

# A Relatividade do Segundo Postulado da Teoria da Relatividade

## The Relativity of the Second Postulate of the Relativity Theory

Gerson Renzetti Ouriques\*<sup>1</sup> e Mércles Thadeu Moretti<sup>2</sup>

(1. Departamento de Física; 2. PPGECT - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil)

**Resumo:** dois postulados formulados por Albert Einstein no início do século passado iluminam diversos fenômenos físicos no âmbito da Teoria da Relatividade. No segundo postulado, que é composto por duas afirmações em uma única frase, Einstein sustenta que: (1) a velocidade da luz no vácuo é constante; (2) a velocidade da luz é independente da velocidade da fonte. Possivelmente querendo enfatizar este novo paradigma em que a velocidade da luz é o elemento fundamental, Einstein não tenha se preocupado em formular a segunda parte do segundo postulado para situações incluindo velocidades de objetos muito menores do que a velocidade da luz. Como consequência, discutimos, neste artigo, a elaboração desta segunda parte do segundo postulado da teoria da relatividade e como aparece nos livros didáticos de física geral básicos, intermediários e em livros específicos sobre relatividade. Mostraremos, com discussões e exemplos, como o segundo postulado deu origem a uma série de compreensões diferentes tanto na forma como no conceito do que é um enunciado.

**Palavras chave:** relatividade especial, segundo postulado de Einstein, transposição didática

**Abstract:** two postulates formulated in the beginning of the past century deal with several physical phenomena related to Relativity Theory. In the second postulate, compounded by two affirmations in one single phrase, Einstein stated: (1) the speed of light in the empty space is constant, and; (2) the speed of light is independent of the source velocity. Possibly wishing to emphasize this new paradigm where the speed of light is the fundamental element, Einstein did not pay too much attention when enouncing the second part of the postulate for situations including objects with velocities much slower than that of the speed of light. As a consequence, we discuss in this paper, the elaboration of the second part of the second postulate of the relativity theory as it appears in physics didactic books, basic, intermediated and in specific books on relativity. We will show through discussions and simple examples, how the second postulate originates several meaning both as a statement and as a concept of postulate.

**Keywords:** special relativity, Einstein's second postulate, didactic transposition

\* Endereço para correspondência: gerson.ouriques@ufsc.br

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo que abordaremos neste texto insere-se na ideia da Transposição Didática desenvolvida por Yves Chevallard [1] que estuda o caminho pelo qual um dado saber chega até os bancos escolares. Muitas vezes este caminho é tortuoso a ponto de modificá-lo de forma significativa. Para este autor “O `trabalho` que faz com que um objeto do saber se torna objeto de ensino é chamado de *transposição didática*” e é neste contexto que pretendemos discutir o segundo postulado formulado por Einstein.

Dois postulados da teoria da relatividade são de importância fundamental na compreensão dos fenômenos físicos envolvendo a teoria da relatividade, desenvolvida principalmente por Albert Einstein, no início do século passado. É uma teoria conhecida não somente por pessoas com formação em física ou da área de ciências exatas, mas por uma imensa parcela da população sem formação específica, abrangendo estudantes ainda no ensino médio que entram em contato pela primeira vez com este assunto, além da população em geral, consequência da enorme divulgação proporcionada pelos órgãos de comunicação em todo o mundo.

Estes postulados, divulgados por Einstein em artigo publicado em 1905 na revista alemã *Annalen der Physik* [2] são assim enunciados:

**1º Postulado** (conhecido como Princípio da Relatividade): **As leis da física são as mesmas em qualquer referencial inercial.**

**2º Postulado** (conhecido como Princípio da Invariância da velocidade da luz): **A velocidade da luz no vácuo  $c$  é constante e independente da velocidade da fonte.**

Este segundo postulado é o assunto que desejamos tratar neste artigo fazendo algumas considerações que consideramos muito importantes para a compreensão dos fenômenos, não só relativísticos, cujos efeitos são previstos somente se grandes velocidades (próximas a da luz) estão envolvidas mas, principalmente, quando estudamos os corpos em movimento a velocidades relativas muito menores do que a velocidade da luz  $c$  ( $c \cong 300000 \text{ km/s}$ ), isto é, os efeitos relativísticos devido ao movimento relativo são impossíveis de serem medidos/observados. Inúmeros livros textos universitários básicos, intermediários ou avançados, trazem algum capítulo ou sessão sobre relatividade, assim como livros específicos, o que mostra o grande interesse dos leitores sobre o tema, como deve ser mesmo, pois é inovador, excitante e predizem resultados que fogem ao sentido comum a que estamos familiarizados no dia a dia.

Mostraremos como o segundo postulado da relatividade é apresentado em diversos livros, a maioria com alterações no enunciado original. Inicialmente introduziremos o leitor na concepção do que vem a ser um postulado com situações exemplos de como tal conceito é edificado. Em seguida apresentaremos situações exemplos onde a formulação de um postulado é gradativamente melhorado, culminando com postulado parecido com o segundo postulado da relatividade, porém sem incluir a luz, apenas descrição da mecânica do movimento envolvendo objetos com velocidades não relativísticas. Temos convicção que nesta etapa de leitura haverá condições do leitor fazer análise crítica do segundo postulado e perceber como ele é impreciso na sua forma enunciada originalmente. Na última parte do artigo apresentamos os enunciados do segundo postulado como está mostrado nos livros textos, fazendo breve comentário sobre os mesmos.

## **2. DISCUSSÃO**

O desenvolvimento de pesquisas e métodos modernos na área educacional têm produzido alterações nos enunciados de leis e postulados, entre outros, de trabalhos originais para uma melhor compreensão didática destes conceitos. Assim acreditamos em relação ao segundo postulado da relatividade pois o enunciado mais comumente encontrado nos livros textos é apresentado como "A velocidade da luz no vácuo é constante em todos os referenciais inerciais e independente da velocidade da fonte", enquanto no texto original do artigo publicado por A. Einstein na revista alemã *Annalen der Physik* [2] está explícito "...a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada  $V$ , independente do estado de movimento da fonte luminosa.", não fazendo menção a referenciais inerciais.

Vamos a seguir mostrar, com exemplos experimentais bastante simples, ao leitor com familiaridade com os conceitos de física e matemática aprendidos ainda no 2º grau, como o segundo postulado pode levar a incompreensões:

- i) experimentos que introduzirão o leitor na compreensão do significado do que vem a ser um postulado;
- ii) experimentos que mostrarão, inequivocamente, a construção de um postulado e como este pode ser impreciso;

No primeiro exemplo (conjunto de experimentos i) temos um observador (o que faz as experiências, as medidas) que chamamos de João, que deixa cair uma caneta esferográfica de sua escrivaninha, em seguida, sobe em uma escada e solta a caneta que também se dirige ao

solo. Então, João curioso, sobe em uma árvore e solta a caneta esferográfica, que novamente cai até o solo. Após uma série de experiências, sempre levando a caneta e soltando-a de diferentes lugares e alturas, João não teve mais dúvidas e chegou a seguinte conclusão: **Sempre que solto uma caneta esferográfica de qualquer altura, ela se dirige ao solo.** Então, João convidou outros colegas e repetiu com eles os seus experimentos, obtendo os mesmos resultados. Convencido de que poderia repetir as experiências o quanto desejasse sem que houvesse alteração nos resultados, chega à conclusão que poderia formular um enunciado e que este enunciado poderia ser formulado como um postulado, já que as evidências são verdadeiras e devem ser aceitas sem contestação, pois não houve um único experimento similar que demonstrasse o contrário. Então, ele formula o seu postulado deste modo:

**Postulado de João:** Sempre que uma caneta esferográfica é solta, de qualquer altura acima do solo, ela retorna ao solo.

Outro observador, chamado Pedro, ao deixar cair uma laranja, realiza vários experimentos idênticos ao de João e verifica que, usando objetos diferentes, sempre obtém os mesmos resultados do que João. Este segundo observador, ao tomar conhecimento do Postulado de João, percebe que está incompleto e o reformula da seguinte maneira:

**Postulado de Pedro:** Um objeto, independentemente de ser caneta esferográfica, quando solto de qualquer altura acima do solo, retorna ao solo.

Dando continuidade às experiências, vamos descrever a observação de um terceiro observador, chamado Paulo, que constata que o Postulado de Pedro tem termos desnecessários e, assim, o modifica, da seguinte maneira:

**Postulado de Paulo:** Qualquer objeto, quando solto de qualquer altura do solo, retorna ao solo.

O Postulado de Pedro é, certamente, mais abrangente do que o Postulado de João, pois amplia para outros objetos a mesma conclusão da afirmação. Entretanto, o Postulado de Paulo engloba qualquer objeto e não utiliza termos desnecessários no enunciado, sendo deste modo mais adequado do que os anteriores.

Os três postulados cumprem a função discursiva apofântica, segundo Duval [3], pois dizem alguma coisa de objetos designados (objetos reais) sob a forma de uma proposição completa.

Sendo o Postulado de Paulo o mais apropriado, prevalecerá sobre os outros dois, não fazendo sentido mencionar os demais. Porém, vamos tecer alguns comentários sobre o mais incompleto deles, ou seja, o primeiro postulado, fazendo o seguinte questionamento: o Postulado de João é correto? A seguir as respostas de três eventuais leitores:

Leitor 1- Mesmo sem ter qualquer formação sobre gravitação, apenas sua experiência de vida, responde que está errado, pois muitos objetos caem, não só a caneta, e isto pode ser verificado soltando diferentes objetos;

Leitor 2 - Tendo melhor qualificação que o primeiro leitor, o Leitor 2 responde que está correto em parte, pois a caneta vai mesmo cair ao solo, mas assim acontece com qualquer objeto, devido à gravidade

Leitor 3 - Este leitor, sendo conhecedor de leis físicas, mesmo sabendo que o fenômeno observado também se aplica a outros objetos, comenta que o Postulado de João, o primeiro deles, está correto, uma vez que a descrição do que foi observado é verdadeira, não havendo possibilidade de qualquer contestação, já que nenhum experimento até hoje realizado tenha demonstrado o contrário do que foi verificado.

A sequência dos três comentários nos leva a acreditar que o comentário do Leitor 3 é o mais completo deles. Entretanto, o Postulado de João pode ser enunciado como um postulado, uma vez que a descrição do fenômeno físico observado (a queda da caneta esferográfica) se enquadra na definição. Um impasse foi agora criado: o Postulado de João está, portanto, correto, podendo ser enunciado como tal. No entanto, sabemos que é incompleto, pois o fenômeno observado aplica-se a outros objetos e não somente à caneta.

Mas o que dizer do Postulado de Paulo? Sendo este postulado abrangente, valendo para qualquer objeto e altura, deve prevalecer sobre o Postulado de João? Quanto a isso não há dúvida. A relatividade dos postulados é evidente e, mesmo se considerarmos apenas o Postulado de Paulo, observaremos o conceito relativo nele: se o afastamento do solo atingir uma altura tal que o efeito gravitacional não seja sentido, qualquer objeto, em vez de cair, entrará em órbita ou se afastará cada vez mais do solo, adentrando nas profundezas do espaço sideral.

O conjunto de experimentos ii) trata de uma série de experiências simplificadas ao máximo possível, envolvendo observadores inerciais (referenciais inerciais) medindo velocidades relativas entre eles.

A primeira experiência consiste no cálculo da medida da velocidade de projétil de fuzil disparado por um observador imóvel dentro de um trem que se encontra estacionado em uma estação ferroviária. Temos dois observadores:

- o Observador A, que dá o tiro dentro do trem em um alvo também dentro do trem, posicionado a uma distância  $x$  do fuzil;
- o Observador B, que está imóvel na plataforma da estação, portanto também imóvel em relação ao Observador A, fazendo as mesmas medições do Observador A, àquele que dá o tiro dentro do trem.

O alvo possui um sensor que emite luz quando é atingido pelo projétil, de maneira que chega aos dois observadores ao mesmo tempo, pois a velocidade da luz é muito grande comparada com a velocidade do projétil e, além disso, a distância entre os Observadores é muito pequena e os relógios de ambos foram previamente sincronizados (ajustados para dar leituras idênticas do tempo na trajetória do projétil, do fuzil até o alvo). A velocidade média  $v_m$  do projétil é a razão entre a distância  $x$  que ele percorre e o tempo  $t$  transcorrido. Considerando o movimento do projétil na direção positiva do eixo  $x$  do sistema de coordenadas, cuja origem é a extremidade do cano do fuzil, temos a relação que permite determinar a velocidade média do projétil a partir do instante em que a bala é liberada da arma:

$$v_m = x/t$$

Portanto, medindo a distância e o tempo para percorrê-la, a velocidade média do projétil é determinada pelos observadores que realizam seus cálculos e ambos chegam ao mesmo valor da velocidade  $v_m$ .

Em uma segunda experiência, idêntica a anterior, mas considerando agora o trem em movimento com velocidade constante  $u$  e o Observador A permanecendo imóvel dentro do trem: este medirá a velocidade do projétil como sendo  $v_m = x/t$  e chega ao mesmo resultado obtido anteriormente na primeira experiência. Porém, para o Observador B, que está na estação de trem, a situação é diferente, pois vê o trem em movimento com a velocidade  $u$  e, portanto, vê o Observador A com a mesma velocidade do trem. Para calcular a velocidade do projétil em relação ao seu sistema de coordenadas que é a plataforma da estação, o Observador B terá que considerar a velocidade do trem nos cálculos, devendo, na velocidade final a ser calculada, adicionar à equação  $x/t$ , a velocidade  $u$  do trem. Assim, o cálculo da velocidade do projétil medida pelo Observador B na plataforma da estação, será:

$$v_m = u + x/t$$

O que diz a equação da segunda experiência? Que, enquanto o Observador A não acionar o gatilho do fuzil, a velocidade do projétil é a mesma da velocidade do trem, ou seja,  $u$ , pelo fato de que o projétil se encontra ainda no interior do fuzil, nas mãos do Observador A que, por sua vez, está imóvel dentro do trem que se move em relação à plataforma. Podemos afirmar sem hesitação que, no sistema de coordenadas dentro do trem, todos estão parados relativamente uns aos outros. Assim, como o projétil não se desloca, temos  $x = 0$  e, deste modo,

$$v_m = u + 0/t = u$$

Na terceira experiência, os observadores estão inicialmente imóveis e seus relógios sincronizados, porém o Observador A, imediatamente após dar o tiro, corre com velocidade constante na direção do projétil como se fosse pegá-lo. Nesta experiência, há duas situações importantes que iremos discutir:

- a) o Observador A, correndo com velocidade constante atrás de projétil após o disparo, para verificar se sua velocidade influencia a velocidade do projétil;
- b) o Observador B na estação, também medindo a velocidade do projétil e vendo o Observador A correr.

Na situação a), o Observador A dispara o projétil anotando o tempo inicial  $e$ , em seguida, corre na direção do alvo. Quando o projétil atinge o alvo, anota o tempo decorrido e calcula a velocidade média do projétil, chegando ao mesmo resultado da primeira experiência, isto é,  $v_m = x/t$ . Em seguida realiza uma série de experiências idênticas, porém aumentando a sua velocidade cada vez mais, mas sempre constante, após cada disparo.

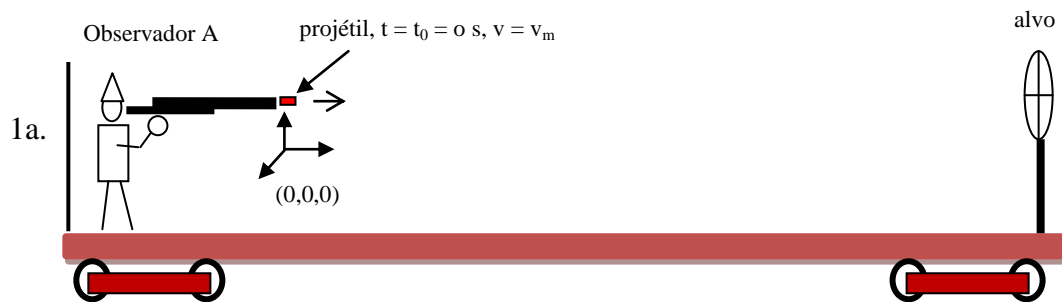
O Observador A ao calcular a velocidade média do projétil em cada experiência e compará-las, verifica que não é alterada, independentemente da velocidade que possui e, deste modo, formula o seguinte postulado:

**Postulado do Observador A:** A velocidade do projétil, depois que sai do fuzil, é independente da velocidade do fuzil.

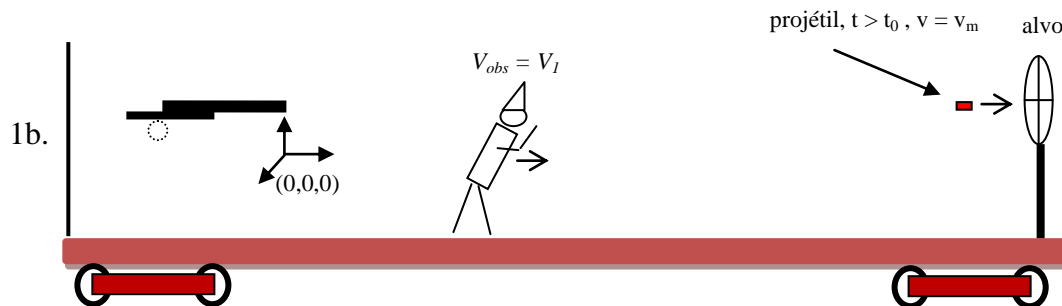
As figuras 1a, 1b e 1c mostram a sequência de três experiências realizadas pelo Observador A dentro do trem, disparando projéteis e correndo atrás com velocidades  $V_1$ ,  $V_2$ ,

$V_3$  até que os projéteis atinjam o alvo. A Figura 1a representa o primeiro experimento onde o Observador A e o trem têm velocidades relativas nulas e as figuras 1b e 1c, correspondem ao segundo experimentos, em que o Observador A dispara projétil e corre.

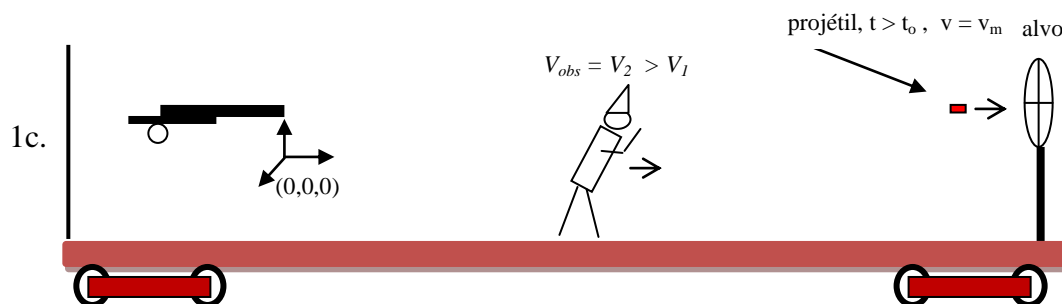
Figuras 1a, 1b e 1c.



Primeira experiência: Trem estacionado na plataforma e Observador A imóvel no trem.



Segunda experiência: Trem estacionado na plataforma e Observador A com velocidade constante  $V_1$  em relação ao trem.



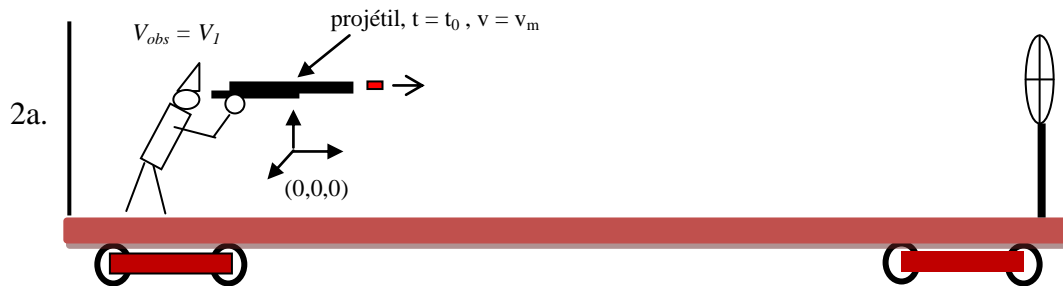
Terceira experiência: Trem estacionado na plataforma e Observador A com velocidade constante  $V_2 > V_1$ .

Percebemos, a partir dessas figuras que, a velocidade média do projétil em cada situação após deixar o cano do fuzil, não poderia sofrer qualquer influência devido ao movimento do Observador A, pois o projétil está livre em seu movimento até o alvo: o projétil agora tem movimento independente do movimento do Observador A, ou seja, da fonte onde se encontrava antes do disparo.

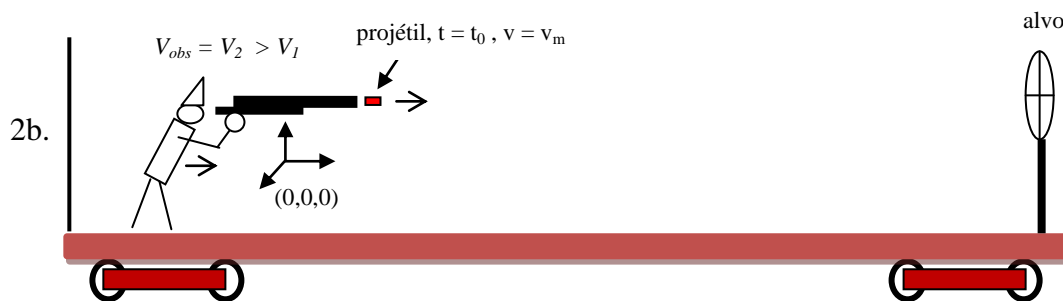


Na situação da Figura 1b, o Observador B vê o projétil saindo do fuzil e anota como sendo o instante  $t = 0$  segundos. Anota, ainda, o tempo até o projétil atingir o alvo, calcula a velocidade média e obtém o mesmo valor do primeiro experimento. Em outra experiência que envolve diversos experimentos, chamados pelo Observador B (fixo na plataforma) de quarta experiência, quinta experiência, sexta experiência, etc....., o Observador A dispara o projétil e corre atrás dele. Três desses experimentos estão mostrados nas Figuras 2a, 2b e 2c a seguir.

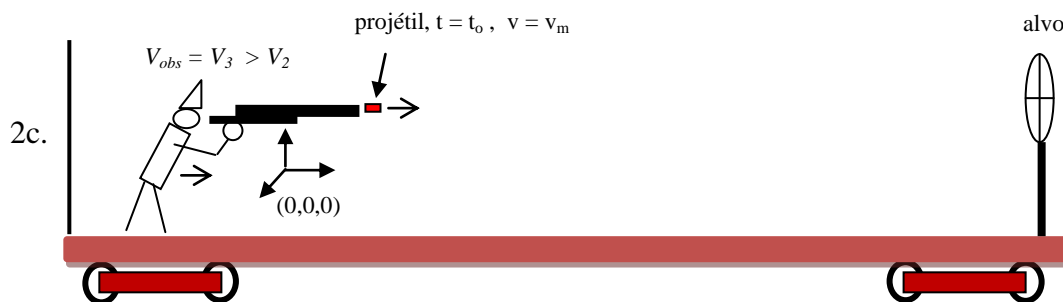
Figuras 2a, 2b e 2c.



Quarta experiência. Trem estacionado na plataforma e Observador A no trem com velocidade constante  $V_1$  visto pelo Observador B na plataforma.



Quinta experiência. Trem estacionado na plataforma e Observador A no trem com velocidade constante  $V_2 > V_1$  visto pelo Observador B na plataforma.



Sexta experiência. Trem estacionado na plataforma e Observador A no trem com velocidade constante  $V_3 > V_2$  visto pelo Observador B na plataforma.

Para verificar a influência do movimento do Observador A na velocidade do projétil, o Observador B, que está parado na estação de trem, anota os tempos de percurso do projétil a partir dos instantes em que o Observador A corre em direção do alvo, calculando as velocidades do projétil nessas diversas situações. Nestes cálculos obtém as mesmas velocidades médias do projétil determinadas pelo Observador A, isto é, a velocidade do projétil permanece inalterada em todas as experiências realizadas. Os cálculos do Observador B comprovam que a velocidade do projétil não depende da velocidade do Observador A nas suas medidas a partir do momento em que o projétil é liberado do cano do fuzil.

Vamos a seguir fundamentar as conclusões do Observador B iniciando discussões com a quarta experiência. Nela o Observador A tem velocidade  $V_1$  (Figura 2a) quando dispara o projétil. O Observador B realiza as medições necessárias para calcular a velocidade média do projétil, que deverá incluir a velocidade  $V_1$  do Observador A:

$$v_m = x/t + V_1$$

Na quinta experiência (Figura 2b), o Observador B calcula a velocidade do projétil com o Observador A à velocidade  $V_2$ , sendo  $V_2 > V_1$ ,

$$v_m = x/t + V_2$$

Na sexta experiência, para o Observador A com velocidade  $V_3$ , sendo  $V_3 > V_2$ , o cálculo aponta:

$$v_m = x/t + V_3 ,$$

Para velocidades  $v_i$  cada vez maiores, o Observador B obtém a relação:

$$v_m = x/t + V_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Após inúmeras experiências o Observador B conclui que o projétil depende da velocidade do Observador A, **desde que o projétil esteja, antes de ser disparado, em movimento junto com este observador, sendo o Observador A (ou fuzil), a fonte do projétil.** Procedendo no aperfeiçoamento de sua conclusão, o Observador B, à medida que o tempo passa, amadurece em suas conclusões e elabora alguns postulados, melhorando-os com generalizações, conforme, por exemplo, nos mostra a sequência a seguir:

**i- a velocidade do projétil depende da velocidade da fonte, desde que o projétil esteja, antes de ser lançado, em movimento junto com ela.**

ii- a velocidade de um objeto qualquer depende da velocidade da fonte, desde que o objeto esteja, antes de ser lançado, em movimento junto com ela.

iii. a velocidade de um objeto qualquer, em qualquer referencial inercial, dependerá da velocidade da fonte se o objeto, ao ser lançado, já se encontrar em movimento junto com a fonte.

iv. a velocidade de um objeto, em qualquer referencial inercial, é independente da velocidade da fonte se o objeto, ao ser lançado, já se encontrar em movimento junto com a fonte.

v. a velocidade de um objeto, em qualquer referencial inercial, uma vez lançado, é independente da velocidade da fonte que o lançou.

vi. a velocidade de um objeto, em qualquer referencial inercial, é independente da velocidade da fonte que o lançou.

Depois de diversas modificações nos postulados o Observador B, finalmente satisfeito, o anuncia como definitivo, ficando o postulado com a seguinte redação:

**Postulado final do Observador B.** A velocidade de um objeto, em qualquer referencial inercial, é independente da velocidade da fonte.

Na sequência deste texto vamos nos referir ao último postulado acima enunciado como o Postulado do Observador B, e comparativamente a essa construção de postulado, discutir o segundo postulado da teoria da relatividade. No Postulado do Observador B está implícito que o objeto já foi lançado e é por esta razão que sua velocidade não depende da fonte. É situação idêntica quando um jogador chuta uma bola e sai correndo para pegá-la. Nenhum torcedor assistindo a cena imagina que depois da bola ser chutada, ela vai mudar de velocidade por causa de mudanças na velocidade do jogador que corre para novamente alcançá-la. Mas qual a razão do leitor pensar isso em relação ao Postulado do Observador B? A resposta está relacionada ao procedimento na leitura das experiências realizadas que, aos poucos, foram induzindo o leitor a compreender os conceitos e fenômenos físicos envolvidos e as próprias experiências realizadas. Porém, se o Postulado do Observador B for apresentado isolado, sem a apresentação das experiências realizadas, o leitor também achará que está errado, pois imaginará e comprovará uma série de situações onde a velocidade de um objeto, quando lançado, vai depender da velocidade de quem o lançou, ou seja, da fonte. Mas isso só é verdade somente quando **o objeto já se encontrar em movimento junto com a fonte.**

O segundo postulado da relatividade apresenta maior dificuldade de compreensão em relação ao Postulado do Observador B porque, enquanto este trata de situações envolvendo mecânica, fáceis de serem visualizadas, o primeiro se refere à luz, uma onda eletromagnética e/ou fótons, cujas propriedades físicas são bem mais difíceis de serem compreendidas. Vamos ver o texto que trata do segundo postulado da teoria da relatividade em sua forma original, escrito por A. Einstein em trabalho enviado para a revista alemã *Annalen der Physik*, publicado em 1905, com título "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" ("Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento") [2]. Nele está escrito explicitamente, logo no início do artigo, a frase colocada como postulado,

**"das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit  $V$  fortpflanzt."** ,

literalmente traduzida para o português como,

**"a luz no espaço vazio sempre se propaga com certa velocidade  $V$  independente do estado de movimento do corpo emissor."**

A tradução do artigo de Einstein da língua alemã para a língua inglesa, amplamente divulgado pela influência mundial do inglês, teve como consequência a produção de muitos textos didáticos com pequenas e grandes alterações no enunciado do segundo postulado da teoria da relatividade. Na versão traduzida para o inglês em livro sobre vários artigos de autores já famosos na época, por A. Sommerfield [4], no artigo de Einstein que traz o segundo postulado "On the Electrodynamics of the Moving Bodies", o postulado está praticamente fiel à versão em alemão.

**"... light is always propagated in empty space with a definite velocity  $c$  which is independent of the state of motion of the emitting body"** ,

cuja tradução para o português é

**"...a luz sempre se propagada no espaço vazio com uma velocidade definida  $c$  que é independente do estado de movimento do corpo emissor"**.

No postulado aparece " $c$ " substituindo a velocidade da luz " $V$ ", em razão de " $c$ " ainda não ter sido definida como uma constante universal, sendo esta a única alteração em relação ao postulado original.

Não estamos interessados na história da formulação do segundo postulado antes de Einstein, pois foi dele o enunciado do princípio da relatividade de maneira clara e geral, mas apresentaremos o enunciado e algumas modificações, ou evoluções do mesmo, como é mostrado em livros, parecido com o aperfeiçoamento do enunciado do Observador B, conforme visto anteriormente.

No livro específico sobre teoria da relatividade, de nível intermediário, de R. D. Sard [5], o segundo postulado é enunciado exatamente como está no artigo de Einstein:

**"Light is always propagated in empty space with a definite velocity  $c$  which is independent of the state of motion of the emitting body."** ,

não havendo assim necessidade de comentários sobre o postulado apresentado nele. Entretanto, outros autores, em livros didáticos de nível universitário específicos ou básicos, sobre teoria da relatividade, enunciam o segundo postulado com algumas diferenças do de Einstein, provavelmente pensando da mesma maneira que o Observador B, "aperfeiçoando-o" cada vez mais.

No livro de R. Resnick [6], de nível intermediário e também específico sobre relatividade, em sua versão traduzida para português, o enunciado do postulado está assim apresentado:

**" A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor  $c$  em todos sistemas inerciais."**

O enunciado claramente mostra a adição de termos não citados no postulado original de Einstein, como a menção de sistemas inerciais "**em todos os sistemas inerciais**", assim como omite que a velocidade da luz é "**independente do movimento da fonte**". Esta omissão, proposital ou não, não é mencionada no texto.

No livro de física moderna (geral), nível intermediário, de A. Beiser [7], o enunciado está assim apresentado:

**"...a velocidade da luz no vácuo possui o mesmo valor para todos os observadores, independente de seus estados de movimento..."**

que claramente explicita a constância da velocidade da luz como sendo "independente" do movimento dos observadores e não da "fonte".

No livro específico sobre relatividade, de nível avançado, de J. Foster e J. D. Nightingale [8], o enunciado está apresentado de maneira bem reduzida, compacta;

**"The speed of light  $c$  is the same in all inertial frames"** , cuja tradução é;

**"A velocidade da luz  $c$  é a mesma em todo sistema inercial".**

No enunciado, o segundo postulado da relatividade de Einstein é apresentado com modificações percebidas com uma leitura comparativa simples. Nele não há menção da propagação da luz ser no espaço vazio/vácuo. Nem podemos imaginar que está implícito no enunciado porque a luz pode se propagar em outros meios transparentes e com velocidades distintas, dependendo das propriedades físicas do meio. Não há ainda menção do meio ser isotrópico, homogêneo. Faz menção de sistema inercial e não menciona a independência da velocidade da luz com a velocidade da fonte emissora. Porém sabemos das discussões do que é um postulado, que o postulado apresentado neste livro, mesmo sendo incompleto quando comparado com o segundo postulado da relatividade de Einstein, não está errado. Por quê? Porque conforme discutimos inicialmente no processo de construção do que vem a ser um postulado, o postulado apresentado no livro de Foster pode ser comprovado experimentalmente e não há, até o momento, qualquer experimento realizado que tenha demonstrado o contrário, ou seja, que a velocidade da luz é diferente quando medida por vários observadores inerciais. Entretanto, importante enfatizar ao leitor, há um equívoco sério no enunciado e que é quase imperceptível na sua leitura, quando diz "a velocidade da luz  $c$ ...." explicitando  $c$  como a velocidade da luz. Isto significa que a luz se propaga no espaço vazio (vácuo) com uma velocidade de aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s, porém em outros meios transparentes a luz se propaga com velocidades menores que  $c$ , dependendo do índice de refração do meio no qual ela se propaga. Neste meio transparente qualquer medida da velocidade da luz realizada por observadores inerciais dará o mesmo resultado, mas a velocidade da luz não será mais  $c$  e sim  $v$  que é menor que  $c$  ( $v < c$ ), onde  $v = c/n$ , sendo  $n$  o índice de refração do meio transparente.

No livro específico sobre radiação eletromagnética, nível intermediário, de J. B. Marion [9], no capítulo sobre eletrodinâmica relativística, o segundo postulado está assim enunciado;

**"The velocity of light (in free space) is a universal constant, independent of the motion of the source."**, com a respectiva tradução;

**"A velocidade da luz (no espaço vazio) é uma constante universal independente do movimento da fonte";**

explicitamente aparecendo a inclusão do termo "é uma constante universal" no enunciado do segundo postulado.

Já no livro também de eletromagnetismo e nível intermediário, de J. R. Reitz e F. J. Milford [10], o enunciado do postulado no capítulo sobre relatividade é;

**"The velocity of light in empty space is the same in all reference systems and is independent of the motion of the emitting body."**

No mesmo livro de eletromagnetismo de J. R. Reitz e F. J. Milford Reitz, agora na versão ampliada e traduzida para o português com um terceiro autor, R. W. Christy [11], o enunciado é;

**"A velocidade da luz no espaço vazio é a mesma em todos os sistemas de referência e é independente do movimento do corpo emissor."**

cuja tradução está fiel ao texto original na língua inglesa, entretanto aparece o termo "sistemas de referência" no enunciado do segundo postulado da relatividade.

O livro de física geral de nível básico, da série Sears e Zemansky [12], de ampla aceitação e muito utilizado como livro texto nos cursos de engenharias, físicas, químicas, entre outros, em muitos países das Américas e Europa discute, no capítulo sobre relatividade, exemplo com alguma profundidade do segundo postulado, mas estranhamente deixa incompleto o texto. Nele, o segundo postulado está assim enunciado;

**"A velocidade da luz no vácuo é sempre a mesma em qualquer sistema de referência inercial e não depende da velocidade da fonte" .**

Neste enunciado o termo "empty space" ("espaço vazio") foi substituído por "... no vácuo ..." termo usual na literatura portuguesa, além de incluir "sistema de referência inercial", que aparece em outros livros já citados mas não no segundo postulado de Einstein. O livro mostra exemplo de míssil sendo lançado por espaçonave que também emite luz na mesma direção do míssil, fazendo comentários interessantes sobre a situação física envolvida e o postulado, mas omite informação importante que, acreditamos, ajudaria em muito os leitores na compreensão do significado do segundo postulado.

No livro de H. M. Nussenzveig [13], de física geral básica, no capítulo sobre relatividade, o segundo postulado da relatividade está assim enunciado;

**"A velocidade da luz no vácuo,  $c$ , é a mesma em todas as direções e em todos os referenciais inerciais, e é independente do movimento da fonte"**.

No enunciado está acrescentado "...em todas as direções..." que embora não é mencionado explicitamente no texto, tem significado importante porque já introduz a ideia de isotropia do espaço.

Existem muitos outros livros que mostram o enunciado do segundo postulado da relatividade com modificações em relação ao postulado feito por Einstein. As alterações que encontramos nos livros textos podem significar que os autores, tendo conhecimento das limitações do postulado inicialmente enunciado, foram elaborando-os e colocando-os com texto mais adequado, ou seja, na forma de um postulado mais apropriado. Nenhum autor destes livros analisados faz menção da razão de colocarem o postulado modificado em seus textos. Sequer sabemos se os autores simplesmente copiaram em seus livros o postulado sem ter a preocupação de verificação da sua razoabilidade. Então como justificar estas alterações? Acreditamos que um estudo detalhado e informações com os próprios autores, questionando-os, poderia fornecer subsídios para uma melhor compreensão desta "evolução" do enunciado do segundo postulado da relatividade. Este estudo não está somente limitado às dificuldades naturais de uma pesquisa deste tipo, mas acrescenta-se ainda ser um trabalho extremamente desgastante porque muitos autores estão aposentados ou já falecidos, praticamente inviabilizando-o. Mas estas informações, caso fossem possíveis, ajudariam em muito a compreensão do significado do enunciado por parte dos nossos estudantes e, ao mesmo tempo, na compreensão da teoria da relatividade como um todo.

O segundo postulado da relatividade essencialmente contém duas afirmações em uma única frase, isto é, que a velocidade da luz no vácuo é constante e que a velocidade da luz é independente da velocidade da fonte. Independentemente de considerarmos a luz como onda ou fótons, a partir do momento que ela é criada, por exemplo, quando acendemos uma lanterna, a luz se propagará com velocidade  $c$  (no vácuo). Nesta situação, a onda ou fótons, a partir do momento de criação deixará a lanterna e, exatamente como nos exemplos do projétil disparado por fuzil ou o chute da bola pelo jogador de futebol, a velocidade da luz não poderá depender da velocidade da fonte, pela simples razão de já estar se propagando livremente no espaço. Podemos reforçar esta afirmação dizendo ainda que ha luz em um processo de criação, ou seja, quando é criada tem velocidade  $c$ , em qualquer outra situação a luz não existe. Portanto, a segunda afirmação do segundo postulado de que a velocidade da luz é independente da velocidade da fonte é irrelevante e, conseqüentemente, desnecessária.



### 3. CONCLUSÃO

As alterações realizadas no enunciado do postulado original de Einstein, pelos diversos autores de livros sobre relatividade, pode ser indicativo de que a compreensão do significado do enunciado tenha de fato sido percebida, porém não especificada diretamente nos textos por cautela destes autores, temerosos de o fazerem, provavelmente devido a já enorme divulgação nos meios de comunicação. Este postulado, conhecido como o segundo postulado da Teoria da Relatividade, enunciado por Einstein no artigo "Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento", tão amplamente divulgado e mundialmente conhecido, não pode ser considerado como um postulado porque traz termos irrelevantes em seu enunciado. Enfatizamos ainda neste trabalho situações que vão desde a reprodução exata do enunciado conforme formulado por Einstein em 1905, como modificações com o acréscimo de novos termos não presentes no enunciado original, como as expressões "referenciais inerciais", "isotropia do espaço", etc. Inserimos a ideia da Transposição Didática desenvolvida por Yves Chevallard comentada no início deste artigo aplicada ao Segundo Postulado da Teoria da Relatividade, mostrando o caminho pelo qual um dado saber chega até os bancos escolares e como o segundo postulado foi modificado de forma significativa nos livros didáticos.

Esperamos que a comunidade interessada no assunto aqui levantado faça questionamentos que venham contribuir ainda mais para o aprendizado da Teoria da Relatividade a velocidades não relativísticas, tanto conceitualmente como com o formalismo matemático necessário para complementar a sua compreensão.

### 4. BIBLIOGRAFIA

[1] – Y. Chevallard, *La transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné*. (La Pensée Sauvage Editions, 1991), pg. 39.

[2] - A. Einstein, *Annalen der Physik* **322**, issue 10 , pg. 891 (1905).

[3] - R. Duval e P. Lang, *Sémiosis et pensée humaine: registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*, (1995), pg. 91.

[4] - H. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski and H. Weyl, *The Principle of Relativity*, notes by A. Sommerfeld (Dover, New York, 1923).

- [5] - R. D. Sard, Relativistic Mechanics - Special relativity and classical particle dynamics, Lecture Notes and Supplements in Physics (Editores-J. D. Jackson and D. Pines,1968).
- [6] - R. Resnick, Introdução à Relatividade Especial (Polígono, São Paulo,1971).
- [7] - A. Beiser, Conceitos de Física Moderna (Polígono, São Paulo, 1969).
- [8] - J. Foster and J. D. Nightingale, A short Course in General Relativity (Longman Scientific & Technical, London, 1986).
- [9] - J. B. Marion, Classical Electromagnetic Radiation (Academic Press, New York, 1972).
- [10] - J. R. Reitz and F. J. Milford, Foundation of Electromagnetic Theory (Addison-Wesley, Reading-Massachusetts, 1967).
- [11] - J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética (Editora Campus , Rio de Janeiro, 1982).
- [12]- Série Sears e Zemanski, H. D. Young e R. A. Freedman, Física IV- Óptica e Física Moderna (Pearson& Addison Wesley, São Paulo, 2004).
- [13] - H. M. Nussenzveig, Curso de Física Básica-Ótica, Relatividade, Física Quântica, v.4, (Edgard Blucher, São Paulo, 1998).