pode ocorrer independentemente do espaço e do tempo, sendo ambos requisitos simultâneos para a ocorrência e a localização de qualquer evento. Não se assume, com isso, a estrutura geométrica relativista introduzida por Minkowski [7]. Por essa razão, o termo é utilizado entre aspas em algumas passagens deste trabalho.

Configuração espaço-temporal de um objeto – sua posição ou distância em relação a outro objeto tomado como referência, seu estado de movimento e suas interações físicas.

Nota epistemológica: Este trabalho adota uma abordagem físico-conceitual fundacional. Parte-se do princípio de que a matemática deve servir como linguagem de descrição dos fenômenos físicos, e não como substituto ontológico da realidade física [8]. Assim, estruturas geométricas abstratas são tratadas aqui como ferramentas representacionais úteis, mas não como entidades físicas em si mesmas. As análises apresentadas privilegiam consistência física, causalidade objetiva e interpretabilidade ontológica, antes de elegância formal. O objetivo não é reformular notações, mas reexaminar pressupostos conceituais que, embora amplamente aceitos, raramente são explicitados ou criticamente discutidos.

A abordagem aqui desenvolvida apresenta afinidades conceituais com a formulação de Newton, particularmente no que se refere à distinção entre movimentos verdadeiros e aparentes e à rejeição de uma concepção puramente relacional do movimento. No entanto, não se trata de um retorno à concepção newtoniana original, mas de uma reformulação que introduz distinções ontológicas não explicitadas na mecânica clássica, cujo desenvolvimento será apresentado nas seções seguintes. Nesse sentido, a presente abordagem pode ser interpretada como uma recuperação crítica de elementos da mecânica clássica que, embora conceitualmente robustos, foram posteriormente relegados a um segundo plano, sem que todas as suas implicações tenham sido plenamente exploradas.

2. A teoria da Relatividade Especial

Antes da formulação da Teoria da Relatividade Especial por Albert Einstein, em 1905 [1, 9], a física clássica – fundamentada na mecânica de Newton e no princípio da relatividade de Galileu – concebia o espaço e o tempo como entidades separadas, absolutas, homogêneas e universais, independentes do referencial adotado. A TRE, contudo, rompeu com essa concepção ao propor que tempo e espaço constituem dimensões interligadas em uma estrutura de espaço-tempo, e que as medidas espaciais e temporais (ou espaço-temporais) dependem do estado de movimento do observador [5, 9, 10, 11]. Nesse contexto, dois observadores em movimento relativo uniforme podem medir durações diferentes para o intervalo entre dois eventos sucessivos, fenômeno conhecido como *dilatação temporal*. Essa reformulação da noção de tempo tornou-se um dos pilares conceituais da TRE e permanece como ponto central de debate entre distintas interpretações da física moderna.

2.1. O surgimento da Teoria da Relatividade Especial

A Teoria da Relatividade Especial teve origem na tentativa de resolver a “incompatibilidade”¹ entre os fundamentos da mecânica clássica e os resultados do eletromagnetismo, particularmente aqueles expressos nas equações de Maxwell [1, 12]. À época de seu desenvolvimento, predominava a mecânica newtoniana, fundamentada nas transformações de Galileu², também conhecidas como *relatividade galileana*.

No final do século XIX, era amplamente aceita a hipótese de que o espaço estivesse preenchido por um meio fluido denominado *éter*, considerado o suporte físico dos fenômenos eletromagnéticos e interpretado como um referencial absoluto [1, 13]. Diversos experimentos foram realizados com o objetivo de detectar o movimento da Terra em relação a esse meio hipotético [13]. O insucesso sistemático dessas tentativas motivou a busca por novas explicações teóricas, tanto para os resultados experimentais negativos quanto para a suposta “incompatibilidade” entre a mecânica clássica e o eletromagnetismo. Embora Albert Einstein seja amplamente reconhecido como a figura central associada à relatividade especial, ele não foi o único (nem o primeiro) a contribuir para sua formulação. O desenvolvimento da teoria foi precedido por contribuições fundamentais de diversos pesquisadores, entre os quais se destacam *Hendrik Lorentz* e *Henri Poincaré* [1, 9]. Lorentz apresentou de forma sistemática as equações que hoje levam seu nome – as *transformações de Lorentz* – fornecendo a base matemática da relatividade especial. Einstein, por sua vez, propôs uma nova interpretação física dessas transformações [5, 9], formulando os seguintes postulados, que consolidaram a teoria:

Primeiro postulado: As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais [5, 9].

Segundo postulado (em duas versões para questão de clareza):

Versão 1: “A luz propaga no espaço vazio sempre com uma determinada velocidade V , independente do estado de movimento do corpo que a emite.” [9, p. 158, tradução de Piattella]

Versão 2: “Cada raio de luz movimenta-se num sistema de coordenadas “em repouso” com a velocidade definida V , independentemente se este raio de luz é emitido por um corpo em repouso ou em movimento.”³ [9, p. 160, tradução de Piattella]

Segundo a TRE [11, 14, 15], para dois referenciais inerciais S e S' , estando S' em movimento em relação a S com velocidade v , o tempo passa de forma diferente, sendo as medidas do intervalo de tempo relacionadas pela expressão:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2.1)$$

onde Δt é o intervalo de tempo medido no referencial S e $\Delta t'$ é o intervalo próprio medido no referencial S' . A expressão $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, conhecida como *fator de Lorentz*, surge naturalmente no formalismo desenvolvido por Hendrik Lorentz no contexto de suas tentativas de explicar as propriedades observadas da propagação da luz no éter luminífero [1, 13, 16, 17]. Embora originalmente associadas a essa hipótese do éter, as transformações de Lorentz consolidaram-se como parte fundamental da relatividade especial [5, 9], descrevendo como coordenadas de tempo e espaço se relacionam entre dois referenciais inerciais em

¹. O termo *incompatibilidade* aparece entre aspas porque, na perspectiva adotada neste trabalho, uma análise aprofundada demonstra que tal problema é apenas aparente. Argumenta-se, ao longo deste estudo, que a percepção de incompatibilidade decorreu de um equívoco conceitual relacionado à interpretação da velocidade da luz.

². As transformações de Galileu consistem em um conjunto de equações lineares que relacionam as coordenadas espaciais e temporais de dois referenciais inerciais, sendo um deles animado por movimento retilíneo uniforme em relação ao outro [5].

³. Alguns autores afirmam que o segundo postulado da relatividade especial de Einstein não implicava explicitamente que a velocidade da luz seria independente do referencial em que é medida [1]. No entanto, uma análise cuidadosa do contexto da versão em português do livro *A teoria da Relatividade Especial e Geral* de A. Einstein, publicado em 1920, mostra que, ao se referir à “lei da propagação da luz no vácuo”, ele estabeleceu exatamente o que é enunciado na *Versão 2* do segundo postulado. Isso é evidenciado pelo uso das expressões $x = ct$ e $x' = ct'$ para descrever a propagação da luz nos referenciais K e K' , respectivamente [5, 9].

movimento relativo. A seguir, é apresentada uma derivação das transformações de Lorentz, baseadas nas referências [6, 18]. Alguns passos que não são essenciais para esta discussão foram omitidos.

2.1.1. As Transformações de Lorentz (Abordagem não axiomática⁴)

Considere um evento observado em dois referenciais inerciais: no referencial S, o evento é descrito pelas coordenadas (x, y, z, t) , e no referencial S', que se move ao longo do eixo X com velocidade v , pelas coordenadas (x', y', z', t') . Os observadores estão situados nas respectivas origens O e O', com eixos X', Y', Z' paralelos aos eixos X, Y, Z. Sendo S e S' referenciais inerciais, as leis da mecânica se aplicam igualmente a ambos. Assim, se uma partícula se move com velocidade constante ao longo de uma linha reta em S, ela também se move com velocidade constante em S'. Nessas condições, as coordenadas espaço-temporais do evento estão relacionadas por um sistema de equações lineares cuja forma geral é:

$$\begin{aligned}x' &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}t + a_{15} \\y' &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24}t + a_{25} \\z' &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34}t + a_{35} \\t' &= a_{41}x + a_{42}y + a_{43}z + a_{44}t + a_{45}\end{aligned}\tag{2.2}$$

onde os coeficientes a_{ij} são constantes. A escolha de v ao longo do eixo X simplifica a análise sem perder generalidade. As constantes a_{15}, a_{25}, a_{35} representam possíveis deslocamentos espaciais iniciais de S' em relação a S nos eixos X, Y e Z, respectivamente, e a_{45} representa a defasagem temporal inicial. Se os relógios de S e S' forem sincronizados no instante em que as origens coincidem ($t = t' = 0$), então:

$$a_{15} = a_{25} = a_{35} = a_{45} = 0$$

e, com base na homogeneidade do espaço e nos postulados da TRE, obtêm-se as reduções:

$$y' = y, \quad z' = z, \quad t' = a_{41}x + a_{44}t, \quad x' = a_{11}(x - vt)\tag{2.3}$$

Para determinar os coeficientes a_{11} , a_{41} e a_{44} , aplica-se o *princípio da constância da velocidade da luz*. Supõe-se que, no instante em que as origens coincidem, uma onda esférica de luz parte da origem comum e se propaga com velocidade c em todos os referenciais. A frente de onda é descrita em S e S', respectivamente, pelas equações:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2\tag{2.4}$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2.\tag{2.5}$$

Substituindo x' e t' nas equações acima e igualando os termos, obtém-se:

$$a_{11} = a_{44} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \quad a_{41} = -\frac{v}{c^2} \gamma$$

⁴. Para esta discussão, a abordagem adotada para determinar as transformações de Lorentz – seja não axiomática, axiomática ou baseada nos postulados da Teoria da Relatividade Especial [ver ref. 6] – é irrelevante, pois todas compartilham um aspecto fundamental: a consideração de uma velocidade limite invariante, independente do referencial. Mesmo quando a velocidade da luz não é mencionada explicitamente, essa constante desempenha papel análogo e, na prática, é identificada com c . Portanto, a determinação dos coeficientes a_{11} , a_{41} e a_{44} depende, direta ou indiretamente, desse princípio, sendo esse um ponto essencial da análise.

Substituindo esses valores nas equações (2.3), obtém-se as *equações de transformação de Lorentz clássicas*:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right)\end{aligned}\tag{2.6}$$

Einstein derivou essas equações partindo dos dois postulados da Relatividade Especial e utilizando uma análise semelhante da onda de luz esférica⁵ [5, 9].

Até aqui, resumiu-se a teoria de Einstein e as transformações de Lorentz. Na seção seguinte, será apresentada uma análise crítica sobre os coeficientes a_{11} , a_{41} e a_{44} , destacando pontos que, segundo esta abordagem, merecem revisão.

3. Análise dos coeficientes fundamentais das transformações de Lorentz

O objetivo desta seção é examinar a validade dos coeficientes a_{11} , a_{41} e a_{44} das transformações de Lorentz. É possível que críticos deste trabalho argumentem que esses coeficientes surgem naturalmente da aplicação direta dos dois postulados da teoria da relatividade especial. Convém, portanto, esclarecer que este estudo não questiona o princípio da relatividade nem a constância da velocidade da luz no vácuo. O ponto central da análise reside, contudo, na seguinte questão fundamental: *Os dois postulados estão sendo aplicados de forma conceitual e cinematicamente correta no contexto da Relatividade Especial?* Essa questão será abordada e discutida nas subseções seguintes.

3.1. Sobre o significado do *princípio da relatividade*:

Considere-se novamente o caso descrito na subseção 2.1.1, de uma onda de luz emitida a partir da origem de um sistema de coordenadas. Segundo Einstein [5, 9], com base nos postulados da teoria da relatividade especial, a equação que descreve a propagação da luz deve ter a mesma forma em todos os referenciais inerciais, o que implica que a equação da frente de onda esférica mantém o mesmo formato em S e S':

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad \text{e} \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

Na abordagem relativista einsteiniana, essas duas equações descrevem a mesma frente de onda física utilizando as coordenadas definidas nos sistemas de referencia S e S', respectivamente [4, 5, 9]. Observa-se que duas equações de esferas descrevem *a mesma frente de onda luminosa* (o mesmo fenômeno físico), porém, ambas *permanentemente centradas nas origens* dos respectivos referenciais. No entanto, isso não decorre do primeiro postulado.

O princípio da relatividade deve ser entendido da seguinte forma: se um experimento é realizado sob certas condições em um referencial inercial S, ele produzirá os mesmos resultados que se for realizado sob as mesmas condições em outro referencial inercial S', porque as leis físicas são as mesmas para todos os referenciais inerciais, o que justifica a mesma forma funcional em ambos os referenciais [13, 14]. Para o caso da frente de onda luminosa, porém, isso não justifica a permanência do centro esférico na origem dos sistemas de coordenadas.

Na visão aqui adotada, o princípio da relatividade exige apenas a preservação da forma geométrica da frente de onda – *não a permanência do centro da esfera na origem de cada sistema de coordenada*, nem a

⁵. No artigo original de Einstein, as coordenadas do referencial k eram representadas pelos símbolos (ξ, η, ζ, τ), correspondentes, neste texto, a (x', y', z', t') do referencial S' [5, 6]. Os coeficientes das transformações, aqui denotados por a_{11} , a_{41} e a_{44} , eram simbolizados por Einstein como $\varphi(v)\beta$, $-\varphi(v)\beta v/V^2$ e $\varphi(v)\beta$, respectivamente, sendo V a velocidade da luz (equivalente a c neste texto) e $\varphi(v) = 1$. O termo v representa a velocidade de k em relação a K [5, 9].

suposição implícita de que o referencial esteja em repouso em relação ao centro físico da propagação no espaço.

Como os relativistas respondem a esse problema

Segundo Whittaker [13], alguns físicos já consideravam estranha, desde o início, a ideia de uma frente de onda centrada em uma “posição subsequentemente inalterada”. A explicação relativista clássica para esse paradoxo é a seguinte:

“O paradoxo é explicado quando se lembra que uma frente de onda é definida como o lugar geométrico dos pontos que estão simultaneamente na mesma fase de perturbação. Agora, eventos que acontecem em diferentes pontos, que são simultâneos de acordo com o sistema de medição de tempo de A, não são em geral simultâneos de acordo com a maneira de B medir o tempo; e, portanto, o que A chama de frente de onda não é a mesma coisa que o que B chama de frente de onda. Além disso, como o sistema de medição do espaço é diferente nos dois sistemas inerciais, o que A chama de esfera não é a mesma coisa que o que B chama de esfera. Assim, não há contradição na afirmação de que as frentes de onda para A são esferas com a origem de A como centro, enquanto as frentes de onda para B são esferas com a origem de B como centro. [13, p. 36] (Tradução do autor)

Além disso, outro argumento frequentemente apresentado pela literatura relativista afirma que a equação da frente de onda não é uma escolha arbitrária, mas a expressão geométrica do conjunto de eventos que satisfazem o intervalo espaço-temporal nulo:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = 0, \quad (3.1)$$

o qual é invariante na geometria do espaço de Minkowski [5, 6, 19].

Segundo essa interpretação:

- A frente de onda representaria um conjunto objetivo de eventos físicos [3, 9], não “o que o observador vê”;
- Cada referencial considera sua própria fonte em repouso na origem, reproduzindo o experimento sob condições simétricas [5, 9, 19];
- Se a equação tivesse formas diferentes em referenciais distintos, isso implicaria ou a violação da constância de c , ou a existência de um referencial privilegiado [5, 9, 20];
- Logo, para preservar simultaneamente a simetria entre referenciais, a isotropia do espaço e a constância da velocidade da luz, seria necessário exigir a invariância formal da equação da frente de onda [5, 20];
- Matematicamente, essa exigência equivale à preservação do intervalo espaço-temporal, o que conduz às transformações de Lorentz [9].

No entanto, este trabalho sustenta que esses argumentos não resolvem os problemas conceituais envolvidos, nem eliminam os paradoxos físicos associados à interpretação relativista da propagação da luz. As razões para isso serão analisadas detalhadamente nas subseções seguintes.

3.1.1. A matemática como linguagem descritiva, não como criadora da realidade

A matemática constitui uma linguagem formal de descrição, e não um agente criador da realidade física [21, 22]. Independentemente de qualquer intenção conceitual associada à sua formulação, as equações (2.4) e (2.5) da frente de onda possuem um significado bem definido dentro da linguagem matemática usual: para um instante fixo t (ou t'), elas representam o lugar geométrico dos pontos do espaço tridimensional euclidiano a uma distância ct (ou ct') da origem, isto é, uma superfície esférica centrada na origem. Esse significado não é interpretativo, decorre diretamente da estrutura algébrica e geométrica da linguagem empregada [23].

A teoria da relatividade especial foi originalmente formulada utilizando a linguagem da geometria euclidiana tridimensional acrescida do tempo como coordenada [9], empregada para descrever a propagação da luz no vácuo em relação a sistemas de referências materiais. Nesse contexto, as equações

apresentadas devem ser interpretadas de acordo com o significado geométrico e físico que essa linguagem matemática explicitamente veicula. Não é metodologicamente consistente sustentar que tais equações devam ser lidas primordialmente à luz de intenções conceituais associadas à sua formulação, em detrimento do conteúdo geométrico objetivo que elas exprimem. Em ciência, interpretações físicas devem respeitar a semântica interna do formalismo utilizado. Se o significado geométrico direto das expressões matemáticas não corresponde ao fenômeno físico que se pretende descrever, o problema reside no uso da linguagem adotada, e não na interpretação do leitor. Não se justifica ignorar esse descompasso apenas em nome da elegância formal ou da coerência interna do formalismo teórico. Ao introduzir as equações em causa, Einstein não criou uma nova linguagem matemática, mas utilizou ferramentas formais já estabelecidas. Atribuir posteriormente novos significados geométricos a expressões já bem definidas, sem alterar explicitamente a estrutura matemática subjacente, não constitui uma dedução física, mas uma reinterpretação conceitual. O que governa o conteúdo informacional de uma equação não é a vontade do autor, mas as regras formais e semânticas da linguagem em que ela é escrita [24].

Portanto, não é metodologicamente consistente afirmar, a posteriori, que tal equação “não representa uma esfera centrada na origem” sem redefinir explicitamente o significado dos símbolos envolvidos. Do ponto de vista semântico, fazer isso equivale a escrever $y = 2x$ e sustentar que a reta não passa pela origem – o que é incompatível com o significado interno da própria linguagem utilizada. O recurso posterior à geometria do espaço de Minkowski [7] surge precisamente nesse contexto como uma mudança de interpretação estrutural da mesma expressão matemática, e não como uma consequência inevitável dos postulados físicos iniciais. Parte-se de uma formulação escrita em termos da geometria espacial ordinária, obtêm-se consequências físicas conceitualmente problemáticas, e então redefine-se o enquadramento geométrico para justificar tais resultados. Assim, a introdução da estrutura de Minkowski não decorre diretamente de uma exigência física observacional, mas constitui uma escolha formal destinada a preservar a consistência interna do formalismo relativista. Trata-se, portanto, de uma decisão de modelagem matemática, e não de uma necessidade física logicamente imposta pelos fenômenos.

A Teoria da Relatividade Especial não foi baseada na geometria do espaço de Minkowski

Os criadores da relatividade especial, como Lorentz [16, 17] e Einstein [9], entre outros, utilizaram a matemática disponível na época para propor soluções a “problemas” físicos específicos. Por exemplo, Einstein [9] utilizou ferramentas matemáticas clássicas como álgebra, cálculo diferencial elementar e geometria analítica. Ele obteve as transformações de Lorentz impondo linearidade, simetria e invariância da velocidade da luz [5, 9]. Não se tratou da criação de uma nova matemática, uma “matemática relativista”, mas da aplicação de conceitos clássicos sob novos postulados físicos, substituindo as transformações de Galileu pelas de Lorentz. Portanto, não é historicamente adequado invocar a geometria do espaço-tempo de Minkowski como fundamento original da teoria. Einstein não utilizou essa formulação geométrica em 1905 [9]; Minkowski apenas formalizou, anos depois, resultados já estabelecidos, reorganizando-os em uma estrutura geométrica [14]. Usar a geometria de Minkowski como fundamento da teoria constitui uma interpretação anacrônica da sua origem, pois toma como base estrutural uma reformulação posterior do formalismo.

3.1.2. Einstein descreve um único fenômeno físico, e não fenômenos distintos

Na derivação tradicional das transformações de Lorentz, as equações

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad \text{e} \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

não correspondem a dois eventos de emissão distintos (um ocorrido na origem de S e outro na origem de S'), mas à descrição do mesmo evento físico em dois referenciais diferentes. No seu artigo de 1905, Einstein afirma explicitamente:

“No tempo $t = \tau = 0$ seja enviado da origem das coordenadas de ambos os sistemas, que neste tempo coincidem, uma onda esférica que propaga-se no sistema K com a velocidade V. Se (x, y, z) é um ponto que acaba de ser alcançado por esta onda, então tem-se:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 .$$

Transformamos esta equação com a ajuda das nossas equações de transformação e obtemos, após um cálculo simples:

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2 \tau^2$$

A onda considerada é então uma onda esférica com velocidade de propagação V também quando observada no sistema em movimento.” [9, p. 163, tradução de Piattella]

Fica claro, portanto, que se trata do mesmo fenômeno físico real descrito em sistemas de referência distintos [25]. Assim, ainda que as noções matemáticas de “frente de onda” e “esfera” dependam dos sistemas de medição de tempo e espaço adotados, isso não altera o fato físico fundamental: ambos os observadores se referem ao mesmo fenômeno real de propagação da onda de luz, que ocorre no espaço físico (vácuo) no qual se encontram e se movem tanto os referenciais inerciais quanto a própria onda luminosa.

Portanto, mesmo considerando que a frente de onda representa um conjunto objetivo de eventos físicos, e não a visão do observador, as referidas equações não são meras convenções linguísticas. Elas afirmam algo objetivo sobre o conjunto de eventos que satisfazem essas relações. Para cada valor fixo de t (ou t'), o conjunto dos pontos forma uma esfera, e toda esfera possui um centro geométrico. Isso decorre da própria estrutura matemática da equação. Assim, se a equação é tomada como descrição de um fenômeno físico real, então ela descreve uma distribuição esférica de eventos em torno de um ponto central. Essa conclusão não depende da opinião do observador nem da intenção ou interpretação relativista ou não relativista; decorre diretamente da geometria da solução.

Quanto ao estatuto físico desse centro, sendo a equação uma descrição de um fenômeno físico real, não faz sentido tratá-lo como algo puramente convencional. Afinal, a simetria esférica descrita pela equação não é uma convenção; ela é uma propriedade do fenômeno representado. Sob essa perspectiva, se uma equação física descreve uma distribuição esfericamente simétrica de eventos, então ela descreve necessariamente a existência de um centro geométrico associado a essa distribuição. A existência desse centro decorre da estrutura objetiva da solução matemática e não da escolha subjetiva de um sistema de coordenadas. Consequentemente, se a frente de onda corresponde a um único fenômeno físico objetivo, o centro geométrico associado à sua simetria também deve constituir uma característica objetiva desse fenômeno. Assim, embora diferentes sistemas de coordenadas possam atribuir coordenadas distintas a esse centro, não é metodologicamente consistente considerar que uma mesma frente de onda permaneça centrada nas origens de referenciais que se deslocam um em relação a outro. Se a simetria esférica da frente de onda é uma propriedade física objetiva, o centro dessa simetria também deve ser objetivo e, portanto, não pode estar permanentemente vinculado a origens que se separam no decorrer do movimento relativo entre os referenciais.

3.1.4. A descrição matemática deve refletir o fenômeno físico, e não a convenção do observador

Os fenômenos físicos ocorrem no espaço (espaço-tempo) físico. No experimento mental considerado por Einstein na derivação das transformações de Lorentz [9], uma onda luminosa é emitida a partir de um ponto do espaço correspondente à origem comum dos sistemas no instante inicial. Após a emissão, a luz não permanece cinematicamente vinculada à fonte nem aos sistemas de coordenadas. A onda luminosa, a fonte, os sistemas de coordenadas (e consequentemente as suas origens) constituem entidades físicas distintas, todas inseridas no “mesmo” espaço-tempo físico e dotadas de movimentos próprios. Assim, independentemente da liberdade de cada observador de considerar-se em repouso, há movimentos relativos no espaço físico entre a frente de onda luminosa e os sistemas de coordenadas, do mesmo modo que há movimento relativo entre os próprios sistemas de coordenadas. Nessa perspectiva, os observadores não descrevem meras convenções de coordenadas, mas um fenômeno físico objetivo. Torna-se incoerente representar a propagação da luz por meio de frentes esféricas cujos centros, ao longo do tempo, permaneçam coincidentes com as origens móveis dos respectivos sistemas de coordenadas, uma vez que tais origens

também se deslocam no espaço físico após o evento de emissão. A descrição matemática deve refletir o fenômeno físico observado, e não impor à natureza uma estrutura geométrica abstrata apenas para manter consistência matemática sem relação física. Coordenadas rotulam posições e relações físicas reais: são rótulos arbitrários para essas entidades, e não meras construções mentais do observador [25, 26, 27]. No entanto, as equações (2.4) e (2.5) contrariam o cenário físico descrito acima.

3.1.5. A invocação da relatividade da simultaneidade não resolve o paradoxo das duas frentes esféricas

A relatividade da simultaneidade é frequentemente invocada para justificar a coexistência de duas frentes de onda esféricas centradas nas origens de referenciais em movimento relativo [13]. No entanto, esse argumento não resolve o paradoxo pelos seguintes motivos:

- Ainda que observadores em movimento relativo não concordem quanto à simultaneidade de eventos espacialmente separados, essa constatação não invalida o fato de que as equações (2.4) e (2.5) descrevem frentes de ondas esféricas centradas nas respectivas origens. Portanto, mesmo que o que é simultâneo para S não o seja para S' e vice-versa, por meio das referidas equações, cada observador descreve a frente de onda como centrada permanentemente na origem de seu próprio referencial.
- As equações utilizadas nesse contexto não têm por finalidade descrever atos perceptivos de observação, mas a geometria física da propagação do fenômeno luminoso. No cenário apresentado por Whittaker [13], assume-se que *um pulso luminoso é emitido* quando as origens dos sistemas coincidem e que, durante a propagação subsequente, surgem frentes de onda esféricas associadas a cada referencial. Tal formulação implica necessariamente que as equações descrevem a geometria da expansão da onda luminosa no espaço físico tal como atribuída em cada sistema de coordenadas, e não meramente uma reconstrução.

Eventualmente, poder-se-ia argumentar que as equações

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \quad \text{e} \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

não descrevem duas esferas com centros nas origens de dois referenciais que se afastam, mas representam apenas condições sobre o conjunto dos pontos considerados, podendo ser associadas, em uma interpretação posterior, aos chamados cones de luz. Entretanto, ainda que essa interpretação pudesse corresponder a uma formulação posterior da teoria, ela não deve ser utilizada para atribuir retroativamente às equações o significado geométrico de uma linguagem que não fazia parte da formulação original de Einstein [28]. Como referido na Seção 3.1.1, os autores da teoria da relatividade utilizaram, em seus trabalhos originais, a linguagem matemática e geométrica disponível à época para formular soluções aos problemas físicos que investigavam. Não se tratava de uma linguagem desprovida de significado geométrico. As equações empregadas possuíam significados específicos no contexto em que foram introduzidas. No caso de Einstein, isso é particularmente claro. Ao introduzir

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2,$$

ele considera explicitamente uma onda esférica emitida a partir da origem e, após a transformação, obtém

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2 \tau^2,$$

notação usada no artigo de 1905. Einstein [28] afirma então: “Die betrachtete Welle ist also auch im bewegten System betrachtet eine Kugelwelle von der Ausbreitungsgeschwindigkeit V.” [28, p. 901], isto é, “A onda considerada é, portanto, também no sistema em movimento, uma onda esférica de velocidade de propagação V.”.

Assim, no contexto original, cada equação representa uma superfície esférica centrada na origem do respectivo sistema de coordenadas. Se o primeiro sistema é S, a primeira equação representa uma frente de onda esférica centrada na origem de S; se o segundo é S', a segunda representa uma frente de onda esférica centrada na origem de S'. Essas origens, contudo, correspondem a posições distintas quando os referenciais possuem movimento relativo. Portanto, dois pontos espacialmente distintos não podem representar um

mesmo centro esférico, assim como dois centros distintos não podem, sem uma justificativa adicional, representar uma mesma frente esférica.

A interpretação dessas equações como “cones de luz” pertence a uma formulação espaço-temporal posterior [7] e não deve ser utilizada para reinterpretar retroativamente o significado que elas possuíam no trabalho original de Einstein. Na linguagem geométrica empregada naquele contexto, para cada instante fixado, as equações descrevem superfícies esféricas; a família dessas superfícies constitui uma frente de onda esférica em expansão. Portanto, não se trata, em sua formulação original, de superfícies cônicas, mas de superfícies esféricas.

O ponto em questão, portanto, não é negar a possibilidade de uma interpretação matemática posterior dessas relações, mas questionar a legitimidade de utilizar essa interpretação posterior para substituir o significado geométrico da formulação original e, desse modo, contornar o problema que emerge quando as equações são interpretadas segundo a linguagem em que foram originalmente apresentadas.

3.2. Sobre a velocidade da luz

A discussão sobre a “velocidade da luz” requer que se compreenda, inicialmente, o que se entende por velocidade. Velocidade é a taxa de variação da posição de um objeto no espaço ao longo do tempo em relação a outro objeto. É, portanto, uma grandeza sempre relacional [5, 11]. O termo objeto aqui deve ser entendido no sentido genérico, podendo referir-se a um substrato. Albert Einstein [5, 9] afirmou que “a velocidade da luz no vácuo é constante e não depende do movimento da fonte ou do observador”. Contudo, há um problema com a interpretação usual desse princípio, pois ela envolve uma sobreposição de dois níveis conceituais distintos:

- a velocidade de propagação natural da onda luminosa (relativa ao meio de propagação);
- a velocidade da frente de onda luminosa em relação a um corpo de referência.

A compreensão desses dois níveis exige a análise dos conceitos fundamentais de espaço, tempo e movimento, nos quais a noção de velocidade se fundamenta.

3.2.1. O conceito de espaço

Ao longo da história da ciência, o espaço tem sido concebido de diferentes maneiras. Essas concepções podem ser sintetizadas, conforme [29], em duas posições fundamentais:

- **Concepção 1:** o espaço não existe independentemente dos objetos materiais; não há espaço absolutamente vazio.
- **Concepção 2:** o espaço existe independentemente dos objetos materiais, admitindo-se a possibilidade de vazio absoluto.

Essas concepções são mutuamente excludentes: o espaço não pode simultaneamente depender e independe da matéria. A primeira concepção levanta dificuldades conceituais fundamentais, como:

1. O que separa os objetos materiais?
2. O que torna possíveis os processos de deslocamento e expansão?
3. Em que domínio são definidas propriedades geométricas como direção, sentido e ângulo?

Tais questões encontram resposta consistente apenas no âmbito da segunda concepção. A distinção entre objetos materiais exige a existência de uma entidade não material que torne essa separação possível. Na perspectiva adotada neste trabalho, parcialmente alinhada à segunda concepção, o espaço é definido como:

Uma realidade física não material e independente dos corpos, que constitui o domínio de extensão no qual os objetos existem e os fenômenos ocorrem.

No entanto, não se defende aqui a possibilidade de vazio absoluto. O espaço permite a definição de propriedades geométricas – como posição, distância e direção –, mas não possui, por si só, propriedades físicas interativas. Sua caracterização depende da presença de objetos materiais, que introduzem distinções mensuráveis. Na ausência de corpos, o espaço não deixa de existir, mas perde significado operacional, pois não há referências para a definição de suas propriedades geométricas [5]. Nesse sentido, há uma aproximação parcial com a perspectiva de Ernst Mach [30], segundo a qual as propriedades observáveis apresentam caráter relacional [31]. No entanto, tais relações não constituem o espaço em si, mas apenas as propriedades físicas nele estabelecidas. Uma analogia útil é a de uma folha de papel em branco: sem marcações, não há divisões definidas. A introdução de uma malha permite estabelecer regiões e relações geométricas, mas essas construções não definem o papel. Ao remover a malha, desaparecem as divisões, mas o suporte permanece. De modo análogo, o espaço não se confunde com os objetos nem com as estruturas geométricas por eles definidas.

Sobre o caráter absoluto do espaço

A noção de espaço absoluto foi introduzida por Isaac Newton [10] no contexto da mecânica clássica. Nessa formulação, o espaço é concebido como uma estrutura fixa e universal, independente dos objetos, que serve de referência para a definição dos estados de movimento. Entretanto, o estatuto ontológico desse espaço e seu papel na descrição física têm sido amplamente debatidos [32]. Na abordagem aqui proposta, essa noção é reformulada nos seguintes termos:

O espaço é absoluto em sua existência, mas não como referencial material privilegiado.

O caráter absoluto do espaço refere-se à sua *independência ontológica*, à sua *invariância* e *universalidade*, e não à existência de um estado de repouso absoluto associado a corpos materiais. Assim, o espaço constitui um domínio real e permanente no qual os fenômenos físicos ocorrem, sem, contudo, impor um referencial material privilegiado. Dessa forma, estabelece-se uma distinção conceitual clara:

- *Estrutura de fundo (absoluta)*: o espaço como domínio físico independente;
- *Descrição geométrica (relacional)*: propriedades como posição, distância e movimento, definidas em relação a objetos ou sistemas de referência.

Essa separação permite preservar a objetividade do espaço enquanto entidade “física”, ao mesmo tempo em que reconhece o caráter relacional das grandezas mensuráveis. O resultado é uma formulação conceitualmente mais consistente, que evita ambiguidades entre o suporte ontológico dos fenômenos e sua descrição matemática.

O caráter absoluto do espaço e o princípio da relatividade

Poder-se-ia argumentar que a validade do princípio da relatividade especial exclui a possibilidade de um espaço absoluto. Entretanto, o conceito de espaço absoluto adotado neste trabalho não entra em conflito com esse princípio. O princípio da relatividade estabelece que as leis da física assumem a mesma forma em todos os referenciais inerciais, implicando a inexistência de sistemas inerciais privilegiados para a formulação dessas leis. Em outras palavras, todos os referenciais inerciais são fisicamente equivalentes, não existindo nenhum corpo ou sistema material sob condição privilegiada no espaço. Trata-se, portanto, de um princípio que se refere aos corpos e sistemas físicos utilizados como referenciais [5, 9], e não de uma afirmação acerca da natureza do próprio espaço.

Nesse contexto, a inercialidade constitui uma propriedade atribuída a corpos e sistemas físicos, definida em relação ao espaço, não sendo uma propriedade aplicável ao próprio espaço. De modo análogo, movimento e repouso são conceitos atribuídos a corpos e processos físicos. Não faz sentido afirmar que o espaço esteja em movimento ou em repouso, pois tais estados exigiriam uma estrutura espacial adicional em relação à qual pudessem ser definidos. Assim, o princípio da relatividade não se pronuncia diretamente sobre a existência ou inexistência de uma estrutura espacial absoluta. Dessa forma, a admissão de um espaço absoluto não implica a existência de um corpo privilegiado nem de um referencial material em repouso absoluto [13]. Em princípio, o espaço pode possuir caráter absoluto sem que qualquer corpo esteja em repouso relativamente a ele, sendo possível que todos os corpos se encontrem em movimento [11].

Consequentemente, a inexistência de corpos privilegiados ou de referenciais materiais em repouso absoluto não implica a inexistência de uma estrutura espacial absoluta.

3.2.2. Espaço absoluto e o “meio de interação” físico

Além do espaço absoluto, propõe-se a existência de uma entidade distinta:

- *Meio de interação*: um meio físico não material (ou não material no sentido clássico), responsável por possibilitar as interações entre objetos, inclusive à distância.

Esse meio não se desloca no espaço absoluto, não produz efeitos de arrasto e não é transportado pelos corpos. Trata-se de uma estrutura física associada ao espaço, homogênea e isotrópica, cujas propriedades podem ser modificadas pela presença da matéria. Diferentemente do espaço absoluto, esse meio possui caráter dinâmico e constitui o suporte da propagação contínua e local das interações físicas. Sem ele, a explicação física da propagação contínua e local das interações entre corpos espacialmente separados tornar-se-ia problemática [5]. A matéria altera as propriedades físicas desse meio, dando origem a configurações que se manifestam como campos físicos, tais como os campos eletromagnéticos e gravitacionais. A ideia de um meio físico subjacente à propagação das interações eletromagnéticas já se encontrava presente na obra de James Clerk Maxwell [33, 34]. Posteriormente, Albert Einstein, embora tenha rejeitado o éter mecânico clássico, admitiu a existência de uma estrutura física associada ao espaço, por vezes descrita como uma espécie de éter [5, 8]. A concepção aqui proposta aproxima-se parcialmente da de Maxwell ao reconhecer a realidade física dos campos e interpretá-los como estados ou configurações de um meio fundamental, e não como entidades ontologicamente independentes. No entanto, esta formulação **não recupera o éter mecânico clássico, e não se postula aqui um meio material detectável.**

3.2.3. O espaço como “pano de fundo” indispensável

Assim como o Sol existe independentemente das teorias que o descrevem, a existência do espaço independe das formulações teóricas e constitui condição necessária para qualquer descrição física [35]. Mesmo em teorias formuladas no espaço-tempo quadridimensional [5, 7], o espaço tridimensional permanece indispensável como estrutura subjacente para a interpretação dos fenômenos; isto é, sua representação física continua a depender de direções espaciais. As coordenadas x , y e z não são meras etiquetas matemáticas, mas representam direções físicas nas quais os objetos existem, interagem e se movem. Sem essas dimensões, não seria possível definir distâncias, volumes, orientações ou a propagação de ondas. Assim, embora o formalismo matemático reorganize a descrição dos fenômenos, ele não elimina a necessidade de um domínio de extensão nem a realidade ontológica do espaço. Nessa perspectiva, o espaço não deve ser entendido como um recipiente. Um recipiente é uma estrutura material que delimita uma região no espaço e, portanto, depende dele. Sobre essa matéria, Barbour [36] diz:

“O espaço e o tempo em seu papel anterior como o palco do mundo são redundantes. Não há recipiente. O mundo não contém coisas, ele é coisas. Essas coisas são Agoras que, por assim dizer, pairam no nada.” [36, p. 16] (Tradução do autor)

No entanto, sob a perspectiva adotada neste trabalho, esse 'nada', no qual as 'coisas são Agoras que, por assim dizer, pairam', corresponde ao próprio espaço absoluto.

3.2.4. O conceito de tempo

A noção de tempo é uma das mais profundas e controversas tanto na física quanto na filosofia. Ao longo da história, diferentes concepções foram propostas. Essas concepções podem ser organizadas, segundo [29], em duas concepções principais:

Concepção 1: O tempo é uma ordem de acontecimentos; uma maneira de medir as mudanças observadas no mundo. O tempo não é uma entidade autônoma.

Concepção 2: *O tempo é uma entidade autônoma que flui independentemente de qualquer mudança. Se cessassem todas as mudanças, o tempo continuaria fluindo.*

Segundo essas concepções, o tempo possui as seguintes características, consideradas aqui críticas: flui uniformemente [10]; não existe por si só, sendo apenas uma relação entre eventos [36, 37]; sem mudanças, não há tempo [36, 38]; o tempo depende do estado de movimento e do campo gravitacional [5]; o tempo possui direção devido ao aumento da entropia [39]; o tempo depende da percepção da consciência [40, 41]; o tempo surge de processos mais fundamentais [42, 43]; passado, presente e futuro coexistem [44, 45].

3.2.4.1. Problemas conceituais dessas abordagens

O “tempo fluindo uniformemente” e a “passagem do tempo”

A ideia de que o tempo “flui” ou “passa” decorre, em grande medida, de uma interpretação metafórica associada às transformações observadas nos sistemas físicos [46]. No entanto, o tempo não pode ser concebido literalmente como algo que se move, corre ou escoia, pois, velocidade e movimento já pressupõem tempo para serem definidos. Assim, atribuir rapidez ao próprio tempo conduz a um problema conceitual: a noção de fluxo temporal utiliza implicitamente aquilo que pretende explicar [44]. Quando se afirma, por exemplo, que “o tempo passou rápido”, isso não significa que o tempo adquiriu maior velocidade. O que efetivamente ocorreu foi uma sucessão intensa de mudanças físicas, estados materiais ou experiências subjetivas em determinado intervalo. Portanto, não é o tempo que flui, são os sistemas físicos que se transformam.

O tempo relacional

Se o tempo fosse apenas relação entre eventos, não seria possível falar de “antes” ou “depois” da própria relação; no entanto, faz-se isso naturalmente. Logo, admitir anterioridade e posterioridade implica reconhecer o tempo independentemente das relações.

O tempo relativístico: a identificação do tempo com processos físicos

O problema central da concepção relativística do tempo reside na identificação implícita entre tempo e comportamento de processos físicos [5, 9]. Relógios são sistemas físicos, e suas mudanças refletem condições materiais específicas; diferenças em seus ritmos não implicam alterações no próprio tempo. O que se observa experimentalmente são variações no comportamento de sistemas submetidos a condições distintas, como estados de movimento ou campos gravitacionais distintos.

Dois sistemas coexistentes podem evoluir segundo ritmos processuais diferentes, sem que isso implique dilatação do tempo. Por exemplo, enquanto a Terra completa determinado número de voltas em torno do Sol, Marte completa outro número. A diferença entre esses ciclos não implica alteração temporal, mas apenas diferenças entre processos físicos. Ambos os sistemas coexistem no mesmo contexto objetivo de acontecimentos.

Não se nega que processos possam apresentar durações diferentes; faz-se apenas uma distinção entre tempo e quantidade de atividades processuais.

O problema torna-se ainda mais evidente quando se considera a própria ideia de ‘transformação’ (dilatação) do tempo. Toda transformação constitui um processo, e todo processo pressupõe um “quando” em que ocorre. Assim, afirmar que o tempo se transforma implica pressupor previamente uma ordem temporal na qual essa transformação ocorreria. Isso conduz a uma regressão conceitual: se o tempo pudesse mudar, seria necessário outro tempo para ordenar essa mudança. Nessa perspectiva, não faz sentido atribuir um tempo próprio e ontologicamente distinto a cada sistema físico coexistente.

Coexistência de passado, presente e futuro

A teoria do universo em bloco [44] sustenta que eventos passados, presentes e futuros coexistem igualmente, distinguindo-se apenas por sua posição na estrutura quadridimensional do espaço-tempo. Nessa perspectiva, o nascimento de Albert Einstein, sua morte e quaisquer eventos futuros possuem a mesma realidade ontológica. Essa interpretação, entretanto, suscita dificuldades conceituais.

Em primeiro lugar, torna-se necessário esclarecer o significado de *existir*. Se um evento futuro já existe objetivamente, em que sentido se pode afirmar que ele ainda ocorrerá? Do mesmo modo, se um evento passado continua existindo, em que sentido se pode dizer que ele ocorreu? Além disso, como um evento deixa de ser presente e passa a ser passado? A afirmação de que todos os eventos são igualmente reais não responde a essas questões, mas desloca o problema para a própria definição de existência.

Dificuldades semelhantes surgem em relação à causalidade. Em seu significado usual, causar é produzir ou fazer surgir um efeito. Contudo, se causa e efeito possuem igual realidade ontológica, em que sentido um evento causa o outro? Se a morte de Albert Einstein já existe na estrutura do espaço-tempo, em que sentido sua doença a causou? Também permanece sem esclarecimento a natureza da dependência entre causa e efeito: trata-se de uma relação lógica, física, matemática ou ontológica? Além disso, é necessário explicar por que a causalidade é assimétrica. Se ambos os eventos coexistem igualmente, por que se afirma que a doença causa a morte, e não o inverso? A mera ordenação temporal parece insuficiente para justificar essa assimetria em uma concepção na qual o tempo não transcorre objetivamente.

Outra dificuldade refere-se à passagem do tempo. No universo em bloco, não ocorre uma transição objetiva entre presente, passado e futuro; todos os eventos permanecem fixos em suas respectivas posições espaço-temporais. Assim, o nascimento de Einstein nunca se torna passado em sentido objetivo, mas apenas é considerado passado por observadores situados em eventos posteriores. Consequentemente, a distinção entre passado, presente e futuro torna-se relativa à posição ocupada no bloco, e não a uma transformação objetiva da realidade. Surge, então, a questão de como compreender a sucessão dos acontecimentos e a própria dinâmica do universo, caso não exista um processo objetivo de mudança ou atualização dos eventos. Da mesma forma, torna-se necessário esclarecer como um observador situado em determinado evento pode obter informações acerca de eventos classificados como passados.

A experiência consciente introduz uma dificuldade adicional. Embora o universo em bloco atribua igual realidade a todos os estados temporais de um observador, a consciência parece estar invariavelmente associada ao que se denomina presente. Recordam-se o passado e antecipam-se eventos futuros, mas nunca se experimentam simultaneamente diferentes estágios temporais. Surge, então, a questão de por que a experiência consciente está localizada em apenas um evento, se todos possuem igual realidade ontológica. Não basta afirmar que cada ponto da linha de universo corresponde ao presente do observador situado nesse ponto, pois essa resposta pressupõe precisamente aquilo que necessita ser explicado. Se todos os estados do observador existem igualmente, em que consiste a unidade do sujeito consciente? O que distingue o estado atualmente experimentado dos demais estados igualmente existentes? E como compreender a sucessão da experiência se nenhuma transição objetiva entre presente, passado e futuro ocorre?

Assim, se a concepção do universo em bloco atribui igual realidade ontológica a todos os eventos, ela deve fornecer uma explicação conceitualmente precisa para o significado de existência, causalidade, assimetria causal, transição temporal e experiência consciente. Enquanto esses conceitos permanecerem apenas pressupostos ou redefinidos sem explicitação de seu conteúdo ontológico, essa interpretação parece deixar em aberto problemas fundamentais relativos à natureza do tempo e da realidade física.

O tempo termodinâmico e a confusão entre reversibilidade processual e direção temporal

A interpretação segundo a qual o aumento da entropia demonstraria que “o tempo só vai para frente” constitui uma das concepções mais difundidas acerca da seta do tempo na física e na filosofia da ciência [39, 43, 44, 46, 47]. Nessa perspectiva, a irreversibilidade termodinâmica é frequentemente tomada como manifestação da direção temporal [39, 43, 44, 46, 47]. O principal problema dessa abordagem consiste, entretanto, em identificar irreversibilidade processual com direção temporal. Quando se afirma, por exemplo, que “um copo quebrado não retorna espontaneamente ao estado original, logo o tempo avança”, conclui-se algo sobre a natureza do tempo a partir do comportamento de um processo físico específico. Entretanto, ainda que o copo se recompusesse naturalmente, isso não implicaria retorno temporal, representaria apenas um novo processo físico ocorrendo posteriormente. A recomposição do copo não constituiria reversão temporal ou retorno ao passado, mas a um novo estado físico futuro, réplica de um estado passado, que se tornaria presente. Continuariam existindo anterioridade, simultaneidade e posterioridade entre os acontecimentos. Desse modo, reversão processual não equivale a reversão temporal.

Mesmo que determinados sistemas físicos apresentassem redução espontânea de entropia, continuaria existindo uma ordem objetiva entre os eventos. O que se alteraria seria apenas o comportamento dos processos físicos, e não a ordem temporal. Assim, a chamada “direção do tempo” não decorre

necessariamente do aumento da entropia. A ordenação temporal dos acontecimentos permaneceria mesmo em cenários hipotéticos nos quais sistemas físicos evoluíssem em sentido inverso ao observado termodinamicamente. A entropia descreve propriedades de determinados processos físicos; não constitui fundamento para definir a natureza ou “a direção do tempo”.

Tempo psicológico

Percepções variam entre indivíduos; o tempo, no sentido físico, não depende disso. O tempo não é a forma como são percebidos.

Tempo emergente

Se o tempo emergisse de processos mais básicos, esses processos ocorreriam “antes” do tempo, o que já pressupõe tempo. Logo, a ideia é contraditória, pois todo processo pressupõe um “quando” ocorre e um “quando” não ocorre.

3.2.4.2. Concepção de tempo segundo esta abordagem

Diante das limitações das abordagens anteriores, propõe-se a seguinte concepção:

Natureza do tempo

Na perspectiva adotada aqui, o tempo não constitui um processo físico, uma configuração material, uma entidade dinâmica, nem consiste no número de actividades ou na taxa de transformação dos sistemas físicos. Também não constitui uma propriedade dos relógios. Antes de definir o conceito de tempo, é conveniente estabelecer o conceito de *existência física*.

Definição de existência: *Existir é ocupar espaço.* Um sistema existe se, e somente se, ocupa uma região do espaço. Os objetos existem ao ocuparem uma determinada região espacial. Todo sistema físico é necessariamente espacialmente localizado. Um sistema que não ocupe qualquer região do espaço não pode interagir, possuir propriedades físicas nem integrar a realidade física. Nesse sentido, a ocupação do espaço constitui condição necessária para a existência física. Por exemplo, Albert Einstein já não existe, pois a configuração física que o constituía deixou de ocupar espaço. As partículas que compunham seu corpo continuam existindo, pois ainda ocupam regiões do espaço, mas já não se encontram organizadas na configuração correspondente ao organismo que era identificado como Albert Einstein.

Tempo: O tempo está associado à condição de existência dos objetos. Ele caracteriza o “quando” da existência e o “quando” da inexistência de sistemas, estados ou configurações físicas ou não físicas. Assim, pode-se afirmar que um objeto ainda não existia em determinado momento ou que deixou de existir em outro. Há, portanto, um antes, um durante e um depois relativamente à existência de cada sistema considerado. Assim, *o tempo pode ser compreendido como o “quando” da ocupação ou não ocupação do espaço, ele é uma referência abstrata utilizada para ordenar a ocupação sucessiva do espaço.* Todo evento pressupõe um “quando” de ocorrência, assim como toda existência material pressupõe uma localização espacial. O tempo não constitui um recipiente no qual os objetos existem. ele apenas ordena a ocupação do espaço.

O tempo não depende de movimento, matéria, interações físicas ou representações numéricas, não depende de mudanças. As mudanças não criam o tempo, apenas permitem estabelecer relações de anterioridade, posterioridade e simultaneidade ou coexistência entre eventos.

Passado, presente e futuro

Passado, presente e futuro correspondem a distinções relativas à ordem das ocorrências físicas ou ocupação de espaço.

O passado não existe, ele diz respeito ao quando de configurações ou estados físicos anteriores ao atual, que ocuparam espaço, mas deixaram de ocupá-lo em consequência de mudanças das transformações dos próprios sistemas.

Presente é o quando da ocupação do espaço, ou seja, de estar em alguma região do espaço.

O futuro não existe. O futuro corresponde ao quando de estados ou configurações que ainda não ocupam espaço, mas poderão ocupar.

Assim, passado e futuro não designam regiões onde objetos existem, mas qualificam, respectivamente, configurações que deixaram de ocupar o espaço e configurações que ainda não o ocupam. Essas distinções estão associadas à condição de existência dos sistemas físicos no espaço e à ordem objetiva de suas ocorrências.

Sobre o “agora”

Do ponto de vista matemático, o “agora” pode ser representado como um instante idealizado, isto é, como um ponto no eixo temporal sem duração [48]. Na realidade física, porém, o “agora” não corresponde a um instante estritamente nulo (ou seja, um ponto temporal de duração exatamente igual a zero), mas a um intervalo temporal no qual ocorrem eventos. Isso ocorre porque toda experiência, observação ou descrição de um acontecimento envolve necessariamente uma duração [40, 49]. Por exemplo, quando alguém afirma que “o carro passou agora”, essa afirmação não se refere rigorosamente ao instante exato em que a frase é pronunciada, mas a um intervalo temporal suficientemente próximo para ser identificado como atual. O instante, nesse sentido, constitui uma idealização matemática útil para a descrição dos fenômenos, mas não corresponde diretamente a uma ocorrência física observável. Assim, o “agora” prático é constituído de eventos passados e presentes.

Na perspectiva adotada, objetivamente, *existe um “agora” universal no sentido de que múltiplos acontecimentos coexistem simultaneamente no universo*. Enquanto um sistema físico se encontra em determinada condição atual, inúmeros outros sistemas coexistem objetivamente em suas respectivas condições. Essa coexistência, contudo, não implica acesso imediato ao estado atual de sistemas distantes. A partilha imediata desse “agora” entre regiões espacialmente separadas é impossibilitada pela velocidade finita de propagação da informação [9, 50]. Assim, observadores localizados em diferentes regiões do espaço não possuem acesso instantâneo a informações do “agora” uns dos outros. Quando a informação proveniente de um evento distante é recebida, ela já corresponde a um estado anterior (ao passado) daquele sistema [50]. Desse modo, a percepção do “agora” é relativa às condições de observação e transmissão de informação. Entretanto, essas limitações são de natureza epistemológica, pois dizem respeito ao acesso aos acontecimentos, e não à existência objetiva dos próprios eventos. A coexistência dos acontecimentos permanece, portanto, independente das condições particulares de observação.

Eventos, referência temporal e tempo operacional

Cada sistema físico está associado a uma sequência de eventos que coexistem com inúmeros outros acontecimentos distribuídos pelo universo. A descrição física do tempo baseia-se precisamente na explicitação das relações objetivas de coexistência, sucessão e coincidência entre esses eventos [9, 50]. Relógios são sistemas físicos nos quais ocorrem processos regulares utilizados como referência para a descrição temporal de outros eventos [9, 52]. Quando um relógio é utilizado para datar uma ocorrência, estabelece-se apenas uma coincidência entre a ocorrência observada e determinado estado do relógio. Por exemplo, quando se afirma que uma bola caiu ao chão às 19h30min, isso significa apenas que o evento “queda da bola” ocorreu em coincidência com o evento “o relógio marcar 19h30min”. Assim, a marcação do relógio não é o tempo em si, mas uma convenção numérica utilizada para representar o “quando” de uma ocorrência. A identificação do tempo com a marcação dos relógios conduz à confusão entre a ordem existencial e sua representação operacional.

Desse modo, torna-se necessário distinguir entre *tempo objetivo (universal)* e *tempo operacional*. O *tempo objetivo* corresponde à ordem real das ocorrências físicas [51], isto é, ao “quando” objetivo dos eventos. Essa ordem independe da percepção, dos instrumentos de medição e dos referenciais adotados pelos observadores. Já o *tempo operacional* corresponde à representação física dessa ordem por meio de relógios, sistemas de sincronização e modelos de descrição temporal [5, 9, 51]. Ou dito de outra forma, o *tempo operacional* corresponde à sua quantificação do *tempo universal* mediante um processo físico de referência (*o quanto no quando*). Coordenadas temporais possuem caráter operacional [9]. Diferentes observadores podem atribuir valores distintos ao mesmo evento sem que isso implique múltiplos tempos objetivos.

Na perspectiva adotada neste trabalho, *o tempo objetivo é absoluto, enquanto o tempo operacional é relativo ao padrão e às condições do processo físico utilizado para sua determinação*. O tempo universal não possui, em si mesmo, uma escala numérica ou uma unidade intrínseca. Sua quantificação requer um padrão temporal de referência, assim como a quantificação de uma extensão espacial requer uma unidade

estabelecida como termo de comparação. Em ambos os casos, a unidade não constitui a própria grandeza, mas apenas o padrão utilizado para representá-la quantitativamente. Essa concepção pode ser ilustrada pelo que aqui se designa por *diagrama dos tempos* (ver Fig. 1), no qual a primeira linha representa um mesmo intervalo de tempo universal, enquanto as linhas inferiores representam as escalas operacionais de dois relógios, A e B. Se os processos físicos utilizados como referência por esses relógios apresentarem diferentes taxas de atividade, o mesmo intervalo de tempo universal poderá corresponder a diferentes números de subdivisões nas respectivas escalas.

Diagrama dos Tempos

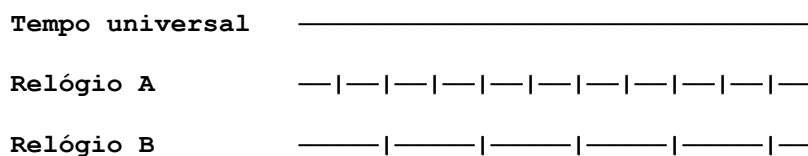


Figura 1 – Diagrama temporal ilustrando a distinção entre o tempo objetivo (universal) e o tempo operacional.

A igualdade da extensão das três linhas representa o mesmo intervalo de tempo universal, enquanto a diferença no número de subdivisões representa apenas a diferença entre as respectivas escalas operacionais. Observe-se que *cada traço vertical da escala operacional de B coincide, em um mesmo ponto da linha do tempo universal, com dois traços da escala operacional de A*. Assim, diferentes leituras de relógios podem corresponder ao mesmo intervalo temporal objetivo, sem que isso implique, por si só, diferentes tempos universais. Nesse sentido, o relógio não determina o tempo nem mede diretamente o tempo universal; sua indicação constitui uma representação quantitativa aproximada e relativa desse tempo, obtida mediante um processo físico tomado como referência. Em contraste, o parâmetro t utilizado na formulação das leis físicas representa, idealmente, o tempo universal, isto é, o parâmetro comum associado ao *quando* objetivo dos acontecimentos físicos. A relação entre o tempo universal e suas diferentes representações operacionais, bem como as consequências dessa distinção para a descrição dos fenômenos físicos, será abordada com mais detalhes nas partes posteriores da série.

A relação entre o tempo universal e suas diferentes representações operacionais, bem como as consequências dessa distinção para a descrição dos fenômenos físicos, será abordada com mais detalhes nas partes posteriores da série.

Limitação epistemológica e propagação da informação

Embora os eventos possuam relações objetivas de coexistência e sucessão, existe uma limitação fundamental no acesso a essas relações: a informação propaga-se a velocidades finitas [9, 50]. Observadores não possuem acesso imediato aos acontecimentos distantes nem à totalidade das ocorrências objetivas do universo. Assim, o tempo percebido, medido ou inferido depende da propagação dos sinais físicos, da posição do observador, das condições do meio, dos instrumentos empregados e dos modelos utilizados na reconstrução temporal dos eventos [50, 51]. Desse modo, o tempo operacional constitui sempre uma reconstrução condicionada da ordem das ocorrências.

Sobre simultaneidade

A questão da simultaneidade ocupa posição central nos fundamentos da física moderna [5, 9, 53]. Na mecânica clássica, admitia-se implicitamente a existência de uma simultaneidade objetiva e universal, válida independentemente do estado de movimento dos observadores: dois eventos espacialmente separados que ocorressem “ao mesmo tempo” para um observador deveriam ocorrer igualmente ao mesmo tempo para qualquer outro observador. Essa concepção estava associada à ideia de um tempo absoluto, concebido como entidade física independente dos processos de medição e das condições particulares de observação [10]. No início do século XX, Albert Einstein [5, 9] propôs uma reformulação radical desse conceito no contexto da relatividade especial. Segundo sua abordagem, a simultaneidade entre eventos espacialmente separados não constitui uma propriedade absoluta dos próprios eventos, mas depende do

estado de movimento do observador. A definição operacional de simultaneidade passa então a basear-se na propagação de sinais luminosos e na hipótese de que a velocidade da luz no vácuo possui o mesmo valor em todas as direções para todos os referenciais inerciais [5, 9].

Para justificar essa nova concepção, Einstein introduz o conhecido experimento mental envolvendo dois raios que atingem simultaneamente os pontos A e B de uma via férrea [5]. Um observador localizado no ponto médio M da estrada recebe simultaneamente os sinais luminosos provenientes dos dois eventos e conclui, portanto, que as descargas ocorreram ao mesmo tempo. Em seguida, considera-se um trem em movimento ao longo da via férrea, contendo um segundo observador situado em seu ponto médio M'. Como o trem se desloca na direção de um dos sinais luminosos e afasta-se do outro, o observador em M' recebe primeiro o sinal proveniente de B e depois o proveniente de A. Com base nisso, Einstein conclui que os eventos não são simultâneos no referencial do trem [5]. Entretanto, essa argumentação apresenta uma dificuldade conceitual relevante frequentemente negligenciada nas exposições tradicionais da relatividade da simultaneidade. O problema reside no fato de que a explicação fornecida por Einstein atribui explicitamente a diferença observada ao movimento do observador relativamente às frentes luminosas. O observador em M' recebe os sinais em instantes distintos porque, segundo a descrição apresentada, move-se ao encontro de um dos sinais e afasta-se do outro durante a propagação da luz.

Todavia, essa explicação torna-se problemática quando analisada de maneira rigorosamente simétrica. O ponto médio M da via férrea também possui movimento relativamente a inúmeros outros referenciais físicos possíveis, como, por exemplo, referenciais associados ao Sol, à galáxia ou a qualquer sistema “inercial” externo à Terra [11]. Consequentemente, do ponto de vista desses referenciais externos, o próprio observador em M também se desloca relativamente às frentes luminosas provenientes de A e B, aproximando-se de uma delas e afastando-se da outra durante a propagação da luz. Nesse caso, o mesmo mecanismo causal utilizado para justificar a não simultaneidade no trem deveria igualmente produzir um efeito análogo para o observador da estrada. Em outras palavras, se a causa física relevante da não simultaneidade consiste no movimento do observador relativamente aos sinais luminosos, então tal efeito não pode ser atribuído exclusivamente ao trem, pois a estrada também se encontra em movimento relativamente a outros referenciais, ou seja, a estrada também é um “trem” num referencial externo à Terra [5]. A dificuldade conceitual decorre do fato de que o argumento de Einstein trata implicitamente o referencial da estrada como um sistema privilegiado em relação à propagação luminosa. Embora a relatividade especial negue explicitamente a existência de referenciais absolutos, o experimento mental apresentado introduz uma assimetria física implícita: o movimento do trem relativamente à luz é considerado fisicamente relevante, enquanto o movimento da estrada relativamente à luz é ignorado na análise causal do fenômeno. Dessa forma, a conclusão de que os eventos são simultâneos na estrada, mas não no trem, decorre de problemas conceituais graves. O experimento, portanto, não estabelece de maneira logicamente necessária a relatividade da simultaneidade, mas apenas mostra que diferentes observadores podem receber sinais luminosos em instantes distintos devido ao movimento relativo entre observador e sinais propagantes.

Uma dificuldade adicional do experimento mental proposto por Albert Einstein reside na ambiguidade conceitual presente no uso do termo “simultaneidade”. Embora a relatividade especial seja apresentada como uma negação da simultaneidade absoluta, a própria estrutura do experimento parece pressupor implicitamente uma distinção entre o instante de ocorrência dos eventos físicos e o instante de recepção dos sinais luminosos por diferentes observadores. No experimento, Einstein considera inicialmente dois eventos físicos bem definidos: as descargas elétricas ocorridas nos pontos A e B da via férrea [5]. Esses eventos são apresentados, no início, como ocorrendo simultaneamente [5]. Em seguida, analisa-se a propagação dos sinais luminosos emitidos por esses eventos até diferentes observadores: o observador em M, localizado no ponto médio da estrada, e o observador em M', localizado no ponto médio do trem em movimento. Entretanto, ao longo da argumentação, não se torna conceitualmente claro a qual conjunto de eventos o termo “simultaneidade” está efetivamente sendo aplicado. Em certos momentos, a simultaneidade parece referir-se às próprias ocorrências físicas das descargas elétricas em A e B; em outros, refere-se à coincidência temporal na chegada dos sinais luminosos aos observadores. Essa oscilação semântica produz uma ambiguidade fundamental no experimento. Com efeito, existem no problema pelo menos dois níveis distintos de acontecimentos:

1. os eventos físicos primários, correspondentes às quedas dos raios em A e B;

2. os eventos secundários de percepção, correspondentes à chegada dos sinais luminosos aos observadores.

Esses dois níveis não são equivalentes.

A coincidência temporal entre eventos de percepção não implica necessariamente coincidência temporal entre os eventos físicos observados, assim como uma defasagem perceptiva não implica obrigatoriamente uma defasagem objetiva entre as ocorrências físicas originais. A propagação finita dos sinais luminosos introduz necessariamente uma separação entre o acontecimento físico e sua percepção por observadores situados em diferentes posições ou estados de movimento [50]. Todavia, o argumento de Einstein passa da diferença nos tempos de recepção dos sinais para uma conclusão acerca da própria simultaneidade dos eventos físicos originais. Em outras palavras, a não simultaneidade dos eventos de percepção é convertida em não simultaneidade dos eventos observados. Essa transição, porém, não é fisicamente justificável.

Consequentemente, o argumento apresenta uma ambiguidade conceitual fundamental entre a simultaneidade física dos eventos e a simultaneidade perceptiva dos sinais luminosos. Essa ambiguidade compromete a clareza lógica do experimento e enfraquece sua pretensão de estabelecer, de forma conclusiva, a inexistência de simultaneidade absoluta. No máximo, o experimento estabelece que diferentes observadores podem receber os sinais luminosos provenientes de um mesmo par de eventos em instantes distintos, fato que, por si só, não constitui demonstração suficiente de que os próprios eventos físicos originais não tenham ocorrido simultaneamente. Essa dificuldade não se restringe ao experimento em questão, mas também está presente em diversas abordagens relativísticas da simultaneidade, nas quais a simultaneidade entre dois eventos A e B (ocorrência objetiva) é definida em função de outros eventos C e D, correspondentes à recepção ou à percepção dos sinais luminosos provenientes de A e B [11]. Em outras palavras, a simultaneidade dos eventos físicos originais é inferida a partir da simultaneidade de eventos de observação. Desse modo, a definição de simultaneidade passa a depender de eventos de percepção, e não diretamente dos próprios eventos cuja simultaneidade se pretende estabelecer. Para evitar essas ambiguidades em torno do conceito de simultaneidade, torna-se necessário distinguir três níveis de simultaneidade:

- **Simultaneidade das ocorrências:** refere-se à coincidência real entre as ocorrências físicas dos eventos ou à *mesma ordem de ocorrência*, independentemente de observadores; é de natureza absoluta. Entretanto, devido à propagação finita da informação, essa simultaneidade não é diretamente acessível aos observadores.
- **Simultaneidade da percepção:** refere-se à coincidência temporal na recepção dos sinais provenientes dos eventos, dependendo da propagação dos sinais físicos e das condições de observação. É relativa.
- **Simultaneidade inferida:** corresponde à reconstrução operacional dos instantes de ocorrência dos eventos realizada pelo observador com base nas informações observacionais, dependendo de procedimentos de sincronização, modelos físicos e sistemas de referência. É relativista.

Assim, divergências entre observadores referem-se às reconstruções operacionais da simultaneidade, e não necessariamente à ordem objetiva das ocorrências físicas.

3.2.5. Espaço e tempo: ligados, mas conceitualmente distintos

Certas abordagens defendem que espaço e tempo constituem componentes inseparáveis de uma única entidade física – o *espaço-tempo*. Neste trabalho, não se questiona a coexistência operacional de ambos na descrição dos eventos, uma vez que espaço e tempo são indispensáveis para caracterizar qualquer fenômeno físico [5, 7, 50]. No entanto, isso não implica que sejam idênticos ou intercambiáveis. A relação entre espaço e tempo pode ser comparada à relação entre base e expoente em uma potência: não há potência sem base, tampouco sem expoente; ainda assim, base não é expoente, e expoente não é base. De modo análogo, espaço e tempo são conjuntamente necessários para a definição dos eventos e da realidade física, constituindo o domínio das ocorrências (o “espaço-tempo”), sem perderem suas funções conceituais próprias. O espaço define o domínio de extensão, especificando “onde” os fenômenos ocorrem, enquanto o tempo ordena os acontecimentos e caracteriza sua duração, indicando “quando” ocorrem. As trajetórias

dos objetos são aqui interpretadas como sucessões de posições no espaço organizadas temporalmente. Ainda que a física relativista descreva os fenômenos dentro de uma estrutura espaço-temporal [5, 7], essa formulação não elimina a distinção funcional entre espaço e tempo. Reconhecer essa distinção evita ambiguidades decorrentes de interpretações puramente geométricas do espaço-tempo.

3.2.5.1. Limitações da ontologia de eventos

Em contraste com a concepção aqui adotada, algumas abordagens contemporâneas propõem substituir a ontologia clássica do espaço, entendido como domínio independente cujos pontos persistem ao longo do tempo, por uma ontologia de eventos no espaço-tempo [54]. Um exemplo representativo é a proposta de Tim Maudlin [54], na qual a distinção entre espaço e tempo absolutos é abandonada em favor de uma estrutura unificada composta por eventos. Nessa perspectiva, um evento é definido como “um lugar no espaço em um tempo” (*a place in space at a time*) [54], sendo tratado como entidade fundamental, pontual e sem extensão.

Entretanto, essa reformulação enfrenta dificuldades conceituais relevantes. A própria definição de evento recorre a noções que pressupõem aquilo que se pretende eliminar. A expressão “lugar no espaço” implica a existência de uma estrutura espacial previamente identificável e reidentificável. Um lugar não constitui um evento, mas uma posição espacial cuja identidade pressupõe alguma forma de persistência ou continuidade do espaço. Assim, a ontologia de eventos acaba por reintroduzir implicitamente um domínio espacial subjacente. Além disso, caracterizar um evento como algo que “ocorre” pressupõe uma ordem temporal na qual esse ocorrer se insere. Caso o evento seja tratado apenas como algo que “existe permanentemente”, perde-se seu caráter de acontecimento. Surge, então, uma circularidade conceitual: o evento depende de espaço e tempo para ser definido, enquanto espaço e tempo são apresentados como um conjunto derivado dos próprios eventos.

Há ainda um problema relacionado à individuação dos eventos. A localização espacial, por si só, não é suficiente para distingui-los, pois um mesmo lugar pode ser ocupado repetidamente e sob condições físicas semelhantes. O que impede a identidade entre ocorrências sucessivas é precisamente a ordem temporal: pode-se retornar ao mesmo lugar, mas não ao mesmo momento. Mesmo quando um fenômeno é reproduzido com propriedades físicas idênticas e na mesma posição espacial, trata-se de um novo evento, distinto do anterior por ocorrer em outro instante. Assim, a individuação dos eventos repousa na assimetria temporal entre “antes” e “depois”, enquanto o espaço admite a reidentificação de posições. Desse modo, a ontologia de eventos não elimina de maneira consistente a dependência de uma estrutura espaçotemporal subjacente nem fornece, por si só, um critério suficientemente claro de individuação dos acontecimentos.

3.2.5.2. Sobre os pressupostos espaciais implícitos nas transformações de Lorentz e o uso do termo “evento”

Esta seção tem por objetivo explicitar pressupostos ontológicos subjacentes às transformações de Lorentz. Embora essa abordagem possa parecer não convencional, sua coerência torna-se mais clara quando se examina rigorosamente a derivação não axiomática das transformações de Lorentz, conforme apresentado na Seção 2.1.1.

Inicialmente, é necessário esclarecer o estatuto dos conjuntos (x, y, z, t) e (x', y', z', t') . Embora frequentemente identificados com o “evento”, tais conjuntos não constituem o evento em si, mas descrições numéricas de um ponto do espaço-tempo [4, 5, 9, 50]. Tratam-se, portanto, de representações distintas da localização espaçotemporal de um mesmo evento físico em diferentes sistemas de referência. Em particular, (x, y, z) e (x', y', z') referem-se ao mesmo lugar objetivo, enquanto t e t' expressam representações distintas de um mesmo momento objetivo. Nesse sentido, as transformações de Lorentz estabelecem relações entre representações coordenadas, sem implicar modificação do evento físico descrito e, portanto, do espaço e tempo associados [4, 5, 18, 50]. Sua função consiste em reexpressar uma mesma realidade física em diferentes sistemas de coordenadas. Além disso, sua derivação pressupõe propriedades como homogeneidade e isotropia do espaço, indicando a existência de um domínio físico comum subjacente às descrições [6, 18]. Essa interpretação pode ser ilustrada de forma simples: um ponto traçado em uma superfície permanece o mesmo independentemente do sistema de coordenadas utilizado para descrevê-lo. Mudanças no sistema alteram apenas sua representação numérica, e não a realidade física representada. De

modo análogo, as transformações de Lorentz operam sobre coordenadas dos eventos, não sobre os próprios eventos físicos em si ou ao espaço e tempo inerentes.

Em muitas formulações da relatividade, o termo “evento” é utilizado em dois sentidos distintos: por um lado, designa um ponto do espaço-tempo especificado geometricamente por coordenadas [4]; por outro, refere-se a uma ocorrência física localizada, como a emissão ou recepção de um sinal luminoso [5, 50]. Essa dupla utilização introduz uma ambiguidade conceitual importante. Um ponto do espaço-tempo pertence à estrutura geométrica da teoria, enquanto uma ocorrência física corresponde a um fenômeno efetivo. Embora uma ocorrência possa ser associada a um ponto do espaço-tempo, não há identidade conceitual entre ambos. A identificação implícita entre “evento” e “ponto do espaço-tempo” tende a obscurecer a distinção entre dois níveis de descrição: o nível geométrico, correspondente à estrutura espaço-temporal, e o nível físico, correspondente aos fenômenos que nela ocorrem. Essa distinção torna-se particularmente relevante quando se discute o estatuto ontológico do espaço-tempo, pois os pontos geométricos funcionam apenas como elementos de localização e representação de processos físicos, e não como os próprios acontecimentos. No presente trabalho, o termo “evento” será utilizado exclusivamente para designar ocorrências físicas localizadas, preservando-se a distinção entre estrutura geométrica e conteúdo físico.

3.2.6. Espaço absoluto e definição de movimento

À primeira vista, a noção de espaço absoluto parece incompatível com a ideia de que todo movimento é relativo [5, 10, 11]. Essa tensão, contudo, é apenas aparente. O espaço absoluto, como concebido neste trabalho, não implica repouso absoluto de corpos, mas a existência de um domínio em relação ao qual o movimento pode ser definido. Assim, o movimento permanece relacional, embora o termo de referência não precise ser necessariamente um corpo material. Nesse contexto, distinguem-se dois tipos de movimento, em consonância com a formulação clássica de Isaac Newton [10]:

- *Movimento absoluto (ou próprio)*: deslocamento de um corpo em relação ao espaço;
- *Movimento relativo*: deslocamento de um corpo em relação a outros corpos materiais.

Essa distinção decorre da concepção adotada neste trabalho, segundo a qual o movimento não se reduz a relações entre corpos, mas corresponde a um estado definido em relação a um substrato físico comum. Corpos e referenciais materiais desempenham papel essencial na descrição e mensuração do movimento [5, 9], mas não constituem sua condição ontológica. Para ilustrar essa ideia, considere-se um observador que, em uma vasta região isolada do espaço, lança um projétil e, em seguida, deixa de existir. É natural admitir que o projétil continue em movimento, mesmo na ausência de outros referenciais materiais detectáveis. A impossibilidade de observação não implica interrupção do estado de movimento, mas apenas limitação epistemológica quanto à sua detecção. Isso evidencia a distinção entre existência física e possibilidade de observação. Essa concepção não entra em conflito com o princípio da relatividade, pois este se refere à equivalência operacional entre referenciais inerciais enquanto descrições de movimentos [5, 14, 55], e não à inexistência de uma estrutura de fundo na qual tais descrições são formuladas.

Um aspecto a ter em conta na análise do movimento diz respeito à natureza dos sistemas de coordenadas. Em alguns casos, o sistema de coordenadas pode ser estabelecido no objeto de referência, tomando-o como suporte geométrico imediato. Por exemplo, para movimentos no solo, o sistema de coordenadas é estabelecido no solo [5]; contudo, para o movimento dos planetas ou estrelas no referencial da Terra, o sistema de coordenadas não pode ser definido na Terra. Embora a origem possa ser fixada na Terra, os pontos do sistema de coordenadas estendem-se pelo domínio espacial em que os corpos celestes se movem. Nesse caso, o objeto ou corpo de referência (Terra) limita-se a fixar a origem e a orientação do sistema coordenado, não constituindo o suporte sobre o qual esse sistema é construído. Assim, o corpo de referência constitui o objeto “em relação ao qual” o movimento é definido [11], e o substrato (ou fundo) comum constitui o objeto “no qual” o sistema de coordenadas é estabelecido e o movimento se realiza. Essa distinção é fundamental. Em geral, o movimento não ocorre no corpo de referência, mas em um substrato comum no qual tanto os corpos quanto os sistemas de coordenadas estão inseridos. Assim, a diferença entre as expressões “em relação ao qual” e “no qual” não é meramente linguística, mas ontológica. Em geral, corpos de referência funcionam como elementos auxiliares de descrição, especificando em relação a quê estados de repouso e movimento são definidos, mas não o domínio físico no qual esses processos

efetivamente se realizam. Essa distinção reforça a tese de que movimento não se reduz a relações entre corpos.

No exemplo citado acima, de estrelas se movendo no referencial da Terra, o sistema de coordenadas é estabelecido sobre o substrato físico comum, identificado, na presente abordagem, com o espaço absoluto. No entanto, sendo o corpo de referência móvel no espaço, o sistema de coordenadas se “move” com o corpo de referência, uma vez que tem sua origem presa ao corpo de referência.

Na formulação matemática usual da cinemática, o movimento (mecânico) é definido pela variação das coordenadas espaciais em função do tempo [9, 10, 55]. Um corpo pode permanecer em repouso espacial, isto é, sem variação de posição, relativamente a um observador, sem que isso implique ausência de evolução temporal. Em outras palavras, mesmo em repouso, a coordenada temporal continua variando. Assim, repouso e movimento distinguem-se não pela variação do tempo (que já é pressuposta), mas pela existência ou não de mudança espacial. Nesse contexto, as coordenadas (x , y , z) constituem variáveis de estado associadas à posição do corpo no substrato físico, e não propriedades definidas no próprio corpo de referência. A distinção entre movimento absoluto e relativo não esgota a análise. É necessário distinguir também entre movimento fisicamente real e movimento meramente descritivo, questão desenvolvida a seguir.

3.2.6.1. Movimento verdadeiro e movimento aparente (reformulação)

A distinção entre movimento verdadeiro e movimento aparente tem origem na mecânica clássica [10]. Na presente abordagem, contudo, ela é reformulada em termos de uma estrutura ontológica mais geral. Distinguem-se três casos:

- *Movimento aparente*: definido pela relação cinemática entre corpos, não implicando, por si só, mudança de posição em relação ao substrato comum. Por exemplo, A pode estar em movimento aparente em relação a B, enquanto seu estado em relação ao substrato comum permanece inalterado. Trata-se de uma relação cinemática simétrica e, nesse sentido, puramente descritiva, como na descrição do movimento relativo entre dois carros que se deslocam com velocidades distintas em uma estrada, independentemente da descrição de seus movimentos em relação à própria estrada, ou na descrição do movimento relativo entre um carro que se desloca na estrada e um homem parado à sua margem.
- *Movimento verdadeiro não absoluto*: definido em relação a um meio físico comum, envolvendo interações reais. Aqui, o objeto em movimento muda o seu estado (posição) no meio comum.
- *Movimento verdadeiro absoluto (em sentido forte)*: definido em relação ao espaço absoluto.

Diferentemente da formulação newtoniana [10], na qual o movimento verdadeiro está exclusivamente associado ao espaço absoluto, aqui ele é entendido como definido em relação a um substrato comum, fundamental ou não. Com isso, preserva-se a distinção entre movimento verdadeiro e aparente, mas em uma fundamentação ontológica mais ampla. O movimento aparente, enquanto relação cinemática entre corpos, não produz efeitos dinâmicos por si mesmo. Um efeito dinâmico requer alteração do estado físico de um corpo em relação ao substrato ou meio comum, independentemente da existência de movimento aparente entre esse corpo e outro. Em contraste, movimentos verdadeiros estão associados a interações físicas e permitem explicar assimetrias dinâmicas entre sistemas. Com base nisso, formula-se o seguinte princípio, doravante denominado princípio dos movimentos verdadeiros:

Princípio dos movimentos verdadeiros (PMV): Sejam A e B dois corpos físicos. Se há movimento entre A e B, então existe um domínio ou elemento S, não necessariamente material, que constitui o substrato comum no qual seus estados de movimento efetivamente ocorrem.

Nesse princípio, S não representa simplesmente um sistema de referência adicional em relação ao qual o movimento é descrito. S constitui o próprio substrato físico comum no qual os movimentos de A e B ocorrem. O sistema de referência pode ser estabelecido nesse substrato para descrever os estados de movimento, mas não se confunde com o substrato. Nesse sentido, o movimento não é uma propriedade

puramente relacional entre A e B, mas uma propriedade definida em relação a S. A descrição recíproca entre os dois corpos possui apenas caráter operacional e simétrico, não implicando equivalência física entre seus estados de movimento. Embora a relação cinemática entre os sistemas permaneça simétrica e recíproca, seus estados dinâmicos podem ser assimétricos em razão de suas diferentes relações com o substrato S. A aceleração constitui uma manifestação de mudança do estado de movimento de um corpo em relação a S, mas não elimina a reciprocidade cinemática entre os corpos. Esse princípio não corresponde à introdução arbitrária de um referencial adicional. O elemento S designa o domínio físico no qual trajetórias e estados dinâmicos são definidos, e, na presente abordagem, é tomado como condição ontológica para a formulação consistente da cinemática. Sua necessidade torna-se particularmente evidente em situações que envolvem assimetrias dinâmicas, como no chamado paradoxo dos gêmeos [6, 50].

Desse modo, segue-se que *nenhum movimento fisicamente real pode ser fundamentado exclusivamente na relação entre corpos isolados, embora essa relação seja suficiente para a descrição cinemática do movimento relativo. Todo movimento verdadeiro pressupõe um substrato comum, global ou local, em relação ao qual velocidades, acelerações e interações físicas adquirem significado dinâmico*. Uma vez estabelecido isso, torna-se necessário distinguir a natureza desse substrato. Ele pode assumir duas formas:

- *Substrato fundamental*: o espaço (com seu meio físico subjacente) entendido como estrutura universal na qual os fenômenos físicos ocorrem e posições, distâncias e interações são definidas;
- *Substratos não fundamentais*: corresponde a meios físicos locais, como superfícies, fluidos ou campos, que permitem definir movimentos em contextos específicos.

Assim, todo movimento verdadeiro está associado a um “pano de fundo” físico comum e possui origem em interações físicas, ainda que tais interações não permaneçam continuamente atuando durante todo o movimento. Um exemplo de movimento verdadeiro absoluto é, na presente abordagem, a propagação da luz no vácuo. Quando uma onda luminosa é gerada no vácuo, ela se propaga isotropicamente pelo espaço físico a partir do ponto de emissão, independentemente da presença de observadores. Esse ponto não está associado a um corpo de referência privilegiado, e a propagação não depende da escolha de um corpo de referência para existir, pois constitui um processo físico que ocorre no substrato espacial. O ponto de emissão é determinado fisicamente pelo próprio processo de geração da onda, não por uma convenção geométrica. Trata-se, portanto, de um movimento fisicamente definido no substrato fundamental, ainda que sua descrição possa ser realizada por diferentes sistemas de coordenadas.

A noção de rapidez e a necessidade de um referencial comum

A própria definição de velocidade fornece um argumento para o princípio dos movimentos verdadeiros. A velocidade não é determinada pela posição em si, mas pela sua variação em relação ao tempo,

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Assim, dizer que *um corpo é mais rápido que outro* significa comparar quantitativamente as respectivas variações espaciais durante um mesmo intervalo temporal. A expressão “mais rápido” não caracteriza, portanto, apenas uma relação entre dois corpos, mas uma diferença entre seus respectivos estados de movimento em relação a um referente comum. Se A e B possuem velocidades v_A e v_B , afirmar que $|v_A| > |v_B|$ requer que ambas as variações espaciais sejam referidas a um domínio comum no qual posições distintas e seus deslocamentos possam ser definidos e comparados. O sistema de coordenadas empregado para descrever o movimento não constitui esse domínio, mas apenas fornece uma representação matemática mediante rótulos atribuídos às posições. Mesmo quando a origem e os eixos são definidos por meio de um corpo material, o corpo não se torna, por isso, o substrato sobre o qual os demais corpos se deslocam. O referencial fornece um padrão de descrição; o substrato fornece o domínio comum em que os deslocamentos ocorrem. Na perspectiva adotada, esse domínio é o espaço. Desse modo, a noção de rapidez pressupõe o espaço como substrato comum em relação ao qual diferentes estados de movimento podem ser quantitativamente comparados.

O fato de a velocidade ser uma grandeza definida pela relação entre espaço e tempo não elimina essa distinção. Na expressão $v = dx/dt$, dx representa a variação espacial da posição, enquanto dt representa a duração durante a qual essa variação ocorre. No movimento mecânico, o deslocamento corresponde à mudança de posição no espaço; o tempo não constitui, por si, um domínio através do qual o corpo se desloca, mas fornece a dimensão mediante a qual a variação espacial é ordenada e quantificada. Assim, ainda que espaço e tempo sejam conjuntamente necessários para a definição da velocidade, eles não desempenham a mesma função no movimento. A denominação “espaço-tempo” (fora desta abordagem) pode designar uma estrutura matemática ou física que reúne essas duas grandezas, mas isso não implica que o espaço deixe de constituir o domínio próprio do deslocamento mecânico. Consequentemente, a velocidade relativa entre A e B não esgota o significado de seus movimentos. Ela expressa apenas a diferença entre seus deslocamentos, enquanto a comparação entre seus estados individuais de movimento requer referência a um domínio comum. É nesse sentido que o princípio dos movimentos verdadeiros sustenta que o movimento relativo constitui uma manifestação da diferença entre estados de movimento realizados no espaço, e não a totalidade do significado físico do movimento.

3.2.7. Sobre as limitações observacionais

Do ponto de vista observacional, nem sempre é possível acessar diretamente o substrato do movimento. Nesses casos, o movimento verdadeiro pode ser inferido a partir de efeitos dinâmicos, como ilustrado no experimento do balde de Isaac Newton. Por exemplo, dois observadores em movimento uniforme relativo, sem acesso a uma referência externa solidária ao substrato, podem descrever apenas o movimento aparente entre si. A ausência de detectabilidade direta, contudo, não constitui critério suficiente para rejeição de uma entidade física. A física contemporânea admite entidades que não são diretamente observadas, mas que são postuladas como componentes explicativos de fenômenos empiricamente observados, como ocorre com a matéria escura [56]. De modo análogo, a rejeição do espaço absoluto não elimina necessariamente a necessidade de uma estrutura física subjacente à definição e à explicação dos estados de movimento; pode apenas deslocar essa função para outra estrutura conceitual ou física [5, 11, 28]. Na presente abordagem, o substrato do movimento é explicitamente identificado como essa estrutura. Nesse contexto, o substrato absoluto não é introduzido como hipótese ad hoc, mas como condição necessária para a definição consistente dos estados de movimento. Além disso, toda formulação física pressupõe explicitamente ou implicitamente uma estrutura de suporte na qual os processos são definidos. Mesmo em teorias que rejeitem o espaço absoluto em sentido clássico, permanece uma estrutura que desempenha funcionalmente o papel de substrato [11, 28]. A diferença, na presente abordagem, consiste em tornar essa estrutura conceitualmente explícita.

Por fim, segue-se uma consequência importante: se a emissão luminosa ocorre em um ponto espacial objetivo, pertencente ao espaço físico independentemente da observação e da escolha do sistema de coordenadas, sua descrição cinemática deve ter como referência primária esse ponto, e não as origens arbitrárias dos sistemas de coordenadas. A formalização dessa ideia será desenvolvida nas seções seguintes.

3.3. A cinemática galileana sob interpretação física adequada

As transformações de Lorentz foram historicamente introduzidas como solução para um problema associado à propagação da luz [5, 16, 17]. Sustenta-se aqui, contudo, que tal problema decorre da não distinção entre dois níveis fisicamente distintos: *a propagação eletromagnética no substrato físico e a cinemática do movimento relativo entre corpos*. As equações de James Clerk Maxwell [33, 34, 55] descrevem a propagação de perturbações eletromagnéticas em um meio físico caracterizado pela permissividade elétrica ϵ_0 e pela permeabilidade magnética μ_0 . A velocidade da luz no vácuo, dada por

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (3.2)$$

decorre dessas propriedades e expressa a velocidade de propagação da onda no substrato [34], independentemente do estado de movimento da fonte ou do observador. Por outro lado, a cinemática galileana [57, 58] descreve relações de movimento entre objetos físicos que se deslocam nesse mesmo

domínio físico. Trata-se, portanto, de uma descrição das relações cinemáticas entre partículas ou sistemas físicos, e não da propagação dos campos no substrato. Essa distinção permite introduzir duas grandezas conceitualmente diferentes:

- *velocidade própria no substrato* v_p : velocidade de um corpo ou processo físico em relação ao substrato fundamental do movimento.
- *velocidade relativa (aparente)* v_{rel} : velocidade definida pela relação cinemática entre dois objetos móveis no substrato. É denominada *aparente* porque não corresponde à velocidade própria de nenhum dos dois objetos isoladamente, mas resulta da combinação de seus respectivos estados de movimento próprio.

Cada objeto físico possui uma velocidade própria definida em relação ao substrato fundamental, ainda que essa grandeza não seja diretamente mensurável. Entre corpos, por outro lado, existem apenas velocidades relativas aparentes, dependentes do sistema considerado. Assim, a velocidade da Terra em relação a Marte difere daquela em relação a Júpiter, refletindo diferentes estados de movimento no substrato comum. No caso da luz, c corresponde à velocidade própria de propagação da onda no substrato físico. Quando a propagação luminosa é considerada em relação a corpos móveis, a grandeza fisicamente relevante passa a ser a sua *velocidade relativa aparente*, e não a velocidade de propagação da onda no próprio substrato. Essa velocidade pode diferir de c sem que isso implique alteração na propagação eletromagnética. A não distinção entre esses níveis conduz à interpretação de que a constância de c exigiria uma modificação da estrutura da cinemática. Na presente abordagem, ao contrário, sustenta-se que as transformações de Galileu permanecem suficientes quando aplicadas às grandezas físicas adequadas, isto é, às relações entre estados de movimento no substrato, e não diretamente às medições locais associadas à propagação luminosa.

Nesse contexto, a velocidade relativa entre dois sistemas pode ser expressa, na forma escalar, por:

$$v_{rel}^{(1,2)} = v_p^{(1)} - v_p^{(2)} \quad (3.3)$$

Assim, expressões como $x = ct$ não devem ser interpretadas como descrições da cinemática da luz em relação a observadores móveis, mas como relações associadas à propagação da onda no substrato físico (ou como “cinemática da luz em relação ao ponto de emissão no substrato”). Uma descrição cinemática consistente da luz em relação a objetos móveis requer a consideração das velocidades relativas entre a frente de onda e os sistemas materiais envolvidos. Desse modo, a suposta incompatibilidade entre as equações de Maxwell e a cinemática galileana decorre de uma interpretação inadequada da grandeza “velocidade da luz”. Quando se distingue entre propagação eletromagnética no substrato e movimento relativo entre corpos, desaparece a necessidade de modificar a estrutura da cinemática clássica, preservando-se simultaneamente:

- a constância de c como velocidade de propagação no meio;
- o princípio da relatividade;
- a invariância das leis fundamentais, incluindo as equações de Maxwell.

As implicações dessa distinção serão exploradas nas seções seguintes, com aplicação à análise da propagação esférica da luz e da cinemática de raios luminosos.

3.4. A cinemática da luz: análise geral da frente de onda esférica e do raio luminoso

Nas derivações tradicionais das transformações de Lorentz, a propagação da luz é frequentemente analisada assumindo-se que a emissão ocorre na origem comum dos sistemas de coordenadas no instante inicial [5, 9, 59]. Essa afirmação não implica que todas as derivações das transformações de Lorentz introduzam explicitamente a propagação da luz desde a primeira etapa. Na realidade, há uma distinção importante entre duas etapas que podem ser identificadas nessas derivações, de forma explícita ou implícita. A primeira

consiste na obtenção de uma estrutura geral para as transformações entre sistemas inerciais, etapa que não é questionada na presente abordagem e que é corroborada. A segunda consiste na determinação dos coeficientes que particularizam essa estrutura geral e conduzem às transformações de Lorentz. É precisamente essa segunda etapa que constitui objeto de análise. No caso de Ignatowski [60], ela corresponde à determinação da constante k (ou n , conforme a notação adotada), enquanto em outras derivações pode assumir forma diferente. Sustenta-se aqui que essa determinação não decorre exclusivamente dos princípios cinemáticos gerais, mas requer informação física adicional, obtida no âmbito do eletromagnetismo e, especificamente, relacionada às propriedades da propagação eletromagnética. Assim, a questão não é a validade da estrutura geral das transformações, mas os pressupostos físicos empregados para selecionar, dentro dessa estrutura, as transformações de Lorentz em detrimento das transformações de Galileu.

Sobre a emissão da onda luminosa a partir da origem comum, embora essa escolha não altere a forma funcional das transformações, ela pode ocultar inconsistências conceituais fundamentais. Para evitar esse problema, adota-se aqui um tratamento mais geral, no qual a emissão da frente de onda luminosa ocorre em um ponto arbitrário do espaço físico, não necessariamente na origem dos sistemas de coordenadas. Antes de prosseguir, é necessário distinguir dois conjuntos de grandezas com papéis conceitualmente distintos.

Constantes aditivas das transformações lineares

Os termos $a_{15}, a_{25}, a_{35}, a_{45}$ das transformações lineares padrão (2.2) representam exclusivamente a configuração espaço-temporal inicial entre as origens dos referenciais. Em particular, a_{15}, a_{25} e a_{35} correspondem à defasagem espacial da origem de S' em relação a S , enquanto a_{45} representa uma eventual defasagem temporal entre os relógios. Quando as origens coincidem no instante inicial, tem-se:

$$a_{15} = a_{25} = a_{35} = 0$$

Esses termos não estão relacionados ao fenômeno físico da emissão da luz.

Coordenadas do centro físico da emissão

As variáveis x_c e x'_c representam as coordenadas do ponto do espaço onde ocorre a emissão da frente de onda luminosa nos referenciais S e S' , respectivamente. No instante de emissão, a posição da fonte coincide com esse ponto, mas, a partir desse instante, a frente de onda propaga-se independentemente da fonte e dos sistemas de referência. Assim, a coincidência das origens ($x = y = z = x' = y' = z' = t = t' = 0$) não implica, em geral, que $x_c = x'_c = 0$, pois a fonte pode estar localizada fora das origens. Essas coordenadas são nulas apenas no instante de emissão, se houver coincidência espacial entre a fonte e as origens, uma vez que, após a emissão, o centro da frente de onda permanece no ponto espacial (ou posição física) em que a emissão efetivamente ocorreu, não acompanhando o movimento posterior da fonte ou do referencial.

Considere-se, então, que as origens dos sistemas S e S' coincidem em $t = t' = 0$, e que, nesse mesmo instante, uma fonte situada em um ponto P do espaço, com coordenadas $x = x_0$ em S e $x' = x'_0$ em S' , emite uma onda luminosa esférica. Trata-se de uma configuração fisicamente admissível, não havendo qualquer princípio que exija que a emissão ocorra na origem dos referenciais no instante em que relógios localmente coincidentes indicam o tempo inicial $t = t' = 0$. Assim, a generalidade considerada não diz respeito à forma das transformações lineares, mas à descrição física da propagação da frente de onda luminosa, sem restrições à posição do ponto emissor. Deve-se observar, além disso, que a coincidência entre pontos pertencentes a dois referenciais inerciais não se restringe às origens. Em um dado instante físico, múltiplos pares de pontos pertencentes a diferentes referenciais podem coincidir no espaço, independentemente da presença de relógios nesses locais. Relógios não condicionam a ocorrência dos fenômenos físicos, sua função é apenas registrar temporalmente ocorrências locais. Assim, a simultaneidade de eventos distribuídos no espaço não depende de convenções operacionais, mas da própria estrutura física do processo. Nessas condições, a equação da frente de onda luminosa ao longo do eixo X pode ser escrita como:

$$\text{em } S: \quad (x - x_c)^2 = c^2(t - t_0)^2 \quad (3.4)$$

$$\text{em } S': \quad (x' - x'_c)^2 = c^2(t' - t'_0)^2 \quad (3.5)$$

onde x_c e x'_c representam as coordenadas do ponto de emissão, e t_0 , t'_0 os instantes correspondentes. Pelo cenário considerado: $t_0 = t'_0 = 0$.

Aplicando a transformação temporal de Lorentz padrão,

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) \quad (3.6)$$

ao evento de emissão em S, caracterizado por $t = 0$ e $x = x_c \neq 0$, obtém-se:

$$t'_0 = -\gamma \frac{v}{c^2} x_c \quad (3.7)$$

Esse resultado implica que, para o referencial S' , o evento de emissão não ocorre no instante $t'_0 = 0$, em desacordo com a condição física inicial do cenário. Essa discrepância não decorre de uma limitação do arranjo físico, mas da forma como o formalismo relaciona as coordenadas dos eventos. Nesse contexto, a restrição imposta pelo formalismo relativístico padrão, segundo a qual apenas eventos ocorridos na origem comum podem satisfazer simultaneamente a condição $t_0 = t'_0 = 0$, resulta de uma característica estrutural das transformações de coordenadas, e não de uma impossibilidade física. O formalismo passa, assim, a limitar a classe de cenários fisicamente admissíveis para preservar sua própria construção matemática, configurando uma inversão metodológica entre descrição teórica e realidade física. No caso particular $x_c = 0$, obtém-se $t'_0 = 0$, como esperado; contudo, a validade em um caso particular não garante a aplicabilidade geral do formalismo. Observa-se, portanto, que uma análise cinemática geral da propagação da luz, sem restrições quanto à posição da fonte, revela uma limitação na generalidade das transformações de Lorentz na forma usual. Esse resultado motiva uma reavaliação crítica dessas transformações no contexto da descrição da propagação luminosa. Em particular, torna-se necessário examinar se a forma da frente de onda e a estrutura causal do fenômeno podem ser preservadas por meio de uma descrição cinemática diretamente ancorada na propagação no espaço físico, sem impor restrições à posição do ponto emissor. Essa análise será desenvolvida na sequência.

3.4.1. Reinterpretação da cinemática da frente de onda luminosa esférica

À luz da limitação identificada no tratamento relativístico do caso geral, formula-se agora a cinemática da frente de onda luminosa a partir do ponto físico de emissão no espaço, utilizando transformações galileanas sob interpretação física adequada. O objetivo é verificar se a forma esférica da propagação e a estrutura causal do fenômeno decorrem diretamente da propagação no espaço físico, sem recorrer previamente à geometrização do espaço-tempo.

Mantendo o cenário estabelecido anteriormente, considera-se a emissão de uma onda luminosa esférica a partir de um ponto arbitrário P do espaço no instante $t = t' = 0$, quando as origens dos referenciais S e S' coincidem. A equação geral da frente de onda nos referenciais S e S' é, respectivamente, dada por:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = c^2(t - t_0)^2 \quad (3.8)$$

$$(x' - x'_c)^2 + (y' - y'_c)^2 + (z' - z'_c)^2 = c^2(t' - t'_0)^2 \quad (3.9)$$

onde (x_c, y_c, z_c) e (x'_c, y'_c, z'_c) representam as coordenadas espaciais do centro da frente de onda, e $t_0 = t'_0 = 0$ correspondem ao instante físico da emissão.

Observação sobre o centro da frente de onda. Na presente descrição, o centro da frente esférica não é tratado como um evento independente dos pontos que constituem a própria frente. Em cada instante t , a frente possui uma determinada configuração espacial, caracterizada por um centro e pelos pontos que a compõem. Por essa razão, o centro é descrito por coordenadas dependentes do mesmo parâmetro temporal da frente, isto é, $(x_c = x_c(t), y_c = y_c(t), z_c = z_c(t))$, e não por uma coordenada $(x_c(t_c), y_c(t_c), z_c(t_c))$ associada a um suposto instante próprio do centro. Assim, para um mesmo t , $(x_c(t), y_c(t), z_c(t))$

representa a posição do centro e $(x(t), y(t), z(t))$ a posição de um ponto qualquer da frente. Assim, as coordenadas espaçotemporais do centro e de um ponto qualquer da frente são, respectivamente, (x_c, y_c, z_c, t) e (x, y, z, t) . Consequentemente, ao transformar essas posições no mesmo instante, obtém-se diretamente

$$x' - x'_c = a_{11}(x - vt) - a_{11}(x_c - vt) = a_{11}(x - x_c),$$

sem que seja necessário introduzir um t_c . O centro e os pontos da frente pertencem, portanto, à mesma configuração espacial da onda em cada instante t .

O ponto de emissão como entidade cinemática

O ponto P no qual ocorre a emissão define o centro geométrico da esfera luminosa. Embora fixo no substrato, esse ponto é descrito como em movimento nos referenciais devido aos movimentos próprios das origens dos sistemas de coordenadas. Assim, suas coordenadas evoluem segundo:

$$x_c = x_0 - v_p t \quad \text{e} \quad x'_c = x'_0 - v'_p t' \quad (3.10)$$

onde v_p e v'_p representam as velocidades das origens de S e S' em relação ao substrato.

Transformação das coordenadas do centro da frente esférica

Considerem-se transformações lineares gerais ao longo do eixo x:

$$x' = a_{11}(x - vt), \quad t' = a_{41}x + a_{44}t$$

Aplicando ao centro da frente de onda, obtém-se:

$$x'_c = a_{11}(x_c - vt), \quad t' = a_{41}x_c + a_{44}t \quad (3.11)$$

Compatibilidade da frente de onda sob transformação de coordenadas

Para verificar a compatibilidade entre as descrições da frente de onda nos dois referenciais, não se busca apenas verificar se os mesmos pontos geométricos satisfazem ambas as equações. Impõe-se uma condição mais forte: a equação da frente de onda obtida após a transformação deve ser algebricamente idêntica à equação originalmente estabelecida em S. Em outras palavras, os polinômios obtidos em ambos os casos devem coincidir termo a termo, o que exige a igualdade dos coeficientes dos termos correspondentes. Substituindo as transformações das coordenadas do ponto da frente e do centro físico nas equações correspondentes, obtém-se:

$$a_{11}^2(x - x_c)^2 = c^2[a_{41}(x - x_c) + a_{44}(t - t_0)]^2. \quad (3.12)$$

Expandindo e reorganizando os termos:

$$(a_{11}^2 - a_{41}^2 c^2)(x - x_c)^2 - 2a_{41}a_{44}c^2(x - x_c)(t - t_0) - a_{44}^2 c^2(t - t_0)^2 = 0. \quad (3.13)$$

Para que essa expressão seja idêntica ao polinômio que representa a frente de onda em S, os coeficientes dos termos correspondentes devem ser iguais. Resulta, portanto, nas condições

$$a_{11}^2 - a_{41}^2 c^2 = 1, \quad a_{41}a_{44}c^2 = 0, \quad a_{44}^2 = 1 \quad (3.14)$$

Uma questão que as equações (3.14) poderiam suscitar é: De onde vem a exigência de identidade termo a termo? Essa questão é importante e, embora a resposta já esteja implícita no desenvolvimento que antecede às equações (3.14), merece atenção e uma resposta explícita. A resposta a essa pergunta tem como núcleo o princípio da relatividade, conforme se descreve a seguir.

Nenhum sistema de referência inercial possui estatuto de referencial privilegiado no espaço. Em particular, os sistemas S e S' possuem a mesma condição em relação ao fenômeno de propagação da onda luminosa. As leis físicas que regem os fenômenos físicos são os mesmos para todos os sistemas de referência inerciais. As equações (3.8) e (3.9) representam exatamente o mesmo objeto geométrico e o mesmo fenômeno físico; S e S' descrevem o que ocorre quando se gera uma perturbação eletromagnética no espaço físico “neutro” (no sentido de que o espaço físico não privilegia nenhum sistema de referência existente nele). Embora possam receber o sinal luminoso em instantes diferentes, S e S', por meio das respectivas equações, descrevem um único fenômeno natural. Portanto, *a exigência de identidade termo a termo decorre do facto de que S e S' devem descrever a mesma lei de propagação da onda luminosa e, conseqüentemente, o mesmo fenómeno físico., pelo que ambas as equações devem representar a mesma relação geométrica para os mesmos pontos do espaço-tempo (ou no espaço e no tempo).*

Das condições (3.14) resulta:

$$a_{11} = a_{44} = \pm 1, \quad a_{41} = 0.$$

A igualdade polinomial, por si só, não determina os sinais. Para seleccionar o ramo fisicamente correspondente à transformação contínua entre referenciais e à orientação convencional dos eixos e do tempo, exige-se que, no limite ($v = 0$), a transformação se reduza à transformação identidade:

$$x' = x, \quad t' = t.$$

Essa condição selecciona os sinais positivos, $a_{11} = a_{44} = 1$,

resultando em $a_{11} = a_{44} = 1, \quad a_{41} = 0.$

Assim, a transformação reduz-se à forma

$$x' = x - vt, \quad t' = t,$$

isto é, à transformação galileana ao longo do eixo x. Esse resultado acima mostra que, quando a frente de onda é descrita relativamente ao ponto físico de emissão e se exige a identidade algébrica entre as equações da frente nos dois referenciais, o termo espacial na transformação temporal desaparece. A estrutura temporal resultante é, portanto, galileana, sem necessidade de introduzir previamente a transformação de Lorentz.

É importante esclarecer que, segundo a interpretação adotada aqui, nas referidas equações, t e t' não representam instantes de percepção ou de registro pelos observadores, mas parâmetros temporais que ordenam a evolução objetiva dos eventos associados à propagação da onda luminosa. Também vale lembrar que cada evento é único, ocorre uma única vez, num único ponto espacial e em um único “quando” objetivo, ou seja, em um único instante, independentemente do observador ou das leituras de relógios. Um fenómeno não ocorre uma vez para um observador, e depois outra vez para outro observador, e equações de *transformação de coordenadas* não transformam os eventos (no caso da onda luminosa, não transformam o ponto espacial P de emissão da onda, a forma de propagação da onda, nem o quando das ocorrências objetivas), mas apenas as *coordenadas ou rótulos* usados para a sua descrição. Também, não entra aqui a questão da simultaneidade entre S e S', pois as equações (3.8) e (3.9) não descrevem atos perceptivos, mas uma lei de propagação luminosa e eventos únicos no espaço.

O argumento acima fornece, portanto, um fundamento conceitual adicional em favor do resultado até aqui obtido para a relação de transformação temporal

$$t' = t.$$

pois trata-se do tempo da evolução das ocorrências, e não do tempo da sua percepção pelos observadores.

O resultado obtido nesta seção será verificado, de forma independente, na análise da cinemática do raio luminoso, apresentada na seção seguinte.

3.4.2. A cinemática do raio de luz reinterpretada

Analisa-se agora um cenário semelhante à situação considerada por Einstein na obtenção das transformações de Lorentz, na qual um raio luminoso percorre longitudinalmente o eixo de movimento, sendo considerado nos sistemas K e k . Diferentemente da análise da frente de onda esférica, que descreve a propagação global da radiação, este caso corresponde a uma descrição local da propagação luminosa ao longo de uma direção preferencial, caracterizando o limite de raio luminoso.

Considere-se um vagão em movimento uniforme com velocidade v ao longo do eixo x em relação a uma estação K . Associado ao vagão, considere-se o referencial k , que se desloca com a mesma velocidade v em relação a K . No interior do vagão, uma fonte luminosa está fixa em um ponto material A , enquanto um espelho plano está fixo em outro ponto B , separados por uma distância própria L' , medida no referencial do vagão. Esse arranjo está ilustrado na **Figura 2**. Mantêm-se aqui as notações K e k , conforme o tratamento original de Einstein, equivalente aos sistemas S e S' utilizados na seção anterior.

No instante $t = t' = 0$, quando as origens dos referenciais coincidem, um pulso luminoso é emitido de A , propagando-se até B , sendo refletido e retornando à fonte. A análise envolve três entidades distintas: o raio luminoso, que se propaga no espaço com velocidade c , e os pontos A e B , que se deslocam com a velocidade própria do referencial k .

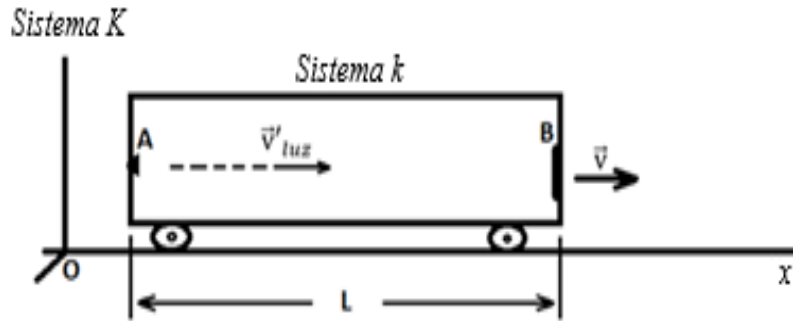


Figura 2 – Um raio luminoso viajando longitudinalmente entre dois pontos A e B num vagão.

Assimetria temporal no referencial do vagão

Considere-se inicialmente a descrição no referencial do vagão k . No percurso de ida (de A até B), o raio parte do ponto espacial P , onde se encontra a fonte no instante $t'_0 = 0$. A partir desse instante, o raio propaga-se no espaço livre com velocidade c em relação ao ponto P , enquanto o espelho B se afasta do ponto P de emissão no espaço com velocidade v'_p . Observe-se que B não se afasta de A , mas sim de P . Consequentemente, o raio não percorre simplesmente a distância própria L' , mas deve alcançar um alvo em movimento, de modo que a distância efetiva satisfaz:

$$c(t'_1 - t'_0) = L' + v'_p(t'_1 - t'_0) \quad (3.15)$$

Dessa expressão resulta

$$t'_1 - t'_0 = \frac{L'}{c - v'_p} \quad (3.16)$$

No percurso de retorno (de B até A), ocorre a situação inversa: o ponto A se desloca em direção ao raio refletido. Assim, a distância efetiva é reduzida pelo movimento de A , e tem-se:

$$c(t'_2 - t'_1) = L' - v'_p(t'_2 - t'_1) \quad (3.17)$$

o que fornece:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{L'}{c + v'_p} \quad (3.18)$$

Como consequência direta, tem-se

$$t'_2 - t'_1 < t'_1 - t'_0 \quad (3.19)$$

e portanto:

$$\frac{(t'_0 + t'_2)}{2} < t'_1 \quad (3.20)$$

mostrando que, no referencial do vagão, os tempos de ida e retorno não são simétricos quando a propagação da luz é descrita explicitamente em relação ao espaço livre. A igualdade temporal característica da formulação relativística padrão decorre, nessa perspectiva, da não distinção entre a velocidade própria de propagação da luz no substrato e sua velocidade relativa aos corpos materiais, hipótese que, nesta abordagem, é considerada *fisicamente desnecessária*.

Equações do movimento no referencial do vagão

No percurso de ida, a equação do movimento do raio no referencial k pode ser escrita como:

$$x'(t') = x'_0 + (c - v'_p)t', \quad \text{com } x'_0 = x'(0) = x'_A. \quad (3.21)$$

No instante de reflexão tem-se:

$$x'_B = x'_A + (c - v'_p)t'_1 \quad (3.22)$$

E no percurso de retorno:

$$x'_A = x'_B - (c + v'_p)(t'_2 - t'_1) \quad (3.23)$$

atingindo novamente a posição da fonte no instante t'_2 .

Descrição do movimento no referencial da estação

Para o observador no referencial K , a luz também propaga-se no substrato espacial com velocidade própria c , tendo como centro da frente o ponto físico P de emissão., enquanto a própria estação K também se desloca no mesmo espaço com velocidade v_p e os pontos materiais A e B se deslocam na estação com velocidade v . Assim, as posições desses pontos em K variam com o tempo. O movimento de K no espaço livre faz com que a velocidade da luz relativa à origem de K seja igual a: $c - v_p$. Portanto, obtém-se assim a seguinte equação para o percurso de ida:

$$x_{B1} = x_{A0} + (c - v_p)t_1, \quad x_A(0) = x_{A0} \quad (3.24)$$

Para o percurso de retorno:

$$x_{A2} = x_{B1} - (c + v_p)(t_2 - t_1). \quad (3.25)$$

O movimento dos pontos A e B em relação à estação K já está incorporado nas coordenadas x_{B1} e x_{A2} , que representam, respectivamente, as posições de B no instante t_1 e de A no instante t_2 . Assim, $x_{B1} = x_{B0} + vt_1$ e $x_{A2} = x_{A0} + vt_2$. As equações (3.24) e (3.25) exprimem, portanto, a coincidência espacial da luz com B no instante t_1 e com A no instante t_2 , não sendo necessário explicitar separadamente o movimento desses pontos em K .

Vale lembrar que as velocidades próprias satisfazem a relação cinemática entre referenciais:

$$v = v'_p - v_p, \quad \text{ou equivalentemente, } v'_p = v + v_p. \quad (3.26)$$

Compatibilidade com transformações lineares

Aplicando as transformações lineares

$$x' = a_{11}(x - vt), \quad t' = a_{41}x + a_{44}t$$

às equações (3.22) e (3.23), obtém-se as seguintes equações:

$$x_{B1} = \frac{a_{11}}{a_{11} - a_{41}(c - v - v_p)} x_{A0} + \frac{a_{11}v + a_{44}(c - v - v_p)}{a_{11} - a_{41}(c - v - v_p)} t_1 \quad (3.27)$$

e

$$x_{A2} = x_{B1} + \frac{a_{11}v - a_{44}(c + v + v_p)}{a_{11} + a_{41}(c + v + v_p)} (t_2 - t_1) \quad (3.28)$$

Impondo que as equações (3.27) e (3.28) descrevem os mesmos eventos físicos descritos pelas equações (3.24) e (3.25), obtidas diretamente no referencial K , resulta um sistema algébrico cuja única solução consistente é:

$$a_{11} = a_{44} = \pm 1, \quad a_{41} = 0.$$

Pelas razões já apresentadas na seção anterior, seleciona-se a solução correspondente à orientação convencional das coordenadas,

$$a_{11} = a_{44} = 1, \quad a_{41} = 0.$$

obtendo-se novamente as transformações de Galileu. A concordância entre a análise da frente de onda esférica e a do raio luminoso reforça a consistência dessa interpretação e indica que a preservação da forma da propagação, de c como velocidade própria da luz no substrato espacial e da estrutura causal do fenômeno decorre diretamente da descrição física da propagação no espaço, sem necessidade de introduzir previamente a geometrização do espaço-tempo.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise crítica dos fundamentos físicos, matemáticos e lógicos associados às transformações de Lorentz, com o objetivo de examinar os pressupostos que conduzem à sua obtenção e a sua interpretação como descrição necessária da cinemática relativística. A análise desenvolvida não questiona a estrutura geral das transformações entre sistemas inerciais, mas concentra-se na etapa em que os coeficientes dessa estrutura são determinados de modo a conduzir especificamente às transformações de Lorentz. Nesse contexto, procurou-se verificar se essa determinação decorre exclusivamente de princípios cinemáticos gerais ou se depende de pressupostos físicos adicionais relacionados às propriedades da propagação luminosa. A investigação foi desenvolvida a partir de uma análise explícita da cinemática da propagação luminosa, distinguindo o ponto físico de emissão, os sistemas materiais e os referenciais coordenados, bem como os movimentos próprios desses elementos em relação a um substrato espacial comum. Sob essa interpretação, mostrou-se que a propagação luminosa pode ser descrita de forma consistente mediante transformações galileanas, preservando-se o princípio da relatividade, a velocidade c como velocidade própria de propagação no substrato e a estrutura causal do fenômeno, sem necessidade da introdução das transformações de Lorentz. A introdução do conceito de movimento verdadeiro absoluto, associado à velocidade própria (v_p), definida em relação ao substrato fundamental, fornece a base conceitual dessa interpretação. Nesse quadro, distingue-se a velocidade própria dos processos físicos no substrato das velocidades relativas entre os sistemas materiais. No caso da luz, a velocidade própria de propagação (c) é determinada pelas propriedades do meio, enquanto as velocidades entre a frente de onda

e os corpos materiais dependem dos respectivos estados de movimento. Essa distinção permite tratar separadamente a propagação física da luz e as relações cinemáticas entre os sistemas envolvidos.

A análise da frente de onda esférica mostrou que, quando a emissão é considerada em um ponto arbitrário do espaço, distinto das origens dos referenciais, a aplicação da transformação temporal de Lorentz atribui ao evento de emissão coordenadas temporais diferentes nos dois sistemas, para referenciais em movimento relativo. Na configuração padrão, a condição ($t = t' = 0$) fica, no formalismo, associada ao evento situado na origem comum. Na presente abordagem, essa consequência não é interpretada como uma impossibilidade física do cenário considerado, mas como consequência da estrutura específica das transformações adotadas. A distinção entre o evento físico e suas coordenadas nos referenciais constitui, nesse contexto, um elemento central da análise. A demonstração foi complementada por uma análise independente da cinemática de um raio luminoso. Nos dois referenciais, a propagação foi descrita mediante a mesma estrutura cinemática, distinguindo-se a velocidade própria (c) das velocidades relativas entre o raio e os pontos materiais. A imposição da compatibilidade entre as descrições nos dois referenciais conduziu novamente aos coeficientes correspondentes às transformações de Galileu. A concordância entre as duas análises constitui, portanto, um resultado independente dentro da presente abordagem e reforça a interpretação segundo a qual a forma da propagação luminosa pode ser preservada sem recorrer às transformações de Lorentz.

A análise realizada nesta primeira parte foi deliberadamente restrita aos aspectos físicos, matemáticos e lógicos da cinemática da propagação luminosa, tendo como núcleo a frente de onda esférica e o raio luminoso. Não se pretendeu, nesta etapa, analisar a compatibilidade ou incompatibilidade entre as transformações galileanas e as equações de Maxwell, nem realizar uma análise dos principais experimentos associados à relatividade. Essas questões serão examinadas nas partes seguintes da série. A Parte 2 aprofundará a análise da relação entre as transformações galileanas e as equações de Maxwell, bem como as implicações conceituais da distinção entre a propagação física dos fenômenos e sua descrição matemática. A análise dos aspectos experimentais e observacionais associados à Relatividade Especial será reservada às Partes 3 e 4. Embora o presente trabalho se concentre na Relatividade Especial, algumas das questões conceituais aqui discutidas têm implicações para a interpretação da Relatividade Geral. Este trabalho estabelece, assim, a base conceitual para um programa de revisão crítica da cinemática relativística padrão, propondo uma descrição na qual a propagação luminosa é tratada como fenômeno físico no espaço e distinguindo-se a dinâmica própria dos sistemas materiais das relações cinemáticas relativas utilizadas em sua descrição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Martins RA. *Teoria da relatividade especial*. Campinas: Grupo de História e Teoria da Ciência; 2008.
- [2] Hawking S. *Uma breve história do tempo*. Tradução de Cássio de Arantes Leite. Rio de Janeiro: Intrínseca; 2015.
- [3] Bandyopadhyay N. *The theory of special relativity*. Calcutta: Academic Publishers; 1998.
- [4] Carroll SM. *Spacetime and geometry: an introduction to general relativity*. Cambridge: Cambridge University Press; 2019.
- [5] Einstein A. *A teoria da relatividade especial e geral*. Tradução do original alemão por Carlos Almeida Pereira. Revisão técnica de Ildeu de Castro Moreira. Rio de Janeiro: Contraponto; 1999.
- [6] Rahaman F. *The special theory of relativity: a mathematical approach*. New Delhi: Springer India; 2014. doi:10.1007/978-81-322-2080-0.
- [7] Minkowski H. *Space and time: Minkowski's papers on relativity*. Tradução de Fritz Lewertoff e Vesselin Petkov. Montreal: Minkowski Institute Press; 2012.
- [8] Einstein A. *Sidelights on relativity*. Tradução de G.B. Jeffery e W. Perrett. London: Methuen; 1922.
- [9] Piattella OF. O artigo fundador da teoria da relatividade restrita. *Cad Astro*. 2020; 1(1):157-176.
- [10] Newton I. *Principia: princípios matemáticos de filosofia natural*. Livro I. 2. ed., 3. reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo; 2016.
- [11] Russell B. *ABC da relatividade*. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges. Revisão técnica de Alexandre Cherman. Rio de Janeiro: Zahar; 2005.
- [12] Einstein A, Infeld L. *The evolution of physics: from early concepts to relativity and quanta*. New York: Touchstone; 1967.

- [13] Whittaker E. *A history of the theories of aether and electricity*. Vol. 2. London: Thomas Nelson and Sons; 1953.
- [14] Rindler W. *Relativity: special, general, and cosmological*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press; 2006.
- [15] Stephani H. *Relativity: an introduction to special and general relativity*. 3rd ed. New York: Cambridge University Press; 2004.
- [16] Lorentz HA. Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden: E.J. Brill; 1895.
- [17] Lorentz HA. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light. *Proc R Acad Arts Sci Amsterdam*. 1904; **6**:809-831.
- [18] Resnick R. *Introduction to special relativity*. New York: Wiley India; 1968.
- [19] Born M. *Einstein's theory of relativity*. Revised ed. New York: Dover Publications; 1962.
- [20] Pauli W. *Theory of relativity*. Tradução de G. Field. New York: Dover Publications; 1981.
- [21] Hertz H. *The principles of mechanics: presented in a new form*. London: Macmillan; 1899.
- [22] Poincaré H. *Science and hypothesis*. New York: Dover Publications; 1952.
- [23] Hilbert D. *The foundations of geometry*. Charleston: CreateSpace Independent Publishing; 2014.
- [24] Wittgenstein L. J. *Tractatus logico-philosophicus*. London: Routledge; 2013.
- [25] Schutz BF. *A first course in general relativity*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2009.
- [26] Misner CW, Thorne KS, Wheeler JA. *Gravitation*. San Francisco: WH Freeman and Company; 1973.
- [27] Wald RM. *General relativity*. Chicago: University of Chicago Press; 1984.
- [28] Einstein A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Ann Phys*, 1905; **17**:891-921. doi:10.1002/andp.19053221004.
- [29] Leite VB, Andrade-Neto A. V. Conceitos de espaço, tempo e movimento na mecânica clássica e na teoria da relatividade. *Rev Bras Ensino Fís*. 2023; **45**:e20220321. doi:10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0321.
- [30] Mach E. *The science of mechanics: a critical and historical account of its development*. Tradução de Thomas J. McCormack. Chicago: Open Court Publishing Company; 1893.
- [31] Assis AKT. *Mecânica relacional e implementação do princípio de Mach com a força de Weber gravitacional*. Montreal: Apeiron; 2013.
- [32] Jammer M. *Conceitos de espaço: a história das teorias do espaço na física*. Tradução da 3ª edição em inglês. Rio de Janeiro: Contraponto; Ed. PUC-Rio; 2009.
- [33] Maxwell JC. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philos Trans R Soc Lond*. 1865; **155**:459-512. doi:10.1098/rstl.1865.0008.
- [34] Maxwell JC. *A treatise on electricity and magnetism*. Vol. 2. Unabridged 3rd ed. New York: Dover Publications; 1954.
- [35] Kant I. *Critique of pure reason*. Tradução e edição de Paul Guyer e Allen W. Wood. Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
- [36] Barbour J. *The end of time*. Oxford: Oxford University Press; 1999.
- [37] Leibniz GW. *The Leibniz-Clarke correspondence*. London: J. Knapton; 1717.
- [38] Aristotle. *Physics: books III and IV*. Tradução e comentários de Edward Hussey. Oxford: Oxford University Press; 1983.
- [39] Eddington AS. *The nature of the physical world*. Cambridge: Cambridge University Press; 1928.
- [40] Bergson H. *Time and free will*. London: George Allen & Unwin; 1889.
- [41] Bergson H. *Creative evolution*. Lanham: Henry Holt and Company; 1907.
- [42] Rovelli C. *The order of time*. New York: Riverhead Books; 2018.
- [43] Carroll S. *From eternity to here: the quest for the ultimate theory of time*. New York: Dutton; 2010.
- [44] Price H. *Time's arrow and Archimedes' point: new directions for the physics of time*. Oxford: Oxford University Press; 1996.
- [45] Eddington AS. *Space, time and gravitation: an outline of the general relativity theory*. Cambridge: Cambridge University Press; 1920.
- [46] Callender C. *What makes time special?* Oxford: Oxford University Press; 2017.
- [47] Reichenbach H. *The direction of time*. Berkeley: University of California Press; 1956.
- [48] Goldstein H, Poole C, Safko J. *Classical mechanics*. 3rd ed. San Francisco: Pearson; 2002.
- [49] James W. *The principles of psychology*. Vol. 1. New York: Henry Holt; 1890.
- [50] Taylor EF, Wheeler JA. *Spacetime physics*. 2nd ed. San Francisco: WH Freeman; 1992.

- [51] Reichenbach H. *The philosophy of space and time*. New York: Dover Publications; 1958. Original alemão: *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. 1928.
- [52] Einstein A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Ann Phys*. 1916; **354**:769-822.
- [53] Jammer M. *Concepts of simultaneity: from antiquity to Einstein and beyond*. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 2006.
- [54] Maudlin T. *Philosophy of physics: space and time*. Princeton: Princeton University Press; 2012.
- [55] Einstein A. *The meaning of relativity: four lectures delivered at Princeton University*, Princeton: Princeton University Press; 1922.
- [56] Devereux C. *Cosmological clues: evidence for the Big Bang, dark matter and dark energy*. Boca Raton: CRC Press; 2020.
- [57] Galilei G. *Dialogue concerning the two chief world systems: Ptolemaic and Copernican*. Tradução de Stillman Drake. 2nd rev ed. Berkeley: University of California Press; 1967.
- [58] Galilei G. *Dialogues concerning two new sciences*. Tradução de Henry Crew e Alfonso de Salvio. New York: Macmillan; 1914.
- [59] Nolting W. *Theoretical physics 4: special theory of relativity*. Cham: Springer International Publishing; 2017.
- [60] Ignatowski W von. Einige allgemeine Bemerkungen über das Relativitätsprinzip. *Physikal Z*. 1910; **11**:972-976.