

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS REALEZA
CURSO DE FÍSICA - LICENCIATURA**

EDUARDO FERNANDO DIAS

**O ECLIPSE DE 1919 EM SOBRAL E O PRIMEIRO TESTE EMPÍRICO DA TEORIA
DA RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN: REFLEXÕES EPISTEMOLÓGICAS**

REALEZA

2023

EDUARDO FERNANDO DIAS

**O ECLIPSE DE 1919 EM SOBRAL E O PRIMEIRO TESTE EMPÍRICO DA TEORIA
DA RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN: REFLEXÕES EPISTEMOLÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física - Licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Dennis F. A. Bessada

REALEZA

2023

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Dias, Eduardo Fernando

O eclipse de 1919 em Sobral e o primeiro teste empírico da Teoria da Relatividade Geral de Einstein: reflexões epistemológicas / Eduardo Fernando Dias. -- 2023.

79 f.:il.

Orientador: Prof. Dr. Dennis Fernandes Alves Bessada

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Licenciatura em Física, Realeza, PR, 2023.

1. Filosofia. 2. Física. 3. Epistemologia da ciência. 4. História. I. Bessada, Dennis Fernandes Alves, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

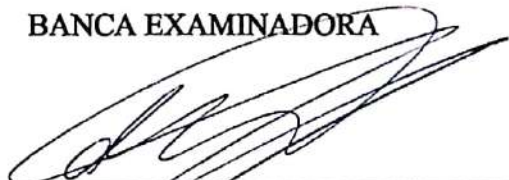
EDUARDO FERNANDO DIAS

**O ECLIPSE DE 1919 EM SOBRAL E O PRIMEIRO TESTE EMPÍRICO DA TEORIA
DA RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN: REFLEXÕES EPISTEMOLÓGICAS**

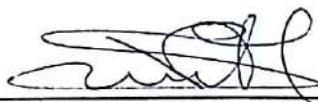
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física - Licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Licenciado em Física.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 19/12/2023.

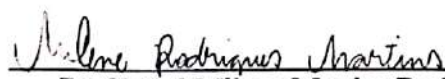
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Dennis E. A. Bessada – UFFS
Orientador



Prof.ª Dr.ª Viviane Scheibel – UFFS
Avaliadora



Prof.ª Dr.ª Milene Martins Rodrigues – UFFS
Avaliadora

Dedico este trabalho a meu querido avô, José
Ermesílio Dias, que sempre me inspirou à
leitura e à busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, O Altíssimo, Pai de Justiça e Misericórdia. Se não fosse esta última, eu não teria chegado até aqui.

Agradeço a meus pais, Paulo e Celi, por todo o apoio, todos os esforços, todo o amor e dedicação implacáveis que me dedicaram sempre.

Agradeço à minha amada esposa, Thayná, por toda a paciência, todo o carinho, todo conforto e amor que me proporcionou no caminho que percorremos até aqui.

Agradeço ao meu orientador, professor Dennis, pelo encorajamento, os direcionamentos valiosos e as conversas enriquecedoras.

Agradeço aos meus amigos de graduação, em especial à Vitória e ao Rodrigo, por todo o companheirismo, o apoio e a amizade.

Os conceitos da física são criações do espírito humano, e não, como possam parecer, coisas determinadas pelo mundo externo. No nosso esforço para compreender a realidade a nossa posição lembra a de um homem que procura adivinhar o mecanismo de um relógio fechado. Esse homem vê o mostrador e os ponteiros, ouve o tiquetaque, mas não tem meios de abrir a caixa que esconde o maquinismo. Se é um homem engenhoso, pode fazer ideia de um maquinismo responsável por tudo o que observa exteriormente, mas não poderá nunca ter a certeza de que o maquinismo que imagina seja o único que possa explicar os movimentos exteriores. (EINSTEIN; INFELD, 19-- , p. 37)

RESUMO

O presente trabalho consiste em uma análise filosófica da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, à luz de concepções presentes na epistemologia da ciência. A análise possui uma metodologia analítica, é de natureza qualitativa e tipo exploratório. Ela enfoca o modo como a teoria foi elaborada conceitualmente e seu primeiro teste empírico bem sucedido, empreendido em 1919 na cidade de Sobral, Brasil. O objetivo é discutir diferentes perspectivas epistemológicas para o caso da teoria da relatividade, especialmente em relação à crença na veracidade das entidades e relações postuladas pela teoria. Primeiramente, a Teoria da Relatividade Especial e Geral é apresentada de forma conceitual e simplificada. Em seguida, é relatada a história da elaboração da teoria e do teste de 1919 em Sobral. Então são explanados alguns dos principais problemas epistemológicos da ciência. São eles: confirmação, explicação, aceitação e progresso. As ideias epistemológicas principais são de autores como Rudolf Carnap, Karl Popper, Bas van Fraassen e Richard Boyd. Por fim, a teoria de Einstein e seu teste empírico são analisados segundo os conceitos epistemológicos no escopo dos problemas abordados. Pôde-se concluir da análise que: o método hipotético-dedutivo é mais adequado para a compreensão da teoria do que o método indutivo; a teoria apresenta um alto grau de confirmação, corroboração e adequação empírica; a teoria corresponde a um progresso científico, mas não cumulativo, já que abandona algumas bases anteriores; a aceitação da teoria não implica a crença de que as entidades ou relações por ela postuladas são reais ou fidedignas, mas apenas que são bons instrumentos de descrição e predição, isso porque a assunção de verdade necessariamente envolve a assunção de princípios metafísicos, que não podem ser testados empiricamente.

Palavras-chave: epistemologia da ciência; eclipse de Sobral; relatividade.

ABSTRACT

The present work consists of a philosophical analysis of Einstein's Theory of General Relativity, in light of concepts present in the epistemology of science. The analysis has an analytical methodology, is qualitative in nature and exploratory in type. It focuses on how the theory was conceptually elaborated and its first successful empirical test, undertaken in 1919 in the city of Sobral, Brazil. The objective is to discuss different epistemological perspectives in the case of the theory of relativity, especially in relation to the belief in the veracity of the entities and relationships postulated by the theory. Firstly, the Special and General Theory of Relativity is presented in a conceptual and simplified way. Next, the story of the elaboration of the theory and the 1919 test in Sobral is reported. Then some of the main epistemological problems of science are explained. They are: confirmation, explanation, acceptance and progress. The main epistemological ideas come from authors such as Rudolf Carnap, Karl Popper, Bas van Fraassen and Richard Boyd. Finally, Einstein's theory and its empirical test are analyzed according to epistemological concepts within the scope of the problems addressed. It was possible to conclude from the analysis that: the hypothetical-deductive method is more suitable for understanding the theory than the inductive method; the theory presents a high degree of confirmation, corroboration and empirical adequacy; the theory corresponds to scientific progress, but not cumulative, as it abandons some previous bases; acceptance of the theory does not imply the belief that the entities or relationships postulated by it are real or reliable, but only that they are good instruments of description and prediction, this is because the assumption of truth necessarily involves the assumption of metaphysical principles, which cannot be tested empirically.

Keywords: epistemology of science; eclipse of Sobral; relativity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – S' se move em relação a S com velocidade constante v ao longo do eixo x	19
Figura 2 – A relatividade da simultaneidade	22
Figura 3 – Trajetória de um pulso de luz em um vagão em movimento	22
Figura 4 – Princípio da equivalência	28
Figura 5 – Representação do espaço-tempo curvado por uma massa	29
Figura 6 – Albert Einstein, autor da TRG	37
Figura 7 – Telescópios montados em Sobral, 1919.....	39
Figura 8 – Crommelin, Davidson e outros cientistas, Sobral, 1919.....	40
Figura 9 – Imagem de uma das chapas fotográficas de Sobral	41
Figura 10 – Representação gráfica das posições de estrelas em um eclipse	42
Figura 11 – Diagrama de fluxo para o método hipotético-dedutivo.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados (em segundos de arco) das placas fotográficas de 1919	43
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TRG Teoria da Relatividade Geral

LISTA DE SÍMBOLOS

\rightarrow	Implicação lógica
\therefore	Conclusão lógica
\neg	Negação lógica
\wedge	Conjunção
\in	Pertence

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	A TEORIA DA RELATIVIDADE DE EINSTEIN.....	19
2.1	CONCEITOS BÁSICOS DE RELATIVIDADE.....	19
2.1.1	A relatividade da simultaneidade	21
2.1.2	Dilatação do tempo e contração do espaço	22
2.1.3	As transformações de Lorentz	25
2.1.4	Momento e energia relativísticos	25
2.1.5	Relatividade Geral.....	27
2.2	HISTÓRIA DA RELATIVIDADE E DO TESTE DE 1919 EM SOBRAL	30
3	PROBLEMAS DE EPISTEMOLOGIA DA CIÊNCIA	44
3.1	CONFIRMAÇÃO	45
3.1.1	Verificacionismo	45
3.1.2	O Círculo de Viena.....	47
3.1.3	O confirmacionismo de Carnap.....	49
3.1.4	O falseacionismo de Popper	50
3.1.5	O método hipotético-dedutivo.....	52
3.1.6	A tese de Duhem-Quine	54
3.2	EXPLICAÇÃO.....	55
3.2.1	A concepção moderna de explicação	55
3.2.2	Hempel, Salmon e van Fraassen	57
3.3	ACEITAÇÃO.....	61
3.3.1	Aceitação realista e anti-realista	62
3.4	PROGRESSO.....	65
3.4.1	A concepção ingênua do progresso	65
3.4.2	Fundacionalismo e cumulativismo.....	65
3.4.3	Progresso em Boyd.....	68
4	ANÁLISE	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento científico é um meio pelo qual a vida dos seres humanos pode ser amplamente transformada. Diversas tecnologias construídas com base nas ciências são empregadas em tarefas úteis às pessoas, como computadores, automóveis, máquinas de lavar roupas e assim por diante. Mas, além da utilização prática, a ciência influi no modo como as pessoas enxergam a realidade e no modo como resolvem problemas. Por exemplo, se um indivíduo decide não ingerir em demasia alimentos feitos com cereais para não desenvolver obesidade porque sabe que os carboidratos excedentes se transformam em gordura no corpo, está observando uma informação dada pela ciência da nutrição (uma ciência aplicada que se fundamenta em ciências puras como Fisiologia e Bioquímica). No caso, a informação de que os carboidratos excedentes se transformam em gordura no corpo. As atitudes podem ser modificadas dependendo do conhecimento científico disponível.

O fascínio com os prodigiosos avanços nas ciências leva muitas vezes a uma visão ingênua sobre a ciência, o chamado *realismo ingênuo*. Nessa visão, todas as proposições estabelecidas na ciência correspondem a verdades absolutas¹, o conhecimento científico tem caráter cumulativo e imutável e sua certeza e alcance são em princípio ilimitados. A partir dessa crença, pode-se ainda avançar para uma visão de mundo *cientificista*. O *cientificismo* é a posição de que todos os aspectos da realidade e da vida humana podem e devem ser explicados exclusivamente pelos métodos científicos de obtenção de conhecimento. Essa posição não surge espontaneamente, mas como produto intelectual do pensamento de diversos filósofos e pensadores que surgiram sobretudo a partir do advento da Ciência Moderna de Copérnico, Galileu e Newton.

A estruturação do conhecimento estabelecido nas ciências se dá nas teorias que criamos para descrever e explicar o mundo. Não basta observarmos a realidade e colecionarmos fatos e descrições de fenômenos para conhecermos algo efetivamente. É necessário que se estabeleça uma compreensão estruturada, racional e causal desses fenômenos observados para que exista conhecimento real. Em geral, essa compreensão não se baseia apenas em observações diretas,

¹ Esclareçamos que o conceito de *verdade* empregado no trabalho é a de *correspondência entre ideia e realidade*.

mas em nexos lógicos e matemáticos² captados abstratamente pelo intelecto. Essa confluência de fatores resulta no que chamamos de teorias científicas.

Etimologicamente, a palavra teoria tem origem na palavra grega *theorien* (θεωρία), que significa “contemplação” ou “visão”, num sentido mais direto, como quando assistimos a uma peça de teatro. Ou seja, a teoria é uma forma de ver ou contemplar aquilo que está à nossa frente. Atualmente, o termo tem uma conotação intelectual, não mais como uma percepção direta, mas como um conjunto de hipóteses, regras ou leis que elaboramos para compreender a realidade.

No entanto, não existe uma teoria que descreva a realidade por completo. Cada teoria se ocupa de um “recorte”, uma parte ou aspecto do mundo e se desenvolve voltada a isso. Mesmo na física, o ramo da ciência que se ocupa dos fundamentos da matéria e da energia que compõem todas as coisas na natureza, não há uma teoria que unifique toda a compreensão física que temos sobre o cosmo.

Se a divisão das teorias se dá mesmo nas ciências mais básicas, a falta de unidade é ainda maior quando se trata de tecnologia. Se quisermos construir, por exemplo, uma calculadora, os conhecimentos científicos disponíveis devem colaborar para o fim prático de uma máquina de calcular. Não é possível criar uma teoria científica que explique ao mesmo tempo a composição química do plástico utilizado na calculadora, as dimensões escolhidas com base nas características anatômicas humanas (como o tamanho do dedo) e o código binário que forma o software colocado nos circuitos eletrônicos da máquina. Aí é onde a ciência se une à técnica.

A ciência se constrói a partir dos dados de observação ou experimentação³, da lógica e da matemática e experimentação e busca a unidade causal. A técnica articula diversas linhas causais, sem necessariamente uma explicação única, com um fim produtivo e por isso não é uma ciência, mas uma *arte*. A multiplicidade de aplicações tecnológicas que um único princípio científico pode ter leva muitas vezes a uma confusão de avanço da técnica com avanço da ciência. A divisão das ciências se dá também entre ciências puras e ciências aplicadas. Voltando

² Os nexos matemáticos são típicos das ciências exatas, enquanto que nexos lógicos são comuns a todas as ciências, inclusive as ciências naturais.

³ Doravante chamaremos de “dados empíricos” os obtidos por meio de observação ou experimentação.

ao exemplo dos carboidratos, a nutrição é uma ciência aplicada, que se estabelece sobre a ciência pura da biologia.

Além da segmentação inerente e da dependência da técnica para o uso produtivo, a ciência é essencialmente dependente de conhecimentos não científicos para sua existência. No livro “As Bases Metafísicas da Ciência Moderna” (1983), Edwin A. Burtt expõe primorosamente essa dependência da ciência em relação à metafísica. Na proposição de qualquer conhecimento científico toma-se, mesmo que inconscientemente, algumas premissas inescapáveis. São elas, por exemplo: há uma realidade física que existe independentemente das mentes humanas; podemos acessar informações ao menos parcialmente correspondentes à realidade por meio dos nossos sentidos; a realidade é caracterizada por certos padrões que compõem uma ordem inerente ao mundo; há leis lógicas e matemáticas que correspondem aos padrões encontrados no mundo físico; nós temos capacidade cognitiva de apreender as correspondências entre leis lógicas e matemáticas e os padrões observados no mundo; nossa linguagem permite expressar a verdade dessas correspondências de forma fidedigna ao que elas são de fato, e assim por diante.

A metodologia científica sempre pressupõe esses e outros princípios que são essencialmente metafísicos. Ora, se a própria metodologia da ciência se baseia nesses princípios, a ciência não pode por si mesma defendê-los sem argumentar em círculos. As formas de conhecimento que podem dar respostas a essas questões são a própria metafísica e, de forma mais abrangente, a filosofia. Por isso, o ramo da filosofia chamado *filosofia da ciência* existe e se ocupa de investigar os fundamentos da ciência, sua relação com o mundo e com outras formas de conhecimento.

Mesmo com suas limitações, o conhecimento científico proporciona mudanças de vastas proporções nas sociedades e vidas humanas. As tecnologias, inclusive de comunicação, se multiplicam a cada dia e a divulgação científica alcança cada vez mais pessoas. É fácil perceber que, com todas as complexidades que envolvem a busca do conhecimento científico, a imagem divulgada da ciência nem sempre será fidedigna. Seja por ignorância de sua real natureza ou por motivações diversas, a concepção da ciência como uma forma de obtenção de saber onipotente, e mesmo como a única resposta aos problemas humanos é frequentemente difundida. Um exemplo disso se materializa nas correntes de pensamento positivista, que apresentaremos mais adiante. Cabe, portanto, a investigação dos princípios da própria ciência em busca de esclarecimento sobre os limites, o alcance e a natureza do saber científico.

As considerações acima têm por objetivo elucidar os motivos que existem para que investiguemos desde os princípios mais básicos da ciência até adentrar no seu *modus operandi* e, finalmente, em seu produto final, o conhecimento científico. As questões de que trataremos neste trabalho pertencem à epistemologia da ciência. Cabe aqui uma breve conceituação. Epistemologia é uma palavra herdada do grego, composta de dois vocábulos, *επιστήμη* (*epistémē*), que significa ciência, no sentido platônico, e *λόγος* (*lógos*), que é estudo, fala, discurso, palavra. Ou seja, epistemologia é o *estudo da ciência*. Mas a noção de episteme pode se referir ao conhecimento em geral, como o conhecimento filosófico ou religioso. Por isso, o termo “ciência” é pertinente. Também nesse tipo de investigação surge a expressão *filosofia da ciência*, já que as questões do tema frequentemente possuem caráter filosófico. Porém, a filosofia da ciência compreende aspectos da atividade científica que podem ser abordados filosoficamente, mas não dizem respeito à natureza ou características do conhecimento científico propriamente, como é o caso da ética da ciência, por exemplo.

Para avaliarmos a validade de teorias epistemológicas, podemos tomar uma teoria científica bem estabelecida e de considerável relevância. Para nossa investigação, escolhemos a Teoria da Relatividade Geral, que foi apresentada em sua versão definitiva por Albert Einstein em 1916. Junto de sua versão especial, de 1905, a teoria da relatividade geral representa um enorme avanço na física e nas ciências naturais. Ela apresenta uma nova e mais profunda compreensão sobre o espaço, o tempo, a matéria e a energia, e trata-se, indubitavelmente, de uma das maiores construções teóricas desde as bases da física clássica lançadas por Newton no século XVII.

A teoria de Einstein propõe novos fundamentos para as leis da natureza, derruba a ideia de que o tempo é um fluxo absoluto em relação a qualquer observador, entrelaça o espaço e o tempo num mesmo tecido, o “espaço-tempo”, propõe uma nova interpretação da gravidade. A relatividade é um dos pilares da física contemporânea e uma das maiores realizações da mente humana de todos os tempos. Na época de sua formulação, a teoria propiciava três possibilidades de teste empírico: o periélio da órbita de Mercúrio, a deflexão gravitacional da luz que passa perto do Sol e o desvio para o vermelho das linhas espectrais.

O periélio de Mercúrio já possuía uma descrição bem conhecida na astronomia e a teoria da relatividade obteve uma previsão do movimento que é compatível com esses dados. A hipótese da deflexão gravitacional da luz foi testada empiricamente por observações astronômicas a partir de 1918 pelo astrônomo americano William W. Campbell (o que veremos

na seção 2.2 em maiores detalhes), quando o primeiro teste obteve resultados não favoráveis. Porém, em 1919 dois testes, promovidos pela *Royal Astronomical Society*, e empreendidos pelos astrônomos ingleses Charles Davidson, Andrew Crommelin e Arthur Eddington foram realizados e apresentaram resultados positivos. Esses resultados levaram à aceitação geral da relatividade pela comunidade científica. Posteriormente, em 1922, na Austrália, novos testes foram feitos por Campbell e outros, novamente com resultados positivos, o que consolidou a teoria da relatividade especial e geral de Einstein como parte essencial da física e de nossa compreensão do mundo. O desvio para o vermelho nas linhas espectrais do Sol não foi confirmado até 1925. Todas as tentativas de observação, feitas por cientistas da área, como John Evershed e Charles St. John entre outros, apresentaram valores de desvio muito menores do que a teoria previa. Somente em 1925, com a análise das linhas espectrais não do Sol, mas da estrela anã Sirius B, foi que o desvio foi encontrado em concordância com a relatividade. Hoje sabe-se que os métodos de análise da época anterior estavam incorretos.

A relatividade, por ser uma teoria tão profunda, abrangente e inovadora, é sem dúvida um excelente objeto de investigação dos princípios e ideias epistemológicas sobre a ciência. Trataremos da origem histórica e dos desenvolvimentos conceituais da teoria da relatividade no Capítulo 2, selecionando a deflexão gravitacional da luz como elemento experimental e a ocasião de 1919 em Sobral, no Brasil, como o caso de análise. Em seguida, no Capítulo 3, apresentaremos as principais ideias epistemológicas sobre três aspectos das teorias científicas: o da *confirmação*, da *explicação* e da *aceitação*. No Capítulo 4, empreenderemos uma análise filosófica, buscando enquadrar os fatos e conceitos desenvolvidos historicamente no âmbito da teoria da relatividade de Einstein e do teste empírico da deflexão gravitacional da luz nas perspectivas e conceitos presentes nas diferentes correntes epistemológicas da ciência. Ou seja, buscar correspondências entre o que é apresentado nos capítulos 2 e 3.

A metodologia adotada na análise final é analítica e de natureza qualitativa, ou seja, trataremos da forma de elaboração da teoria, de teste empírico e dos conceitos científicos envolvidos sem entrar no mérito da medição ou coleta de dados que levaram ao resultado final do experimento. Há também um caráter exploratório em nossa análise, pois ela não discute apenas um problema de epistemologia nem se aprofunda até os últimos detalhes em cada discussão, mas busca introduzir formas de interpretação de teorias científicas com conceitos e perspectivas da epistemologia da ciência.

2 A TEORIA DA RELATIVIDADE DE EINSTEIN

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE RELATIVIDADE

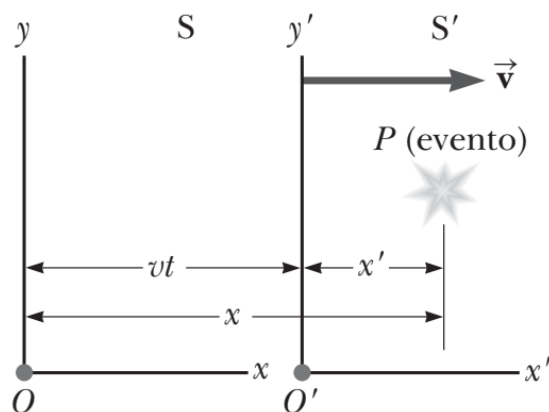
A teoria da relatividade especial foi desenvolvida para resolver um problema: a aparente incompatibilidade entre o Princípio da Relatividade de Galileu e as Equações de Maxwell. Einstein afirma:

“[...] Por uma análise dos conceitos físicos de tempo e de espaço demonstrou-se que não existe incompatibilidade entre o princípio da relatividade e a lei de propagação da luz. Pelo contrário, por uma adesão firme e sistemática a estas duas leis se pode chegar a uma teoria lógica que está ao abrigo de toda objeção. [...]” (EINSTEIN, 1999, p. 24)

O princípio da relatividade de Galileu afirma que a forma das leis físicas que descrevem determinado evento será a mesma para quaisquer observadores que estiverem em movimento uniforme em relação ao referencial em repouso em relação ao evento, ou seja, o referencial inercial. E um referencial com velocidade constante em relação a um referencial inercial é ele próprio também inercial.

Tomemos o exemplo mais simples possível de dois sistemas de coordenadas em movimento uniforme relativo. Como ilustrado na Figura 1, o referencial S' se move com velocidade v em relação ao referencial S .

Figura 1 – S' se move em relação a S com velocidade constante v ao longo do eixo x .



Fonte: Serway; Jewett, 2014.

No caso mais simples, consideremos um referencial S em repouso e um referencial S' com velocidade v na direção do eixo x . As coordenadas que descrevem S são (x, y, z, t) e as que

descrevem S' são (x', y', z', t') . Assumindo ainda que no instante $t = t' = 0$ as origens O e O' de S e S' , respectivamente, coincidem, assim sendo, num dado instante posterior t , S' estará separado de O por uma distância vt . As equações que transformam as coordenadas de um referencial para outro são as seguintes:

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

Seguindo o mesmo raciocínio, se um carro se move da mesma forma que S' , e liga os faróis, a luz emitida deverá ser descrita por um observador situado em S como

$$c' = v + c$$

Ou seja, a velocidade da luz é maior que c para um observador em repouso em relação a S . Todos os experimentos com eletrodinâmica, porém, resultavam em que a velocidade da luz no vácuo é sempre c independentemente do referencial. Então, existem apenas três soluções lógicas para o problema:

- A mecânica newtoniana e as equações de Maxwell estão corretas, mas o princípio da relatividade não se aplica a todas as leis físicas. Existe, portanto, um referencial absoluto (o “éter”) que deve ser detectável experimentalmente.
- A mecânica newtoniana está correta e o princípio da relatividade aplica-se a todas as leis, mas as equações de Maxwell devem ser modificadas. Deve ser possível de se observar desvios das leis de Maxwell.
- As equações de Maxwell estão corretas e o princípio da relatividade aplica-se a todas as leis físicas, mas a mecânica newtoniana deve ser modificada. Deve ser possível de se observar desvios das leis de Newton.

O conjunto dos experimentos realizados à época apontava apenas para a terceira opção. O mais importante deles foi o experimento de Michelson-Morley, feito com o interferômetro de Michelson. O engenhoso aparato capaz de detectar o movimento absoluto das ondas eletromagnéticas (luz) através de um suposto meio próprio, o chamado éter luminífero, não detectou nenhum éter (SERWAY; JEWETT, 2014, p. 286-287). Albert Einstein se propôs a resolver o problema em seu artigo de 1905, “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”. Ele se baseia em dois princípios:

1. O princípio da relatividade: todas as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.
2. A constância da velocidade da luz: a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todos os referenciais inerciais, independentemente da velocidade do observador ou da velocidade da fonte emissora da luz.

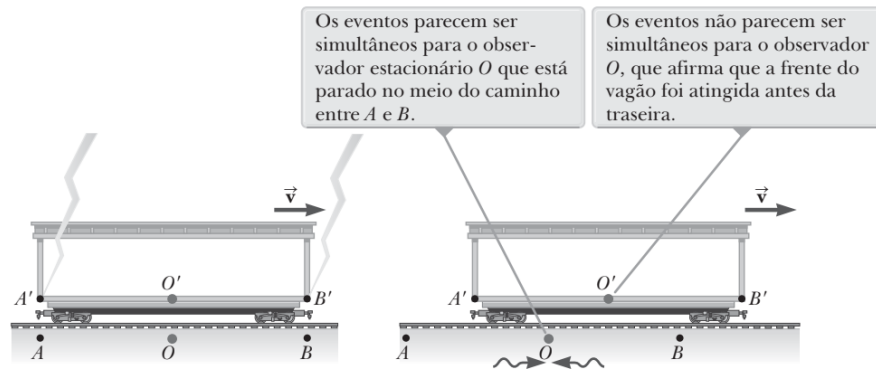
O segundo princípio é necessário ao primeiro, já que este afirma que as leis da eletrodinâmica independem do estado de movimento do referencial inercial, o que implica que a velocidade da luz também independe do referencial. Esses princípios são a base da teoria da relatividade especial e têm diversas consequências importantes.

Um princípio é algo que admitimos sem requerer provas. É uma asserção que tomamos como válida mesmo sem demonstrações. Se exigíssemos uma demonstração para um princípio, tal demonstração se basearia em um novo princípio, necessariamente. Isso criaria uma regressão infinita, o que não pode ser feito. É necessária a assunção de princípios para que se possa construir conhecimento científico. O fundamento de um princípio só pode ser metafísico, pois não pode ser testado empiricamente. Por isso a importância fundamental da filosofia para a ciência: embasar os princípios metafísicos que permitem a investigação.

2.1.1 A relatividade da simultaneidade

Ao contrário de Newton, Einstein chegou à conclusão de que dois eventos que parecem simultâneos para um observador não o farão em relação a outros observadores. Para ilustrar esse fenômeno, ele deu o exemplo de um vagão de trem que se move com velocidade uniforme nos trilhos quando raios atingem as extremidades do vagão, como na Figura 2. Os raios deixam as marcas A e B no chão e A' e B' nas extremidades do vagão. Um observador O está no chão, no ponto médio entre A e B e outro observador O' está dentro do vagão, no ponto médio entre A' e B' . Os sinais luminosos atingem O ao mesmo tempo, já que percorrem a mesma distância no mesmo intervalo de tempo. Mas o observador O' verá a luz do raio que atingiu B' antes do sinal que atingiu A' , já que no tempo t , em que a luz viajou até O' , este percorreu a distância vt em direção a B' . Isso mostra que a simultaneidade de dois eventos depende do referencial tomado.

Figura 2 – A relatividade da simultaneidade

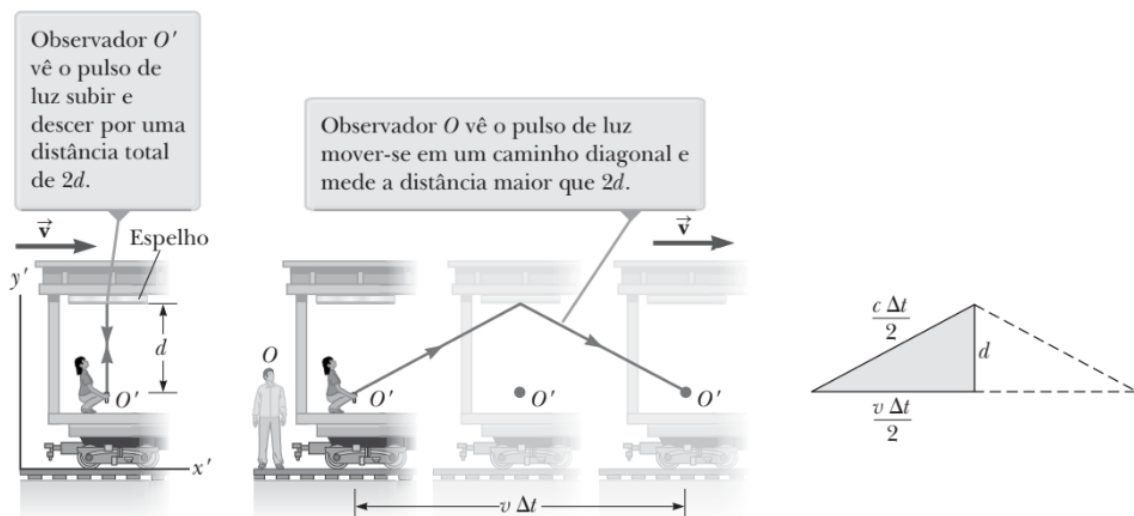


Fonte: Serway; Jewett, 2014.

2.1.2 Dilatação do tempo e contração do espaço

A dilatação temporal e contração espacial ocorrem para eventos observados de diferentes referenciais. Tomemos outro exemplo de um trem, que é ilustrado na Figura 3. O vagão se move uniformemente para a direita com velocidade v . Dentro do vagão, o observador O' aponta uma lanterna para cima, onde há um espelho no teto. Chamemos de evento 1 a emissão de um pulso luminoso na direção do espelho quando O' liga a lanterna momentaneamente e de evento 2 a chegada da luz novamente à lanterna.

Figura 3 – Trajetória de um pulso de luz em um vagão em movimento



Fonte: Serway; Jewett, 2014.

O observador O' mede com seu relógio o intervalo de tempo Δt_p entre os eventos 1 e 2. O sufixo p significa próprio. O intervalo de tempo próprio é, em geral, o intervalo de tempo entre dois eventos medido por um observador que os vê ocorrerem no mesmo ponto do espaço. Temos então

$$\Delta t_p = \frac{2d}{c}$$

O observador O , em repouso em relação ao solo, vê o mesmo raio luminoso que sai da lanterna, atinge o espelho no teto e volta para a lanterna. Mas este raio percorre uma trajetória diagonal devido à sua velocidade v para a direita. Pelo postulado da constância da velocidade da luz, ambos os observadores devem medir a mesma velocidade c para a luz. Ocorre então que a luz percorre uma distância maior entre os eventos 1 e 2 para o observador O do que para O' . Logo, o intervalo de tempo Δt medido pelo relógio de O entre os dois eventos é maior do que o intervalo medido por O' . Para calcular a relação entre os intervalos de tempo podemos considerar o triângulo mostrado na Figura 3. O teorema de Pitágoras nos dá

$$\left(\frac{c \Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v \Delta t}{2}\right)^2 + d^2$$

Resolvendo para Δt , temos

$$\Delta t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Logo, como $\Delta t_p = 2d/c$, temos

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_p$$

onde $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Como γ é sempre maior que 1, Δt é sempre maior que Δt_p . Esse efeito é chamado de *dilatação do tempo*.

Considerando-se dois pontos quaisquer do espaço, um observador em movimento uniforme em relação aos pontos medirá a distância entre eles, na direção de seu movimento, como menor em relação à distância medida por um observador em repouso em relação aos pontos. Tomemos a situação em que um observador com velocidade uniforme v sai de um primeiro ponto em direção a um segundo ponto. Consideremos o evento 1 como o momento em que o observador em movimento em relação a um referencial O sai da posição do primeiro ponto e o evento 2 o momento em que ele atinge o segundo ponto. Para o seu referencial, o referencial O' em relação ao qual o observador está em repouso, os eventos acontecem na mesma posição. Portanto, por causa da dilatação do tempo, ele mede o tempo próprio entre os eventos 1 e 2: $\Delta t_p = \Delta t / \gamma$, onde Δt é o tempo decorrido para um observador O para o qual os pontos estão em repouso. Já o observador O mede a *distância própria* entre os dois pontos. A distância própria L_p é a distância entre dois pontos medida por um observador para o qual estes pontos estão em repouso. Para este observador, L_p é dada por

$$L_p = v\Delta t$$

onde v é a velocidade do observador em movimento. Para este observador, a distância L entre os pontos é dada por

$$L = v\Delta t_p = v \frac{\Delta t}{\gamma}$$

Como $L_p = v\Delta t$, temos que

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Como $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ é menor que 1, a distância L medida por O' entre os pontos é menor que a distância própria. Temos então a *contração do espaço* para um observador em movimento.

2.1.3 As transformações de Lorentz

A aceitação dos postulados da relatividade especial exige que as equações que transformam as coordenadas (x, y, z, t) de um referencial S nas coordenadas (x', y', z', t') de um referencial S' em movimento retilíneo uniforme em relação a S sejam não mais as equações da relatividade de Galileu, como vimos acima, mas as transformações de Lorentz. Essas equações foram desenvolvidas por Hendrik Lorentz (1853-1928) em 1890 no contexto do eletromagnetismo. Einstein percebeu que elas tinham um significado mais abrangente e deveriam descrever também os fenômenos mecânicos e de todas as áreas da física.

Para o caso mais simples, em que o referencial S' tem velocidade v na direção do eixo x' e a direção de x' é a mesma de x , como na Figura 1, as transformações de Lorentz têm a seguinte forma:

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

Como o tempo t' medido pelo observador em O' em S' depende de t e também de x medidos pelo observador O em S , na relatividade, o espaço e o tempo não são mais absolutamente separados, mas tem um significado misto expresso pelo conceito de *espaço-tempo*.

Quando $v \ll c$, o que é o caso para a maioria dos fenômenos físicos observados cotidianamente, as transformações de Lorentz se reduzem às de Galileu. Mas, quando v é significativo em relação à velocidade da luz, somente as transformações de Lorentz fornecem os valores corretos.

2.1.4 Momento e energia relativísticos

Consideremos a situação ilustrada na Figura 1. Tomemos um corpo que se move em um referencial S' com uma componente de velocidade u' dada por

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}$$

Das transformações de Lorentz, temos

$$dx' = \gamma(dx - v dt) \quad e \quad dt' = \gamma\left(dt - \frac{v}{c^2} dx\right)$$

Substituindo esses valores na equação anterior, obtemos

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$$

que é a transformação de velocidade de Lorentz em $S \rightarrow S'$.

Seguindo as decorrências relativísticas especiais, temos que o momento linear, que deve conservar a energia para todo os referenciais inerciais, é dado por

$$\vec{p} \equiv \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

onde \vec{u} é a velocidade da partícula. O momento relativístico pode ser escrito na forma simplificada como

$$\vec{p} = \gamma m \vec{u}$$

A força relativística atuando em uma partícula cujo momento é \vec{p} é dada por

$$\vec{F} \equiv \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Com isso, é possível demonstrar que qualquer matéria, energia ou informação não pode viajar mais rápido que a luz. A velocidade da luz c é o limite máximo para a velocidade de qualquer objeto.

Para encontrarmos a energia cinética relativística de uma partícula, consideremos o caso em que uma força de módulo F , ao longo do eixo x , é exercida sobre uma partícula repouso até

ela atingir uma velocidade v . O trabalho W exercido sobre a partícula é equivalente à energia cinética relativística da partícula:

$$W = \Delta K = K - 0 = K = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dp}{dt} dx$$

Avaliando dp/dt a partir da definição de momento relativístico e tomando $dx = u dt$, encontramos

$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2$$

O termo mc^2 é independente da velocidade do corpo. É chamado de *energia de repouso*, E_R , dada por

$$E_R = mc^2$$

Essa equação mostra que a massa é uma manifestação de energia. Uma pequena quantidade de massa corresponde, portanto, a uma enorme quantidade de energia.

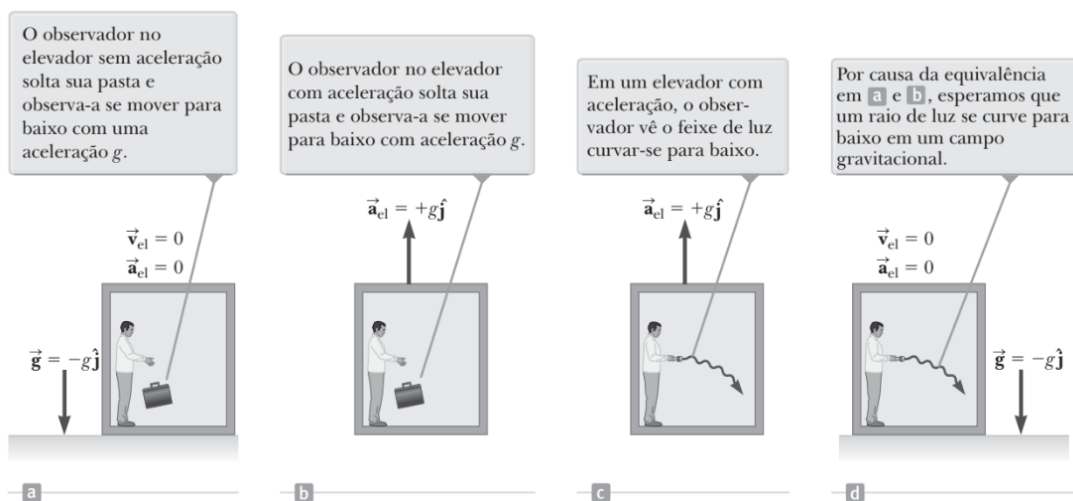
2.1.5 Relatividade Geral

A relatividade especial, no entanto, não trata de referenciais não-inerciais, ou seja, referenciais acelerados. Em seu famoso *insight* no escritório de patentes em Berna, Einstein percebeu que, se um homem estivesse em um elevador em queda livre, ele não notaria campo gravitacional algum. Seria como se o campo gravitacional fosse desligado. Assim, nenhum experimento mecânico poderia distinguir entre a aceleração causada pela presença de um campo gravitacional e a aceleração causada por quaisquer outros meios. Em suma, um campo gravitacional é indistinguível de um referencial acelerado. Esse é o *princípio da equivalência*, que juntamente com a ideia de que as leis físicas são as mesmas para quaisquer referenciais, inclusive os não inerciais, compõem a base da teoria da relatividade geral.

1. Todas as leis da natureza têm a mesma forma para observadores em qualquer referencial, acelerado ou não.
2. Na vizinhança de qualquer ponto, um campo gravitacional é equivalente a um referencial acelerado em um espaço livre da ação gravitacional.

Uma consequência desses postulados é a de que um raio de luz é curvado por um objeto com massa suficiente para gerar um campo gravitacional intenso o bastante. A Figura 4 ilustra essa ocorrência. Em a) o observador está na superfície de um planeta sujeito a um campo gravitacional com valor $-g$. Já em b) o observador está no espaço livre de gravidade, mas acelerado para cima com uma aceleração de valor g . Nos dois casos, o observador enxerga o movimento de queda de sua maleta exatamente da mesma forma.

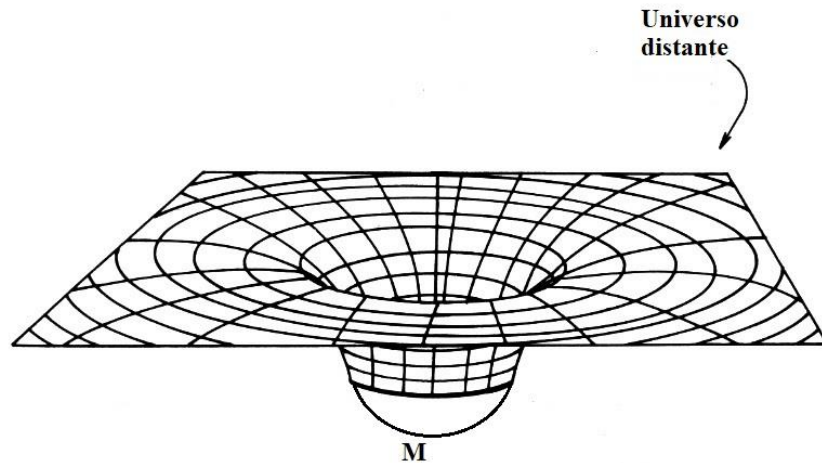
Figura 4 – Princípio da equivalência



Fonte: Serway; Jewett, 2014.

A equivalência se aplica a todos os fenômenos, inclusive os eletromagnéticos. Então se um observador em um elevador acelerado para cima como em c) da Figura 4 vê um raio de luz ser curvado para baixo, o mesmo deve ocorrer como consequência de um campo gravitacional, como em d). Einstein desenvolveu o conceito de espaço-tempo, onde as três dimensões espaciais e a dimensão temporal compõem um “tecido” que permeia todo o universo. A Figura 5 é uma representação de como o espaço-tempo na vizinhança de um corpo com massa “M” é curvado pela massa do corpo. A curvatura desse tecido determina a trajetória que os corpos livres em movimento devem seguir. A ideia de “força” gravitacional de Newton é completamente substituída pela curvatura do espaço-tempo.

Figura 5 – Representação do espaço-tempo curvado por uma massa



Fonte: Soares. *O espaço-tempo einsteiniano*, UFMG, 2019.

A equação principal da teoria, que relaciona o conteúdo de massa com o conteúdo de campo de qualquer objeto material, chamada “equação de campo de Einstein”, tem a seguinte forma⁴:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Os termos à esquerda dizem respeito ao campo e os termos à direita à matéria. A partir da equação de campo, é possível deduzir outra equação, que determina o ângulo de deflexão δ de um raio de luz que passa tangencialmente a um corpo massivo, como uma estrela, por exemplo:

$$\delta = \frac{4GM}{c^2 R}$$

onde G é a constante gravitacional, M a massa do corpo, c a velocidade da luz e R o raio do corpo. Para o caso do Sol, $\delta = 1,75''$.

⁴ A demonstração das equações de campo de Einstein está além do escopo do presente trabalho. Mais detalhes podem ser encontrados em: WEINBERG, Steven. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Universidade de Michigan: Wiley, 1972; ou HARTLE, James B. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. Cambridge University Press, 2021.

2.2 HISTÓRIA DA RELATIVIDADE E DO TESTE DE 1919 EM SOBRAL

A ideia de que a luz pode percorrer uma trajetória curva devido à atração gravitacional aparece desde a fundação da ciência moderna. Em 1704, Isaac Newton (1643-1727) já havia indagado em sua obra “*Opticks*” se um raio de luz deveria sofrer uma deflexão ao passar próximo de um corpo massivo (MATSUURA, 2019). Isso porque ele acreditava que a luz era composta de pequenos corpúsculos, que hoje chamamos de fótons. John Michell (1724-1783), décadas depois, também previu um fenômeno de curvatura da luz. Baseando-se na teoria corpuscular e na ideia de velocidade de escape, concluiu que se uma estrela for suficientemente massiva, os corpúsculos de luz emitidos por ela irão retornar à sua superfície após sofrerem uma deflexão de 180° . Aí houve a primeira previsão do que hoje conhecemos como buracos negros, que Michell chamou na época de estrelas obscuras.

O primeiro a calcular propriamente a deflexão de um raio de luz segundo a física newtoniana foi o físico, matemático e astrônomo alemão Johann Georg von Soldner (1776-1833). Utilizando a velocidade da luz, massa e raio do Sol conhecidos à época, Soldner chegou ao valor de $0,84''$ (em 1911, em suas tentativas de aprimorar a Relatividade Restrita, Einstein chegaria a $0,83''$). A publicação, em 1801, dos resultados dos experimentos de dupla-fenda com luz, realizados pelo inglês Thomas Young (1773-1829), junto de outros resultados favoráveis à teoria ondulatória da luz (desenvolvida pelo contemporâneo de Newton, Christian Huygens) colocariam em xeque a ideia de deflexão da luz. Afinal, se a luz consistisse de uma onda propagando-se em um meio sutil (o éter), como a teoria ondulatória levava a crer, não faria sentido uma deflexão da luz. A interferência gravitacional na propagação da luz só voltaria a ser investigada novamente por Albert Einstein (1879-1955), mais de um século depois.

Albert Einstein vinha de uma família judia do sul da Alemanha. Nasceu em um vilarejo próximo de Ulm. Mas a família morou em vários lugares no decorrer de sua juventude. Ele rejeitou a cidadania alemã aos 15 anos de idade e estabeleceu-se como estudante em Zurique, Suíça (SEKSIK, 2010). Conseguiu uma graduação na Escola Politécnica Federal de Zurique, mas seu desempenho foi mediano. Por sua índole rebelde, inconformada e insolente, Einstein não conseguiu nenhum emprego acadêmico na universidade após se formar. Ele então trabalhou como professor substituto em vários lugares, sempre por pouco tempo. Em 1902, graças à ajuda de um amigo, conseguiu um emprego como assistente de patentes no Instituto Suíço de Patentes em Berna. Ele trabalharia no escritório até 1908. Mas foi ali que Einstein publicou vários de seus principais trabalhos teóricos.

O trabalho com patentes não era cansativo nem extenuante para Einstein, e ali mesmo, em sua tarefa monótona num escritório no terceiro andar, foi onde ele pôde passar muito tempo refletindo sobre os problemas da física que o atraíam. Em 1905, Einstein publicou quatro artigos visionários. O último deles estabelecia a Relatividade Restrita.

Os trabalhos de Einstein que levariam ao edifício teórico da Teoria da Relatividade Geral tiveram origem na tentativa de resolver o problema da incompatibilidade entre o princípio da relatividade de Galileu Galilei, e os postulados do físico neerlandês Hendrik Lorentz de que a velocidade da luz é a mesma para quaisquer referenciais inerciais. Além disso, as bases da física newtoniana pareciam insuficientes para entender o cosmo para Einstein. A ideia de força da gravidade de Newton não parecia natural: dois corpos com massa se atraem à distância. Mas como pode um objeto se “comunicar” com outro dessa forma. Que elo os une? O que está por trás dessa atração à distância? O próprio Isaac Newton não sabia responder essas questões. Apesar da funcionalidade de suas descrições matemáticas dos movimentos de corpos celestes ou na superfície da Terra, a física clássica de Newton não explicava o mecanismo pelo qual opera-se a gravidade. A estes problemas Albert Einstein se debruçou por muitos anos.

Na primavera de 1905, Einstein estava andando de ônibus. Ele olhou para a torre do relógio de Berna e teve um insight brilhante: se seu ônibus estivesse se afastando do relógio com a velocidade da luz, este estaria parado para um observador no ônibus, o tempo pararia! Isso o levou a conceber o espaço e o tempo como intimamente relacionados, como sendo uma coisa só: um “tecido flexível” chamado espaço-tempo. Postulando que: 1. A velocidade da luz é constante no vácuo, independentemente do movimento da fonte ou do observador; e 2. As leis físicas são as mesmas para todos os referenciais inerciais, Einstein chegou às consequências de dilatação do tempo e contração do espaço, ou seja, a relatividade do espaço e do tempo em relação ao estado de movimento do observador.

As ideias desenvolvidas por Einstein eram radicais e bastante inusitadas para o “arroz com feijão” da comunidade científica da época. Custava a aceitação e até mesmo a publicação dos trabalhos de um mero funcionário do governo suíço que não tinha ligação com a academia e ainda se propunha a refundar as bases da física.

Em 1907, Einstein escreveu um artigo de revisão de sua Relatividade Restrita de 1905, e o publicou em 1908. Nessa época, ele já sabia que precisava aprimorar sua teoria para abarcar todos os fenômenos físicos. A Relatividade Restrita só dava conta de referenciais e movimentos com velocidade constante. Mas a aceleração é onipresente no universo físico. Era necessário generalizar a teoria para quaisquer referenciais, incluindo os acelerados.

Pensando nessa questão, e ainda trabalhando no instituto de patentes em Berna, Einstein teve o maior insight de sua vida, que o levaria a desenvolver a Teoria da Relatividade Geral (ou TRG, como chamaremos daqui em diante). Ele olhava pela janela de seu escritório quando viu um trabalhador no telhado de um prédio e imaginou o que aconteceria como homem, caso caísse. Nesse experimento mental (“*Gedanken-Experiment*”, do alemão), ele percebeu que do ponto de vista do trabalhador, não haveria força nenhuma puxando-o para baixo enquanto caísse. Seria como se a gravidade fosse desligada. Então ele imaginou o homem em um elevador em queda livre. Nesse caso, ele não notaria que estava caindo, e apenas não sentiria mais a ação da gravidade sobre si. E se estivesse em uma cabine no espaço sideral com um foguete que a propelisse com a mesma aceleração da gravidade, sentiria como se estivesse sofrendo a ação da gravidade na superfície da Terra.

Essas considerações levaram Einstein a formular seu Princípio da Equivalência, segundo o qual a massa inercial é equivalente à massa gravitacional e um referencial uniformemente acelerado é equivalente a um campo gravitacional homogêneo. Ele apresentou esse princípio em seu artigo de revisão de 1908 e anunciou que a gravitação requer uma generalização da Relatividade Restrita a todos os referenciais e que essa generalização se basearia no Princípio da Equivalência.

O Princípio da Equivalência resultava em que o movimento de um relógio em um local onde a gravidade é mais intensa é mais lento do que o de um relógio idêntico, mas em um local com gravidade menor. Essa consideração levou Einstein a prognosticar que deveria haver uma tendência para o vermelho nas linhas espectrais do Sol. Essa é uma das possíveis formas de se testar a TRG experimentalmente. Também previu a deflexão da luz causada por um objeto suficientemente massivo, pois para um observador em um compartimento acelerado, haveria uma curvatura na trajetória de um raio de luz. Portanto, um campo gravitacional teria de apresentar o mesmo efeito, pelo Princípio da Equivalência. Aqui, Einstein ainda não havia constatado a possibilidade de se verificar esse efeito num eclipse.

Com o passar do tempo, a comunidade científica começou a ter de reconhecer que não poderia ignorar os trabalhos de Einstein. Com isso, ele conseguiu trabalhar como professor na Universidade de Berna em 1908, e em 1909 na Universidade de Zurique. Em 1910 o ministro da educação do Império Austro-Húngaro nomeia Albert como professor catedrático de física da Universidade de Praga (SEKSIK, 2010).

Lecionando em Praga, ele escreve um artigo preliminar sobre sua teoria da gravitação em que tentava descrever a deflexão da luz pela ação da gravidade. Para tal, utilizou-se do

Princípio da Equivalência, da equivalência massa-energia deduzida por ele em 1905 e o Princípio de Huygens para a formação e propagação das ondas de luz. Demonstrou assim que o potencial gravitacional causava a deflexão de um raio luminoso, prevendo o valor de $0,83''$ para a deflexão de um raio rasante ao Sol. Essa previsão se revelaria incorreta. A teoria de Einstein, nesse ponto, ainda era semelhante à de Newton e o valor de $0,83''$ era praticamente o mesmo calculado por Soldner um século antes. No entanto, é com essa publicação que Einstein conclamou os astrônomos a procurarem a deflexão da luz em eclipses.

A observação do eclipse solar total permite que uma boa câmera astronômica tire fotos da Lua encobrindo o Sol, ou seja, do eclipse, e também das estrelas que aparecem ao redor do círculo negro no céu diurno, ou seja, do campo estelar que circunda o Sol. Com isso, é possível observar a luz que vem das estrelas e passa perto do Sol em sua trajetória até a Terra, algo que seria impossível em dias normais devido à obstrução da luz do próprio Sol. Como, segundo a teoria da Relatividade, a luz é desviada na direção de um objeto massivo, a posição das estrelas ao redor do Sol parecerá afastada radialmente em relação ao Sol em relação ao mesmo campo estelar fotografado sem a presença do Sol entre as estrelas e a Terra, em uma noite adequada. Eclipses totais, porém, são observáveis em faixas relativamente estreitas do globo terrestre a cada eclipse que ocorre.

Para se determinar a posição exata das estrelas ao redor do Sol encoberto era necessário se levar em conta diversos fenômenos que interferem na captação da luz dessas estrelas (MATSUURA, 2019). A *aberração estelar* é um deles. Ela consiste na variação da posição aparente de uma estrela causada pelo movimento de rotação e translação da Terra ao redor do Sol. Esse efeito depende da posição da estrela na esfera celeste que se está observando e pode ser eliminado por métodos de cálculo. Outro fenômeno que interfere na captação da luz de estrelas é a refração atmosférica, que em geral faz com que os astros pareçam mais elevados em relação à linha do horizonte. O efeito é máximo no horizonte e vai diminuindo conforme se eleva a posição na esfera celeste, até ser nulo no Zênite. Como a atmosfera é caótica, o efeito é diferencial em relação à esfera celeste e depende também de variáveis como a altitude, temperatura e pressão no momento da observação, não se pode calcular um valor exato, mas apenas estimar uma média.

Além desses e de outras interferências que afetam a trajetória de um raio de luz até ele chegar à lente de um telescópio para ser fotografado, ainda é preciso considerar as imprecisões dos próprios aparelhos de observação. Um problema comum nos telescópios é a miopia ou astigmatismo das lentes que ficam expostas a variações de temperatura. As fotografias do

eclipse são tiradas durante o dia, enquanto as de comparação são tiradas à noite. Ou seja, a observação do mesmo campo estelar será feita a temperaturas e condições atmosféricas discrepantes, com direções em que se apontam os aparelhos inevitavelmente diferentes. Ou seja, o experimento de tentar captar a deflexão gravitacional da luz se constitui em uma tarefa extremamente exigente, complicada e com alto risco de falha.

Nenhum astrônomo de alta reputação se interessa pela proposta, mas um assistente do Observatório de Berlim, Erwin-Finlay Freundlich (1885-1964) ficou muito entusiasmado com a ideia. Ele reconheceu a importância do experimento e dedicaria muito de sua carreira à busca da comprovação da teoria de Einstein. Em 1911, Freundlich cogitava analisar fotografias de eclipses passados em busca de sinais da deflexão. Em outubro daquele ano, contatou em Berlim Charles Dillon Perrine (1867-1951), astrônomo americano que era diretor do Observatório de Córdoba, na Argentina. Perrine havia trabalhado no Observatório de Lick, na Califórnia, de 1893 a 1909. Nesse período, participou de quatro expedições para observar eclipses, juntamente com o renomadíssimo astrônomo William Wallace Campbell (1862-1938). Freundlich interpelou Perrine sobre a possibilidade de se detectar a deflexão de Einstein nas chapas fotográficas do eclipse de 25 de maio de 1900, quando as condições para a detecção da deflexão da luz eram excelentes. Este respondeu negativamente, pois o Sol não se encontrava no centro das fotografias, alegou. Mesmo assim, Freundlich solicitou as fotografias a Campbell e as analisou, não obtendo resultados úteis.

Em 1912, Freundlich solicitou a Perrine que tentasse detectar a deflexão da luz do Sol em sua próxima observação de um eclipse, que aconteceria em 10 de outubro de 1912. Perrine concordou e essa foi a primeira tentativa de observar um eclipse com o objetivo de testar a teoria de Einstein. Campbell não conseguiu uma expedição pelo Observatório de Lick, mas emprestou objetivas a Perrine, que seriam utilizadas para detecção da deflexão. O grupo enviado pelo Observatório de Córdoba, chefiado por Perrine, também faria observações no estudo da física solar no local, a cidade brasileira de Cristina, no estado de Minas Gerais. No entanto, no dia do eclipse a chuva forte frustrou todas as equipes e não foi possível de se fazer observações.

Enquanto os astrônomos procuravam por um bom eclipse, Albert Einstein corrigia sua teoria da gravidade. Em 1911, havia concebido o Princípio da equivalência, segundo o qual a velocidade da luz varia em função da aceleração gravitacional. Tal variação, por sua vez, sugere que o espaço não é euclidiano. Pois, em um espaço não-euclidiano, ou curvo, a trajetória mais curta entre dois pontos não é uma reta, mas curva. Nesse sentido, em outro de seus “*Gedanken-*

Experiment” Einstein descobriu que outro tipo de aceleração, a centrípeta, ou rotacional, produz um espaço não-euclidiano de curvatura negativa.

Ainda em Praga, Einstein recebe um convite para ser professor na Escola Politécnica de Zurique, a mesma instituição onde tinha se formado. Para ele, era uma porta antes fechada que agora se abria. Mas ao mesmo tempo, Max Planck pleiteava a ida de Einstein para Berlim, para o Kaiser Wilhelm Gesellschaft, o instituto fundado pelo imperador alemão para trazer os mais brilhantes cientistas para o centro do *II Reich* (Segundo Império Alemão). A esposa de Albert queria voltar a Zurique e, em julho de 1912, a família Einstein vai para a antiga cidade.

Para conseguir explicar as decorrências de seu Princípio da Equivalência, nessa época ele teve de seguir os conselhos de seu amigo, o matemático Marcel Grossmann (1878-1936) e ser introduzido ao Cálculo Tensorial. Essa disciplina matemática lida com os tensores, que são formas generalizadas de se representar grandezas físicas de quaisquer ordens. Com essa ferramenta nova e trabalhando juntamente com Grossmann, com quem publicou um artigo em 1913, Einstein julgou que a maior parte de sua teoria estava pronta. Mas descobriu que as equações acopladas que utilizara não representavam a teoria clássica newtoniana na situação limite onde o campo gravitacional fosse fraco e estático.

Em 1914 a insistência de Max Planck, junto das complicações pelas quais Einstein passa em seu casamento e ainda o contato com sua prima em Berlim, por quem tem velhos sentimentos, finalmente fizeram Einstein concordar em assumir um lugar na Academia Prussiana de Ciências. Ele se mudou com a família em abril de 1914.

Freundlich continuou a empenhar-se na tentativa de testar as teorias de Einstein e, em 1914, chamou a atenção de seus colegas astrônomos para o eclipse que seria visível no Império Russo. Seu chefe no Observatório de Berlim, Hermann Struve (1854-1920) não apoiou a empreitada e Freundlich conseguiu apenas fundos privados com o próprio Einstein. Ao contactar Campbell, porém, o retorno foi positivo e o americano levou sua própria expedição para o eclipse de 1914. Perrine também foi para a Rússia e ainda emprestou equipamentos a Freundlich. As expedições argentina e alemã se posicionaram na cidade de Feodosia, na região da Crimeia, Império Russo. Para terem mais chances de sucesso, a equipe americana de Campbell foi para o norte, nos arredores de Kiev.

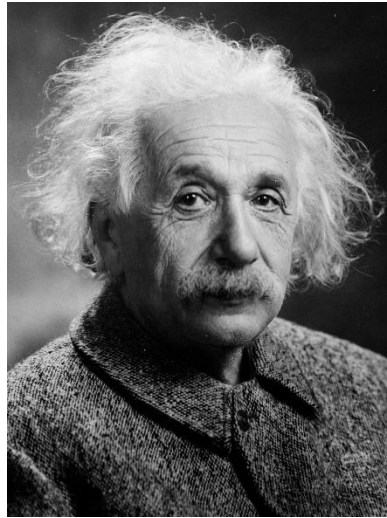
Três equipes estariam prontas para detectar a deflexão da luz solar prevista pelas teorias de Einstein dessa vez. Porém, o início da Primeira Guerra interferiu. Quando a equipe de Freundlich já estava no local da observação, o Kaiser Guilherme II do Império Alemão declarou guerra ao Império Russo de Nicolau II. O jovem astrônomo e seus companheiros alemães foram

tidos como potenciais espões pela polícia russa e foram presos imediatamente, não podendo prosseguir em sua tarefa. Já os argentinos não conseguiram que seus equipamentos chegassem ao local do eclipse a tempo da observação. Campbell e sua equipe, americanos, ainda estavam neutros no conflito e os russos os deixaram em paz. Mas, novamente o mau tempo impediu quaisquer observações do eclipse. Felizmente para Einstein, o valor que ele previa em seu desenvolvimento da Teoria de Relatividade Geral ainda estava incorreto em 1914, pois não levava em conta a curvatura do espaço-tempo nas proximidades do Sol. Então, o valor que encontrariam estaria em desacordo com sua previsão e o teria descredibilizado.

Desde a publicação do artigo em parceria com Grossmann, em 1913, Einstein sabia que precisava corrigir sua teoria e apresentar a matemática correta. Era necessário que a TRG satisfizesse o Princípio da Covariância, ou seja, que as leis da física fossem as mesmas para quaisquer sistemas de coordenadas, fossem eles inerciais ou acelerados. Em 1915 ele ministrou palestras sobre sua teoria da relatividade na Universidade de Göttingen, onde estava presente um dos maiores matemáticos de todos os tempos, David Hilbert (1862-1943). Este, ao ser apresentado às ideias de Albert, se propôs a formular a matemática necessária para a teoria da relatividade. Hilbert assim o faria, e de forma mais rigorosa e abrangente que o próprio Einstein.

Em novembro de 1915, Einstein estava empenhado em apresentar a versão correta de sua teoria. No dia 6 daquele mês, publicou um boletim na academia prussiana onde acreditava estar tudo acertado. Mas percebeu algumas falhas e no dia 11 um novo boletim foi necessário. E outro no dia 18. Neste ele explicava de forma correta o excesso anômalo de 43'' por século no periélio de Mercúrio e, pela primeira vez, declarava que a deflexão gravitacional da luz correspondia ao encurvamento do espaço-tempo e deveria ser o dobro da previsão newtoniana. No dia 25, Einstein apresentou as equações de campo corretas para a TRG. Depois disso, faltavam apenas alguns detalhes e a versão final da teoria foi publicada no início de 1916. A Figura 6 mostra Albert Einstein, vários anos depois de ter terminado sua teoria. Ele nunca deixaria de tentar aprimorá-la.

Figura 6 – Albert Einstein, autor da TRG.



Fonte: Wikipédia, 2023.

Em 03 de fevereiro de 1916, em Tucacas, na Venezuela, uma nova expedição astronômica chefiada por Perrine fez observações do eclipse daquele ano. Mas as dificuldades financeiras provocadas pela guerra na Europa impediram que se levassem os melhores equipamentos e as fotografias tiradas mesmo assim não serviriam para detectar a deflexão.

Durante a Primeira Guerra, e mesmo por um bom tempo depois que ela acabou, a correspondência científica entre o Império Alemão e seus inimigos, incluindo a Inglaterra, foram interrompidos. Mas em fevereiro de 1916, o cosmólogo holandês Willem de Sitter (1872-1934) enviou ao secretário da Royal Astronomical Society, a maior associação de astrônomos do Reino Unido, um pacote com a versão em inglês da Teoria da Relatividade Geral. Esse secretário era Arthur Eddington, que ficou muito impressionado e entusiasmado com a nova teoria do alemão que, assim como ele, se opunha à guerra. Eddington tinha muita experiência no campo da Astronomia Observacional, de seu tempo trabalhando no observatório de Greenwich e também era um brilhante astrofísico da Universidade de Cambridge. Após tomar conhecimento da teoria de Einstein, ele começou a pensar em realizar uma expedição para comprovar a deflexão da luz solar em um eclipse.

O próximo eclipse ocorreria em 8 de junho de 1918 e seria observável de uma grande faixa dos EUA. Por conta da guerra, Eddington não pôde ir à América para observar, mas solicitou a Campbell que o fizesse. Campbell concordou, e o eclipse americano foi fotografado com sucesso em Goldendale, Washington. Porém, o equipamento adequado para a tarefa havia sido confiscado pelos russos durante a expedição de 1914. As fotografias não tinham uma boa qualidade para os fins a que o experimento se propunha. Por isso, quando as chapas foram

analisadas por Heber Doust Curtis (1872-1942), astrônomo que ajudou Campbell na expedição, nenhuma anomalia nas posições ou desvio gravitacional foram encontrados.

Uma nova oportunidade ocorreria no dia de 29 de maio de 1919, quando um eclipse com totalidade bastante longa seria visível de regiões do Brasil e da África. Por isso, Perrine solicitou a Henrique C. Morize (1860-1930), então diretor do Observatório Nacional do Rio de Janeiro informações sobre qual seria o melhor lugar para observação do eclipse de 1919. O brasileiro então elaborou uma circular técnica, onde apontava a localidade de Sobral como melhor posto de observação. Essas informações seriam utilizadas pelos britânicos para sua expedição. Os gastos nos três eclipses anteriores impediram que Perrine fosse dessa vez. Os alemães, derrotados na I Guerra, muito menos teriam condições de participar. Tudo favoreceu os britânicos.

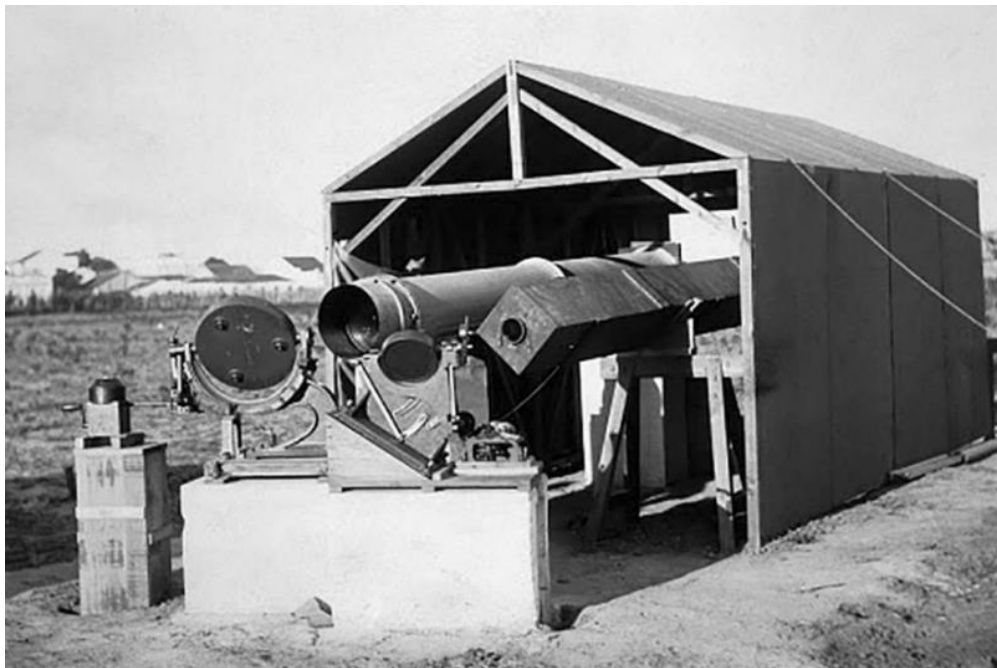
O primeiro teste empírico bem sucedido da deflexão da luz passando perto do Sol foi realizado em 29 de maio de 1919 por duas expedições britânicas. Elas foram organizadas pelo Comitê Permanente Conjunto de Eclipses para fotografar o eclipse em dois locais onde este seria observável: a cidade de Sobral, localizada no nordeste brasileiro; e a Ilha de Príncipe, localizada na Costa Oeste da África. O comitê que organizou as expedições era chefiado pelo Astrônomo Real do Reino Unido Frank Watson Dyson. Arthur Stanley Eddington e Edwin Turner Cottingham compunham a expedição à África enquanto Andrew Claude de la Cherois Crommelin e Charles Rundle Davidson compunham a expedição ao Brasil.

Os astrônomos deixaram o porto de Liverpool no dia 08 de março de 1919, a bordo do vapor *Anselm* (CRISPINO, 2019). Depois de parar em Lisboa, o navio chegou à Ilha da Madeira, onde a equipe de Eddington e Cottingham desembarcaram para esperar o navio que os levaria à Ilha do Príncipe. Crommelin e Davidson seguiram viagem no *Anselm* até o Brasil. Eles fizeram uma viagem pela Amazônia, depois ficaram alguns dias em Belém, no Pará, e depois seguiram para Camocim de navio e depois de trem para Sobral.

Em Sobral, a casa do coronel Vicente Saboya recebeu os astrônomos durante o preparo e realização das observações. O local escolhido para montar os telescópios foi a pista de corrida de cavalos, que ficava em frente à casa do coronel. Nos primeiros dias de maio os suportes e instalações foram montados para os dois telescópios que seriam utilizados para fotografar o eclipse. Crommelin operaria uma lente fotográfica de 4 polegadas (equivalente a 10,16 centímetros) da Academia Real Irlandesa, enquanto Davidson ficaria responsável pela lente de 13 polegadas (33,02 centímetros) do telescópio astrográfico de Greenwich.

A lente de Crommelin foi montada em um tubo de seção reta quadrada feito de madeira acoplado a um celóstato de 8 polegadas. Já a lente de Davidson foi montada em um tubo cilíndrico de aço com um redutor para 8 polegadas e acoplada a um celóstato de 16 polegadas. No dia 20 de maio a lente de 13 polegadas do astrográfico foi montada e no dia 23 fotos revelaram um astigmatismo causado pelo espelho. A solução para o problema foi uma máscara que obturou a objetiva de 13 para 8 polegadas. Foram realizados também ensaios nos dias 26 e 27. Decidiram-se então os programas de operação das fotografias durante o eclipse: 8 placas fotográficas com tempo de exposição de 30 segundos cada para o telescópio de Crommelin e 19 placas com tempos de 5 ou 10 segundos de exposição para o de Davidson. Isso porque a totalidade do eclipse, quando a Lua obscurece totalmente o Sol, duraria aproximadamente 5 minutos. A Figura 7 mostra os dois telescópios utilizados em Sobral. À esquerda, vemos o a lente de 13 pol montada em um tubo cilíndrico. À direita, a lente de 4 pol montada em um tubo de madeira de seção quadrada.

Figura 7 – Telescópios montados em Sobral, 1919.



Fonte: Crispino; Kenefick, 2019.

O dia 29 de maio, quando ocorreu o eclipse, amanheceu nublado. A nebulosidade aumentou e, às 7:46, momento do primeiro contato (quando a orla da Lua “encosta” na do Sol), o céu estava 9/10 nublado. Mas pouco antes da totalidade o céu ficou limpo, e permaneceu assim por toda a totalidade, salvo 80 segundos perto de seu meio. Por causa das nuvens logo

antes do eclipse, as correções dos relógios dos celóstatos não puderam ser bem feitas. O relógio do celóstato de 16 polegadas acabou funcionando de forma variável, mas o do de 8 polegadas por sorte funcionou bem. A temperatura variou pouco durante o eclipse, ficando apenas entre 27 e 29 °C. A Figura mostra Crommelin e Davidson (em branco, da esquerda para a direita, respectivamente), juntamente com outras expedições científicas, que foram a Sobral por causa do eclipse, mas para estudar fenômenos diferentes da deflexão da luz.

Figura 8 – Crommelin, Davidson e outros cientistas, Sobral, 1919.



Fonte: Crispino; Kennefick, 2019.

Nos dias subsequentes as fotografias foram sendo reveladas. Era necessário que a água utilizada na revelação das chapas fosse fria. Como não havia gelo disponível, usaram-se moringas de barro e trabalhar à noite ou de madrugada para que a água ficasse a cerca de 24 °C. Formol foi utilizado para endurecer os filmes, evitando ao máximo a emulsão das imagens. Em 5 de junho todas estavam prontas. As fotografias do telescópio de Davidson mostravam 12 estrelas em várias placas e 7 em todas. No entanto, devido à expansão desigual do celóstato causada pelo calor do Sol, houve uma grave mudança no foco e a nitidez das imagens foi comprometida. As fotografias de Crommelin, por outro lado, mostraram 7 estrelas em 7 placas com ótima definição.

No dia 07 de junho a expedição foi para Fortaleza, deixando os equipamentos armazenados em Sobral. Isso porque voltariam posteriormente para fotografar as mesmas estrelas, ou campo de estrelas, na mesma angulação da ocasião do eclipse. As fotografias para comparação foram tiradas entre os dias 11 e 18 de julho. Depois disso, os astrônomos seguiram até São Luís, no estado do Maranhão. Em São Luís embarcaram no vapor *Polycarp* para voltar à Inglaterra.

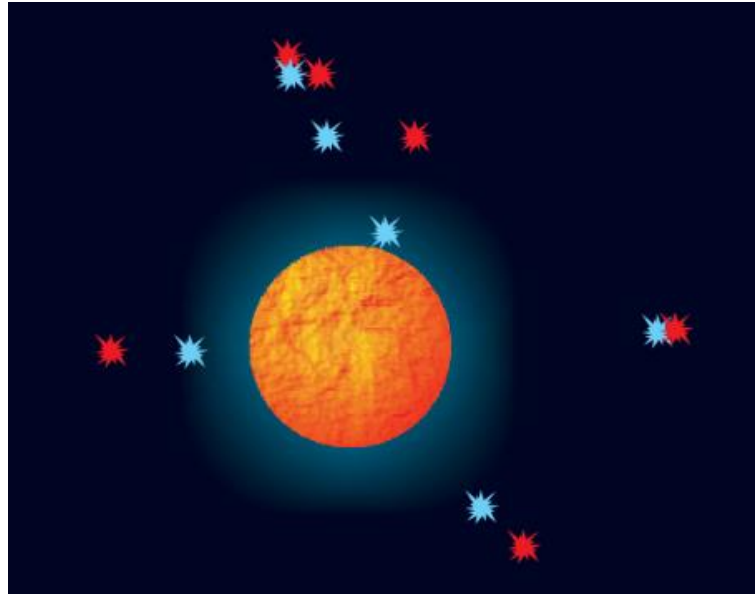
Figura 9 – Imagem de uma das chapas fotográficas de Sobral.



Fonte: Observatório Nacional. Disponível em: <<https://daed.on.br/sobral/>>

A Figura 9 é a imagem de uma das chapas fotográficas obtidas em 1919 em Sobral. Podemos ver ao centro a lua encobrindo totalmente o Sol e vários pontos brancos ao redor do Sol encoberto, que corresponde a estrelas. A análise da deflexão consiste, basicamente, calcular o ângulo de deflexão da trajetória de raios de luz que partem das estrelas fotografadas e chegam até as lentes. Esse cálculo é feito a partir da comparação entre a posição em que essas estrelas aparecem na fotografia tirada durante o eclipse com a posição em que aparecem em uma fotografia tirada em uma noite comum do mesmo campo estelar. “Campo estelar” é um conjunto de estrelas que aparecem em uma determinada região do céu. Podemos ver na Figura 10 uma representação artística dessa comparação, onde as posições em vermelho correspondem ao observado na fotografia com o eclipse e as posições em azul, ao que seria observado em uma noite comum.

Figura 10 – Representação gráfica das posições de estrelas em um eclipse.



Fonte: Kennefick, Physics Today, 2009.

Em Greenwich, a análise das placas fotográficas foi realizada pelo próprio Davidson, supervisionado pelo Astrônomo Real Frank Watson Dyson. Na reunião conjunta da Royal Society e da Royal Astronomical Society em 06 de novembro, foram anunciados os resultados finais do experimento, confirmando as previsões de Albert Einstein. Foi publicado no Philosophical Transactions of the Royal Society of London, um trabalho assinado por Davidson, Eddington e Dyson com a exposição dos resultados.

Junto da expedição da Ilha do Príncipe, os resultados da expedição se aproximaram da previsão de Einstein da deflexão da luz. Eddington não teve muitos resultados bons, mas duas de suas três chapas fotográficas aproveitáveis possuíam a deflexão esperada e a terceira apresentou falhas que justificaram seu descarte, como justificam Gilmore e Tausch-Peabody (2020). Os resultados finais da deflexão e incerteza associada das expedições de Sobral e Príncipe aparecem na Tabela 1. Também aparecem na tabela os resultados obtidos por um grupo de astrônomos do Royal Greenwich Observatory, que, por ocasião do centenário do teste de 1919, realizaram uma nova análise das placas fotográficas com o auxílio de uma máquina moderna de medição (CRISPINO, KENNEFICK, 2019).

Tabela 1 – Resultados (em segundos de arco) das placas fotográficas de 1919.

Instrumento	Resultado de 1919	Reanálise de 1979
Astrográfico de Príncipe	$1,61 \pm 0,30$	-
Lente de 4 pol de Sobral	$1,98 \pm 0,18$	$1,90 \pm 0,11$
Astrográfico de Sobral	$0,93 \pm 0,50$ ou $1,52 \pm 0,46$	$1,55 \pm 0,34$

Fonte: Crispino; Kennefick, 2019.

Os resultados foram favoráveis à previsão da TRG de $1,75''$. Devido à má qualidade das imagens e à detecção de erro sistemático nas fotografias, as chapas do astrográfico operado por Davidson foram descartados, conforme publicação de Davidson, Dyson e Eddington de 1920 (MATSUURA, 2019, p. 110-115), em que constam os resultados das duas expedições. As placas de Príncipe foram poucas, e apenas duas foram aproveitáveis, sendo que a análise final feita na Inglaterra demonstrou que estas eram suficientemente confiáveis. As imagens obtidas com o telescópio de Crommelin eram quase ideais e tinham uma escala maior que a de outras placas. Pelo maior número de estrelas que apareceram, essas placas tiveram o maior peso estatístico na análise final. O resultado publicado em 1920 confirmou que a deflexão era muito mais próxima da previsão einsteiniana do que da newtoniana.

3 PROBLEMAS DE EPISTEMOLOGIA DA CIÊNCIA

São muitas as questões levantadas e investigadas pelos epistemólogos da ciência desde o surgimento do pensamento científico. A necessidade de se elaborar um método ordenado e estruturado de se buscar e fazer ciência surge com Aristóteles. Nossa discussão, no entanto, se concentra mais nas novas ideias que surgiram no final do século XIX com o Círculo de Viena (que será apresentado adiante) e na reação de diversos pensadores ao longo do século XX.

A ciência moderna tem como componente fundamental a possibilidade de teste empírico das teorias. O fato de que os testes podem afirmar ou negar as hipóteses levantadas leva ao primeiro problema em epistemologia da ciência. De que forma podemos estabelecer um método confiável de teste empírico das hipóteses teóricas e que critérios devemos estabelecer para saber se um teste realmente confirmou ou não uma teoria é o chamado *problema da confirmação*.

O caráter empírico da ciência também é muitas vezes colocado como marco distintivo entre ciência e outras formas de conhecimento. Essa questão se relaciona com o *problema da demarcação*, que envolve o modo como o saber científico pode ser clara e objetivamente distinguido de outros saberes. Ao longo da atividade científica propriamente dita, pode ocorrer de uma hipótese ser confirmada ou ainda de hipóteses ou teorias distintas serem confirmadas por experimentos diversos. Surge aí a necessidade de se elaborar um método de como podemos aceitar uma teoria com base em seus méritos e em face de outras teorias concorrentes. A isto chamamos de *problema da aceitação*. Além disso, se a teoria é aceita e suas decorrências e previsões são tidas como válidas, a forma pela qual ela pode ser compreendida como um avanço conhecimento do mundo e como uma evolução da ciência constitui o *problema do progresso*.

Trataremos a seguir dos principais problemas epistemológicos em separado. A divisão adotada é didática, e vários dos problemas estão interligados. Assim, algumas considerações presentes em um tópico podem dizer algo também sobre os outros. Essa abordagem se baseia em grande parte no livro “Introdução à Teoria da Ciência” de Luiz Henrique de Araújo Dutra (2009). Alguns epistemólogos e suas ideias são escolhidos para representar as principais perspectivas na área. Dentre eles, destacam-se Rudolf Carnap, Karl Popper, Richard Boyd e Bas van Fraassen.

3.1 CONFIRMAÇÃO

Saber se uma teoria científica pode ser confirmada ou infirmada por meio de experimentos e até que ponto esses experimentos devem ser conduzidos e repetidos para aumentar o grau de confiança que podemos ter em uma teoria é essencial para a investigação epistemológica. De maneira simplista, acreditamos que uma teoria é bem confirmada se muitos testes são feitos e apresentam resultados compatíveis com a teoria. Mas, se queremos determinar exatamente o quanto podemos confiar numa teoria ou mesmo aceitá-la, é necessário um método de teste. Este seria uma forma pré-estabelecida que garanta a confiabilidade dos testes e quais critérios devem ser atendidos para que se possa dizer que uma teoria é realmente bem confirmada experimentalmente. O problema da confirmação consiste em encontrar esse método.

3.1.1 Verificacionismo

A visão clássica empirista assume que uma série de experimentos com resultado positivo em relação às previsões teóricas confere à teoria uma aceitação irrestrita, o que a aproxima da verdade. Ou seja, ao observarmos que certos dados empíricos correspondem à nossa teoria, estamos realmente verificando essa teoria. Estamos apenas conferindo que a teoria realmente corresponde à realidade. Essa concepção se assenta em ideias filosóficas que surgiram no início da Modernidade, com Francis Bacon, John Locke, George Berkeley e outros. O pensamento empirista se baseia no princípio de que todo o conhecimento humano se origina nas experiências sensíveis, ou seja, naquilo que captamos pela visão, audição, tato e os outros sentidos. Essa doutrina contrasta com o *racionalismo*, que afirma que a mente humana possui saberes inatos, inerentes à sua natureza, uma capacidade inata de conhecer a partir da razão.

A visão empirista encontra alguns problemas ao ser confrontada com o fato de que as teorias científicas sempre são compostas de afirmações ou enunciados universais, enquanto que as conclusões que se podem tirar de experimentos realizados em determinado espaço e tempo só podem ser singulares. Ao dizermos “afirmação”, “enunciado” ou “sentença” nos referimos a uma frase declarativa, construída segundo regras gramaticais, que expressa um juízo sobre as coisas. Uma sentença declarativa se diferencia de uma sentença imperativa, por exemplo. A primeira pode ser entendida como verdadeira ou falsa, enquanto a segunda não. “O céu é azul”

é uma sentença declarativa verdadeira, por exemplo. Já “beba esta xícara de café”, uma sentença imperativa, não pode ser interpretada como verdadeira ou falsa. Então, a ciência se constitui de sentença (tomadas no presente trabalho como sinônimo de “enunciados”) declarativas, que afirmam algo sobre as coisas.

As leis científicas, englobadas por teorias, sempre expressam uma série de regularidades, uma ordem ou disposição que ocorre para toda a realidade física, em qualquer espaço ou tempo, ou seja, para todo o universo. Isto porque não há razão para se supor que tal ordem apareça ao acaso em uma região específica em que estamos inseridos e no momento em que decidimos observar as coisas. Sempre que houver determinadas condições, em qualquer lugar ou tempo, a ordem expressa em uma teoria científica deverá se manifestar. Portanto, os enunciados de uma teoria científica são sempre universais. Se os enunciados não fossem assim, seria impossível fazer qualquer previsão a partir de uma teoria, solapando a própria base do que se propõe ser uma teoria científica válida.

Mas de que maneira um resultado singular, expresso por uma conclusão singular obtida em um experimento, poderia atribuir veracidade a uma afirmação universal? Esse é o conhecido *problema da indução* de David Hume. Toda a visão dos empiristas depende da validade de um princípio da indução que possa fundamentar a atribuição de verdade aos enunciados teóricos a partir dos enunciados experimentais. Indução consiste justamente no ato de induzir, de chegar a uma conclusão a partir de vários elementos indicativos. Vejamos um exemplo de situação em que constatamos o problema da indução dado por Bertrand Russel (1912):

Tomemos como ilustração um assunto sobre o qual nenhum de nós, de fato, tem a menor dúvida. Estamos todos convencidos de que o sol nascerá amanhã. Por quê? Será esta crença um mero resultado cego da experiência passada, ou pode ser justificada como uma crença razoável? Não é fácil encontrar um teste pelo qual julgar se uma crença deste tipo é razoável ou não, mas podemos pelo menos determinar que tipo de crenças gerais seriam suficientes, se verdadeiras, para justificar o julgamento de que o sol nascerá amanhã, e os muitos outros julgamentos semelhantes nos quais nossas ações se baseiam. (RUSSELL, Bertrand, 1912, p. 94-95, tradução nossa)

A lógica indutiva clássica consiste em alguns passos: a coleta de dados empíricos leva à formulação de leis científicas, que podem compor teorias científicas; a partir das leis e teorias embasadas pela observação podemos então deduzir as previsões dadas pelas teorias. Este segundo passo é conhecido em lógica como *modus ponens*. O *modus ponens* é uma forma de se obter conclusões a partir de uma premissa. Chamemos de P uma premissa dada em uma teoria científica e Q uma consequência de P . Através do *modus ponens*, temos a seguinte simbolização formal:

$$\begin{array}{r}
 P \rightarrow Q \\
 P \\
 \hline
 \therefore Q
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 (P \text{ implica } Q) \\
 (P \text{ é afirmado verdadeira}) \\
 (\text{Portanto, } Q \text{ é verdadeira})
 \end{array}$$

Assim, uma vez que um princípio ou lei científica é tido como verdadeiro, suas consequências ou previsões são necessariamente verdadeiras.

3.1.2 O Círculo de Viena

Para muitos pensadores da ciência até o século XX, a dificuldade em se estabelecer critérios para uma construção das ciências que fosse totalmente baseada em enunciados de experiência direta residia em uma vasta contaminação da linguagem científica por conceitos sem significado real. Esses conceitos advinham do pensamento metafísico que antecedeu as investigações de ciência natural desde a Antiguidade.

Ilustremos o que seria um conceito estabelecido sobre especulações metafísicas. Tomemos a ideia de *lugar natural* da física de Aristóteles. Segundo ela, os objetos da natureza possuem em sua própria essência o direcionamento para um determinado estado de movimento. O ar sobe, o fogo sobe mais ainda, a água desce, e a terra desce mais ainda. Todos os demais entes naturais são compostos desses elementos e seu movimento dependerá de sua composição específica e de suas causas finais. Causa final é a finalidade de algo e, para Aristóteles, é impossível de se compreender alguma coisa sem se levar em conta sua finalidade. Por exemplo, a finalidade de um pássaro é, em certo aspecto, embelezar seu ambiente com seu canto. Sua existência e sua ação de cantar servem ao fim último do Belo. Tudo o que acontece no cosmo está condicionado a uma finalidade suprema, e assim tudo obedece a sua causa final.

No entanto, a noção de causa final é totalmente abandonada e criticada pelos adeptos do pensamento moderno. A ideia de causalidade final é tida como mera superstição e, como em si mesma não pode ser posta à prova empiricamente, tem seu lugar garantido entre as superstições e fantasias do pensamento antigo e medieval. Um conceito que antes servia perfeitamente às investigações filosóficas da natureza já não é mais admitido como válido pelos novos cientistas empiristas da Modernidade.

Assim sendo, para a fundamentação de um método científico estritamente empírico, era necessário que toda e qualquer afirmação científica não dependesse de noções de natureza metafísica ou não empírica. Tudo deveria ser redutível aos enunciados de experiência direta. Esta pretensão caracterizou os adeptos do empirismo lógico, pertencentes sobretudo ao chamado Círculo de Viena, um grupo de professores da Universidade de Viena empenhados em desenvolver uma nova fundamentação epistemológica para as ciências. Esse grupo foi fortemente influenciado pela filosofia de Bertrand Russell e Ludwig Wittgenstein, fundadores da filosofia analítica. Essa corrente filosófica visa reduzir problemas filosóficos à análise de enunciados linguísticos.

Os problemas que surgem na justificação ou mesmo na construção de uma teoria advém de uma “poluição” das sentenças por termos metafísicos ou ilusórios, como *ser*, *absoluto*, *ordem cósmica*, etc. Para eliminar esses problemas, somente poderiam ser admitidas para a construção das ciências aquelas sentenças que pudessem ser totalmente reduzidas a elementos observacionais. Termos que denotam objetos não observacionais são, contudo, muito comuns em teorias científicas. Podemos citar alguns exemplos como *próton*, *eletrosfera* e *ADN*. Nenhum desses objetos pode ser observado diretamente. Se não puderem ser traduzidos em experiências, não podem ser considerados significativos ou de valor cognitivo segundo o empirismo lógico.

Além dessa dificuldade imediata, alguns problemas lógicos incontornáveis surgem no método dos empiristas lógicos. O mais importante se refere às leis, que estão presentes em toda e qualquer teoria. Uma lei enuncia uma regularidade para um fenômeno natural sob certas circunstâncias. Isto significa que o descrito pela lei ocorrerá para todo e qualquer acontecimento real que envolva os mesmos elementos da lei. Mas o experimento feito para testar tal regularidade somente contará com um acontecimento singular; logo, para testar o enunciado universal da regularidade correspondente dever-se-ia examinar todas as suas ocorrências singulares passadas, presentes, e futuras, em todo ponto do espaço, o que é impossível. Por essa razão não é possível atribuir um valor de verdade (ou falsidade) a um enunciado universal por meios empíricos.

3.1.3 O confirmacionismo de Carnap

Um dos principais expoentes do pensamento positivista do Círculo de Viena foi Rudolf Carnap (1891-1970). Carnap percebeu as dificuldades descritas acima e concluiu que os enunciados de experiência nunca podem conferir a verdade das hipóteses que levantamos para explicar esses mesmos fenômenos. Ou seja, uma teoria não pode ser “verificada” pela experiência. Também concluiu que as teorias não podem ser formadas por conjuntos de descrições experimentais; é preciso uma teoria articuladora.

Carnap adotou então o conceito de probabilidade lógica, donde o grau de confirmação c de um enunciado é dado por sua probabilidade lógica:

$$c(h, e) = q$$

onde h é um enunciado correspondente a uma hipótese, e é um enunciado de evidência e q é um número real no intervalo $[0,1]$.

Nesse cálculo, o número real h é o grau de correspondência entre a hipótese teórica e as observações experimentais. Porém, se a hipótese é colocada como uma lei, terá caráter universal, ou seja, diz respeito a um número infinito de instâncias da realidade, enquanto que o enunciado de evidência só pode cobrir uma porção muito limitada de instâncias. Logo, o grau de confirmação só pode ser zero. Assim sendo, o problema do universal versus particular permanece, embora expresso em um cálculo de probabilidade.

Percebendo essa dificuldade, Carnap desenvolve um novo conceito, a confirmação de instância qualificada. Basicamente, ela diz que a hipótese só poderá se referir ao próximo evento a ser observado, e não mais ao universo inteiro. Se uma hipótese foi testada muitas vezes, o apoio que esses resultados dão é bastante significativo para o cálculo, já que a hipótese se refere a apenas um evento. Com isso, os resultados para o grau de confirmação podem chegar mesmo a serem próximos de 1, se o número de vezes em que a hipótese se confirmou for muito maior que o caso contrário. Isso parece resolver o problema, mas na verdade o grau de confirmação não pode mais se referir a uma lei científica, mas apenas a uma instância da lei. Para alguns críticos de Carnap, com destaque para Imre Lakatos, essa aparente solução representa um abandono do problema inicial da lógica indutiva.

3.1.4 O falseacionismo de Popper

Como resposta aos entraves consequentes do positivismo lógico, Karl Popper formulou o chamado *falseacionismo*. Esse método desloca a concepção do modo de construção das teorias científicas e seus enunciados de uma *lógica indutiva* para uma *lógica dedutiva*. Ao contrário dos positivistas, que pretendiam que o fundamento das teorias fossem os dados da observação, que conduziram às leis e explicações das teorias, Popper acreditava que o único nexos lógico que se pode construir vai da teoria concebida anteriormente para suas consequências observacionais. A partir de qualquer conjunto de dados de observação isolados não se pode fazer nenhuma afirmação universal, mas uma afirmação universal *a priori* possui diversas consequências lógicas dedutíveis. Aquelas formulações teóricas cujas decorrências empíricas deduzidas não são contrariadas ou, na linguagem de Popper, falseadas pelos testes são boas teorias.

Em seu livro “A Lógica da Pesquisa Científica” (2008), Popper demonstrou contundentemente que qualquer tentativa anterior de estabelecimento de um princípio de indução, como o confirmacionismo de Carnap, o probabilismo de Reichenbach e o apriorismo de Kant falharam (POPPER, 2008, p. 27-31). É impossível se estabelecer um nexos lógico que aponte a veracidade de hipóteses ou teorias a partir da mera observação. Sendo assim, uma forma lógica como a do *modus ponens* não pode ser válida para descrever o processo real de construção do conhecimento científico.

A única forma de se produzir conhecimento científico, segundo Popper, é pelo que se chama de *método hipotético-dedutivo*, que veremos adiante. Os cientistas formulam princípios abstratos gerais e deduzem suas decorrências através de uma lógica dedutiva. Algumas dessas decorrências são fenômenos que podem ser observados e, portanto, são passíveis de teste. Se o teste obtiver um resultado positivo, isso não significa que a teoria é verdadeira. Isso porque a veracidade dos enunciados de observação não retransmite a veracidade aos princípios gerais de que foram deduzidas, segundo os princípios da lógica dedutiva, como discutido no final da seção 3.1.2.

Essa forma de argumentação é chamada de *modus tollens*. Tomemos um exemplo: *P* é uma premissa que implica uma consequência *Q*. Se *Q* não é verificada, ou seja, é afirmada como falsa, a consequência lógica é que *P* também é falsa. Esse caso para o *modus tollens* pode ser simbolizado formalmente da seguinte maneira:

$$\begin{array}{ll}
 P \rightarrow Q & (P \text{ implica } Q) \\
 \neg Q & (Q \text{ é afirmada falsa}) \\
 \hline
 \therefore \neg P & (\text{Portanto, } P \text{ é falsa})
 \end{array}$$

Se, por outro lado, a consequência Q for afirmada verdadeira, não se pode concluir em favor da veracidade de P . Da mesma forma, se uma consequência empiricamente testável de uma lei científica que é confirmada por experimentos, isso não significa que a lei é confirmada ou afirmada verdadeira. A veracidade da consequência testável Q não é retransmitida à premissa P . Porém, a premissa não foi falseada, ela passou no teste. A isso Popper chama de *corroboração*. Quando os testes empíricos são favoráveis à teoria, esta é *corroborada*. Quanto mais isso ocorrer, maior o grau de corroboração da teoria. Boas teorias são, para Popper, aquelas com maior grau de corroboração.

Sempre há a possibilidade de existirem outros princípios que incorrem nas mesmas consequências ou que decorrências da teoria em questão sejam testadas futuramente e obtenham resultado negativo. Mas, por outro lado, se o resultado for negativo, certamente a teoria construída sobre aqueles princípios gerais se mostra falsa. Esse formato é, para Karl Popper, o que precisamente distingue uma teoria científica de uma não científica. Se a teoria não é passível de falseamento, não é científica.

Em seus escritos, Popper argumenta que teorias como a astrologia, a psicanálise freudiana e o materialismo histórico-dialético marxista não podem ser consideradas científicas. Qualquer que seja o resultado de uma averiguação experimental do que quer que essas teorias afirmem sobre o mundo, este será englobado dentro das previsões de outras partes da teoria. Nos termos de Popper, essas teorias não possuem nenhum falseador potencial. Por exemplo, qualquer previsão astrológica sobre uma característica de personalidade de um indivíduo com base no seu signo que se mostra contrariada pelos fatos pode ser remediada por outros instrumentos da astrologia, como por exemplo o ascendente. Da mesma forma, qualquer constatação observacional que coloque em dúvida a hipótese da mais-valia na teoria marxista, é imediatamente absorvida pela hipótese da alienação de classe. Ou seja, qualquer resultado desfavorável às previsões da teoria não é admitido logicamente pela teoria.

O critério de falseabilidade resolve o problema da demarcação, mas não o da confirmação. Isso porque averiguar se uma teoria foi falseada por experimentos é tão complicado quanto averiguar sua confirmação. Um resultado que contraria as previsões da

teoria nem sempre significa que a teoria está falseada. Pode tratar-se de um problema nas premissas admitidas no experimento.

Talvez o maior exemplo nesse caso seja o da descoberta do planeta Netuno. A órbita de qualquer planeta do Sistema Solar pode ser calculada segundo as leis de Newton sobre a gravitação. A maior influência gravitacional que um planeta sofre é devida ao Sol, mas também é alterada pela ação gravitacional de outros planetas. Por isso, é necessário que se admita um modelo sobre o Sistema Solar, com as órbitas dos planetas, suas posições, massas, distâncias do Sol e assim por diante, para se efetuar tal cálculo. Segundo o modelo disponível, a órbita calculada para Urano no século XIX não se adequava às observações astronômicas. Ao invés de tomar esse fato como um falseamento da mecânica newtoniana, Adams e Leverrier trabalharam na hipótese de que o modelo sobre o Sistema Solar deveria estar errado: poderia estar faltando um planeta. Calcularam a posição desse novo planeta de acordo com as anomalias encontradas na órbita de Urano e sugeriram que os astrônomos observassem esse local com telescópios em busca do objeto. O resultado foi a descoberta de Netuno, um planeta com uma órbita além da de Urano (WALLACE, 2021, p. 9-11).

Assim sendo, uma hipótese ou teoria nunca é confirmada experimentalmente, mas não pode ser absolutamente falseada também. A base empírica disponível, que no exemplo acima é o modelo de Sistema Solar, está sempre em transformação e descobertas futuras podem alterar o rumo das teorias. Para Popper, a verdade é um ideal regulador do empreendimento científico. Apesar de não podermos alcançá-la, os esforços imaginativos e criativos dos cientistas se direcionam a esse ideal em busca de teorias que descrevam ou expliquem o mundo com maior precisão.

3.1.5 O método hipotético-dedutivo

Em Platão, já encontramos o método hipotético-dedutivo sob a denominação de método da hipótese. Foi utilizado na ciência medieval e mesmo nos primórdios da ciência moderna foi defendido por grandes nomes, como Christian Huygens. O cientista holandês dizia que o método hipotético-dedutivo é inescapável. A única forma de explicar a natureza é pela formulação de princípios ordenadores dos quais se deduzem consequências testáveis. Porém, diferentemente de ciências exatas totalmente abstratas, como é o caso da geometria euclidiana, por exemplo, os princípios (ou axiomas) não são auto evidentes e precisam ser confirmados

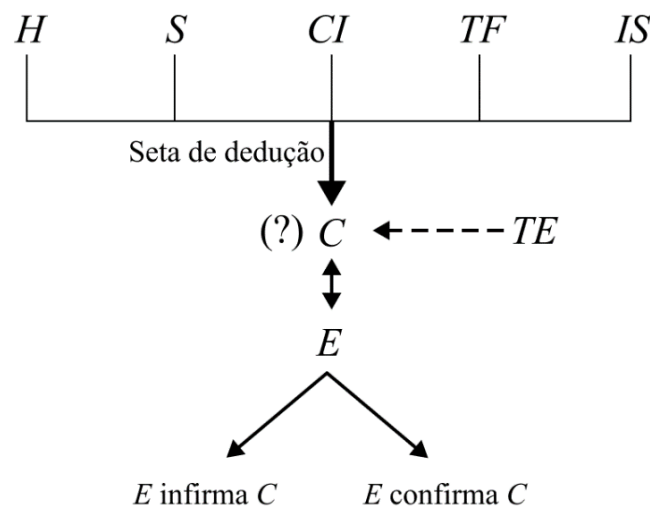
(NOLA, SANKEY, 2014, p. 171). Tal confirmação, porém, não implica em demonstrar que os princípios são verdadeiros, por duas razões: a) eles dizem respeito a entidades e propriedades não observáveis diretamente; e b) existe um número potencialmente infinito de instâncias particulares a serem observadas para confirmar sua veracidade. Por isso, os princípios são chamados também e frequentemente de hipóteses.

A formulação de uma consequência testável C envolve também uma série de considerações adicionais que não pertencem propriamente à cadeia lógica dedutiva:

- A hipótese diz algo sobre um sistema S , um recorte do mundo natural que é representado por um modelo. O sistema é concebido com base em informações obtidas por observação e a falta de informações sobre o sistema pode fazer com que uma hipótese pareça menos ou mais adequada ao sistema.
- Também são necessárias as condições iniciais (CI) de um determinado sistema para que a hipótese possa prever o que se sucederá.
- Outro fator que não pode ser ignorado são as teorias de fundo (TF), que são suposições fundamentais para que a teoria em questão possa ser sustentada. Essas suposições são baseadas em teorias já aceitas e não estão sob teste. Elas permitem que se possa conceber um modo de coletar os dados experimentais.
- A hipótese diz respeito a uma linha causal abstrata, como a atração gravitacional, por exemplo. Para que uma hipótese, como a atração gravitacional newtoniana, por exemplo, possa descrever um determinado sistema, é preciso assumir-se um isolamento suficiente (IS), ou seja, é preciso que se considere que outros fatores, como a eletricidade ou magnetismo, não têm efeito significativo no comportamento do sistema, embora sejam elementos reais atuantes no mundo real.
- Por fim, as consequências deduzidas de H precisam ser comparadas com dados observacionais, ou elementos de evidência E . Mas esses elementos às vezes não são obtidos por simples observação. É necessário um experimento que é idealizado levando-se em consideração outra teoria, chamada de teoria do experimento (TE). Um exemplo disso são as teorias de óptica que são assumidas para qualquer observação astronômica com telescópios e tornam possíveis hipóteses astronômicas.

O teste de uma consequência C de determinada hipótese H é comparado com a evidência E . Ou seja, aquilo que a teoria prevê dedutivamente como uma consequência testável (ou observável) é confrontado com o resultado efetivo de um experimento realizado. Se esses dois elementos forem parecidos (por exemplo, até dez por cento de concordância nos parâmetros mensuráveis), o teste empírico é considerado uma confirmação da hipótese H . Caso não sejam, o teste infirmou (negou) a hipótese. A Figura 11 ilustra essas relações e a estrutura do método hipotético-dedutivo.

Figura 11 – Diagrama de fluxo para o método hipotético-dedutivo.



Fonte: autor, adaptado de Nola, Sankey, 2014.

3.1.6 A tese de Duhem-Quine

Tanto Carnap quanto Popper, entre outros epistemólogos, enxergam as teorias científicas como conjuntos organizados de sentenças que traduzem regularidades ou eventos sobre a realidade. Por isso, podemos estabelecer uma relação direta entre um acontecimento real, o enunciado observacional e a hipótese teórica que o descreve. Mas para outros intelectuais, isso não pode ser assim. Pierre Duhem (1861-1916) defendeu que em um experimento não é possível testar somente um enunciado teórico, pois na experiência sempre se presentificam diversos eventos que podem se relacionar com diversas partes da teoria. Não há uma correspondência exata entre linguagem e fato. Uma sentença observacional depende da

linguagem utilizada pela comunidade científica. Ela serve de mediador entre a teoria e as observações, mas não representa o fato de todo.

Na mesma linha de pensamento está Willard van Orman Quine (1908-2000). Para esses autores, não é possível determinar qual ou quais sentenças teóricas foram falseadas por experimentos. Isso porque vários fatores estão inevitavelmente presentes no teste de qualquer hipótese, como ilustrado na Figura 9. Se as evidências obtidas no teste não correspondem às consequências deduzidas da hipótese, sabe-se que ao menos um fator (*H*, *S*, *CI*, *TF*, *IS* ou *TE*) foi falseado no teste experimental, mas não se pode verificar qual ou quais. Por outro lado, se o teste mostrou uma correspondência entre fatos e previsões, a própria lógica dedutiva não permite retransmitir a verdade das consequências para a hipótese inicial. Portanto, não é possível se desenvolver uma teoria de confirmação que possa dar uma resposta positiva ao problema.

3.2 EXPLICAÇÃO

3.2.1 A concepção moderna de explicação

A concepção vulgar de ciência enxerga a atividade científica caracterizada por um método composto de algumas etapas essenciais: observação neutra dos fenômenos naturais; elaboração de hipóteses explicativas para os fenômenos observados; submissão das hipóteses a testes experimentais; aceitação ou rejeição das explicações dependendo dos resultados experimentais.

Essa estrutura do método científico é uma herança do empirismo clássico de Bacon, Locke e outros. As ideias empiristas surgem como uma tentativa de refundar a filosofia, incluindo as ciências naturais, substituindo as bases anteriores de hegemonia aristotélica. A visão de Aristóteles do estudo dos fenômenos naturais consistia em reconhecer a natureza das coisas, das substâncias. Isto é, explicar o comportamento da natureza por meio de uma razão causal fundada na essência dos entes. Essa essência própria de cada ente (do objeto da ciência) contém sua forma, suas qualidades, substâncias, potencialidades e finalidades, características que não são explicadas matematicamente ou mecanicamente. Apenas é necessário reconhecer sua existência, sua presença real.

Já para os cientistas modernos, é possível e necessário apreender, através da observação, as relações causais mecânicas subjacentes aos fenômenos e que “produzem” as qualidades dos objetos. Então, por exemplo, para se explicar mecanicamente determinados fenômenos físicos surgiram as teorias atomistas. Porém, a teoria atomista não elimina a necessidade de se recorrer às naturezas ou qualidades dos objetos em uma instância mais elementar, como explica van Fraassen:

Para explicar fenômenos tais como o calor ou as reações químicas em termos apenas de atributos mecânicos, eles [os empiristas] se davam conta de que era necessária pelo menos uma teoria atômica da matéria. Mas presumo que está claro que eles iriam enfrentar o mesmo dilema de novo em relação às regularidades que postulavam para o comportamento das partes dos átomos. Aí nenhuma explicação mecânica é possível, uma vez que os átomos não possuem partes. Assim, ou eles deveriam atribuir poderes específicos, qualidades e propriedades causais a tais átomos, para explicar por que eles agem e reagem da maneira como realmente o fazem, ou então eles deveriam, assim como os nominalistas fizeram antes deles, rejeitar o pedido de explicação. (VAN FRAASSEN, 2007, p. 17)

De certa forma, Aristóteles já havia reconhecido o impasse da indução no final de sua filosofia. Se por um lado o conhecimento racional e sistematizado almejado pelas ciências só pode ser de natureza universal, o acesso direto do homem ao mundo real sempre é singular. O filósofo macedônio enxergava no mundo natural uma imprecisão, um tipo de caos intrínseco que estava presente nos entes e que fazia com que a matemática não fosse adequada ao tratamento desse campo. Nesse ponto, discordava de seu mestre, Platão, que defendia que o mundo material era apenas uma sombra do mundo das formas essenciais perfeitas e entidades matemáticas e que o fundamento do primeiro é dado pelo segundo.

Com a predominância do pensamento aristotélico que se estabeleceu na Europa a partir de São Tomás de Aquino, não havia a preocupação de estudar os fenômenos naturais pelo aspecto quantitativo ou matemático. As tentativas de explicar o mundo natural de forma matematizada e mecânica só foram ressurgir depois do Renascimento, quando estudiosos bizantinos levaram para a Itália as obras de Platão preservadas em Constantinopla. A partir daí o platonismo se difundiu e as cada vez mais acirradas críticas às ideias de Aristóteles culminaram no pensamento de René Descartes, Galileu Galilei, Blaise Pascal e finalmente Isaac Newton, o “pai da Ciência Moderna”.

A perspectiva filosófica mais comum a partir do início da Modernidade sobre o papel da ciência foi dada por Bacon. Para ele, fazer ciência consiste em observar e compreender a natureza, para então dominá-la. Nesse sentido, a ciência pura não se distingue da ciência

aplicada, da tecnologia. O papel da ciência é dar explicações que permitam fazer previsões. Essa concepção predominou até o século XX, quando outras teorias de explicação surgiram.

Os filósofos da ciência, como Carnap e Popper, perceberam que o poder explicativo de uma teoria é influenciado por fatores diversos. Carnap percebeu que pode ocorrer de uma teoria ter uma abrangência muito restrita e tratar de um conjunto muito limitado de fenômenos, o que torna mais fácil ela ter um alto grau de confirmação, mas um baixo grau de explicação. Já uma teoria abrangente terá um maior conteúdo empírico a ser observado e será mais difícil de ser confirmada, embora seu poder explicativo seja maior. Quanto maior o conteúdo empírico, maior o poder explicativo e menor o grau de confirmação. Para Popper, quanto maior o conteúdo empírico de uma teoria, maior seu grau de corroboração, caso não seja falseada. A explicação que a teoria dá é a melhor disponível e o melhor retrato do mundo até que se encontre uma melhor.

Diferentemente de Bacon, autores do século XX afirmaram outros motivos para a construção de teorias científicas que diferem de sua aplicação tecnológica. Popper e Hempel propuseram que a curiosidade e a vontade de compreender o mundo são fatores de busca de teorias que independem do desejo de domínio sobre a natureza (DUTRA, 2009, p. 102-103). Posteriormente, Bas van Fraassen propôs ainda que a explicação não faz parte da ciência pura e só é relevante para a ciência aplicada. Temos aí dois rompimentos com a noção tradicional de explicação científica. Esta explanação trata apenas de alguns dos principais autores do assunto. Três das teorias de explicação podem ilustrar bem o status da questão para os epistemólogos atuais: a de Hempel, a de Salmon e a de van Fraassen.

3.2.2 Hempel, Salmon e van Fraassen

Hempel divide os modelos de explicação em dois tipos, o nomológico-dedutivo e o probabilístico-indutivo. No modelo nomológico dedutivo a explicação é um argumento cuja conclusão é uma descrição de um fenômeno observado. O argumento se dá quando um enunciado de experiência particular é associado logicamente a uma lei ou regra teórica universal e resulta no enunciado que é a conclusão dessa associação. Os dois primeiros enunciados são chamados de *explanans*, e a conclusão é o *explanandum*. Exemplifiquemos esse tipo de nexo dedutivo:

Este pedaço de fio de cobre foi aquecido;	(C)
Todos os metais se dilatam quando aquecidos;	(L)
<hr/> Portanto, este pedaço de fio de cobre se dilatou	(E)

Temos um enunciado de experiência (C) e uma lei geral (L) que constituem as premissas do argumento, os *explanans*. A conclusão do argumento é o enunciado (E), o *explanandum*.

Nesse modelo, a explicação é concebida como uma resposta a uma questão-por-quê, ou seja, um questionamento sobre o motivo de um fenômeno. Sobre qual seria o nexó lógico que resulta no fato a ser explicado. Esse nexó se dá entre dois outros fatos. Por isso, para que a explicação seja válida é necessário que tanto o enunciado de experiência e a lei envolvida sejam verdadeiros. O problema de determinar a veracidade dessas premissas é outro. Contudo, considerando-se que sejam verdadeiros, a explicação é garantida pela dedução.

O tipo de explicação probabilística-indutiva, segundo Hempel, é mais próxima da lógica indutiva do que da lógica dedutiva. Tomemos o exemplo a seguir:

Cerca de 90 por cento das pessoas em sono REM (abreviação do inglês “rapid-eye movement”, traduzido “movimento rápido dos olhos”) têm sonhos;
 A pessoa P está em sono REM;
 ~~~~~ [90 %]  
 A pessoa P está sonhando.

Nesse caso, a explicação não se dá como certa, “P está sonhando” não é um argumento conclusivo, como no caso da explicação nomológica-dedutiva, mas tão somente provável, em um nível de maior ou menor qualificação. Quanto maior a porcentagem, melhor qualificado o argumento. A linha ondulada para o argumento simboliza que ele é indutivo, enquanto uma linha reta simboliza um argumento dedutivo. O grau de confiabilidade da explicação fornecida pelo nexó lógico dos *explanans* é igual ao percentual de casos observados em eles ocorrerem. Para o exemplo, o percentual de casos em que um indivíduo estava em sono REM e teve sonhos.

A teoria de explicação de Wesley Salmon é chamada de modelo da relevância estatística, ou simplesmente modelo S-R (da sigla em inglês *statistical relevance*). Para Salmon, a explicação não é a conclusão de um argumento que relaciona logicamente duas premissas, mas apenas um conjunto de sentenças que expressa uma relação probabilística que permite inferir com que probabilidade um determinado fato vai ocorrer dados outros fatos, cada qual com sua probabilidade de ocorrência. Não se trata de uma resposta a uma questão-por-quê, como no

caso de Hempel, mas de uma probabilidade de ocorrência dada pelas probabilidades de associação de duas ou mais classes de fatores, como no exemplo a seguir (DUTRA, 2009, p. 109):

A = a classe dos metais

B = a classe das coisas que se fundem a 1083°C

C<sub>1</sub> = a classe das coisas que são cobre

C<sub>2</sub> = a classe das coisas que não são cobre

Para esse caso, poderíamos fazer a seguinte pergunta no modelo de Salmon: “Por que essa substância, que é um membro da classe dos metais, é um membro da classe das coisas que se fundem a 1083°C?”. O seguinte conjunto de sentenças seria a explicação:

$$P(B, A \wedge C_1) = 1 \quad (1)$$

$$P(B, A \wedge C_2) = 0 \quad (2)$$

$$X \in C_1 \quad (3)$$

Ou seja:

- (1) a probabilidade de que algo se funda a 1083°C e seja cobre é 1;
- (2) a probabilidade de que algo se funda a 1083°C e não seja cobre é 0;
- (3) essa substância em questão, (X) é cobre.

Nesse modelo, não se exige que o fato a ser explicado seja verdadeiro ou certo, mas apenas se determina sua probabilidade. Também os fatores associados não são certos, mas apenas prováveis. Para que a explicação seja válida, portanto, é necessário que esses fatores sejam estatisticamente relevantes, dentre outras condições menores estabelecidas por Salmon.

A maior dificuldade encontrada para a construção de uma teoria de explicação é a diferenciação de dois aspectos do que uma teoria procura oferecer: a descrição e a explicação. A descrição se caracteriza por um conjunto de informações que se pode obter dos fenômenos observados com as ferramentas da teoria. Já a explicação vai além desse objetivo e procura identificar basicamente as relações e os processos causais subjacentes ao que se pode observar com experimentos. Os esforços de teóricos como Hempel e Salmon procuram elucidar a

explicação em termos daquilo que torna uma teoria mais ou menos informativa, ou seja, mais ou menos descritiva.

A teoria de explicação formulada por Bas van Fraassen traz alguns elementos novos àquilo que se elenca como elementos de uma explicação científica. Assim como Hempel e outros, van Fraassen acredita que a causalidade é essencial na explicação. É em busca das causas dos fenômenos que a ciência avança. Para ele, ela é uma *conditio sine qua non* (do latim, algo como “condição imprescindível”). Então, uma explicação é uma resposta a uma questão-por-quê.

Van Fraassen percebe, porém, que a explicação depende do contexto em que os fatos são analisados. Uma mesma questão-por-quê pode ser enfocada sob diferentes aspectos e requerer explicações diferentes. A explicação não é uma relação apenas entre uma teoria e um fato, mas envolve também o contexto em que se busca uma explicação. O que ele chama de poder explicativo de uma teoria depende de qual aspecto da realidade uma teoria pode abarcar.

Tomemos o célebre fenômeno da maçã caindo da macieira. A principal questão pertinente seria “Por que a maçã caiu da macieira?”. Se olharmos a questão do ponto de vista da física, podemos responder que foi porque as forças das ligações eletromagnéticas entre as moléculas do talo ficaram mais fracas do que a força gravitacional agindo sobre a fruta. Essa é uma explicação pertinente. Mas, se a teoria utilizada for biológica, por exemplo, tal explicação não é possível. Posso argumentar que a maçã chegou a um ponto de maturação em que é biologicamente natural que ela vá cair, para espalhar as sementes da espécie. A teoria gravitacional não entra na jogada, assim como a reprodução da espécie não cabe numa explicação física.

Em cada tipo de interpretação ou abordagem para uma mesma questão existe uma classe de elementos que podem servir de explicação. Van Fraassen chama esses conjuntos de *classe-de-contraste*. Se o contexto em que se pede explicação é a física, a classe-de-contraste poderia ser o conjunto

{deterioração molecular, ação do vento, árvore atingida por raio, ...},

e se fosse a biologia, seria algo como

{amadurecimento do fruto, coleta de alimento um animal, ...}.

Por depender do contexto de aplicação, van Fraassen argumenta que a explicação é uma tarefa da ciência aplicada e não da ciência pura. Isso quer dizer que não se pode considerar o poder de explicação de uma teoria como uma virtude que ela possui em si mesma, mas apenas como a que ela pode adquirir quando aplicada em determinado contexto. Na formulação de uma teoria, não há como se prever todos os contextos em que ela pode ser aplicada e, portanto, quantas e quão boas explicações pode vir a dar.

### 3.3 ACEITAÇÃO

A visão ingênua ou vulgar da ciência compreende que a aceitação de uma teoria científica depende basicamente de sua capacidade de oferecer um relato (ou retrato) verdadeiro do mundo. Uma vez que as previsões extraídas da teoria são colocadas à prova por meio de experimentos e os resultados são positivos, não há razão para se rejeitar a teoria. Isso caracteriza o realismo ingênuo, que não leva em conta as limitações da ciência. Talvez a principal seja a de suas bases metafísicas. Não é possível afirmar que o relato fornecido por uma teoria é verdadeiro sem que se aceite alguns pressupostos metafísicos.

Não podemos dizer que a sentença “todos os cisnes são brancos” (para usar o clássico exemplo de Popper) é verdadeira porque todas as observações que fizemos mostraram cisnes brancos. Para tal, seria necessário assumir nas entrelinhas que “em toda a extensão de espaço e tempo do universo os cisnes são como aqueles que pude observar”, o que implica a noção metafísica de “uniformidade universal e eterna dos cisnes”. Para lidar com a metafísica da ciência, a própria ciência não serve. A metodologia científica não pode tratar de conceitos que não se referem ao mundo natural ou material. As afirmações da ciência só têm validade mediante a observação empírica. Portanto, tentar sustentar a fundação metafísica da ciência de forma científica é argumentar em círculos. A filosofia se faz indispensável.

Quando analisamos a história da ciência, bem como a prática científica até os dias de hoje, percebemos que a aceitação de teorias científicas é algo bem mais complicado que simples confirmação empírica. Para ilustrar esse fato, basta apontar que quando um cientista aceita uma teoria, está se comprometendo com uma série de premissas, métodos de investigação, de experimentação, expectativas de resultados dentre outros fatores que são muito próprios daquela teoria em particular. Se houver algum problema sério na sua visão teórica, o trabalho de muitos anos pode ter sido em vão.

### 3.3.1 Aceitação realista e anti-realista

As concepções dos epistemólogos da ciência sobre o problema da aceitação se dividem, de maneira geral, em duas correntes. De um lado, temos os *realistas*, de outro, os *anti-realistas*. Os primeiros afirmam que o critério de aceitação não pode ser outro que não a crença de que a teoria é verdadeira, ou que pelo menos se aproxima disso. Os últimos, defendem que a única crença envolvida na aceitação é a de que as teorias são bons instrumentos de predição e funcionam bem experimentalmente, mesmo que não se possa afirmar sua veracidade.

Existe, ainda, uma outra questão que divide opiniões a respeito da aceitação. Trata-se da veracidade das teorias e das entidades postuladas nas teorias. Nem todos os realistas acreditam que uma teoria verdadeira apresenta entidades verdadeiras. Para alguns filósofos da ciência, como é o caso de Bertrand Russell, a teoria pode apresentar um conjunto de explicações e descrições verdadeiras, mas as entidades postuladas para tal são apenas simplificações, fórmulas econômicas que traduzem as observações. Sustentam que seja assim principalmente pelo fato de essas entidades geralmente serem inobserváveis, embora as observações possam atestar as teorias. Russell acredita que os termos pelos quais se designam objetos postulados, como elétron, por exemplo, não possuem significado cognitivo. Não denotam nada real. A teoria pode ser verdadeira, mas a linguagem e os termos que utiliza não são literais.

Por outro lado, autores como Wilfrid Sellars, Ian Hacking e Nancy Cartwright sustentam a existência das entidades. Sellars afirma que ter boas razões para aceitar uma teoria é o mesmo que ter boas razões para acreditar que as entidades postuladas pela teoria em questão existem. Hacking vai além e é um realista apenas de entidades. Ele argumenta que se podemos interferir na natureza com aceleradores de partículas e manipulá-las, então as partículas existem, embora as representações que fazemos delas sejam insuficientes e inadequadas.

Voltando à questão da linguagem científica, tanto realistas quanto anti-realistas podem ter a posição de que ela deve ser interpretada literalmente. É o caso de Richard Boyd e Bas van Fraassen, o primeiro realista e o segundo anti-realista. Boyd defende que a crença em uma teoria envolve necessariamente a crença nas entidades da teoria. Van Fraassen é um *ficcionalista* e um *instrumentalista*. *Ficcionalismo* é a posição de que as entidades das teorias são ficções, ou seja, embora possam existir no mundo real, isto não pode ser afirmado com certeza porque elas não são observáveis. *Instrumentalismo* é a posição de que as teorias não podem ser consideradas verdadeiras ou falsas, mas apenas bons ou maus instrumentos de predição e de análise dos fenômenos.

Tomando Richard Boyd como exemplar dos realistas, entendamos de forma geral o que é a concepção realista da aceitação. Para os realistas, uma teoria oferece boas razões para ser aceita quando é aproximadamente verdadeira. Na concepção vulgar ou ingênua da ciência, uma teoria é verdadeira ou falsa. Respectivamente, a teoria faz uma descrição que corresponde exatamente às coisas do mundo como são ou não o faz. Os teóricos realistas mais atuais não vão tão longe na afirmação da verdade. Geralmente, afirmam que as teorias são aproximadamente verdadeiras, como é o caso de Boyd. Para ele, a verdade é dada pela correspondência de alguns elementos das teorias à realidade. Mas, existindo outros elementos que são falsos, decorre que a verdade é aproximada. As teorias se aproximam cada vez mais da verdade completa conforme os experimentos vão aperfeiçoando a teoria e vice-versa. Boyd não desenvolve uma teoria da confirmação, mas defende que a correspondência entre resultados experimentais e previsões teóricas implica na verdade do processo causal descrito na estrutura da teoria. Essa estrutura compreende toda a dedução lógica que vai desde os primeiros princípios até as consequências testáveis.

O critério de aceitação é, para Boyd, a existência de elementos que levam a crer que a teoria é aproximadamente verdadeira. O método que permite avaliar se este é o caso consiste na comparação da teoria com a tradição científica estabelecida, que já comentamos anteriormente. Uma vez constatada a plausibilidade da teoria em relação à tradição, pode-se aceitá-la ou rejeitá-la. Isso incorre em circularidade, uma vez que se pode fazer então a pergunta de qual o critério utilizado para avaliar a verdade aproximada da tradição estabelecida. A saída proposta por Boyd e a crença de que o dinamismo da ciência garante um aperfeiçoamento cada vez maior que no futuro poderá fornecer os instrumentos para avaliar melhor a verdade das teorias incorporadas na tradição científica.

Os anti-realistas, por outro lado, defendem que não se pode crer na verdade de uma teoria, principalmente devido ao fato de que duas teorias distintas, que postulam entidades e mecanismos diferentes para explicar um fenômeno, podem ser ambas empiricamente bem sucedidas. O que ocorre, nesse caso, chama-se de *subdeterminação*. Ou seja, as teorias são subdeterminadas pela experiência. Se a experimentação, que é o meio de aferir a validade das teorias, diz o mesmo sobre o conteúdo empírico de duas ou mais teorias, não é possível de se determinar qual é “mais verdadeira” que a outra. Um dos maiores exemplos de subdeterminação é o caso histórico da disputa entre a teoria geocêntrica de Cláudio Ptolomeu e a teoria heliocêntrica de Nicolau Copérnico do Sistema Solar. Ambas preveem os mesmos fenômenos, mas a teoria de Copérnico foi aceita em vista de sua maior plausibilidade ontológica.



Van Fraassen e outros anti-realistas defendem que a subdeterminação é um fator que impede a afirmação de verdade de uma teoria. Isso porque teorias diferentes postulam diferentes entidades não observáveis, mas podem ter as mesmas consequências empíricas. Logo, não se pode determinar qual teoria é verdadeira, mas se adere a uma ou a outra conforme suas virtudes de simplicidade, plausibilidade, etc. Não se exige a verdade de uma teoria, mas apenas a sua adequação empírica, ou seja, sua correspondência com aquilo que é observável.

Confirmar se uma teoria é empiricamente adequada é tão complicado quanto confirmar sua veracidade (com todos os problemas descritos na seção sobre confirmação). Mas, segundo van Fraassen, a noção de adequação empírica, ao não envolver a crença na verdade nem das teorias nem das entidades postuladas, exclui a metafísica da ciência, ao exigir verdade somente em relação àquilo que é observável.

Para van Fraassen, outra diferença entre sua teoria da ciência, que ele chama de “empirismo construtivo”, e as de outros autores (como Carnap) é que as teorias são entendidas como “famílias de modelos”. Os modelos teóricos têm como consequência modelos que descrevem situações passíveis de teste empírico. Esses modelos análogos a situações reais são chamados de “subestruturas empíricas”. Enquanto que os fenômenos reais que são análogos às subestruturas empíricas são chamados de “aparências”. A aceitação da teoria se dá quando existe uma correspondência entre as subestruturas empíricas e as aparências.

Essa abordagem da ciência adotada por van Fraassen e outros autores é chamada de *abordagem semântica*, em contraste com a *abordagem sintática* dos empiristas lógicos. Na abordagem sintática, as teorias são compostas por um vocabulário teórico e um vocabulário observacional. São um conjunto de enunciados consistentes que se estruturam de forma lógica. Esses sistemas contêm axiomas, ou princípios, dos quais os demais enunciados são deduzidos logicamente. Além disso, os enunciados teóricos devem ser redutíveis a enunciados observacionais. Já na abordagem semântica, as teorias consistem em conjuntos de modelos, que por sua vez são definidos como estruturas ou conjuntos ordenados de entidades e relações entre entidades. Os enunciados, que relacionam objetos de determinados conjuntos com outros, são considerados como verdadeiros ou falsos em relação à teoria se suas afirmações estão de acordo com os critérios que definem cada conjunto.

O impasse entre realistas e anti-realistas se dá principalmente em torno do sucesso preditivo e da subdeterminação das teorias. Os realistas advogam que o sucesso preditivo só pode ser explicado em função de uma verdade aproximada presente nas teorias. Os anti-realistas

respondem que a subdeterminação não permite nenhuma crença na veracidade das entidades e relações causais inobserváveis descritas por teorias científicas.

## 3.4 PROGRESSO

### 3.4.1 A concepção ingênua do progresso

A tradição científica moderna possui em seu escopo a ideia de que a ciência progride através de descobertas que se acumulam. E assim formam um todo coerente e estável de conhecimento científico validado. Atingido um certo patamar em um assunto, aquilo que foi descoberto como verdadeiro não pode mais ser revogado. Isso se baseia em ideias enraizadas sobre a ciência e o mundo: de um lado, a ciência é vista como algo que oferece uma descrição fiel, exata e verdadeira do mundo; de outro, o mundo é algo que pode ser conhecido e descrito fielmente até os últimos detalhes. temos aí uma visão epistemológica ingênua e uma visão cosmológica também ingênua.

Neste ponto, podemos afirmar que se trata realmente de ingenuidade dadas todas as discussões que foram empreendidas até aqui. Essas concepções ingênuas são muito difundidas pela divulgação científica, e possuem grande penetração no imaginário popular e no senso comum. Porém, suas raízes se encontram nos pensamentos de diversos filósofos e cientistas, desde o advento da ciência moderna até os dias atuais.

### 3.4.2 Fundacionalismo e cumulativismo

As perspectivas sobre a construção das ciências de filósofos como René Descartes e Immanuel Kant apresentam a ideia de acúmulo e progresso contínuo do conhecimento científico. Para Descartes, o conhecimento verdadeiro se dá pela presença de ideias inatas, cuja origem é um Deus benevolente, e que podem ser reconhecidas a partir da experiência. Para Kant, os exemplos históricos da Matemática e da Física mostravam que uma disciplina verdadeiramente científica é aquela que, estabelecendo princípios gerais sólidos, como as leis de Newton e os axiomas da geometria euclidiana, pudessem avançar sistematicamente para a elucidação das decorrências daqueles princípios nas particularidades do campo de estudo.

Tanto a visão de Descartes como a de Kant são chamadas de *fundacionalistas* e levam esse nome por afirmarem que os fundamentos das ciências dão suporte a toda a sua empreitada. Se os fundamentos forem bem estabelecidos, o progresso cumulativo estará seguro. Bacon também defende uma perspectiva progressiva, mas afirmando que o estabelecimento dos fundamentos da ciência se dá de maneira diferente. São obtidos por sucessivas generalizações feitas a partir da coleta de dados observacionais, e não pela reflexão abstrata como no caso de Descartes e Kant.

Posteriormente, os positivistas também sustentaram a ideia de progresso cumulativo da ciência. Em “A Construção Lógica do Mundo”, Carnap advoga a busca pelos fundamentos seguros e inquestionáveis do conhecimento, que garantem o avanço contínuo da ciência (DUTRA, 2009, p. 72). Popper é o primeiro a romper definitivamente com a crença no progresso contínuo da ciência. Para ele, tanto as teorias utilizadas para descrever e explicar o mundo quanto a base empírica que é aceita como validadora das teorias podem ser substituídas com o falseamento.

Um segundo rompimento se dá com Thomas Kuhn. em seu livro “A Estrutura das Revoluções Científicas”, Kuhn diz que tanto as questões que se buscam responder quanto as formas de tentar respondê-las mudam com o tempo. Tudo o que percebemos sobre o mundo depende de nossas estruturas de assimilação de conhecimento. Não temos como conhecer as coisas como são por si mesmas, mas somente através de nossos esquemas de observação próprios (essa é a teoria epistemológica básica de Kant).

Limitados por nossos aparatos perceptivos, somos expostos aos problemas do mundo. As tentativas de resolver esses problemas podem gerar o que Kuhn chama de *paradigma*. O conceito de paradigma é um tanto elástico na obra de Kuhn, mas pode ser compreendido como um conjunto de fatores na atividade científica que caracteriza uma visão e uma prática geral do fazer científico. Um paradigma seria a mecânica newtoniana, por exemplo. Kuhn defende que o progresso da ciência se dá pelo estabelecimento de paradigmas, que consolidam um período de *ciência normal*, durante o qual os problemas encontrados no fazer científico são resolvidos tais como "enigmas"; contudo, certos problemas poderiam subsistir sem encontrar respostas no escopo do paradigma, as chamadas *anomalias* (não-conformidades entre os resultados de fato e os esperados teoricamente). O acúmulo de anomalias pode então conduzir a comunidade científica a questionar o paradigma vigente e buscar o desenvolvimento de um novo, no escopo do qual tais anomalias são resolvidas; com isso, o paradigma anterior é substituído pelo novo, e ocorre o que Kuhn chama de *revolução científica*.

Ciência normal, como concebido por Thomas Kuhn, é o desenvolvimento da atividade científica de forma ortodoxa segundo o exemplar (uma primeira realização modelar que resolve o problema inicial), as generalizações simbólicas, os valores e outras características do paradigma. É importante que a comunidade científica siga as regras do paradigma em vigor para que o período de ciência normal possa esgotar todas as potencialidades do método original e enfim encontre as anomalias que permitirão a criação de um novo paradigma.

As tentativas de resolver problemas por parte dos cientistas e intelectuais têm, na teoria de Kuhn, uma origem bastante parecida com a origem das teorias concebidas por Popper. Porém, Kuhn tem uma cosmovisão materialista, e defende que os principais fatores que irão influenciar a criatividade dos cientistas são fatores sociais. O contexto cultural, político e histórico influencia muito mais a criação científica do que a racionalidade ou livre curiosidade intelectual como prefere Popper.

Outra característica importante, e talvez a que mais distancia o pensamento de Kuhn de outros epistemólogos, é o que ele chama de incomensurabilidade entre paradigmas (OSTERMANN, 1996). O caráter intersubjetivista do conhecimento científico como entendido por Kuhn o leva a afirmar que um paradigma não pode ser traduzido em termos de outro. Ou seja, não pode haver um conjunto de critérios racionais e objetivos válidos que sirva para comparar um paradigma com outro. Por isso, Kuhn afirma que a adesão a um paradigma é feita através de retórica, emoção, conveniência ou contexto histórico, nada muito objetivo. Isso leva Kuhn para o âmbito do relativismo e é motivo de várias críticas. O relativismo de Kuhn, contudo, não é metafísico, como é o caso de Hegel. Não se trata de construir o mundo, mas apenas de construir a imagem científica do mundo, já que não temos acesso direto ao mundo real.

Sendo a ciência uma sucessão de rupturas, como então se pode falar de progresso? Como os critérios científicos, as regras e as visões de mundo empregadas são intersubjetivas, não pode ser um progresso na busca pela verdade. O progresso defendido por Kuhn é em direção a teorias que são melhores em resolver problemas, ou seja, mais aptas, assim como as espécies se adaptam na teoria evolucionista de Darwin. Kuhn é um realista metafísico, mas um anti-realista epistemológico, ou seja, defende que não podemos ter um retrato verdadeiro do mundo através da ciência. Do mesmo modo acreditam teóricos como van Fraassen, como já explanamos anteriormente.

### 3.4.3 Progresso em Boyd

Há também aqueles que acreditam que a ciência nos leva para mais perto da verdade. Richard Boyd é um nome importante nesse âmbito. Segundo ele, as concepções anti-realistas da ciência, tais como as de Kuhn e van Fraassen não resolvem a questão de como as teorias científicas são muitas vezes bem sucedidas em fazer previsões. Se não houvesse uma correspondência, mesmo que indireta entre a teoria e o fato, não seria possível que tantas previsões teóricas sejam confirmadas empiricamente. Embora Boyd acredite que os experimentos são sempre dependentes das teorias, ou seja, não existe observação neutra, defende que o experimento aponta as falhas da teoria e nos permite formular teorias mais próximas da verdade.

O processo histórico onde teorias são cada vez mais capazes de resolver problemas indica que há uma aproximação da verdade, e não uma simples adaptação (Kuhn) ou adequação empírica (van Fraassen). A ciência se dá por descobertas e não por construções. As rupturas entre paradigmas são na verdade correções dentro de uma mesma tradição científica que se aperfeiçoa dialeticamente. Temos, em Boyd, uma retomada da visão de progresso cumulativo da ciência.

## 4 ANÁLISE

As especulações sobre a natureza da luz ou da gravidade foram, desde o início, bastante abstratas. Newton teve de unir as observações astronômicas, as leis de Kepler sobre o movimento dos planetas, os princípios de Galileu sobre a queda dos corpos e as suas próprias investigações e considerações para obter sua teoria da gravitação. Tudo isso para elaborar um conjunto de leis que eram presumivelmente universais. John Michell, que mencionamos na seção 2.2, procurou aplicar as leis de Newton à luz, acreditando que a gravidade devia estar presente em todo e qualquer fenômeno. Ele deduz que por ser uma força universal, a gravidade deveria agir também sobre as partículas de luz:

Entretanto, há uma força conhecida, a gravidade, que presumivelmente age sobre as partículas de luz e que fixa exatamente seus caminhos a distâncias razoáveis de outros corpos. O movimento gravitacional das partículas de luz não é, é claro, observado rotineiramente devido à sua grande velocidade. Ainda assim, um corpo extraordinariamente massivo como uma estrela poderia atrair sua própria luz com força bastante para causar uma diminuição na velocidade. (MICHELL, 1784 apud LENZI, POMPEIA, STUDART, 2019)

Essa passagem sugere que o único fator indicativo do fenômeno da curvatura da luz era a validade universal presumida das leis da gravitação de Newton. Michell não havia observado nada que sugerisse a curvatura da luz, mas deduziu esse fenômeno da estrutura teórica da mecânica newtoniana. Por se mostrar tão adequada em tantas situações físicas, a teoria de Newton pareceu universalmente válida. Isso serve para mostrar que mesmo que muitos fatos experimentais atestem uma hipótese teórica, esta pode ainda ser falsa. O valor da deflexão da luz calculado como decorrência lógica da hipótese newtoniana se mostrou posteriormente falsa, em Sobral. A concepção ingênua da ciência, no entanto, presume que, uma vez extraídas as leis das observações empíricas, esse conhecimento é inabalável. Se fosse o caso, as observações astronômicas de Sobral não poderiam ter falseado a teoria de Newton, tão atestada por diversos experimentos.

Dado o fato histórico de que as observações que poderiam afirmar a teoria da relatividade geral só foram feitas depois da elaboração completa da teoria, podemos afirmar que o modelo indutivo clássico de ciência de Bacon, Locke e dos empiristas modernos não se verifica nesse caso. Einstein parte de experimentos mentais, raciocínios altamente abstratos e até contra intuitivos para desenvolver sua teoria da relatividade. A criatividade e a imaginação que confluíram na mente do físico alemão até que ele pudesse formular seus postulados não

envolveram observação direta e neutra da natureza, mas um forte racionalismo e análise matemática. O modelo hipotético-dedutivo é muito mais adequado para descrever sua construção. Principalmente porque os postulados da relatividade não podem ser testados diretamente de forma empírica, mas o são as consequências extraídas desses princípios de forma dedutiva, no caso, o valor do ângulo de deflexão da luz. Se fosse o caso da visão ingênua da ciência, em que observações neutras levam a uma lei, nunca haveria surgido a relatividade einsteiniana.

Aplicamos os conceitos de hipótese e condições auxiliares descritos no Capítulo III ao caso histórico da relatividade. Temos uma hipótese extraída da teoria de forma dedutiva. A hipótese é a de que um raio de luz, passando na borda do Sol, sofreria a deflexão descrita na última equação da subseção 2.1.6. Foi necessária então a consideração dos diversos elementos que estão presentes em qualquer teste experimental. O sistema  $S$ , dado pelo Sol, a Terra e o campo estelar em torno do Sol no momento do eclipse para um observador nos locais escolhidos na Terra. As condições iniciais ( $CI$ ) podem ser identificadas como as posições relativas da Terra, do Sol e das estrelas do campo estelar no momento em que a observação seria feita. As teorias de fundo ( $TF$ ) envolvidas são a propagação retilínea da luz, a refração da luz sofrida na atmosfera, os conhecimentos de óptica utilizados na construção dos telescópios e lentes entre outros. Esses conhecimentos e leis não estão sob prova no momento do experimento. Também se considerou o isolamento suficiente ( $IS$ ) como a não interferência significativa de forças eletromagnéticas, condições termodinâmicas ou outras no comportamento dos raios de luz. A teoria do experimento ( $TE$ ) compreende o esquema próprio de obtenção de dados, unindo as teorias e aparelhos utilizados.

Todos esses fatores tiveram de ser levados em consideração para se idealizar a real consequência testável da hipótese da deflexão. Considerando todos eles, se fez a comparação entre o resultado previsto e o que o teste empírico forneceu. No caso, entre o arco de 1,75 segundos e os arcos de 1,98 de Sobral e o de 1,52 de Príncipe.

Com todos os cuidados para que as condições do experimento correspondam às previsões teóricas, ainda assim permanecem os problemas da observabilidade e da universalidade. O princípio da equivalência, bem como a geometria curva do espaço-tempo, princípios que fundamentam a deflexão da luz, não podem ser observados diretamente. Assim, não podemos saber com certeza se a deflexão é devida a eles ou a outras causas quaisquer. O problema da universalidade se encontra no fato de que o teste empírico corresponde a um acontecimento particular, em uma região do espaço particular, em um momento particular. Não

podemos ter certeza absoluta de que o mesmo ocorre em todo o universo. Mas a teoria de Einstein é universal, necessariamente.

Van Fraassen comenta os limites da observação em uma passagem de “A Imagem Científica”:

Para a teoria da relatividade geral, temos dois estudos de Clark Glymour que mostram claramente os limites da observação. O primeiro presume com razão que a medição revela apenas os valores de quantidades locais, e então mostra que a medição não pode determinar sozinha a estrutura global do espaço-tempo. O segundo chega à mesma conclusão a partir da pressuposição de que qualquer estrutura observável deve estar no passado absoluto do cone [de luz] de algum ponto do espaço-tempo. Mas é a própria teoria da relatividade, com certeza, que nos impõe essas pressuposições, pois ela nos força a localizar os observadores no espaço-tempo e restringe a informação que pode alcançá-los. (VAN FRAASSEN, 2007, p. 120)

Além da consideração sobre particularidade *versus* universalidade, van Fraassen também aponta o problema da dependência entre teoria e experimento. As pressuposições necessárias ao experimento são dadas pela própria teoria.

Para um realista, como é o caso de Richard Boyd, o resultado experimental próximo do valor da teoria, embora dependa de considerações teóricas, indica que ela deve ser aproximadamente verdadeira. Caso contrário, nenhuma proximidade dos resultados seria justificada. A teoria deve ser verdadeira, pois estabelece uma relação sólida e amplificadora com a tradição científica estabelecida, resolvendo a aparente incompatibilidade entre o princípio da relatividade de Galileu e a constância da relatividade da luz para qualquer referencial.

O teste dessas consequências resultou em claras confirmações ou corroborações. O sucesso dos testes empíricos de 1919 e posteriores conferem à teoria da relatividade um alto grau de confirmação. A teoria não foi reprovada pelos experimentos, e quando o foi, os testes se mostraram equivocados posteriormente (o caso do desvio para o vermelho).

Sob o ponto de vista popperiano, a teoria de Einstein é altamente corroborada, embora o sucesso seja em relação à base empírica que a comunidade científica reconhece. Nos parece razoável supor que Popper a identificaria como uma teoria de alto conteúdo empírico e abrangência e um exemplo bem sucedido de teoria não falseada. As previsões experimentais da teoria não admitem qualquer resultado, e caso a experiência não evidencie o que se espera, toda a teoria tem de ser reformulada. Por isso, a teoria de Einstein atende aos critérios de demarcação de Popper. Ela é verdadeiramente científica. Popper é importante para nossa discussão porque ele estabelece um critério claro e objetivo de confirmação negativa de teorias.



A verdade serve como ideal regulador, em direção ao qual os esforços humanos se voltam. Por causa dos problemas da observabilidade e da universalidade, não é possível estabelecer critérios que assegurem que a teoria é verdadeira. Mas Popper estabelece critérios que determinam sua falsidade potencial. É por causa disso que a teoria de Popper é realista. A prova da realidade e da verdade objetiva a que as teorias se dirigem se mostra quando o resultado experimental contraria as previsões teóricas, quando a teoria é falseada. A teoria “esbarra” na realidade e por isso pode ser testada.

O método lógico dedutivo de Popper tem como regra a não retransmissão da verdade das consequências para as premissas. Como só podemos testar as consequências empíricas das premissas da teoria e não as próprias premissas, esse problema persiste. Se as premissas adotadas na teoria fossem de natureza auto-evidente (como o princípio lógico da identidade, por exemplo), o caso seria outro. Pela própria natureza da investigação natural, as premissas adotadas numa teoria científica não são de maneira alguma auto-evidentes.

Assim, demonstrar a veracidade da curvatura gravitacional da luz não prova nem torna verdadeira a afirmação do princípio da equivalência, ou que as leis da física são as mesmas para quaisquer referenciais ou que o espaço-tempo é um tecido flexível curvado pela presença de massa. Mas então o que a teoria de Popper nos permite crer sobre a relatividade? Bem, com certeza nos permite dizer que a relatividade é a melhor teoria da mecânica que temos, e que é uma forma muito útil e frutífera de analisarmos o mundo físico e fazermos previsões. Ela nos aponta na direção do que a natureza realmente é.

Uma perspectiva realista mais otimista afirma que a confirmação das consequências testáveis da teoria aponta para a verdade (ao menos aproximada) das relações causais presentes na teoria. Boyd (1973) afirma que evidências experimentais em favor de uma teoria são evidências de que as relações causais presentes no corpo da teoria, e não outras quaisquer, operam para produzir os fenômenos que a teoria prevê. Ou seja, que a verdade das consequências empiricamente testáveis deduzidas das premissas da teoria retransmitem a verdade para esses princípios.

O argumento básico que Boyd utiliza é o de que o que indica a verdade aproximada da teoria é sua plausibilidade em relação ao conhecimento que já está estabelecido. Portanto, um fator de confiabilidade para a teoria da relatividade é que ela “dá conta” dos fenômenos já descritos à luz da mecânica clássica. Mesmo que outra teoria fosse formulada e obtivesse as mesmas consequências observacionais da relatividade, esta deveria ser aceita em detrimento da primeira em vista de sua adequação à tradição científica estabelecida. Para Boyd e outros

realistas, a confirmação ou corroboração da hipótese da curvatura gravitacional da luz implica que algo pelo menos próximo da curvatura do espaço-tempo conforme Einstein descreve deve existir de fato.

De uma perspectiva anti-realista, a teoria pode bem ser falsa, embora seja um bom instrumento de previsão. Ela deve ser aceita como válida para descrever os fenômenos, mas não é necessário que se creia nela como verdadeira. Uma teoria sempre contempla estruturas causais e entidades que são inobserváveis e outras que o são. Para van Fraassen, uma teoria é aceita se as estruturas, modelos e entidades que ela descreve são isomórficos àquilo que é observado. Ou seja, possuem o mesmo comportamento. Quanto ao que não é observável, não há como verificar qualquer isomorfia. A teoria seria verdadeira se, e somente se, pudéssemos verificar essa isomorfia em todos os seus aspectos. De modo semelhante à não retransmissão da verdade das consequências testáveis aos princípios teóricos, podemos dizer que, para van Fraassen e os anti-realistas, não há transmissão da verdade da parte observável da teoria para a parte não observável.

Quanto à questão da explicação, a teoria da relatividade se divide em dois âmbitos. O primeiro é o da relatividade restrita, e o segundo, da relatividade geral. O primeiro explica basicamente como podemos ter leis físicas com a mesma forma em referenciais inerciais considerando que a velocidade da luz é constante para todos eles. Ou seja, como podemos ter um princípio da relatividade e a velocidade da luz ser constante em todos os referenciais inerciais como Lorentz havia mostrado. Einstein afirma em seu livro sobre a relatividade que “[...] Todo o conteúdo da Teoria da Relatividade Especial está incluído no seguinte postulado: as leis naturais são invariantes em relação às transformações de Lorentz [...]” (EINSTEIN, 1999, p. 122). O segundo âmbito é o da relatividade geral. Einstein escreveu “Esta teoria surgiu, em primeiro lugar, do desejo de compreender a igualdade entre massa inercial e massa gravitacional [...]” (EINSTEIN, 1999, p. 125). A explicação básica que Einstein dá para os dois problemas pode ser consultada na subseção 2.1.6. Para aceitarmos sua teoria como ao menos aproximadamente verdadeira, precisamos crer que o tecido do espaço-tempo de fato existe, como Einstein escreve:

De acordo com a mecânica clássica e com a Teoria da Relatividade Especial, o espaço (espaço-tempo) tem uma existência independente em relação à matéria ou ao campo. Para que possamos descrever aquilo que o preenche e que depende das coordenadas, o espaço-tempo ou o sistema inercial com suas propriedades métricas já tem que ser pensado como existindo de antemão, porque do contrário a descrição daquilo que “enche o espaço” não teria sentido. (EINSTEIN, 1999, p. 128)

Precisamos considerar o “tecido flexível” chamado de espaço-tempo como existente para entendermos a relatividade geral. Então, deve existir algo que possui as propriedades que a TRG descreve, que se curva ao redor de objetos massivos e que causa a deflexão da luz. Mas, não podemos observar ou detectar diretamente nem o espaço nem o tempo, muito menos algo como o espaço-tempo. A entidade espaço-tempo da teoria de Einstein é não observável. Logo, embora a deflexão da luz em torno do Sol seja de fato aproximadamente aquela que ocorreria caso o espaço-tempo existisse exatamente como Einstein o concebe, não temos como saber com absoluta certeza que essa entidade é real.

Para os anti-realistas, a TRG é um bom instrumento de descrição e predição dos fenômenos no espaço e no tempo (ou no espaço-tempo). É uma teoria empiricamente adequada, pois seus resultados observáveis são correspondentes com as experiências reais. Mas, como não podemos observar entidades como o espaço-tempo, não podemos afirmar a verdade da teoria. Para os realistas, a única explicação para o sucesso preditivo da TRG é que as entidades que ela postula são, em grande medida, correspondentes aos entes reais que causam os fenômenos tais como os observamos. O processo causal que constitui a explicação da teoria é aproximadamente verdadeiro.

A TRG, bem como a relatividade especial, é entendida como um inegável progresso da ciência. Isso tanto para os realistas quanto para os anti-realistas. Em primeiro lugar, porque é compatível com uma quantidade maior de fenômenos observados do que sua antecessora, a mecânica clássica. Nesse sentido, podemos dizer que a ciência avançou, que foi ampliada. Mas o desenvolvimento da relatividade não se adequa a uma perspectiva exatamente cumulativa da ciência, do mesmo modo como Bacon ou Carnap defenderam. De um ponto de vista verificacionista, que corresponde amplamente ao realismo ingênuo, uma vez que uma lei científica tenha sido verificada, a lógica do modus ponens nos garante que tal lei é verdadeira e, portanto, não pode mais ser colocada em dúvida. Temos nesse caso um progresso cumulativo. Essa foi a lógica da primeira fase de Carnap. Na segunda fase, a do confirmacionismo, a teoria que for confirmada mais vezes, embora sua veracidade total não seja mais garantida, deve ser aceita e representa o avanço da ciência.

A TRG foi confirmada historicamente, e ela contempla muitos dos fenômenos descritos na mecânica clássica. Isso poderia ser interpretado como uma simples ampliação da física a partir de um patamar estabelecido. Um degrau a mais. Porém, a relatividade não parte dos mesmos pontos, das mesmas bases da física newtoniana. Um exemplo disso seria a substituição das transformações relativísticas de Galileu pelas de Lorentz. Então, as noções básicas sobre as

quais se construíram a nova teoria são diferentes das anteriores. O progresso da ciência nesse caso não pode ser entendido como linear ou cumulativo.

Para Popper, o progresso consiste em substituir teorias menos satisfatórias por outras mais satisfatórias (POPPER, 1982, cap.10 apud DUTRA, 2009, p. 74). Ele rompe com a ideia moderna de progresso cumulativo. Também defende que o conteúdo de teorias que buscam solucionar um mesmo problema pode variar, embora o problema permaneça. Já para Kuhn, tanto os problemas quanto as formas de resolvê-los mudam segundo fatores sociais e contextuais. No caso da relatividade, temos de dar razão a Popper. Tanto a relatividade quanto a mecânica newtoniana tentam explicar e descrever o movimento dos corpos em relação ao espaço e ao tempo. Ou seja, vão de encontro ao mesmo problema. A primeira postula um espaço-tempo não absoluto que depende da presença de massas e a segunda postula espaço e tempo absolutos. Os conteúdos mudam, mas os problemas, os objetos, são os mesmos.

As razões que nos levam a considerar uma teoria como a relatividade como um progresso da ciência são, para Boyd e van Fraassen, as mesmas que nos levam a aceitá-la. Assim, para Boyd, a teoria é um progresso se corresponde à tradição científica estabelecida dialeticamente na história da ciência e para van Fraassen, se é empiricamente adequada. A relatividade parte de conceitos estabelecidos por outras áreas da física, como o eletromagnetismo e a óptica, e constrói a partir deles, embora os modifique eventualmente. Por isso, pode ser concebida como uma teoria que respeita a tradição científica. A relatividade fornece modelos que descrevem os fenômenos que a mecânica anterior descrevia, e ainda modelos que descrevem casos que esta não poderia descrever. desse modo, podemos dizer que a relatividade “salva mais fenômenos” que a mecânica clássica. Portanto, do ponto de vista de van Fraassen, ela é empiricamente mais adequada que sua antecessora e um progresso na ciência.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pudemos verificar que os fatos históricos do modo de construção e teste da teoria da relatividade de Einstein materializam ideias, métodos, conceitos e critérios estabelecidos na epistemologia da ciência. O método hipotético-dedutivo é adequado para descrever como a teoria da relatividade foi elaborada. Já o indutivismo clássico de Bacon e dos modernos se revela inadequado frente aos fatos históricos e os princípios abstratos em que a teoria se baseou.

A teoria da relatividade foi historicamente bem confirmada, apresentando resultados positivos no aspecto da deflexão gravitacional da luz e em outros também. As teorias de confirmação dos positivistas lógicos, como Carnap, se aplicam ao caso da Relatividade classificando-a como tendo um alto grau de confirmação. Já o falseacionismo de Popper identificaria a teoria de Einstein como uma boa forma de aproximação do ideal de verdade, não tendo sido falseada por experimentos, embora potencialmente possa ser no futuro, segundo o realismo crítico.

Para os realistas como Boyd, a teoria é aproximadamente verdadeira. As confirmações experimentais da deflexão gravitacional da luz indicam que os princípios da equivalência e da covariância devem ser verdadeiros, bem como toda a construção teórica da relatividade, incluindo o espaço-tempo curvo e outros elementos. Já para os anti-realistas, a relatividade é um bom instrumento de descrição e previsão na física, mas as entidades, estruturas e relações que postula para essa descrição e previsão não são necessariamente verdadeiras. Não há meio de sabermos se a teoria condiz totalmente com a realidade. Portanto, a adequação dos resultados dos testes empíricos realizados às previsões teóricas não indica que os princípios ou cadeias causais da teoria são verdadeiros.

Fica claro que, para os empiristas clássicos, os positivistas lógicos (Carnap), para Popper, para os realistas mais atuais (Boyd) e para os anti-realistas (van Fraassen), a teoria da relatividade corresponde a um progresso científico. A relação da relatividade com a sua antecessora, a física de Newton, revela que o avanço que a primeira representa para o conhecimento do movimento e da gravitação não se deu de maneira cumulativa, mas sim rompendo com algumas bases anteriores. A perspectiva da permanência dos problemas, embora não dos conteúdos, das teorias é a que melhor se adequa à história da teoria de Einstein. A visão realista de Boyd vê a relatividade como um avanço devido ao seu diálogo com a tradição da ciência física estabelecida. Já a perspectiva anti-realista de van Fraassen a vê como um avanço devido à sua maior adequação empírica.

O problema da indução permanece, apesar de todo o sucesso empírico da relatividade. Suas consequências empíricas foram bem constatadas em nosso planeta, em relação ao nosso Sol. Mas, a rigor, não há a garantia de que o restante do universo apresente o mesmo comportamento. Não temos como atestar experimentalmente a universalidade da teoria. Ao contrário do que uma visão ingênua sobre a ciência poderia levar a crer, mesmo uma das teorias científicas mais abrangentes e matematicamente rigorosas não pode ser provada ou afirmada como verdadeira. O próprio autor da TRG, Albert Einstein, reconhece a incompletude e falibilidade da teoria em relação a uma pretensão de verdade.

Se tomarmos uma perspectiva realista da ciência e, por consequência, acreditarmos que a verdade de aspectos empiricamente testáveis de uma teoria atesta ou implica na verdade de aspectos não observáveis, podemos crer que a TRG é verdadeira (aproximadamente). Mas isso envolve assunções metafísicas. Envolve crermos no que não podemos ver. Implica crermos que, por exemplo, o universo deve apresentar o mesmo comportamento em todos os lugares, algo que não podemos observar. A perspectiva dos anti-realistas nos parece mais adequada à natureza da ciência, porque nos livra de qualquer compromisso metafísico.

A assunção de verdade sempre envolve a assunção de princípios metafísicos (retomando que a noção de verdade empregada é a de correspondência entre ideia e realidade). Tendo essa concepção em mente, torna-se claro que a investigação científica não pode, por sua própria natureza, afirmar ou infirmar elementos metafísicos, já que não são empiricamente observáveis. Portanto, as teorias científicas não podem afirmar a verdade das relações causais ou entidades não observáveis que postulam.

Podemos afirmar que nossa análise atingiu os objetivos desejados, pois permitiu a identificação de elementos presentes na literatura da epistemologia da ciência no âmbito conceitual da TRG e dos fatos históricos de sua elaboração e teste empírico. Nossa análise proporcionou essa identificação e pôde articular alguns pontos com argumentos, permitindo chegar-se às considerações acima elencadas. Abordamos os problemas de epistemologia da ciência de forma exploratória, sintética e resumida, buscando oferecer uma introdução a possíveis discussões mais aprofundadas nas diferentes problemáticas. Esperamos que o cerne das questões filosóficas tenha sido suficientemente explanado e abra portas para mais investigações em epistemologia da ciência.

## REFERÊNCIAS

BOYD, Richard N. Realism, Underdetermination and a Causal Theory of Evidence. **Noûs**, vol. 7, n. 1, p. 1-12, mar. 1973.

BURTT, Edwin Arthur. Trad. José Viegas Filho; Orlando Araújo Henriques. **As Bases Metafísicas da Ciência Moderna**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1983.

CRISPINO, Luis Carlos Bassalo. Expedição do Observatório Real de Greenwich para Sobral em 1919 - Anotações Tomadas pela Comissão Britânica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 41, 2019.

\_\_\_\_\_; KENNEFICK, D. A hundred years of the first experimental test of general relativity. **Nature Physics**, vol. 15, p. 416-419, mai. 2019. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1907.10687>>. Acesso em 06 mar 2023.

DUTRA, Luiz Henrique de Araújo. **Introdução à Teoria da Ciência**. 3 ed. rev. ampl. Florianópolis: Editora da UFSC, 2009.

EINSTEIN, Albert. Trad. Carlos Almeida Pereira. Rev. Téc. Ildeu de Castro Moreira. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

\_\_\_\_\_; INFELD, Leopold. **A evolução da física: o desenvolvimento das ideias desde os primitivos conceitos até à relatividade e aos quanta**. Trad. Monteiro Lobato. Lisboa: Livros do Brasil, [19--]. (Coleção Vida e Cultura; 74).

HARTLE, James B. **Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity**. Cambridge University Press, 2021.

LENZI, César H.; POMPEIA, Pedro J.; STUDART, Nelson. A deflexão gravitacional da luz: De Newton a Einstein. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, vol. 41, suppl.1, e20190238, 2019.

MATSUURA, Oscar T. O eclipse de Sobral e a deflexão gravitacional da luz predita por Einstein. **Khronos - Revista de História da Ciência**, n. 7, p. 81-139. 2019. Disponível em: <<http://revistas.usp.br>>. Acesso em: 06 de mar. 2023.

NOLA, Robert; SANKEY, Howard. **Theories of Scientific Method: An Introduction**. Routledge, 2014.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica - 4: ótica, relatividade, física quântica**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OSTERMANN, Fernanda. A epistemologia de Kuhn. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, vol. 13, n. 3, p. 184-196, dez. 1996.

POPPER, Karl R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. Trad. Leonidas Hegenberg; Octanny Silveira da Mota. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 2008.

RUSSELL, Bertrand. **The Problems of Philosophy**. Londres: Williams and Norgate, 1912.

SEKSIK, Laurent. Trad. Rejane Janowitz. **Albert Einstein**. L&PM, 2010. 240 p. (Coleção L&PM Pocket)

SERWAY, Raymond A.; JEWETT JR., John W. **Princípios de Física: Mecânica Clássica e Relatividade**. 5. ed. São Paulo: Cengage, 2014. 480 p. v. 1.

SILVEIRA, Fernando L. da. A filosofia da ciência de Karl Popper: o Racionalismo Crítico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, vol. 13, n. 3, p. 197-218, dez. 1996.

VAN FRAASSEN, Bas C. Trad. Luiz Henrique de Araújo Dutra. **A Imagem Científica**. São Paulo: Editora UNESP: Discurso Editorial, 2007.

WALLACE, David. **Philosophy of Physics: A Very Short Introduction**. Oxford University Press, 2021.

WEINBERG, Steven. **Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity**. Universidade de Michigan: Wiley, 1972.