Philosophy of Science, Institute for Humanities and Cultural Studies (IHCS)
Biannual Journal, Vol. 11, No. 2, Autumn and Winter 2021-2022, 263-292
Doi: 10.30465/ps.2021.37917.1548

On the testability of the second postulate of special theory of relativity

Sayyed Saied Mirahmadi*

Abstract

As is well known, special theory of relativity rests on two postulates: (1) the postulate of "relativity"; (2) the postulate of "the constancy of the speed of light in vacuum in all inertial frames". In this theory, the second postulate is neither an obvious principle nor a logical consequence of other obvious principles. Therefore, in order to evaluate the validity of this postulate, its experimental verification is necessary. In this paper, it becomes clear that by accepting the common thesis of the conventionality of distant clocks synchronization, the experimental verification of the second postulate is not possible. However, it is shown that by conducting experiments to examine "the independence of the speed of light from the speed of its source", the experimental refutation of the second postulate is possible. It is explained that under what conditions these experiments are crucial.

Keywords: Special theory of relativity, Second postulate, Testability, Conventionality of synchronization, Verification, Refutation.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

* PhD student, philosophy of physics, Baqir al-Olum University, Qom, Iran (I. R.), mirahmadi@bou.ac.ir

Date received: 05/06/2021, Date of acceptance: 05/09/2021

Copyright © 2018, This is an Open Access article. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

فلسفهٔ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
دوفصل‌نامهٔ علمی (مقالهٔ علمی ـ مروری)، سال ۱۱، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۰، ۲۶۵ - ۲۹۲

بررسی آزمون‌پذیریِ اصل‌موضوع دوم نظریهٔ نسبیت خاص

سیدسعید میراحمدی*

چکیده

همان طور که مشهور است، نظریه نسبیت خاص بر دو اصل‌موضوع استوار است: (۱) اصل «نسبیت»؛ (۲) اصل «ثابت و یکسان بودن سرعت نور در همه دستگاه‌های لخت در خلأ». در این نظریه، اصل دوم، نه اصلی بدیهی است و نه نتیجهٔ منطقیِ سایر اصول‌موضوعه است. بنابراین جهت ارزیابی اعتبار این اصل، آزمون تجربی آن ضروری خواهد بود. در این نوشتار، روشن می‌شود که با فرض پذیرش نظر رایج مبنی بر قراردادی‌بودنِ روش همزمان‌سازی ساعت‌ها، تأیید تجربیِ اصل‌موضوع دوم، ممکن نیست. با این وجود، نشان داده می‌شود که با تدارک آزمایشاتی جهت بررسیِ «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»، امکان نقض اصل‌موضوع دوم وجود دارد. شرایط قطعی بودن این آزمون‌ها نیز بیان می‌شود.

کلیدواژه‌ها: نظریه نسبیت خاص، اصل‌موضوع دوم، آزمون‌پذیری، قراردادی بودنِ هم‌زمان‌سازی، تأیید، نقض.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

* دانشجوی دکتری فلسفهٔ فیزیک، دانشگاه باقرالعلوم علیه‌السلام، قم، ایران، mirahmadi@bou.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

Copyright © 2018, This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International, which permits others to download this work, share it with others and Adapt the material for any purpose.

۱. مقدمه

همان طور که مشهور است، نظریه نسبیت خاص، بر دو اصل‌موضوع زیر استوار است:

اصل نسبیت: شکل قوانین فیزیک در همه دستگاه‌های لخت، یکسان است. هیچ دستگاه لخت ارجحی وجود ندارد.

اصل‌موضوع دوم: مقدار سرعت نور c ($c \in R$)، در همه دستگاه‌های لخت در خلأ، ثابت و یکسان است.

با استفاده از دو اصل‌موضوع فوق، به راحتی می‌توان تبدیلات لورنتز را استخراج کرده و نشان داد که این دو اصل‌موضوع می‌توانند با یکدیگر کاملاً سازگار باشند، اگر از خصوصیات عرفی و کلاسیک معنای «فضا» و «زمان» دست برداشته و مطلق بودن «هم‌زمانی» را نفی کنیم. نتایج بسیار عجیبی (مانند نسبی و نامتعدی بودن رابطهٔ همزمانی، نسبی بودن تقدّم و تأخّر زمانی برخی روی‌دادها، پارادوکس دوقلو و غیره) که از نظریه نسبیت خاص نتیجه می‌شود، از لوازم منطقی اصل‌موضوع دوم است. این اصل به هیچ وجه اصلی بدیهی نیست. نگاهی اجمالی به تاریخ علم نشان می‌دهد که تا قبل از آغاز قرن بیستم، نقیض اصل‌موضوع دوم، بدیهی تلقی می‌شده است. پس از مطرح شدن این اصل در اوایل قرن بیستم نیز اختلاف‌نظرهای بسیاری در مورد آن مطرح شده است. بنابراین چنین می‌توان گفت که غیر بدیهی بودن اصل‌موضوع دوم، بدیهی است. از طرف دیگر، در نظریه نسبیت خاص، اصل‌موضوع دوم همان طور که از نامش پیداست، نتیجهٔ منطقیِ سایر اصول‌موضوعه نیست بلکه خود به عنوان یک اصل‌موضوع پذیرفته شده است (ن.ک. پیوست الف).[۱] این در حالیست که پیشرفت‌های آزمایشگاهی در حوزه کوانتوم، در زمینهٔ آزمون نامساوی‌های بِل (Bell's inequalities)، گفتگوها و منازعاتی پیرامون احتمال نقض اصل موضعیت انشتین[۲] (Einstein's locality principle) که ارتباط نزدیکی با اصل‌موضوع دوم دارد را در پی داشته است (رجوع کنید به رزمی، ۱۳۹۰: ۱۰۶–۶۸ و منابع موجود در آن). حال که اصل‌موضوع دوم، نه بدیهی است و نه با استفاده از سایر اصول‌موضوعه اثبات شده است، جهت ارزیابی اعتبار این اصل، آزمون تجربی آن ضروری خواهد بود.

به نظر می‌رسد که اندازه‌گیری سرعت نور در جهات متفاوت و در دستگاه‌های لخت مختلف، ساده‌ترین راهِ آزمون تجربیِ اصل‌موضوع دوم باشد، اما در ادامه، روشن می‌شود که چنین نیست. واضح است که اندازه‌گیری صحیح سرعت نور در یک دستگاه مختصات، مشروط به در اختیار داشتن ساعت‌هایی هم‌زمان شده در آن دستگاه است. از طرف دیگر می‌دانیم که روش هم‌زمان‌سازی ساعت‌های یک دستگاه مختصاتِ لخت در نظریه نسبیت خاص، روش هم‌زمان‌سازی نوری انشتین (Einstein's light synchronization method) است که مبتنی بر فرض همسان‌گردیِ سرعت یک‌طرفهٔ نور (One-way speed of light) (به معنای یک‌سان بودن مقدار سرعت نور بر روی یک خط راست، در دو جهت) در آن دستگاه مختصات لخت می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که اندازه‌گیری تجربی سرعت یک‌طرفهٔ نور، گرفتار یک دور منطقی است. مسأله هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم، در واقع، پاسخ به این پرسش است که «در یک چارچوب لخت، ساعت‌های دور از هم، چگونه هم‌زمان می‌شوند؟». البته در مورد اندازه‌گیری میانگین سرعت دوطرفه نور (مسیر بسته) (Two-way speed of light)، وضعیت متفاوت است؛ چرا که در این مورد، نیازی به هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم نیست و ثابت بودن مدت‌زمان حرکت نور در یک مسیر بسته را می‌توان تنها با استفاده از یک ساعت واقع شده در یک مکان ثابت، موردآزمایش قرار داد.

جهت بررسیِ امکان آزمون تجربیِ اصل‌موضوع دوم، در قسمت ۲، با بررسی مسأله هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم، روشن می‌شود که با فرض پذیرش نظر رایج مبنی بر قراردادی بودنِ روش همزمان‌سازی ساعت‌ها، تأیید تجربی اصل‌موضوع دوم، ممکن نیست. با این وجود، در قسمت ۳، نشان داده می‌شود که با تدارک آزمایشاتی قطعی جهت بررسیِ «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»، امکان نقض اصل‌موضوع دوم وجود دارد.[۳] شرایط قطعی بودن این آزمون‌ها نیز بیان خواهد شد.

۲. امکان اندازه‌گیری سرعت نور و مسئلهٔ هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دورازهم

در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، برخی از مشکلات مربوط به اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور و هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم (Remote synchronization) به وسیله پوانکاره مورد بررسی قرار گرفت (Poincaré, 1898, 1905, 1914, 1958: 1; Goldberg, 1967).

بیان وی هنگام بحث از «عدم وابستگی سرعت نور به جهت انتشارش» چنین است: "این یک اصلی است که بدون آن، شروع هر اندازه‌گیری برای این سرعت، غیر ممکن است. این که اصل مذکور با آزمایش تأیید شود، همواره غیر ممکن خواهد بود" (Quoted by Tyapkin, 1993: 67).

مایکلسون بیان کرده است که در سال ۱۸۸۰م. سیمون نیوکم (Simon Newcomb) ظاهراً از وجود نقص در یک آزمایشِ پیشنهاد شده جهت اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور آگاه بوده است (Michelson,1904).

انشتین در کتاب خود با عنوان «نسبیت: نظریه خاص و عام»، ضمن اشاره به دور منطقی موجود در این مبحث، به قراردادی بودن فرض همسان‌گردی سرعت یک‌طرفه نور، جهت رسیدن به تعریفی برای «هم‌زمانی» و حتی «زمان»، تصریح کرده است. بیان وی چنین است (Einstein, 1920: ch. 8):

> آذرخش، راه‌آهن [مثالِ] ما که بر خاکریز واقع است را در دو مکان A و B مورد اصابت قرار داده است. من اینِ حکم را اضافه می‌کنم که این دو جرقهٔ آذرخش، هم‌زمان روی داده‌اند. اگر از شما بپرسم که آیا این گفته دارای معناست، پرسش مرا با یک "آری" قطعی پاسخ خواهید گفت. حال اگر از شما بخواهم که معنای این گفته را با دقت بیشتر برای من توضیح دهید، شما بعد از مقداری تأمل پی خواهید برد که پاسخ به این سؤال آن گونه که در نگاه اول به نظر آمد خیلی ساده نیست. ...
>
> پس از مدتی اندیشه درباره این موضوع، پیشنهاد زیر را برای آزمون هم‌زمانی ارائه می‌کنید. طول خط واصل AB در امتداد راه‌آهن می‌بایست اندازه‌گیری شده و یک ناظر در نقطه M در وسط مسافت AB قرار داده شود ... اگر ناظر دو جرقه آذرخش را در یک زمان مشاهده کند، آنگاه آن دو هم‌زمان خواهند بود.
>
> ... تعریف شما قطعاً درست می‌بود اگر فقط می‌دانستم که نوری که به وسیله آن، ناظرِ واقع در M جرقه‌های آذرخش را می‌بیند، طول $A \to M$ را با همان سرعتی می‌پیماید که طول $B \to M$ را طی می‌کند. اما بررسی و تأیید این فرض، تنها درصورتی ممکن است که ما قبلاً ابزارهای اندازه‌گیری زمان را در دسترس داشته باشیم. بنابراین به نظر می‌رسد که گویا ما در اینجا در حال حرکت در یک دور منطقی بوده‌ایم.
>
> پس از تأمل بیشتر، نگاه تحقیرآمیزی به من می‌افکنید – و حق هم دارید – و اعلام می‌کنید : "با وجود این، من به تعریف قبلی خود پایبندم، برای این که در واقع

این هیچ چیزی در مورد نور فرض نمی‌کند. تنها یک خواسته و نیاز از تعریف هم‌زمانی وجود دارد که می‌بایست برآورده شود، و آن این که در هر مورد واقعی می‌بایست یک تصمیم‌گیری تجربی را برای ما میسّر سازد درباره این که آیا این مفهومی که می‌بایست تعریف شده باشد [مثل مفهوم هم‌زمانی در ما نحن فیه]، تحقق یافته است یا خیر. این که تعریف من این خواسته را برآورده می‌کند مسلّم و غیر قابل بحث است. این که نور برای پیمودن مسیر $A \to M$ و مسیر $B \to M$ به مدت‌زمان یکسانی نیاز دارد، درواقع نه یک فرض (Supposition) است و نه یک فرضیه (Hypothesis) درباره ماهیت فیزیکی نور، بلکه یک قراردادی (Stipulation) است که من به اختیار خود می‌توانم بگذارم تا به تعریفی از هم‌زمانی دست یابم."

روشن است که با استفاده از این تعریف می‌توان به هم‌زمانی معنای دقیقی داد. ... به این ترتیب، تعریفی از «زمان» در فیزیک به دست می‌آید.

انشتین در مقاله مشهور خود درباره نسبیت خاص (۱۹۰۵.م)، روشی برای هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم پیشنهاد داد که به روش «هم‌زمان‌سازی انشتین» شهرت یافته است. البته این روش همزمان‌سازی، قبل از وی توسط پوانکاره پیشنهاد شده بود. این روش چنین است: علامتی نوری به وسیله یک ساعت که در مکان A واقع است در زمان t_1 به سمت ساعتی که در مکان B قرار دارد ارسال شده و پس از بازتاب به سمت ساعت A برگشته و در زمان t_3 به وسیله آن دریافت می‌شود. زمان رسیدن به مکان B به صورت میانگین زمان‌های t_1 و t_3 تعریف می‌شود: $t_2 = \frac{t_1+t_3}{2}$، که می‌توان آن را به این صورت نیز نوشت: $t_2 = t_1 + \frac{1}{2}\left(t_3 - t_1\right)$.

بنابراین روشن است که نتیجهٔ مستقیم هم‌زمان‌سازی ساعت‌ها به روش انشتین، هم‌سان‌گردیِ سرعت یک‌طرفهٔ نور است. یعنی این که سرعت نور به طور مثال، در مسیر $A \to B$ با سرعت نور در مسیر $B \to A$ برابر است و همچنین سرعت نور در مسیر $A \to C$ با سرعت نور در مسیر $C \to A$ برابر است. البته اگر A، B و C در یک راستا نباشند، لزومی ندارد که سرعت نور در راستای AB با سرعت نور در راستای AC برابر باشد. به عبارت دیگر، هم‌زمان‌سازی ساعت‌ها به روش انشتین، مستلزم این است که در هر جهتی، سرعت یک‌طرفهٔ نور با میانگین سرعت دوطرفهٔ نور (رفت و برگشت)، برابر باشد. البته لزومی ندارد که در همه جهات، سرعت دوطرفهٔ نور یکسان باشد. بنابراین

اگر جهت هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم، از روش نوری انشتین استفاده شود، امکان آزمونِ ناهمسان‌گردیِ سرعت یک‌طرفهٔ نور از بین رفته و مقدار اندازه‌گیری شده برای سرعتِ یک‌طرفهٔ نور، در واقع، چیزی جز مقدار میانگین سرعت دوطرفهٔ نور نخواهد بود.

تلاش‌های فلسفی و فیزیکی بسیاری جهت صورت‌بندی یک نظریه فیزیکی بدون استفاده از اصل‌موضوع دوم صورت گرفته است. مهمترین اثر در این زمینه، کتاب «فلسفهٔ فضا و زمان» متعلق به هانس رایشنباخ (Reichenbach, 1958) است. ایشان سعی داشت تا «ثابت بودن سرعت نور در یک مسیر بسته» (یا به عبارت دیگر، ثابت بودن سرعت دوطرفهٔ نور) را به عنوان اصل‌موضوع به جای اصل‌موضوع دوم قرار دهد؛ چراکه میانگین سرعت دوطرفهٔ نور را می‌توان تنها با استفاده از یک ساعت اندازه‌گیری کرد و درنتیجه، نیازی به هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم، وجود ندارد. به عقیده رایشنباخ، تعریف همزمان‌سازی به صورت $t_2 = t_1 + \frac{1}{2}\left(t_3 - t_1\right)$، برای نظریه نسبیت خاص ضروری است، اما از نظر معرفت‌شناختی ضروری نیست و انکار آن، تناقضی در پی نخواهد داشت. وی بیان کرده است که اگر قانون کلی‌تری به شکلِ $t_2 = t_1 + \varepsilon\left(t_3 - t_1\right)$ (که $0 < \varepsilon < 1$) را در نظر بگیریم، اشتباه نخواهد بود. اگر نظریه نسبیت خاص، ε را برابربا $\frac{1}{2}$، در نظر گرفته است، به این خاطر است که این تعریف منجر به روابط ساده‌تری می‌شود (Reichenbach, 1958). مقادیر متفاوت ε مربوط به مقادیر متفاوت سرعت یک‌طرفهٔ نور است. می‌دانیم که $t_2 - t_1 = \frac{l}{c(\theta)}$ و $t_3 - t_2 = \frac{l}{c(\theta+\pi)}$ (که l مسافتِ AB است و $c(\theta)$ سرعت یک‌طرفهٔ نور در جهت $A \to B$ است و $c(\theta+\pi)$ سرعت یک‌طرفهٔ نور در جهت $B \to A$ است). با حذف t_2 از دو رابطه فوق، به این رابطه می‌رسیم: $t_3 - t_1 = \frac{l}{c(\theta)} + \frac{l}{c(\theta+\pi)}$. از طرفی می‌دانیم که $t_3 - t_1 = \frac{2l}{c}$ (که c سرعت میانگین دوطرفهٔ نور در مسیر رفت و برگشت است). بنابراین خواهیم داشت: $\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} = \frac{c}{2\,c(\theta)}$. همان طور که مشاهده می‌شود، با فرض ثابت بودن c (مقدار میانگین سرعت دوطرفهٔ نور)، مقادیر متفاوت ε، مربوط به مقادیر متفاوت سرعت یک‌طرفهٔ نور $c(\theta)$ است.

در دهه‌های ۱۹۶۰م. و ۱۹۷۰م. نیز آدلف گرونباوم با پرداختن به مبحث هم‌زمانی موجب مطرح شدن دوبارهٔ این مسأله در محافل فلسفی شد (Grünbaum, 1973). رایشنباخ

و گرونباوم همزمان‌سازی ساعت‌های دور از هم را به طور مفصل بررسی کرده و اشاره کردند که هیچ تفاوت مشاهده‌پذیری حاصل نمی‌شود اگر سرعت نور واقعاً ناهم‌سان‌گرد باشد (Reichenbach, 1958: 142; Grünbaum, 1960). در محافل فیزیکی نیز بحث‌های بسیاری در مورد اهمیت نظریات آزمون نسبیت خاص مطرح شده است که در قسمت‌های بعد (بخش‌های ۲-۱ و ۲-۲) به آن خواهیم پرداخت.

روشن شد که با پذیرش هم‌زمان‌سازی نوری انشتین، مقدار اندازه‌گیری شده برای سرعت یک‌طرفهٔ نور، در واقع، چیزی جز مقدار میانگین سرعت دوطرفهٔ نور نیست. هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم را می‌توان به این صورت نیز انجام داد که ابتدا دو ساعت را در کنار یکدیگر قرار داده و آنها را هم‌زمان کرد و سپس یکی از آن‌ها را به آرامی به نقطهٔ مورد نظر انتقال داد. این روشِ هم‌زمان‌سازی، به نام روش انتقال آهسته ساعت (Slow clock transport) معروف است. منصوری و سکسل معتقدند که با جایگزینیِ روشِ هم‌زمان‌سازیِ انتقال آهستهٔ ساعت به جای روش نوری انشتین، دور منطقیِ موجود در تعریف هم‌زمان‌سازی، مرتفع شده و در نتیجه، می‌توان سرعت یک‌طرفهٔ نور را اندازه‌گیری کرد (Mansouri et al., 1977a,b). در ادامه، روشن خواهد شد که چنین اعتقادی صحیح نیست.

جهت آزمون نظریه نسبیت خاص، چندین نظریهٔ آزمون ارائه شده است. در ادامه، ابتدا نظریه آزمون منصوری-سکسل و نتایج مترتب بر آن را توضیح داده و سپس به مقایسه این نظریه با دیگر نظریات آزمون خواهیم پرداخت. بررسی خواهیم کرد که آیا این نظریاتِ آزمون، توانایی آزمودن اصل‌موضوع دوم را دارند یا خیر.

۱.۲ نظریهٔ آزمون منصوری ـ سکسل و امکان آزمون اصل‌موضوع دوم

منصوری و سکسل در سه مقالهٔ پیاپی با عنوان کلی «یک نظریهٔ آزمون نسبیت خاص» (Mansouri et al., 1977a,b,c)، با اشاره به نقشِ «قرارداد» در تعاریف مختلف هم‌زمان‌سازی و هم‌زمانی، دو روش اصلی هم‌زمان‌سازی را مطرح کرده‌اند: روش درون‌دستگاهی (Internal Synchronization) و روش برون‌دستگاهی (External synchronization). آن‌ها نشان داده‌اند که دو روش هم‌زمان‌سازیِ درون‌دستگاهی انشتین و انتقال آهسته ساعت، در همه دستگاه‌های لخت موافقند اگر و تنها اگر ضریب اتساع زمان، دقیقاً برابر با مقدار نسبیت

خاصی آن باشد. ایشان با معرفی چهار پارامتر، توانسته‌اند نظریه نسبیت خاص و نظریات اتر رقیب را در قالب یک نظریهٔ آزمون صورت‌بندی کنند. این نظریهٔ آزمون بر پایه این دو فرض اساسی قابل طرح است: (۱) سرعت نور، مستقل از حرکت چشمه است، (۲) دو روش هم‌زمان‌سازی انتقال آهسته ساعت (S_T) و انشتین (S_E) در چارچوب مرجع Σ (چهارچوب اتر)، هم‌ارزند (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۵۳–۱۶۲).

ایشان با قبول خطی بودن تبدیل میان چارچوب ارجح $\Sigma(X,Y,Z,T)$ و چارچوب لخت دلخواه $S(x,y,z,t)$ و برخی فرض‌های معقول سینماتیکی دیگر، به تبدیل زیر رسیده‌اند:

$$t = a(v)T + \varepsilon x, \quad x = b(v)(X - vT), \quad y = d(v)Y, \quad z = d(v)Z$$

که در آن، v سرعت S نسبت به Σ، به موازات محور x انتخاب شده است. ε یک پارامتر عددی (اسکالر) و تابع v است. ضرایب a، b و d می‌تواند به طور نظری یا به وسیله آزمایش‌هایی مانند مایکلسون–مورلی، کندی–تورندیک، و ایوز–استیلول معین شود. اما تعیین ε، به انتخاب نوع قراردادِ هم‌زمان‌سازی ساعت‌ها بستگی دارد. منصوری و سکسل با محاسبه مقدار ε برای دو حالت همزمان‌سازی ساعت‌ها به روش انشتین و روش انتقال آهسته ساعت، نشان داده‌اند که در حالت کلی، نتیجهٔ هم‌زمان‌سازی به این دو روش متفاوت بوده و هم‌ارزیِ آنها، نه بدیهی است و نه الزام منطقی دارد. ایشان به درستی نشان داده‌اند که صرفاً با مقایسهٔ این دو نوع روشِ هم‌زمان‌سازی، می‌توان $a(v)$ را تعیین کرد (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۵۷–۱۵۹).

منصوری و سکسل با تصریح به قراردادی بودن هم‌زمانی و انتخاب یک روش هم‌زمان‌سازیِ برون‌دستگاهیِ منحصر به فرد (یا استفاده از هم‌زمان‌سازی انشتین و تنظیم دوباره ساعت‌ها به نحوی خاص) یعنی انتخاب $\varepsilon = 0$، و همچنین پذیرش مقادیر خاص $a(v) = \left(1 - v^2/c^2\right)^{1/2}$، $b(v) = \left(1 - v^2/c^2\right)^{-1/2}$ و $d(v) = 1$ که مستلزم انقباض طول و اتساع زمان در دستگاه‌های لختی است که نسبت به دستگاه اتر در حال حرکتند، یک نظریهٔ اتر (مبتنی بر تبدیلات تانگرلینی) ساخته‌اند که «مطلق بودن هم‌زمانی» را حفظ می‌کند. با وجود این که در این نظریهٔ اتر، اصل‌موضوع دوم نظریه نسبیت خاص، صادق نیست (یعنی این که سرعت یک‌طرفهٔ نور در دستگاه‌های لختِ مختلف، متفاوت می‌باشد)، این نظریه تا آنجا که به اثرهای مشاهده‌پذیر (اندازه‌گیری‌پذیر) مربوط است از نظر سینماتیکی، هم‌ارز نظریه نسبیت خاص است. بنابراین هر آزمایشی که تأییدی برای نظریه نسبیت

خاص باشد، در این نظریهٔ اتر نیز قابل تبیین و تعبیر است (البته در برخی موارد مانند آزمایش فیزو و غیره، در نظریه اتر، نیاز به استفاده از فرض‌های اضافه است).

علی‌رغم این که در نظریه نسبیت خاص، انشتین مفهوم "اتر شفاف" (Luminiferous ether) را مفهومی «زائد» دانست و بدون احتیاج به «فضای ساکنِ مطلق» پدیده‌های فیزیکی را تبیین کرد (Einstein, 1905; Lorentz et al., 1952: 38)، پس از ارائه نظریه نسبیت عام، خیلی زود دانسته شد که علی‌رغم نام آن، مفهوم «فضای مطلق» یا «چهارچوب ارجح اتر» کماکان در این نظریه حضور دارد (Earman, 1970; Jammer, 1993: xvi; Lichtenegger et al., 2007; Grünbaum,1957). از طرف دیگر، نسبی بودن هم‌زمانی در نظریه نسبیت خاص، بحث‌ها و مشکلات فیزیکی-فلسفی بسیاری را به دنبال داشته است. بنابراین نظریهٔ اتر منصوری-سکسل، در واقع تلاشی بوده است جهت حفظ «چهارچوب ارجح اتر» و «مطلق بودن هم‌زمانی».[۴]

همان طور که گذشت، منصوری و سکسل به درستی بیان کرده‌اند که در نظریهٔ آزمونی که ارائه کرده‌اند، با مقایسهٔ دو روش هم‌زمان‌سازی انتقالی و انشتین، می‌توان ضریب اتساع زمان (یعنی مقدار a) را آزمود. علاوه بر این، منصوری و سکسل ادعا کرده‌اند که سرعت یک‌طرفهٔ نور نیز در این نظریه، قابل اندازه‌گیری است (Mansouri et al., 1977a,b). این ادعای منصوری و سکسل، موجی از پذیرش و همراهیِ بسیاری از فیزیک‌دانان و برخی از فلاسفهٔ علم را به همراه داشته است (رجوع کنید به Anderson et al., 1998: 146 و منابع موجود در آن؛ Feenberg, 1979; Nissim-Sabat, 1984; Stolakis, 1986; Fung, 1980; Kaivola, 1985). اعتقاد به امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور به همراه پذیرش قراردادی بودن هم‌زمان‌سازی (یا بدون التفات به اهمیت موضوع همزمان‌سازی)، در زمان حاضر نیز در بین فیزیک‌دانان، طرفداران بسیاری دارد و پیشنهاد یا انجام آزمایش‌هایی جهت اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور همچنان ادامه دارد (Greaves et al., 2009; Ahmed et al., 2012; Wojtsekhowski et al., 2021; Will, 2014; Dryzek et al., 2007; Mattingly, 2005; Kostelecký, 2011; Wojtsekhowski, 2014). با این وجود، برخی از فیزیک‌دانان، آزمایشات انجام شده برای اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور را مخدوش دانسته‌اند اما در عین حال، امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور را نفی نکرده‌اند. به طور مثال، پیرز بیان کرده است که با استفاده از روش‌های موجود نمی‌توان سرعت یک‌طرفه را معین کرد مگر این که اندازه‌گیری، در دستگاه ساکن و حقیقی اتر (که سرعت یک‌طرفه نور در آن دستگاه، حقیقتاً

هم‌سان‌گرد است) انجام شود. و از آنجا که نمی‌دانیم آیا زمین، همان دستگاه حقیقی اتر است، ادعاها در مورد مقدار گزارش‌شده برای سرعت یک‌طرفهٔ نور، اعتبار خود را ازدست می‌دهد. وی در ادامه، مشکلات مربوط به اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور (و شناسایی دستگاه حقیقی اتر) را مشکلات تکنیکیِ قابلِ حل دانسته است (Pérez, 2011). ژنگ نیز امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور را نفی نکرده است (Zhang, 1997: v). عدّه‌ای دیگر از فیزیک‌دانان بر این باورند که با فرض پذیرش نظر رایج مبنی بر قراردادی‌بودنِ روش همزمان‌سازی ساعت‌ها، امکان اندازه‌گیری تجربی سرعت یک‌طرفهٔ نور به طور کلی منتفی است و یا این که حداقل در نظریهٔ آزمون منصوری–سکسل چنین امکانی فراهم نیست (Anderson et al., 1998; Zhang, 1997; Croca et al., 1999; Minguzzi, 2002; Ruderfer, 1960). ژنگ معتقد است که تفاوت قابل مشاهده بین تبدیل منصوری–سکسل و تبدیل لورنتز، به وسیله ناهمسان‌گردیِ سرعت دوطرفهٔ نور ایجاد می‌شود. بنابراین آزمون فیزیکیِ تبدیل منصوری–سکسل، یک آزمونِ سرعت دوطرفهٔ نور است، نه آزمون سرعت یک‌طرفهٔ نور (Zhang, 1995). همان طور که اشاره شد، آزمایش‌های بسیاری جهت اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور، پیشنهاد یا انجام داده شده است و این روند هم‌چنان نیز ادامه دارد. بیان تولی در این باره چنین است:

> آزمایش‌های پیشنهاد داده شده یا انجام شده تا کنون، به نظر می‌رسد که همه مخدوشند، چرا که با بررسی‌های دقیق و موشکافانه ظاهراً همه این آزمایش‌ها بر یک اصل یا چیز دیگری استوارند که صحت آنها مشروط به ثابت‌بودن سرعت یک‌طرفهٔ نور است. اگر چنین باشد، هیچ یک از آزمایش‌های پیشنهاد داده شده یا انجام شده تا کنون، نمی‌تواند منجر به یک مقدار برای سرعت یک‌طرفهٔ نور (که متفاوت از میانگین سرعت دوطرفهٔ نور است) شود (Tooley, 1997: 347).

ژنگ بیان کرده است که اشتباه نویسندگانی که ادعای اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفه نور را کرده‌اند، حداقل یکی از این سه مورد است: (۱) نویسندگان تمایزی بین ناهمسان‌گردی سرعت یک‌طرفه و ناهمسان‌گردی سرعت دوطرفه در نظر نگرفته‌اند، (۲) زمان مختصات، از زمان ویژه، متمایز نشده بوده است، (۳) این نویسندگان پی نبرده‌اند که سرعت‌های تعریف شده در چهارچوب‌های منصوری–سکسل همگی سرعت‌های منصوری–سکسل هستند که نمی‌توانند، در حالت کلی، به علت تعاریف متفاوت از همزمانی، مستقیماً با

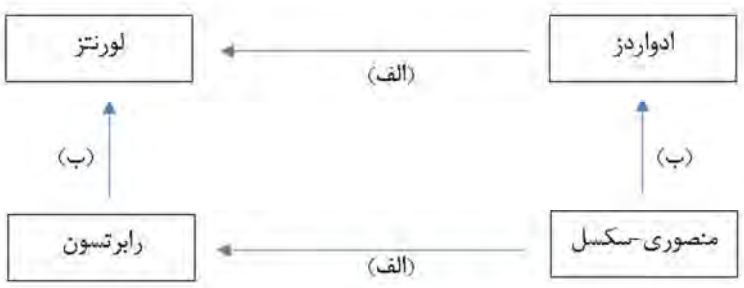
مقادیر آزمایش شده مقایسه شوند اگر چه که تفاوتی بین آنها برای پیش‌بینی مرتبه دوم بر حسب $\frac{v}{c}$ وجود ندارد (Zhang, 1997: 128).

مطالب فوق به خوبی نشان می‌دهد که مسأله امکان اندازه‌گیری تجربی سرعت یک‌طرفهٔ نور، در بین فیزیک‌دانان و متفکرین معاصر، محل نزاع و اختلاف است. به‌طور کلی چنین می‌توان گفت که اکثر فیزیک‌دانان، قائل به امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور هستند در حالی که اکثر فلاسفهٔ علم، اعتقاد به عدم امکان آن دارند.[۵]

در ادامه، با مقایسه تبدیلات منصوری–سکسل، تبدیلات رابرتسون، تبدیلات ادواردز و تبدیلات لورنتز روشن می‌شود که هیچ یک از نظریات آزمون نسبیت خاص، قادر به آزمودن ناهمسان‌گردی سرعت یک‌طرفهٔ نور نیستند.

۲.۲ نظریات آزمون نسبیت خاص

با استفاده از اصل نسبیت و اصل‌موضوع دوم می‌توان تبدیلات لورنتز را استخراج کرد. رابرتسون با پذیرش اصلی عام‌تر از اصل‌موضوع دوم، یعنی پذیرش روش همزمان‌سازی انشتین (همسان‌گردیِ سرعت یک‌طرفهٔ نور در همه دستگاه‌های لخت)، تبدیل عام‌تری را پیشنهاد داد (Robertson, 1949). ادواردز (Edwards, 1963) و وینی (Winnie, 1970a,b) با پذیرش اصل ثابت بودن سرعت دوطرفهٔ نور در همه دستگاه‌های لخت، به یک تبدیل لورنتز توسعه‌یافته دست یافتند. منصوری و سکسل تبدیل عام‌تری را ارائه کردند که در آن هیچ پیش‌فرضی نسبت به ثابت بودن سرعت یک‌طرفه یا دوطرفه نور و یا انتخاب روشی خاص جهت همزمان‌سازی ساعت‌ها در نظر گرفته نشده بود (Mansouri et al., 1977a,b,c). در شکل ۱، رابطهٔ تبدیلات منصوری–سکسل، تبدیلات ادواردز، تبدیلات رابرتسون، و تبدیلات لورنتز با یکدیگر نشان داده شده است (Zhang, 1995).



شکل ۱. مقایسه تبدیلات منصوری-سکسل، رابرتسون، ادواردز، و لورنتز با یکدیگر.
(الف): همسان‌گرد بودن سرعت یک‌طرفه نور در همه چارچوب‌های لخت در خلأ (یعنی، پذیرش روش انشتین در همزمان‌سازی ساعت‌ها در همه چارچوب‌های لخت).
(ب): یکسان و همسان‌گرد بودن سرعت دوطرفه نور در همه چارچوب‌های لخت در خلأ.

همان طور که اشاره شد، منصوری و سکسل معتقدند که با جایگزینیِ روشِ همزمان‌سازیِ انتقال آهستهٔ ساعت به جای روش نوری انشتین، دورِ منطقیِ موجود در تعریف همزمانی، مرتفع شده و در نتیجه، سرعت یک‌طرفهٔ نور، در نظریهٔ آزمون آنها قابل‌اندازه‌گیری است (Mansouri et al., 1977a,b)، اما از آنجا که تنها تفاوتِ ممکن بین نظریهٔ آزمون منصوری-سکسل و نظریهٔ آزمون رابرتسون، در انتخاب یک روش همزمان‌سازی است، با توجه به ماهیت قراردادی بودنِ روش‌های همزمان‌سازی، بنابراین تا آن‌جا که به اثرات فیزیکی مشاهده‌پذیر (یا اندازه‌گیری‌پذیر) مربوط می‌شود، هیچ تفاوتی بین این دو نظریه وجود ندارد. از طرف دیگر، روشن است که اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور در نظریهٔ رابرتسون ممکن نیست (چرا که با پذیرش روش همزمان‌سازی نوری انشتین در این نظریه، امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور از بین رفته است). در نتیجه، اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور در نظریهٔ منصوری-سکسل نیز ممکن نمی‌باشد. از آن‌جا که تنها تفاوتِ ممکن بین نظریهٔ آزمون ادواردز و نظریهٔ نسبیت خاص (مبتنی بر تبدیلات لورنتز) نیز در انتخاب یک روش همزمان‌سازی است، با توجه به ماهیت قراردادی بودنِ روش‌های همزمان‌سازی، بنابراین تا آنجا که به اثرات فیزیکی مشاهده‌پذیر (یا اندازه‌گیری‌پذیر) مربوط می‌شود، هیچ تفاوتی بین این دو نظریه وجود ندارد. از طرف دیگر، روشن است که اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور در نظریه نسبیت خاص، ممکن نیست (چرا که با پذیرش روش همزمان‌سازی نوری انشتین در این نظریه، امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور

ازبین رفته است). بنابراین اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفهٔ نور (که متفاوت از میانگین سرعت دوطرفهٔ نور می‌باشد) در نظریهٔ آزمون ادواردز نیز ممکن نمی‌باشد.

بنابراین روشن شد که با فرض پذیرش نظر رایج مبنی بر قراردادی بودنِ روش هم‌زمان‌سازی ساعت‌ها، سرعت یک‌طرفهٔ نور از نظر فیزیکی کمیتی مشاهده‌ناپذیر (اندازه‌گیری‌ناپذیر) است و علی‌رغم ادعاهای بسیار، اندازه‌گیری تجربی آن ممکن نیست. درنتیجه، امکان تأیید اصل‌موضوع دوم وجود ندارد.

با توجه به این که نظریات آزمون نسبیت خاص: منصوری-سکسل، رابرتسون و ادواردز، همگی بر پیش‌فرضِ استقلال سرعت نور از سرعت منبعش استوارند، بنابراین این نظریاتِ آزمون، توانایی آزمودن نظریه نسبیت خاص یا اصل‌موضوع دوم را از این جهت (یعنی بررسی استقلال سرعت نور از سرعت منبعش) ندارند. در قسمت ۳، نشان داده می‌شود که بدون نیاز به اندازه‌گیریِ مقدار سرعت یک‌طرفهٔ نور و مواجهه با مسألهٔ هم‌زمان‌سازی ساعت‌های دور از هم، می‌توان اصل‌موضوع دوم را با بررسی «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش» آزمود.[۶] البته روشن است که با بررسی استقلال یا وابستگی سرعت نور نسبت به سرعت منبعش، تنها می‌توان امکان نقض اصل‌موضوع دوم را فراهم کرد نه امکان تأیید آن را؛ چرا که در نظریات اتر که اصل‌موضوع دوم را ارضا نمی‌کنند نیز سرعت نور، مستقل از سرعت منبعش می‌باشد. البته روشن است که با انجام آزمایش و مشاهدهٔ وابستگی سرعت نور به سرعت منبعش، اصل‌موضوع دوم و هم‌چنین نظریات اتر، رد خواهند شد.

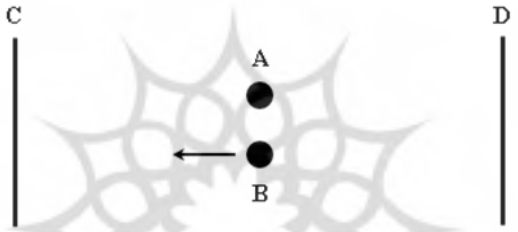
۳. بررسی آزمون‌پذیریِ «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»

نظریه الکترون لورنتز و نظریه نسبیت خاص انشتین هر دو بر مبنای استقلال سرعت نور از سرعت منبعش صورت‌بندی شده‌اند. با این وجود، در سال ۱۹۰۸م. ولتر ریتز (Wolter Ritz) نظریه گسیلی (Emission theory) یا نظریه پرتابی (Ballistic theory) خود را بر مبنای وابستگی سرعت نور به سرعت منبعش ارائه کرد (Ritz, 1908). به همین دلیل، آزمایش مایکلسون-مورلی به راحتی در نظریه گسیلیِ ریتز قابل تبیین است. جهت آزمون نظریهٔ ریتز، لا روزا (La Rosa, 1912a,b) و تولمان (Tolman 1912) پیشنهاد دادند تا آزمایش مایکلسون-مورلی با استفاده از یک چشمهٔ نور فرازمینی تکرار شود. در سال ۱۹۱۹م.

ماجورانا (Majorana, 1919) آزمایش مشابهی با استفاده از یک چشمهٔ نور زمینی متحرک انجام داد و هیچ جابجایی‌ای در طرح تداخلی مشاهده نکرد. میشُ (Michaud, 1919) نشان داد که نظریه ریتز با یافته‌های ماجورانا هم‌خوانی دارد. توماسچک (Tomaschek, 1924) با استفاده از نور ستارگان و میلر (Miller, 1925) با استفاده از نور خورشید، آزمایش را تکرار کردند و هیچ تداخلی در فرینج‌ها گزارش نکردند. قبل از این آزمایشات، استدلالی که توسط کامستاک (Comstock, 1910) و دِسیته (De Sitter, 1913a,b,c,d) اقامه شده بود به طور جدی امکان وابستگی سرعت نور به سرعت منبعش را متزلزل کرده بود. آنها بیان کرده بودند که مدارهای مشاهده شدهٔ ستارگان مزدوج با نظریه گسیلی سازگار نیست؛ چرا که طبق این نظریه، اختلاف سرعت نور ارسال شده توسط این‌دو ستاره موجب اعوجاج در تصویر دریافتی از سیستم می‌شود. اکنون روشن است که این استدلال‌ها، قطعی نیستند (Fox, 1962; Dingle, 1959b).

با انتشار مقالات دینگل (Dingle, 1959a,b, 1964)، کانتور (Kantor, 1962) و فاکس (Fox, 1962) در اواخر دهه ۱۹۵۰م. و دهه ۱۹۶۰م.، تلاش‌های تجربی جهت آزمون اصل‌موضوع دوم نظریه نسبیت خاص مورد توجه بیشتری قرار گرفت. دینگل هیچ یک از آزمایشات انجام‌شده برای آزمون استقلال سرعت نور از سرعت منبعش را غیرقابل‌خدشه ندانست و خود یک آزمایش پیشنهاد داد. کانتور با انجام یک آزمایش مستقیم، نتیجه گرفت که سرعت نور به سرعت منبعش بستگی دارد که اظهارنظرهای مختلفی را در پی داشت (Babcock et al., 1964; Záhejský et al., 1966; Kantor, 1972). فاکس با استناد به قضیه انهدام (Extinction theorem)، بسیاری از استدلال‌ها و آزمایشات مشهور که به عنوان آزمایشاتی قطعی شناخته شده‌اند (مانند کارهای دسیته و دیگران) را نقد و رد کرد و خودش آزمایشاتی را انجام داد. به اعتقاد وی اگر در اطراف ستارگان مزدوج، گازهایی ساکن وجود داشته باشد، با توجه به طول انهدام نور، روشن است که نور دریافت‌شده در زمین، همان نور ارسال شده توسط ستارگان مزدوج نیست. بنابراین آزمایشات فرازمینیِ اثبات‌کنندهٔ استقلال سرعت نور از سرعت منبعش، همگی مورد تردید قرار می‌گیرند، مگر آزمایشاتی که به طور مثال در آنها از منابع پرتو-X با پالس‌دهی منظم در سیستم‌های ستاره مزدوج استفاده شده است؛ چرا که منابع پرتو-X دارای طول انهدام بسیار بزرگ‌تری هستند.

به عقیده دینگل، آزمایشاتی که به قصد آزمونِ (test) اصل‌موضوع دوم نظریه نسبیت خاص یا کل این نظریه، انجام می‌شوند، می‌بایست سینماتیکیِ خالص باشند یعنی این که کاملاً مستقل از نظریه الکترومغناطیس شامل مفاهیمی مانند جرم، نیرو، طول موج، بسامد و غیره باشند؛ چرا که مقدار این کمیات با استفاده از نظریه الکترومغناطیس معین می‌شود نه به‌وسیله اندازه‌گیری مستقیم (Dingle, 1959b). اغلب گفته می‌شود که آزمون تجربی اصلِ «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»، غیر ممکن است؛ چرا که ساعت‌های استفاده شده برای آزمون این اصل، با استفاده از همین اصل، هم‌زمان‌سازی شده‌اند. دینگل این ادعا را رد کرده و با بیان این که تا دهه ۱۹۷۰م. هیچ آزمایش قابل قبولی جهت آزمون این اصل انجام نشده است، آزمایش زیر را پیشنهاد داد (شکل۲).



شکل ۲. منابع نور A و B، و صفحات تصویربرداری C و D.

A و B دو منبع نور هستند (منابعی قابل رؤیت، محسوس و مادی، نه ذراتی مبتنی بر فرضیه) که نسبت به آزمایشگاه (صفحه کاغذ)، A ساکن و B با سرعت در حال حرکت به سمت چپ است. در لحظه‌ای که آن دو در مجاور یکدیگر قرار می‌گیرند، هر کدام دو تپ (پالس) به سمت صفحات تصویربرداری C و D که فاصله آنها از A و B ثابت بوده و به سمت پایین صفحه کاغذ در حال حرکت هستند، ارسال می‌کنند. سرعت نسبی A و B در مدت‌زمان حرکت نور، ثابت می‌ماند. اگر اصل «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش» درست باشد، اثرات ظاهر شده بر هر دو صفحهٔ تصویربرداری، در کنار یکدیگر به صورت متقارن خواهند بود، در حالی که اگر فرضیهٔ ریتز (یعنی وابستگی سرعت نور به سرعت منبعش) درست باشد، اثر حاصل از نور منبع A بر روی یکی از صفحات تصویربرداری، در بالای اثر حاصل از نور منبع B خواهد بود و بر روی صفحه دیگر در پایین آن. چنین آزمایشی شامل هیچ نظریه‌ای نیست، منابع به صورتی غیر قابل تردید، قابل شناسایی هستند،

واقعیت سرعت نسبی آنها غیر قابل تردید است، و هیچ اندازه‌گیری‌ای از مدت‌زمان حرکت یا فرضی درباره هم‌زمانی ساعت‌ها به کار گرفته نشده است. آزمایش می‌تواند در خلأ انجام شود اگر نیاز باشد (Dingle, 1972: ch. 10).

بررسی تجربی استقلال سرعت نور از سرعت منبعش، در طول سال‌های اخیر نیز موردعلاقه و توجه برخی بوده است. طبق تحلیل برچر (Brecher, 1977) از مشاهدات منابع پرتو-X با پالس‌دهی منظم در سیستم‌های ستاره مزدوج، تعبیر گسیلی ظاهراً قابل‌دفاع نیست (Brecher, 1977). بر خلاف برچر، وُو و همکاران (Wu et al., 2015) بیان کرده‌اند که با ارائه یک روش جدید، سرعت نور دریافتی از برخی از ستارگانِ بسیار دور دست که دارای سرعت نسبیِ قابل توجهی نسبت به زمین هستند را اندازه‌گیری کرده‌اند. ایشان بیان کرده‌اند که در واقع سرعت نور ستارگان را با c مقایسه کرده و با این کار توانسته‌اند از مشکلات ناشی از هم‌زمان‌سازی ساعت‌ها احتراز کنند. نتایج ایشان حاکی از این است که در مقایسه با پالس‌های نور سفید محلی، پالس‌های کاپلا (Capella) (عیوق) و الدبران (Aldebaran) تأخیر داشتند اما پالس‌های وگا (Vega) زودتر رسیدند. بنابراین کاپلا و الدبران درحال دورشدن از زمین هستند و وگا در حال نزدیک شدن. به عبارت دیگر، نتایج آنها حاکی از این است که سرعت نور وابسته به سرعت منبع آن است. اختلاف‌نظرها در مورد اعتبار آزمایشات انجام شده در سال‌های اخیر، همچنان ادامه دارد (Aleksandrov et al., 2011a,b; Kupryaev, 2015; Apollonov et al., 2016, 2017).

اهمیت و نقش بنیادین اصل‌موضوع دوم در نظریه نسبیت و همچنین وجود اختلاف‌نظرها و تردیدهایی پیرامون آن، مستلزم این است که با تدارک آزمایشاتی قطعی جهت بررسی «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»، امکان نقض اصل‌موضوع دوم، مورد ارزیابی قرار بگیرد. قطعی بودن این آزمون‌ها منوط به دارا بودن شرایط زیر است:

۱. آزمایش انجام شده می‌بایست کاملاً سینماتیکی بوده و در آن از محاسبات مبتنی بر نظریه الکترومغناطیس پرهیز شده باشد؛ چرا که آزمون اصل‌موضوع دوم، به نوعی آزمون نظریه الکترومغناطیس نیز می‌باشد. بنابراین در روند اجرای آزمایش نباید نظریه الکترومغناطیس به طور پیشین صحیح دانسته شده و به کارگرفته شود.

۲. آزمایشاتی که در آنها احتمال تأثیر «قضیه انهدام» (Extinction theorem) وجود دارد، قطعی دانسته نمی‌شوند. به همین دلیل، آزمایشاتی که در آنها از منابع نور فرازمینی

استفاده می‌شود، به دلیل احتمال تأثیر «قضیه انهدام»، قطعی دانسته نمی‌شوند. محدودیت‌های ناشی از «قضیه انهدام»، در مورد آزمایشات انجام شده بر روی سطح زمین در محیط غیر خلأ نیز مطرح است. همچنین هوای موجود در جو زمین، دارای اثرات ناشی از تغییر سرعت نور در محیط‌های مادی متحرک نیز می‌باشد (آزمایش فیزو) که ممکن است این اثرات قابل صرف نظر کردن نباشند.

آزمایشاتی که شروط فوق را ارضا نمی‌کنند، اگر چه که در تأیید یا نقض اصل «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»، آزمایشاتی قطعی محسوب نمی‌شوند، اما درصورت مغایرت نتایج آنها با اصل مذکور، می‌توانند احتمال غیر صحیح بودن اصل‌موضوع دوم را تقویت کنند. بنابراین پیگیری انجام چنین آزمایش‌هایی نیز خالی از فایده نخواهد بود. از این رو، تکرار آزمایش انجام شده توسط وُو و همکاران (Wu et al., 2015) مفید خواهد بود. البته بر خلاف ایشان که نور ستارگان و پرتو نور محلی را به‌طور هم‌زمان در محل فرستنده به پالس‌هایی ماجوله کرده‌اند و یک گیرندهٔ واقع در دوردست، این پالس‌ها را شناسایی کرده و زمان‌های دریافت را ثبت کرده است، به‌نظر نمی‌رسد که ماجوله کردن و اعمال اثراتی اضافی بر روی نور که ممکن است بر صحت آزمایش مؤثر باشد، امری لازم و ضروری در روند انجام آزمایش باشد. از این رو، می‌توان آزمایش را به طور مستقیم به صورت زیر انجام داد (شکل ۳).

شکل ۳. طرح آزمایش بررسی استقلال سرعت نور از سرعت منبعش

به وسیله صفحهٔ مانع عبور نور، در یک لحظه، مسیر عبور پرتوهای نور (متعلق به ستاره و منبع نور زمینی که نسبت به یکدیگر دارای سرعت نسبی قابل توجهی هستند) را باز کرده و بلافاصله مسیر را می‌بندیم.[۷] دریافت‌کننده، لحظات دریافت علامت‌های نوری را ثبت خواهد کرد. بنابراین می‌توان تقدم و تأخر زمانی دریافت دو علامت نوری (و حتی میزان اختلاف زمان دریافت آنها) را مشخص کرد. این آزمایش، یک آزمایش سینماتیکی خالص است. فقط احتمال وجود گازها و محیط‌های اطراف‌ستاره‌ای، بین‌ستاره‌ای و یا هوای موجود در جو زمین می‌تواند قطعی بودن آزمایش را مورد تردید قرار دهد. تکرار آزمایش در حوزه وسیعی از بسامدها (استفاده از امواج رادیویی تا پرتوهای اشعه ایکس یا گاما) می‌تواند در تخفیف این مشکل مفید باشد. به هر حال، مشاهده هر گونه اختلاف بین زمان دریافت پرتوها، با اصل‌موضوع دوم در تناقض است. برای اطمینان بیشتر می‌توان آزمایش را برای تعداد بیشتری از ستارگان تکرار کرد.

به هر حال، انجام آزمایشاتی قطعی (ارضاکننده شروط مذکور)، از ارزش بسیار ویژه‌ای برخوردار است. به نظر می‌رسد که انجام چنین آزمایشاتی، مافوق توان فن‌آوری کنونی ما نباشد.

۴. نتیجه‌گیری

اصل‌موضوع دوم نظریه نسبیت خاص، نه اصلی بدیهی است و نه به وسیله سایر اصول‌موضوعه اثبات شده است. به علاوه، پیامدهای فیزیکی-فلسفی عجیبی (مانند نسبی و نامتعدی بودن رابطهٔ همزمانی، نسبی بودن تقدّم و تأخّر زمانی برخی روی‌دادها، پارادوکس دوقلو و غیره) بر این اصل مترتب است. از طرف دیگر، پیشرفت‌های آزمایشگاهی در حوزه کوانتوم در زمینهٔ آزمون نامساوی‌های بِل، گفتگوها و منازعاتی پیرامون احتمال نقض اصل موضعیت انشتین که ارتباط نزدیکی با این اصل دارد را در پی داشته است. بنابراین انجام آزمایشات قطعی جهت آزمودن اصل‌موضوع دوم ضروری است. در این نوشتار در قسمت ۲، با بررسی مسألهٔ همزمان‌سازی ساعت‌های دور از هم، نشان داده شد که با فرض پذیرش نظر رایج مبنی بر قراردادی بودنِ روش همزمان‌سازی ساعت‌ها، سرعت یک‌طرفهٔ نور از نظر فیزیکی کمیتی مشاهده‌ناپذیر (اندازه‌گیری‌ناپذیر) است و علی‌رغم ادعاهای بسیار، اندازه‌گیری تجربی آن ممکن نیست. در نتیجه، امکان تأیید اصل‌موضوع دوم

وجود ندارد. با این حال، در قسمت ۳، نشان داده شد که با تدارک آزمایشاتی جهت بررسیِ «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش»، امکان نقض اصل‌موضوع دوم وجود دارد. دو شرط، جهت قطعی بودن این آزمون‌ها بیان شد. انجام آزمایشاتی که شروط مذکور را ارضا نمی‌کنند، اگر چه که در بررسی نقض اصل‌موضوع دوم، آزمایشاتی قطعی محسوب نمی‌شوند، اما در صورت مغایرت نتایج آنها با مفاد اصل‌موضوع دوم، می‌توانند احتمال غیر صحیح بودن این اصل را تقویت کنند. بنابراین پیگیری انجام چنین آزمایش‌هایی نیز خالی از فایده نخواهد بود. از این رو، در قسمت ۳، تکرار آزمایش وُو و همکاران (Wu et al., 2015)، مورد تأکید قرار گرفت (البته با ارائهٔ پیشنهادی جهت ساده‌سازی و تقویت جنبهٔ سینماتیکی آزمایش). به هر حال، انجام آزمایشات قطعی (ارضاکنندهٔ شروط مذکور)، از ارزش بسیار ویژه‌ای برخوردار است. به نظر می‌رسد که انجام چنین آزمایشاتی، مافوق توان فن‌آوری کنونی ما نیست.

پیوست الف. آیا اصل‌موضوع دوم، نتیجهٔ اصل نسبیت است؟

برخی از فیزیک‌دانان بیان کرده‌اند که برای استخراج تبدیلات لورنتز، استفاده از اصل نسبیت (البته به همراه برخی از خواص تقارنیِ حرکت، فضا و زمان) کفایت می‌کند و نیازی به استفاده از اصل‌موضوع دوم و یا اصل‌موضوعی دیگر مربوط به سرعت نور، نیست (Ignatowski, 1910; Frank et al., 1911; Berzi et al. 1969; Lévy-Leblond, 1976; Sen, 1994; Torretti, 1983: 76-82; Anker et al., 2020). خسروی و منصوری نیز اثباتی بر این ادعا ارائه کرده و نتیجه گرفته‌اند که اصل‌موضوع دوم، نتیجهٔ اصل نسبیت است (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲، ۲۷–۳۱، ۶۱). در ادامه، نشان می‌دهیم که جهت استخراج تبدیلات لورنتز، علاوه بر اصل نسبیت، استفاده از اصل‌موضوع دیگری مربوط به سرعت نور، ضروریست. همچنین نشان می‌دهیم که اصل‌موضوع دوم به معنای رایج آن، مستقل از اصل نسبیت است و نتیجهٔ آن نیست.

فرض می‌کنیم که چارچوب لخت $S'(x',y',z',t')$ با سرعت ثابت v در جهت محور x در چارچوب لخت $S(x,y,z,t)$ در حال حرکت است (مبدأ S و S' در لحظهٔ $t=t'=0$، بر هم منطبقند و محور x و x' نیز بر هم منطبق و هم‌جهت‌اند). به راحتی می‌توان نشان داد که به کارگیری اصل نسبیت، اصل همگنی فضا و زمان، اصل

هم‌سان‌گردی فضا و اصلِ Reciprocity[8]، منجر به استخراج تبدیل زیر بین دو دستگاه لخت S و S' می‌شود (خسروی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۷-۳۰):

$$x' = \gamma(x - vt)\ ,\quad y' = y\ ,\quad z' = z\ ,\quad t' = \gamma\left(t - \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2 v}x\right). \qquad (1)$$

که در آن γ فقط تابعی از v و مستقل از مختصات است (عملاً مانند یک ثابت رفتار می‌کند). رابطه فوق را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - Kv^2}},\quad y' = y,\quad z' = z,\quad t' = \frac{t - Kvx}{\sqrt{1 - Kv^2}}. \qquad (2)$$

که $K \in R$.

تبدیلات فوق، علی‌رغم این که دارای ظاهری شبیه به تبدیلات لورنتز است، اصطلاحاً تنها به ازای $K > 0$ به آن «تبدیلات لورنتز» گفته می‌شود (نتایج مترتب بر تبدیلات لورنتز در نظریه نسبیت خاص، مانند «نسبی بودن زمان»، تنها با فرض پذیرش $K > 0$ قابل‌تحقق است)، همان طور که به ازای $K = 0$ به آن «تبدیلات گالیله» گفته می‌شود. تبدیلات فوق، به ازای $K < 0$ نیز نام دیگری دارد. به طور مثال، لالان (Lalan) نشان داد که فرض $K < 0$ با اصل کرونالژی[9] (Chronology Principle) ناسازگار است (نقل از: Torretti, 1983: 82). بنابراین برای استخراج تبدیلات لورنتز، علاوه بر اصل نسبیت، استفاده از اصل یا شرطِ $K > 0$، ضروریست. روشن است که اصل نسبیت هیچ الزامی نسبت به پذیرشِ فرضِ $K > 0$ ایجاد نمی‌کند. به عبارت دیگر، فرضِ $K > 0$، مستقل از اصل نسبیت است. بنابراین اصل نسبیت همان طور که با نسبی بودن زمان سازگار است (در فرض پذیرش شرطِ $K > 0$) با مطلق بودن زمان نیز سازگار است (در فرض پذیرش شرطِ $K = 0$).

می‌توان نشان داد که پذیرش شرطِ $K > 0$ به همراهِ اصل نسبیت، مستلزم پذیرش اصل‌موضوع دوم است. از طرف دیگر، می‌توان نشان داد که پذیرش شرطِ $K \leq 0$ (نقیضِ شرطِ $K > 0$) به همراهِ اصل نسبیت، منجر به نقضِ اصل‌موضوع دوم و نتایج مترتب بر این اصل (مثل نقضِ نسبی بودن زمان در فرض $K = 0$) می‌شود. این مطلب، نشان می‌دهد که اصل‌موضوع دوم، مستقل از اصل نسبیت است و نتیجهٔ آن نیست، مگر

این‌که اصل موضوع دوم را به این صورت تعریف کنیم: «سرعتی وجود دارد که در همه چهارچوب‌های لخت ناورداست بدون در نظر گرفتن این که مقدار این سرعت، عددی حقیقی، موهومی یا نامتناهی است»، که در این صورت، اصل‌موضوع دوم، نتیجه اصل نسبیت است اما روشن است که در این حالت برای استخراج تبدیلات لورنتز نیاز به پذیرش اصل‌موضوع سوم یعنی شرطِ $K > 0$ می‌باشد. از آنجا که اضافه‌کردنِ اصل‌موضوع سوم جهت استخراج تبدیلات لورنتز، رایج نیست، روشن می‌شود که در اکثر منابع، اصل‌موضوع دوم به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که دربردارندهٔ شرطِ $K > 0$ می‌باشد. بنابراین تعریف مذکور برای اصل‌موضوع دوم رایج نیست.

توضیحات فوق نشان می‌دهد که با استفاده از اصل نسبیت به تنهایی و بدون استفاده از اصل یا شرطِ $K > 0$، نمی‌توان به تبدیلات لورنتز دست یافت.

اصل یا شرطِ $K > 0$، بدین معناست که «فقط سرعتی متناهی و متعلق به مجموعه اعداد حقیقی ($c \in R$) وجود دارد که در دو دستگاه لخت S و S'، ناورداست». بنابراین تفاوت اصلِ $K > 0$ با اصل‌موضوع دوم (فقط سرعتی متناهی ($c \in R$) وجود دارد که در همه دستگاه‌های لخت، ناورداست) و رابطهٔ آنها با یکدیگر نیز روشن است. شرطِ $K = 0$ بدین معناست که «فقط سرعت نامتناهی است که در دو دستگاه لخت S و S'، ناورداست» و یا به عبارت دقیق‌تر، «هیچ سرعتی متناهی وجود ندارد که در S و S'، ناوردا باشد». شرطِ $K < 0$ نیز بدین معناست که «فقط سرعتی موهومی (Imaginary) وجود دارد که در دو دستگاه لخت S و S'، ناورداست». روشن است که اصل نسبیت، مستقل از شروط مذکور است و با آنها سازگار است.

عده‌ای (Berzi et al., 1969) پس از استخراج تبدیلات لورنتز-گونه (معادله ۲) با استفاده از اصل نسبیت به تنهایی (بدون استفاده از اصل‌موضوع دوم)، مشخص شدن مقدار K را به تجربه و آزمایش ارجاع داده‌اند. ایشان گمان کرده‌اند که مشخص کردن مقدار K نیاز به پذیرش اصل‌موضوع دیگری ندارد. با توجه به مطالب ارائه شده در قسمت ۲ مقاله، روشن است که با توجه به پذیرش قراردادی بودن همزمان‌سازی ساعت‌ها توسط اکثر فیزیک‌دانان، امکان اندازه‌گیری سرعت یک‌طرفه و مشخص کردن مقدار K به وسیلهٔ آزمایش، از طرف ایشان منتفی است. البته با پذیرش اصل نسبیت و اصل کرونالژی (شرطِ $K \geq 0$) و همچنین بررسی «استقلال یا وابستگی سرعت نور نسبت به سرعت

منبعش»، می‌توان مقدار K را مشخص کرد. به راحتی می‌توان نشان داد که پذیرش اصل نسبیت، اصل کرونالژی (شرطِ $K \geq 0$)، اصل «متناهی بودن سرعت نور» و اصل «استقلال سرعت نور نسبت به سرعت منبعش»، مستلزم پذیرش اصل‌موضوع دوم (که دربردارندهٔ شرطِ $K > 0$ است) می‌باشد.[۱۰]

پی‌نوشت‌ها

۱. از آن‌جا که اصل‌موضوع دوم، صحت استفاده از روشی خاص برای همزمان‌سازی ساعت‌ها (یعنی روش نوری انشتین) را تضمین می‌کند، و همزمان‌سازی ساعت‌های دور از هم نیز در تعریف و اندازه‌گیری کمیت «سرعت» و در نتیجه، در تعریف و شناسایی «چارچوب‌های لخت» نقشی اساسی دارد، در نتیجه، اصل‌موضوع دوم، در تعریف چارچوب لخت و به عبارت دیگر در تعریف اصل نسبیت، به کار رفته است. البته اصل‌موضوع دوم به تنهایی نمی‌تواند مجموعهٔ چهارچوب‌های لخت را به طور یکتا مشخص کند.

۲. اصل موضعیت: هیچ دو سیستم فیزیکی نمی‌توانند با سرعتی بیشتر از سرعت نور (در خلأ) و یا به‌طور عقب‌گرد در زمان با هم تبادل اطلاعات فیزیکی انجام دهند (رزمی، ۱۳۹۰: ۱۹).

۳. اصل‌موضوع دوم، مستلزم این است که «مقدار سرعت نور، مستقل از سرعت منبع و ناظر است». مطالب قسمت ۲، نشان می‌دهد که امکان آزمون تجربیِ «استقلال سرعت نور از سرعت ناظر» وجود ندارد. مطالب قسمت ۳، نشان می‌دهد که امکان آزمون تجربیِ «استقلال سرعت نور از سرعت منبعش» وجود دارد.

۴. سؤالی بسیار مهم که در اینجا قابل طرح است این است که آیا دست‌یابی به یک نظریهٔ فیزیکیِ کارآمد که در آن، «مطلق بودن هم‌زمانی» و «اصل نسبیت» (به معنای حذفِ کامل چهارچوب ارجح یا مطلق) هر دو حفظ شوند، ممکن است؟ راه‌کارهای لازم کدامند؟

۵. برای مطالعه پیرامون اختلافات فیلسوفان علم در این زمینه، رجوع کنید به (Janis, 2018; Anderson et al., 1998: 117-127; Malament, 1977; Ellis, 1985; Grünbaum, 1969, 2010) و مراجع موجود در آنها.

۶. با بررسیِ «استقلال سرعت نور نسبت به بسامد» نیز می‌توان امکان نقض اصل‌موضوع دوم را فراهم کرد.

۷. بستن مسیر پرتوها، به خاطر کاهش اثرات احتمالی پرتوهای نور بر یکدیگر است. شکل دیگری از آزمایش: در ابتدا مسیر عبور نور باز است. در یک لحظه، مسیر عبور نور را می‌بندیم.

دریافت‌کننده، زمان قطع هر کدام از پرتوها را ثبت می‌کند. بنابراین می‌توان تقدم و تأخر زمانی قطع شدن نور پرتوها (و حتی میزان اختلاف آنها) را مشخص کرد.

۸. اصلِ Reciprocity: اگر چارچوب لخت F' با سرعت v در چارچوب لخت F درحال حرکت باشد، آنگاه چارچوب F با سرعت $-v$ در چارچوب F' در حال حرکت است.

۹. اصلِ Chronology: اگر در یک نقطهٔ مفروض از یک چارچوب لخت، رویداد E_1 قبل از رویداد E_2 رخ دهد، در همه چارچوب‌های لخت، E_1 قبل از E_2 رخ می‌دهد.

۱۰. در این زمینه، توضیحات مفیدی در (Friedman, 1983: 159-160) آمده است.

کتاب‌نامه

خسروی، شهرام؛ منصوری، رضا (۱۳۸۹)، نسبیت خاص، تهران: مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

رزمی، حبیب الله (۱۳۹۰)، قضیه بِل رئالیسم (غیر) موضعی، قم: انتشارات دانشگاه قم.

Ahmed, M. F., Quine, B. M., Sargoytchev, S., Stauffer, A. D. (2012). "A review of one-way and two-way experiments to test the isotropy of the speed of light," Indian Journal of Physics, 86(9), 835-848.

Aleksandrov, E. B., Aleksandrov, P. A. E., Zapasskii, V. S., Korchuganov, V. N., Stirin, A. I. (2011a). "Direct experimental demonstration of the second special relativity postulate: the speed of light is independent of the speed of the source," Physics-Uspekhi, 54(12), 1272.

Aleksandrov, E. B., Aleksandrov, P. A. E., Zapasskii, V. S., Korchuganov, V. N., Stirin, A. I. (2011b). "Measuring speed of the light emitted by an ultrarelativistic source," JETP letters, 94(5), 344-346.

Anderson, R., Vetharaniam, I., Stedman, G. E. (1998). "Conventionality of synchronisation, gauge dependence and test theories of relativity," Physics reports, 295(3-4), 93-180.

Anker, J. P., Ziegler, F. (2020). "Relativity without light: A new proof of Ignatowski's theorem," Journal of Geometry and Physics, 158, 103871.

Apollonov V.V., Voinov Y. P. (2016). The Way of Science, 3 (25), 10.

Apollonov, V. V., Voinov, Y. P. (2017). "Experiments directly demonstrating that the speed of light is independent of the velocity of the source: an experimental fact or a misconception," IJRES. 5(8). 49-55.

Babcock, G. C., Bergman, T. G. (1964). "Determination of the Constancy of the Speed of Light," JOSA, 54(2), 147-151.

Bell, J. S. (2010). Speakable and unspeakable in quantum mechanics, 2nd ed. Cambridge university press.

Berzi, V., Gorini, V. (1969). "Reciprocity principle and the Lorentz transformations," Journal of Mathematical Physics, 10(8), 1518-1524.

Brecher, K. (1977). "Is the Speed of Light Independent of the Velocity of the Source?," Physical Review Letters, 39(17), 1051-4

Cartan, É. (1923). "Sur les variétés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée (première partie)," Ann École Norm Sup., 40, 325-412.

Cartan, É. (1924). "Sur les variétés à connexion affine, et la théorie de la relativité généralisée (première partie)(suite)," Ann École Norm Sup., 41, 1-25.

Comstock, D. F. (1910). "A Neglected Type of Relativity," Physical Review, 30, 267.

Croca, J. R., Selleri, F. (1999). "Is the one-way velocity of light measurable?," Nuovo Cimento B Serie, 114(4), 447-457.

De Sitter W. (1913a). "A proof of the constancy of the velocity of light," Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam, 15(2), 1297–1298.

De Sitter W. (1913b). "Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit," Physikalische Zeitschrift, 14(10), 429.

De Sitter W. (1913c). "On the constancy of the velocity of light," Proceedings of the Section of Sciences, Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam, 16(1), 395–396.

De Sitter W. (1913d). "Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann," Physikalische Zeitschrift, 14(25), 1267.

Dingle, H. (1959a). "A possible experimental test of Einstein's second postulate," Nature, 183(4677), 1761-1761.

Dingle, H. (1959b). "A Proposed Astronomical Test of the "Ballistic" Theory of Light Emission," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 119(1), 67-71.

Dingle, H. (1964). "Reason and experiment in relation to the special relativity theory," The British Journal for the Philosophy of Science, 15(57), 41-61.

Dingle H. (1972). Science at the Crossroads, London: Martin Brian & O'Keeffe.

Dryzek, J., Singleton, D. (2007). "Test of the second postulate of special relativity using positron annihilation," American Journal of Physics, 75(8), 713-717.

Earman, J. (1970). "Who's afraid of absolute space?" Australasian Journal of Philosophy, 48(3), 287-319.

Edwards, W. F. (1963). "Special relativity in anisotropic space," American Journal of Physics, 31(7), 482-489.

Einstein, A. (1905). "On the electrodynamics of moving bodies," Annalen der physik, 17(10), 891-921.

Einstein, A. (1918). "On the foundations of the general theory of relativity." In: The Collected Papers of Albert Einstein, volume 7, pages 33–35, Princeton University Press, Princeton, 2002.

Einstein, A. (1920). Relativity: the special and the general theory, London: Methuen & Co. Ltd. (First published: 1916)

Ellis, B. (1985). "What science aims to do," in: P.M. Churchland, C.A. Hooker (Eds.), Images of Science, Chicago: University of Chicago Press, 1985, pp. 48-74.

Feenberg, E. (1979). "Distant synchrony and the one-way velocity of light," Foundations of Physics, 9(5), 329-337.

Fox, J. G. (1962). "Experimental evidence for the second postulate of special relativity," American Journal of Physics, 30(4), 297-300.

Fox, J. G. (1965). "Evidence Against Emission Theories," American Journal of Physics, 33(1), 1–17.

Frank, P., Rothe, H. (1911). "The transformation of the space-time coordinates of stationary to moving systems," Ann. Phys., 34, 825-855.

Friedman, M. (1983). Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science, Princeton University Press.

Fung, S. F., Hsieh, K. C. (1980). "Is the isotropy of the speed of light a convention?," American Journal of Physics, 48(8), 654-657.

Goldberg, S. (1967). "Henri Poincaré and Einstein's theory of relativity," American journal of physics, 35(10), 934-944.

Greaves, E. D., Rodríguez, A. M., Ruiz-Camacho, J. (2009). "A one-way speed of light experiment," American Journal of Physics, 77(10), 894-896.

Grünbaum, A. (1957). "The philosophical retention of absolute space in Einstein's General Theory of Relativity," The Philosophical Review, 66(4), 525-534. For an enlarged excerption of this paper see: Problems of space and time, ed. Smart J. J. C. (Macmillan, New York, 1964) p. 313.

Grünbaum, A. (1960). In Philosophy of Science, A. Danto and S. Morgenbesser, eds., New York: Meridian Books.

Grünbaum, A. (1973). Philosophical Problems of Space and time, Dordrecht/Boston: Reidel Publishing Company.

Grünbaum, A. (1969). "Simultaneity by slow clock transport in the special theory of relativity," Philosophy of Science, 36(1), 5-43.

Grünbaum, A. (2010). "David Malament and the conventionality of simultaneity: A reply," Foundations of Physics, 40(9), 1285-1297.

Ignatowski, W. V. (1910). "Einige allgemeine Bemerkungen über das Relativitätsprinzip," Phys. Z., 11, 972-976.

Jammer, M. (1993). Concepts of Space — The History of Theories of Space in Physics, New York: Dover, 3rd edition.

Janis, A. (2018). "Conventionality of Simultaneity," The Stanford Encyclopedia of Philosophy," (Fall 2018 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/fall2018/entries/spacetime-convensimul/>.

Kaivola, M., Poulsen, O., Riis, E., Lee, S. A. (1985). "Measurement of the relativistic Doppler shift in neon," Physical review letters, 54(4), 255.

Kantor, W. (1962). "Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source," JOSA, 52(9), 978-984.

Kantor, W. (1972). "Closed-path interferometric experiments on the speed of light from moving sources," Il Nuovo Cimento B (1971-1996), 11(1), 93-105.

Kostelecký, V. A., Russell, N. (2011). "Data tables for Lorentz and C P T violation," Reviews of Modern Physics, 83(1), 11.

Kretschmann, E. (1917). "Über den physikalischen Sinn der Relativitätspostulate, A. Einsteins neue und seine ursprüngliche Relativitätstheorie," Annalen der Physik, Leipzig, 53, 575-614. (In German)

Kupryaev, N. V. (2015). "On the Measurement of the Velocity of Light Emitted by an Ultrarelativistic Source," Russian Physics Journal, 57(9), 1220-1224.

La Rosa, M. (1912a). "Fondamenti sperimentali del 2.° principio della teoria della relativitÀ," Nuovo Cimento, 3(1), 345-365.

La Rosa, M. (1912b). "Uber einen Versuch zum Vergleiche der Relativitätstheorie mit den mechanischen Anschauungen über die Lichtausstrahlung," Physikalische Zeitschrift, 13(23), 1129-1131.

Lévy-Leblond, J. M. (1976). "One more derivation of the Lorentz transformation," American Journal of Physics, 44(3), 271-277.

Lichtenegger, H.; Mashhoon, B., (2007). "Mach's Principle", in The Measurement of Gravitomagnetism: A Challenging Enterprise, edited by L. Iorio (NOVA Science, Hauppage, NY, 2007), Chapter 2. [arXiv: physics/0407078 [physics.hist-ph]]

Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H., Weyl, H. (1952). The Principle of Relativity: a collection of original memoirs on the special and general theory of relativity, New York: Dover.

Majorana, Q. (1919). "Experimental demonstration of the constancy of velocity of light emitted by a moving source," Philosophical Magazine, 37(217), l45- 150.

Malament, D. (1977). "Causal Theories of Time and the Conventionality of Simultaniety," Noûs, 11: 293–300.

Mansouri, R., Sexl, R. U. (1977a). "A test theory of special relativity: I. Simultaneity and clock synchronization," General relativity and Gravitation, 8(7), 497-513.

Mansouri, R., Sexl, R. U. (1977b). "A test theory of special relativity: II. First order tests," General Relativity and Gravitation, 8(7), 515-524.

Mansouri, R., Sexl, R. U. (1977c). "A test theory of special relativity: III. Second-order tests," General relativity and Gravitation, 8(10), 809-814.

Mattingly, D. (2005). "Modern tests of Lorentz invariance," Living Reviews in relativity, 8(5), 1-84.

Michaud, F. (1919). "Les théories émissives et le principe de Doppler-Fizeau," Comptes rendus de l'Académie des sciences, 168, 507-509.

Michelson, A. A. (1904). "LXXII. Relative motion of earth and æther," The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 8(48), 716-719.

Miller, D. C. (1925). "Ether-Drift Experiments at Mount Wilson," Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 11(6), 306–314.

Minguzzi, E. (2002). "On the conventionality of simultaneity," Foundations of Physics Letters, 15(2), 153-169.

Misner, C. W.; Thorne, K. S.; Wheeler, J. A.; Kaiser, D. I. (2017). Gravitation, Princeton University Press.

Nissim-Sabat, C. (1984). "A Gedankenexperiment to Measure the One Way Velocity of Light," The British Journal for the Philosophy of Science, 35(1), 62-64.

Pérez, I. (2011). "On the experimental determination of the one-way speed of light," European journal of physics, 32(4), 993.

Poincaré, H. (1898). "La mesure du temps," Revue de métaphysique et de morale, 6(1), 1-13.

Poincaré H. (1905). In Congress of Arts and Science, Vol. I: Philosophy and Mathematics, ed. Rogers, J. (George Bruce Halsted, transl.) Boston: Houghton, Mifflin and Co. Reprinted in (1968). Relativity Theory, Its Origin and Impact on Modern Thought, ed. Williams, L. P., New York: John Wiley & Sons, Inc.

Poincaré H. (1914). Science and Method, New York: Dover Publications.

Poincaré H. (1958). The value of science, New York: Dover Publications.

Reichenbach, H. (1958). The Philosophy of Space and time, New York: Dover Publications. (First German edition: 1928)

Ritz, W. (1908). "Recherches critiques sur l'électrodynamique générale," Annales de Chimie et de Physique, 13, 145–275; reprinted in Société Suisse de Physique, ed., Gesammelte Werke Walther Ritz Œuvres (Paris: Gauthier-Villars, 1911), pp. 317–426.

Robertson, H. P. (1949). "Postulate versus observation in the special theory of relativity," Reviews of modern Physics, 21(3), 378.

Ruderfer, M. (1960). "RELATIVITY-BLESSING OR BLINDFOLD," PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF RADIO ENGINEERS, 48(9), 1661-1662.

Salmon, W. C. (1977). "The philosophical significance of the one-way speed of light," Noûs, 11, 253-292.

Sen, A. (1994). "How Galileo could have derived the special theory of relativity," American Journal of Physics, 62, 157-162.

Stolakis, G. (1986). "Against Conventionalism in Physics: Absolute synchronisation in a single frame of reference," The British Journal for the Philosophy of Science, 37(2), 229-232.

Tolman, R. C. (1912). "Some emission theories of light," Physical Review, 35(2), 136-143.

Tomaschek, R. (1924). "Über das verhalten des lichtes außerirdischer lichtquellen," Annalen der Physik, 378(1-2), 105-126.

Tooley, M. (1997). Time, tense, and causation, Oxford University Press.

Torretti, R. (1983). Relativity and Geometry, Pergamon Press.

Tyapkin, A. A. (1993). Relatività speciale, Milano: Jaca Book.

Vargas, J. G. (1984). "Revised Robertson's test theory of special relativity," Foundations of physics, 14(7), 625-651.

Will, C. M. (2014). "The confrontation between general relativity and experiment," Living reviews in relativity, 17(1), 1-117.

Winnie, J. A. (1970a). "Special relativity without one-way velocity assumptions: Part I," Philosophy of science, 37(1), 81-99.

Winnie, J. A. (1970b). "Special relativity without one-way velocity assumptions: Part II," Philosophy of Science, 37(2), 223-238.

Wojtsekhowski, B. (2014). "On measurement of the isotropy of the speed of light," EPL (Europhysics Letters), 108(3), 31001.

Wojtsekhowski, B., Budker, D. (2021). "Local Lorentz invariance tests for photons and hadrons at the Gamma Factory," Annalen der Physik, 2100141.

Wu, J., Huang, Y. R., Tsao, H. W., Lee, S. L., Chang, S. T., Tsay, H. L., Young, H. T. (2015). "Measurement of the speed of light from extraterrestrial sources," In Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII (Vol. 9608, p. 96080E). International Society for Optics and Photonics.

Záhejský, J., Kolesnikov, V. (1966). "Optical Experiments to verify the Second Postulate of the Special Theory of Relativity," Nature, 212(5067), 1227-1227.

Zhang, Y. Z. (1995). "Test theories of special relativity," General Relativity and Gravitation, 27(5), 475-493.

Zhang, Y. Z. (1997). Special relativity and its experimental foundation, World Scientific.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی