Philosophy of Science, Institute for Humanities and Cultural Studies (IHCS)
Biannual Journal, Vol. 13, No. 1, Spring and Summer 2023, 159-192
Doi: 10.30465/ps.2023.45029.1667

Einstein and Mach's principle

Seyed Saied Mirahmadi*

Abstract

Newton considered the dynamical effects exerted upon accelerating bodies (such as the concavity of the surface of the water in Newton's bucket experiment, etc.) to be caused by their acceleration relative to absolute space. Following Mach's ideas, Einstein, based on the thought that all motion is relative, knew very well that if he could show that the inertial effects are actually due to the acceleration relative to distant matter instead of absolute space, then he would be able to dispose of the Newtonian concepts of absolute space and motion. There is a widespread belief that the general theory of relativity get rid of the preferred (inertial) frames corresponding to Newtonian absolute space and time. In this article, by examining Einstein's thought process in creating the general theory of relativity, the claim: despite Einstein's efforts and contrary to the name of the theory, Mach's principle in the sense of "relativity of all motion" or "inertial forces are exerted by matter, not by absolute spacetime" is neither included in the principles of the general theory of relativity nor results from it, is confirmed. Therefore, the absolute elements such as "absolute rest and motion", "absolute acceleration", "absolute inertial forces" and "absolute spacetime" are yet essentially retained in the general theory of relativity. Due to the epistemological importance of Mach's principle, the effort to provide an efficient physical theory based on this principle continues.

Keywords: general relativity, Mach's principle, relativity of all motion, absolute space, absolute motion, inertial forces.

* PhD holder of philosophy of physics, Baqir al-Olum University, Qom, Iran (I. R.). mirahmadi@bou.ac.ir
Date received: 2023/03/14, Date of acceptance: 2023/06/10

Copyright © 2010, IHCS (Institute for Humanities and Cultural Studies). 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.

فلسفهٔ علم، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
دوفصل‌نامهٔ علمی (مقالهٔ علمی ـ پژوهشی)، سال ۱۳، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۲

اینشتین و اصل ماخ

سید سعید میراحمدی*

چکیده

نیوتن اثرات دینامیکی مشاهده شده برای اجسام شتاب‌دار (مانند فرورفتگی سطح آب در آزمایش سطل نیوتن و غیره) را ناشی از شتاب آن‌ها نسبت به فضای مطلق می‌دانست. اینشتین با دنبال کردن ایده‌های ماخ به خوبی می‌دانست که اگر بتواند بر اساس این فکر که «حرکت» امری کاملاً نسبی است، نشان دهد که اثرات لختی، در واقع، ناشی از شتاب جسم نسبت به ماده دوردست در عالم است، نه نسبت به فضای مطلق، آنگاه توانسته است مفاهیم مطلقِ نیوتنی را به کلی کنار بگذارد. اعتقاد رایجی وجود دارد مبنی بر این که نظریه نسبیت عام، دستگاه‌های مختصات ارجح (چارچوب‌های لخت) مربوط به فضا و زمان مطلق نیوتنی را کنار گذاشته است. در این نوشتار با بررسی سیر اندیشهٔ اینشتین در تدوین نظریه نسبیت عام، صحت این ادعا تایید می‌شود که علی‌رغم تلاش اینشتین و برخلاف نام این نظریه، اصل ماخ به معنای «نسبی بودن حرکت» یا به این معنا: «منشأ اعمال نیروهای لختی، ماده موجود در عالم است، نه فضازمان مطلق»، نه در اصول‌موضوعه نظریه نسبیت عام گنجانده شده و نه از آن نتیجه می‌شود. بنابراین چنین می‌توان گفت که عناصر مطلق مانند «حرکت و سکونِ مطلق»، «شتاب مطلق»، «نیروی لختی مطلق» و «فضازمانِ مطلق» کماکان در نظریه نسبیت عام حضور دارد. با توجه به اهمیت معرفت‌شناختی اصل ماخ، تلاش برای ارائه یک نظریه فیزیکی کارآمد منطبق با این اصل همچنان ادامه دارد.

کلیدواژه‌ها: نظریه نسبیت عام، اصل ماخ، نسبی بودن حرکت، فضای مطلق، حرکت مطلق، نیروهای لختی.

* دکترای فلسفهٔ فیزیک، دانشگاه باقرالعلوم علیه السلام، قم، ایران، mirahmadi@bou.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

Copyright © 2018, IHCS (Institute for Humanities and Cultural Studies). 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

بر خلاف نظریه اتمی قدما در باب حرکت، ارسطو با انکار وجود فضایی مستقل و ذاتاً خالی از جسم به عنوان بستری برای تحقق حرکت واقعی اجسام، در تلاش بود تا تبیینی غیرمطلق از «مکان» و «حرکت مکانی» ارائه دهد (میراحمدی و دیگران، ۱۴۰۱). با این وجود، نیوتن جهت تبیین حرکت اجسام و آثار دینامیکی ناشی از آن، فرض وجود یک «فضای مطلق» (absolute space) را ضروری دانست. وی در ابتدای کتاب اصول خود بیان کرده است که حرکت و سکون نسبی و مطلق (absolute and relative rest and motion) با توجه به خواص (properties)، علل (causes) و آثارشان (effects)، از یکدیگر قابل تشخیص هستند (Newton, 1999: 57-61). او به طور خاص، آزمایشی در مورد سطل آبی که با طناب به سقف آویزان است را مطرح کرده و نتیجه گرفته است که چرخش نسبی بدنه سطل نسبت به آب درون آن هیچ تأثیری در ایجاد فرورفتگی یا تقعر سطح آب ندارد، بلکه اگر خودِ آب، در حال چرخش باشد، در سطح آن، فرورفتگی ایجاد می‌شود و اگر در حال چرخش نباشد، فرورفتگی نیز وجود نخواهد داشت. بنابراین آن چه که منشأ اثرِ چنین تقعری است، چرخش خودِ آب است، نه چرخش سطل نسبت به آب. از آنجا که چرخش و یا به طور کلی حرکت اجسام، پدیده‌ای نسبی است، نیوتن به این سؤال که چرخش خودِ آب نسبت به چه چیزی عامل ایجاد فرورفتگی در سطح آب شده است؟ چنین پاسخ داده است: نسبت به فضای مطلق (و فضای مطلق چیزیست که جدای از اجرام به خودی خود موجود است و حرکت اجرام در آن محقق می‌شود) (Newton, 1999: 58-59).

یک جسم که نسبت به فضای مطلق، شتاب ندارد (یعنی یا ساکن است یا دارای حرکتی یک‌نواخت)، در وقت شتاب‌گرفتن نسبت به فضای مطلق، از خود «مقاومت» نشان می‌دهد که اصطلاحاً به آن «لختی» (inertia) گفته می‌شود. در فیزیک نیوتنی، شکل ساده صورت‌بندی قانون دوم حرکت ($\mathbf{F} = m\,\mathbf{a}$)، تنها برای فضای مطلق یا چارچوب‌های لخت (که نسبت به فضای مطلق، بدون شتاب هستند) صادق است، بدین معنا که شتاب $\mathbf{a}$ در این صورت‌بندی، شتاب نسبت به فضای مطلق یا چارچوب‌های لخت است نه امری نسبی در ارتباط با دیگر اجرام. به عقیده نیوتن، وجود نیروهای لختی، راهی غیرمستقیم جهت پی بردن به وجود فضای مطلق است. شکل قانون دوم حرکت، برای چارچوب‌های شتاب‌دار نسبت به فضای مطلق، پیچیده‌تر است و شامل عبارت‌هایی بیان‌گر نیروهای گریز از مرکز، کوریولیس و نیروی ناشی از شتاب انتقالی چارچوب می‌باشد. این نیروهای لختی در اثر شتاب نسبت به فضای مطلق

ایجاد می‌شوند و دارای منشأ یا علتی عینی که مستقیماً قابل تشخیص باشد نیستند (Newton, 1999).

فضا و حرکت مطلق نیوتنی، از همان ابتدا توسط لایبنیتز (Alexander, 1977)، هویگنس (Stan, 2016) و برکلی (Berkeley, 1988; Suchting, 1961)، مورد نقد و انکار قرار گرفت.

در دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، ماخ (۱۸۳۷–۱۹۱۶) به طور جدی تلاش کرد تا مفاهیم مطلق نیوتنی را به کلی کنار بگذارد. این فکر که «ستارگان ثابت» را به عنوان چارچوب ارجح و منشأ اعمال نیروهای لختی، جایگزینی برای «فضای مطلق» نیوتنی (که مستقیماً قابل‌تشخیص نیست) بدانیم، و این گونه، صورت‌بندی ریاضیاتی مکانیک نیوتنی را با کم‌ترین مقدار تغییرات در مفاهیم، حفظ کنیم، برای ماخ کاملاً راضی‌کننده نبود؛ چرا که معتقد بود «حرکت»، امری کاملاً نسبی است[1] و این مطلب، با ارجح دانستن چارچوب متصل به ستارگان ثابت (و مجموعه چارچوب‌های هم‌ارز با آن) از بین همه چارچوب‌های موجود، درتعارض است. وی مدل بطلمیوسی و مدل کوپرنیکی برای عالم را به طور یکسان درست می‌دانست و معتقد بود مهم نیست ما فکر کنیم زمین به دور محور خود در حال چرخش است (فرض اول)، یا این که زمین غیرچرخان است و ستارگان ثابت به دور آن درحال گردش هستند (فرض دوم). آن چه مهم است این است که اصول مکانیک به گونه‌ای درک شود که نتایج حاصل از فرض دوم با نتایج حاصل از فرض اول دقیقاً یکسان باشد. یعنی این که وضعیت‌های سینماتیکیِ هم‌ارز، لزوماً می‌بایست آثار دینامیکی یکسانی ایجاد کنند (Mach, 1960).

در واقع، ماخ همه سرعت‌ها، جرم‌ها و همه نیروها را نسبی می‌دانست. به اعتقاد وی منشأ نیروهای گریز از مرکز (آزمایش سطل نیوتن) و کوریولیس (آزمایش آونگ فوکو) که به یک جرم وارد می‌شوند، ناشی از اندرکنش آن جرم با دیگر اجرام موجود در عالم است (Mach, 1960).

ایده‌های ماخ به تدریج مورد توجه دیگران واقع شد (Norton, 1995) و اصطلاح «اصل ماخ» (Mach's principle) و «اصل‌موضوع ماخ» (Mach's postulate) برای اولین بار توسط شلیک در سال ۱۹۱۵م. به کار رفت (Schlick, 1915: 185; Norton, 1995: 47).

تحت تأثیر ایده‌های ماخ، اینشتین تلاش فراوانی را آغاز کرد تا با توسعه نظریه نسبیت خاص در قالب نظریه نسبیت عام، فضا و حرکت مطلق نیوتنی را به کلی کنار بگذارد (تحلیل سینماتیکی) و برای مشکل منشأ لختی در فیزیک نیوتنی راه‌حلی ارائه کند

(تحلیل دینامیکی) (Einstein, 1912: 128, 1913a: 154, 1913b: 191, 1913d: 219, 1913c: 197, 1914a: 292, 1914b: 311-313, 1916a: 148-149, 1918a, 2003: 105, 1924: ch. 18) اما سرانجام موفقیت چندانی به دست نیاورد (ن.ک. بخش۳).

نوعِ برداشت و تفسیر اینشتین از ایده‌های ماخ در این بیان وی به خوبی نمایان است:

> این نظریه که در اینجا طرح کلی آن ارائه شد، بر نقصی معرفت‌شناختی فائق می‌آید که نه تنها نظریه نسبیت خاص بلکه مکانیک گالیله نیز با آن درگیر است، و به طور ویژه توسط ماخ مورد تاکید قرار گرفته است. این واضح است که شخص نمی‌تواند یک معنای مطلق به مفهوم شتابِ یک ذره نسبت دهد همان طور که نمی‌تواند آن را به مفهوم سرعت نیز نسبت دهد. شتاب، تنها می‌تواند به عنوان شتاب نسبی یک ذره نسبت به دیگر اجسام تعریف شود. در نتیجه، این بی‌معنا است که به سادگی به یک جسم، یک مقاومت در مقابل شتاب نسبت داده شود (مقاومت لختی جسم در معنای مکانیک کلاسیک). در عوض، مطلوب این خواهد بود که مقاومت لختی، مرتبط باشد با شتاب نسبی جسمِ مد نظر، نسبت به اجسام دیگر(Einstein, 1913c: 197).

همان طور که مشهور است، اینشتین اولین بار در مقاله ۱۹۱۸ درباره نسبیت عام (Einstein, 1918a) عبارت «اصل ماخ» را به صورت زیر تعریف کرد که معنای رایج کنونی برای اصل ماخ نیز همین معناست:

اصل ماخ: G–میدان به طور کامل به وسیله جرم اجسام معین می‌شود. از آن جا که جرم و انرژی– بر طبق نتایج نظریه نسبیت خاص– یکسان هستند، و از آن جا که انرژی به وسیله تانسور انرژی ($T_{\mu\nu}$) توصیف می‌شود، نتیجه می‌شود که G–میدان به وسیله تانسور انرژیِ ماده ایجاد و معین می‌شود.

همان طور که نقل قول مذکور (Einstein, 1913c: 197) نشان می‌دهد، اینشتین برداشت‌های دیگری غیر از این تعریف مشهور نیز از ایده‌های ماخ داشته و در صدد تحقق‌بخشی به آنها بوده است. وی تنها زمانی به تعریف فوق رضایت داد که در ارضای برخی از این ایده‌ها ناکام ماند (Hoefer, 1995). البته خیلی زود روشن شد که نظریه نسبیت عام، تعریف فوق را نیز ارضا نمی‌کند (ن.ک. بخش۳).

نگاهی اجمالی به صفحه ۵۳۰ از کتاب ویرایش شده توسط باربر و فیستر با عنوان «اصل ماخ: از سطل نیوتن تا گرانش کوانتومی» که محصول همایشی با همین عنوان است که در سال ۱۹۹۳م. در شهر توبینگن آلمان برگزار شد، نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر، تفاسیر

بسیار و صورت‌بندی‌های مختلفی از «اصل ماخ» ارائـه شـده اسـت (Barbour et al., 1995: 530) به‌طوری که برخی از آنها با یکدیگر ناسازگارند (Bondi et al., 1997).

در ادامه، دو تعریف برای اصل ماخ ارائه می‌کنیم. تعریف اول، در واقع، قـوی‌تـرین تعریـف برای اصل ماخ است که با ایده‌های مطرح شده توسط ماخ همخـوانی دارد (Mach, 1960; Assis, 2017: ch.14) و اینشـتین نیـز ابتـدا در صـدد ارضـای ایـن معنـا بـوده اسـت (ن.ک. بخـش۳). تعریف دوم نیز در واقع، ضعیف‌ترین تعریف برای اصل ماخ است.

اصل ماخ۱ («نسبی بودن حرکت» Relativity of all motion): حرکـت، امـری نسـبی اسـت و هیچ ناظر یا چارچوب ارجحی وجود ندارد (به عبـارت دیگـر، «حرکـت» هـم از لحـاظ تبیـین سینماتیکی و هم از لحاظ اثرات دینامیکی، امری نسبی است. بنابراین جهـت تبیـین پدیـده‌هـای طبیعی، بـه هـیچ وجـه از مفـاهیم «چـارچوب ارجـح»، «فضـای مطلـق»، «حرکـت مطلـق» یـا «شتاب مطلق» استفاده نمی‌شود).

اصل ماخ۲: منشأ اعمال نیروهای لختی، ماده موجود در عالم است، نه فضازمان مطلق.

این دو تعریف، متباین از یکدیگر نیستند. در واقع، تعریف اول، دارای معنای عامی است کـه شامل تعریف دوم نیز می‌شود. بنابراین امکـان دارد نظریـه‌ای اصـل مـاخ۲ را ارضـا کنـد امـا از ارضای اصل ماخ۱ ناتوان باشد. خطوط کلی دو تعریف فوق را در نقل قول ذکر شده از اینشـتین (Einstein, 1913c: 197) نیز می‌توان یافت. اینشتین، نسبت دادنِ نیروی لختی به مـاده موجـود در عالم (اصل ماخ۲) را نتیجه‌ی نسبی بودن شتاب (قسمتی از محتوای اصل ماخ۱) دانسته است.

در ایـن مقالـه، اسـتعمال عبـارت «اصـل مـاخ» بـه طـور مطلـق و بـدون قرینـه کـافی، بـه گونه‌ای است که استفاده‌ی هر دو معنای فوق از آن صحیح است.

اینشتین ابتدا معتقد بـود کـه پـذیرش «اصـل نسـبیت» (Relativity principle) بـرای ارضـای «نسـبی بـودن حرکـت» و حـذف مفـاهیم مطلـق شـتاب و حرکـت از فیزیـک (اصـل مـاخ۱) کافی است. در واقع، دلیل انتخاب نـام «نسـبیت» بـرای ایـن اصـل توسـط اینشـتین نیـز همـین بـوده اسـت. امـا خیلـی زود روشـن شـد کـه اصـل نسـبیت یـا اصـل همـوردایی عـام[۲] (General Covariance principle)، توان ارضای «نسبی بـودن حرکـت» و حـذف مفـاهیم مطلـق شـتاب و حرکـت از فیزیـک (اصـل مـاخ۱) را نـدارد[۳] (ن.ک. بخـش۳). بنـابراین بایـد توجـه کافی داشت که عنوان «اصل نسـبیت» (یـا همـوردایی عـام) بـا عنـوان «نسـبی بـودن حرکـت» (اصل ماخ۱)، با یکدیگر اشتباه نشود.

هدف این مقاله، نشان دادن اهمیت و جایگاه ویژه اصل ماخ، بیان ویژگی‌های لازم برای ماخی بودن یک نظریه و فراهم کردن بستری برای تأمل پیرامون راه‌کارهای لازم جهت دست‌یابی به نظریه‌ای مبتنی بر این اصل است. نیل به این هدف با بررسی سیر تاریخی تلاش اینشتین جهت ارضای اصل ماخ و مشاهده ناکامی‌های وی در این مسیر و تأمل پیرامون آنها به‌خوبی محقق می‌شود. همچنین با بررسی اصول موضوعه نظریه نسبیت عام و برخی نتایج حاصل از آن، ماخی یا غیرماخی بودن این نظریه نیز به وضوح نمایان می‌شود. از این رو، ابتدا در بخش ۲ به منظور آشکار شدن بیشتر اهمیت اصل ماخ، به بررسی برخی اشکالات ناشی از مفاهیم فضا و حرکت مطلق پرداخته شده و سپس در بخش ۳، تلاش اینشتین جهت ارضای اصل ماخ و میزان موفقیت وی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. جمع‌بندی مطالب در بخش ۴ ارائه شده است.

۲. تأملاتی در باب فضا و حرکت مطلق

تصور کیهان به صورت وجود فضایی ذاتاً مستقل از جسم و نامتناهی از لحاظ ابعاد که اجسامی در آن قرار داده شده است، به هر حال، سؤالاتی را به وجود می‌آورد. همان طور که لایبنیتز اشاره کرده است (Alexander, 1977)، به نظر می‌رسد که حرکت صلب‌گونهٔ کل عالم (همه اجسام عالم) به اندازه‌ای دلخواه مثلاً یک متر به سمت راست، هیچ تغییرِ قابلِ مشاهده‌ای ایجاد نکند. حال سؤال این است که چرا خداوند متعال از بین همه این انتخاب‌ها، این انتخابِ کنونی را انجام داده است و مثلاً همه اجسام عالم را نسبت به حالت کنونی، یک متر در سمت راست قرار نداده است؟ آیا این انتخابِ کنونی مرجّحی داشته است یا این که نه؟ آیا این انتخاب، ترجیح بلا مرجّح و امری محال نیست؟ آیا اصلاً این کار، ترجُّح بلا مرجّح و امری محال نیست؟ همان طور که روشن است، این اشکالات، با فرض پذیرش اصل «امتناع ترجیح بلا مرجح» یا اصل «امتناع ترجُّح بلا مرجح» قابل طرح است.[۴]

سؤالاتی مانند آن چه که در مورد مکانِ اجرام موجود در عالم مطرح شد، در مورد سرعت کل عالم در فضای مطلق نیز قابل طرح است. اگر اجرام موجود در عالم، همین حرکاتِ نسبیِ خود را داشته باشند اما به عنوان یک کل، همگی نسبت به فضای مطلق با سرعتی یکنواخت (ثابت و بر روی یک خط راست) با اندازه‌ای دلخواه در حال حرکت باشند آیا تغییر قابل‌مشاهده‌ای وجود خواهد داشت؟ سرعت کنونی عالم نسبت به فضای مطلق چقدر است؟

آیا انتخاب این سرعت از جانب خداوند متعال مرجّحی داشته است؟ آیا این انتخاب، ترجیح بلا مرجح و امری محال نیست؟ آیا اصلاً این کار، ترجُّح بلا مرجح و امری محال نیست؟

با توجه به قوانین پایستگی، روشن است که مرکز جرم کل عالم به عنوان یک سیستم بسته، نسبت به فضای مطلق، یا ساکن است و یا این که با سرعت ثابت بر روی یک خط راست درحال حرکت است. حال سؤال این است که کدام یک از این دو حالت، واقعیت دارد؟ به عبارت دیگر، آیا مرکز جرم عالم، نسبت به فضای مطلق، واقعاً ساکن است و یا این که با سرعت ثابت در حال حرکت است؟ به راستی، مقدار سرعت مرکز جرم عالم نسبت به فضای مطلق چقدر است؟

اگر چه در نظریه نسبیت، مرکز جرمِ محاسبه شده برای عالَم توسط یک ناظر با ناظر دیگر متفاوت است و هر ناظر، مرکز جرمِ مختص به خود را دارد، اما سؤالات فوق، برای هر ناظر، به‌طور جداگانه قابل طرح و نیازمند پاسخ است.

به طور خلاصه، برخی از مهمترین اشکالات و استدلال‌های ارائه شده علیه فضای مطلق عبارتند از:

۱. حالتی را در نظر بگیرید که در آن، پیکربندی و آرایش اجرام در فضای مطلق مانند پیکربندی کنونی عالم باشد اما این پیکره به گونه‌ای در فضای مطلق قرار گرفته باشد که بر پیکربندی کنونیِ عالم منطبق نباشد. تعدادِ بی‌نهایت از این پیکربندی‌ها (که مشابه پیکربندیِ کنونی عالم باشد اما هیچکدام بر یکدیگر منطبق نباشند) قابل تصور است. آیا وقوعِ یکَ پیکربندی از بین همه پیکربندی‌های ممکن، ترجُّح بلا مرجح و امری محال نیست؟ آیا انتخاب یک پیکربندی از بین بقیه، ترجیح بلا مرجح و امری محال نیست؟

۲. پیکربندی‌های اشاره شده در بند فوق (شماره ۱) را می‌توان به گونه‌ای در نظر گرفت که نسبت به پیکربندی کنونی عالم، با سرعت ثابت بر روی یک خط راست، در فضای مطلق درحال حرکت باشند. تعداد بی‌نهایت از این پیکربندی‌ها (که مشابه پیکربندی کنونی عالم باشند اما با سرعت ثابت بر روی یک خط راست نسبت به پیکربندی کنونی عالم در حال حرکت باشند) قابل تصور است. آیا تمایز موجود بین این پیکربندی‌ها واقعاً قابل‌تشخیص است؟ آیا انتخاب یک پیکربندی از بین بقیه، ترجیح بلا مرجح و امری محال نیست؟ به عبارت دیگر، آیا مرکز جرم عالم نسبت به فضای مطلق، ساکن است و یا این که با سرعت ثابت بر روی خط راست در حال حرکت است؟ آیا وقوع یک سرعت مشخص (به طور مثال، سرعت $۱۰۰\ kmh^{-1}$) از بین بی‌نهایت سرعتِ ممکن، ترجُّح بلا مرجح و امری

محال نیست؟ آیا انتخاب یک سرعت مشخص (به طور مثال، سرعت kmh^{-1} ۱۰۰) برای عالم، از بین بی‌نهایت سرعتِ ممکن، ترجیح بلا مرجح و امری محال نیست؟

۳. نظریات فیزیکی موجودی که فضای مطلق را به رسمیت شناخته‌اند (مانند فیزیک نیوتنی و نظریه نسبیت عام (ن.ک. بخش ۳))، با وجود این که در این نظریات، حرکت نسبت به فضای مطلق، دارای آثار دینامیکیِ قابل مشاهده‌ای است، هیچ راه مشخصی برای تشخیصِ کاملِ فضای مطلق ارائه نکرده‌اند (Einstein, 1914b: 311-313, 1916a: 148-149).

۴. نظریات فیزیکی موجودی که فضای مطلق را به رسمیت شناخته‌اند (مانند فیزیک نیوتنی و نظریه نسبیت عام (ن.ک. بخش ۳))، واقعاً نمی‌توانند نیاز علیت را برآورده کنند؛ چرا که در فیزیک، هیچ پاسخی نمی‌تواند از نظر معرفت‌شناختی رضایت‌بخش باشد، مگر این که دلیل یا علت ذکر شده، یک واقعیتِ قابل مشاهده از تجربه باشد. قانون علیت به عنوان یک بیان درباره جهان تجربه، اهمیت ندارد، مگر وقتی که واقعیاتِ قابل مشاهده در نهایت به عنوان علل و معلول‌ها ظاهر شوند.[۵] از این رو، فضای مطلق که به هیچ وجه قابل شناسایی و مشاهده نیست، نمی‌تواند به عنوان علت بروز آثار دینامیکی در نظر گرفته شود (Einstein, 1916a: 148-149).

۵. حرکت و سکون همه اجسام نسبت به فضای مطلق سنجیده می‌شود اما حرکت و سکون خود این فضای مطلق، امری مطلق در نظر گرفته شده است. آیا حرکتِ فضای مطلق، امری ممکن است؟ آیا فضای مطلق، ساکن است؟ نسبت به چه چیزی ساکن است؟

۶. یکی از اشکالات ماخ نسبت به «فضای مطلق» را اینشتین این گونه بیان کرده است: «این در تعارض با روش تفکر علمی است نسبت به درک یک چیزی (پیوستار فضازمان) که اثر می‌کند اما هیچ تأثیری نمی‌پذیرد» (Einstein, 2003: 58). به عبارت دیگر، پیوستار فضازمانِ مطلق چیزی است که اثر می‌کند بدون این که متأثر شود.

برای روشن‌تر شدنِ اشکال اخیر (شماره ۵)، یک مثال را بررسی می‌کنیم. سطل آبی را درنظر بگیرید، می‌دانیم که اگر این سطل آب نسبت به فضای مطلق، دارای شتاب لختی ثابتی باشد، سطح آب موجود در سطل، حالت افقی خود را از دست داده و به طور مایل خواهد ایستاد. اما سؤال این است که سطل و آبِ موجود در آن از کجا می‌دانند که اکنون نسبت به فضای مطلق دارای شتاب لختی ثابتی هستند و سطح آب می‌بایست تغییر حالت دهد؟ به‌نظر می‌رسد که فضای مطلق خاصیتی دارد که بر اجسامی که نسبت به آن دارای حرکتی با سرعت ثابت بر روی خط راست هستند هیچ اثری نمی‌گذارد اما موجب می‌شود اجسامی که نسبت به آن شتاب لختی دارند تغییر حالت دهند. با این وجود، در فیزیک نیوتنی و نظریه

نسبیت عام (ن.ک. بخش ۳)، هیچ توضیحی نسبت به نحوه تعامل فضای مطلق و اجسام شتاب‌دار ارائه نشده است.

سؤالی اساسی که قابل طرح است و به نظر می‌رسد که در گام نخست، اساساً امکان وجود بُعد یا اتصال (پیوستگی) را مورد هدف قرار داده و در گام بَعد به نسبی یا مطلق بودن مکان یا فضا مرتبط باشد این است که اگر در عالم، همه ابعاد دو برابر شوند، آیا هیچ تغییرِ قابل مشاهده و قابل تشخیصی وجود خواهد داشت؟ آیا مقدار حجم تغییر می‌کند؟ کدام یک از کمیات فیزیکی دچار تغییر می‌شوند؟ آیا مقدار جرم، چگالی، نیروی بین اجرام، سرعت، شتاب، زمان و یا ثابت گرانش دچار تغییر می‌شوند؟ سؤالاتی از این دست، اهمیت «کمیات بدون بُعد» را در فیزیک بیشتر آشکار می‌کند. همچنین این سؤال نیز مطرح است که چرا خداوند متعال ابعاد موجودات را به اندازهٔ کنونی قرار داده و به طور مثال، ابعاد همه موجودات را دو برابرِ مقدار کنونی قرار نداده است؟ آیا انتخاب این اندازهٔ کنونی برای موجودات عالم، از بین بی‌نهایت انتخابِ ممکن، ترجیح بلا مرجّح و امری محال نیست؟ در گام بعد، سؤالاتی از این دست، درصددِ روشن کردن معنا و مفهوم این پرسش هستند که «بُعد»، «اندازه» یا «مقیاس»، در صورت امکانِ وجود، آیا اموری مطلق هستند یا نسبی؟ آیا واحدی مطلق برای اندازه‌گیری بُعد یا فاصله وجودِ دارد؟ اگر همه ابعاد، دو برابر شوند به طوری که حتی واحد اندازه‌گیری نیز دوبرابر شود، آیا اصلاً تغییری وجود خواهد داشت؟ آیا راهی وجود دارد تا ما از این تغییر با خبر شویم؟ به‌نظر می‌رسد این سؤالات، ارتباط نزدیکی با اصل هموردایی عام و بررسی نقش دستگاه‌های مختصات در صورت‌بندی قوانین فیزیک دارند. با این وجود، راه‌حل باربر و همکاران در این زمینه (یعنی مبحث «مطلق یا نسبی بودن اندازه»)، منجر به طرح مبحث «دینامیک شکل» (shape dynamics) شده است (Barbour, 2012; Gomes et al., 2012, 2013; Koslowski, 2014; Mercati, 2018).

مبحث «حرکت» همان گونه که با مکان یا فضا مرتبط است با «زمان» نیز پیوندی ناگسستنی دارد. سؤالاتی که در ادامه مطرح می‌شود در صدد بررسی امکان وجود «سرعت» و «زمان» در جهان و کشف ماهیت آنها هستند. آیا ممکن است سرعت‌های همه حرکات موجود در عالم، به طور مثال، دو برابر شود؟ اگر انتخاب اندازهٔ سرعتِ فعلیِ جهان، هیچ ترجیحی ندارد، چرا خداوند متعال سرعت فعلی را برگزیده است و به طور مثال، آن را دو برابرِ مقدار کنونی قرار نداده است؟ اگر همه سرعت‌ها دو برابر شوند آیا تشخیص آن ممکن است؟ سؤالاتی از این دست نیز قابل طرح است: اگر همه سرعت‌ها دو برابرِ مقدار کنونی می‌بود، الآن

ما به طور مثال می‌بایست در عالم برزخ می‌بودیم و نسل‌های بعدی ما اکنون بر روی زمین زندگی می‌کردند؟ به عبارت دیگر، اگر همه سرعت‌ها دو برابر می‌بود آیا کار جهان زودتر به‌پایان نمی‌رسید و قیامت زودتر برقرار نمی‌گشت؟ آیا قیامت در طول زمان است یا در عرض زمان؟ این سؤالات که معمولاً ذیل مباحث مربوط به «فلسفه زمان» مطرح می‌شوند، به‌طور کلی، به موضوع «گذر زمان» و به طور خاص، به موضوع «سرعت و نرخ گذر زمان» می‌پردازند (Markosian, 1993; Olson, 2009; Smart, 1949).[۶]

در موارد عرفی و روزمرهٔ زندگی به نظر می‌رسد که ما تشخیص میزان سرعت و همچنین علم به یکنواختی یا غیر یکنواخت بودن حرکات را در مقایسه با سرعت ساعت زیستی خود و فرض یکنواخت بودن آن انجام می‌دهیم. آیا چنین نیست که اگر قدرت و سرعت پردازش مغز یک شخص و همچنین سرعت عمل‌کرد اعضاء و جوارح وی، ده برابر مقدار کنونی باشد، حرکات دیگران از دید وی، آهسته به نظر می‌رسد؟ ما از کجا بدانیم که میزان سرعت ساعت زیستی ما همواره ثابت است و معیاری است برای سنجش دیگر سرعت‌ها؟[۷]

۳. اینشتین و «حرکت و فضای مطلق»

در سال ۱۹۰۵م. اینشتین نظریه نسبیت خاص را بر اساس دو اصل‌موضوع زیر بنا کرد (Einstein, 1905):

اصل نسبیت خاص[۸] (Special principle of relativity): شکل قوانین فیزیک در همه دستگاه‌های لخت، یکسان است.[۹]

اصل دوم: مقدار سرعت نور در همه دستگاه‌های لخت در خلأ، ثابت و یکسان است.

ایده نظریه نسبیت عام یعنی این فکر که چگونه می‌توان نظریه نسبیت خاص را که محدود به چارچوب‌های لخت است توسعه داد تا شامل چارچوب‌های غیرلخت نیز بشود، برای اولین بار، در سال ۱۹۰۷م. به طور ناگهانی به ذهن اینشتین خطور کرد. وی به شدت تلاش کرد تا این محدودیت را بردارد (Einstein, 1907, 1982). سپس وی در همان سال، یعنی سال ۱۹۰۷م.، هنگام آماده‌سازی یک مقاله در خصوص نظریه نسبیت خاص برای نشریه «سال‌نامه رادیواکتیویته» Jahrbuch der Radioaktivitat، در پاسخ به درخواست یوهان استارک، متوجه شد که همه قوانین طبیعی، در چارچوب نظریه نسبیت خاص قابل طرح هستند مگر قانون گرانش (Einstein, 1982; Norton, 2007). نکته این بود: علی‌رغم این که رابطه

لختی (inertia) و انرژی به طور صریح به وسیله نظریه نسبیت خاص ارائه شده بود، رابطه بین لختی (inertia) و وزن، یا انرژی میدان گرانشی، روشن نبود. وی به این نتیجه رسید که این مشکل، در چارچوب نظریه نسبیت خاص قابل حل نیست. راه‌حل به طور ناگهانی و در ضمن یک آزمایش فکری برای اینشتین آشکار شد: اگر شخصی در حال سقوط آزاد باشد، وزن خود را احساس نمی‌کند. این فکر ساده، اینشتین را به نظریه گرانش رساند. با پیگیری این فکر که مردِ در حال سقوط آزاد، دارای حرکت شتاب‌دار است و بنابراین آنچه او احساس و قضاوت می‌کند در یک چارچوب مرجع شتاب‌دار روی‌می‌دهد، اینشتین تصمیم گرفت تا نظریه نسبیت خاص را به چارچوب‌های مرجع شتاب‌دار توسعه دهد. احساس اینشتین این بود که با انجام این کار می‌تواند به طور همزمان مشکل گرانش را نیز حل کند. مردِ سقوط‌کننده، وزن خود را احساس نمی‌کند؛ چرا که در چارچوب مرجع وی، یک میدان گرانشیِ جدید وجود دارد که میدان گرانشی زمین را خنثی می‌کند. بنابراین در چارچوب مرجع شتاب‌دار به یک میدان گرانشی جدید نیاز است. حل کامل این طرح کلی که در سال ۱۹۰۷م. به ذهن اینشتین رسید، هشت سال به طول انجامید (Einstein, 1907, 1982).[۱۰]

در اواخر سال ۱۹۱۳م.، استدلال روزنه (hole argument) اینشتین را به این اعتقاد رساند که ارائه یک نظریه فیزیکی بر اساس اصل هموردایی عام، ممکن نیست (Stachel, 1980, 2014; Torretti, 1983: 162-168; Norton, 1987, 2022). پس از دو سال یعنی در اواخر سال ۱۹۱۵م. اینشتین با استفاده از استدلال انطباق نقطه‌ای (point-coincidence argument) به استدلال روزنه پاسخ داد و در نوامبر همان سال، بر اساس اصل هموردایی عام، نظریه نسبیت عام را ارائه کرد[۱۱] (Stachel, 1980; Norton, 1984; Giovanelli, 2021).

اینشتین در مقاله مهم ۱۹۱۶م. به تبیین بنیادهای صورت‌بندی نهایی نظریه نسبیت عام پرداخت (Einstein, 1916a). در این مقاله، هدف اینشتین این بود که نشان دهد چگونه با پذیرش اصل نسبیت، اصل هم‌ارزی (Equivalence principle) و اصل هم‌وردایی عام، می‌توان نظریه نسبیت خاص را توسعه داد به گونه‌ای که نظریه جدید بتواند علاوه بر دستگاه‌های لخت، شامل سایر دستگاه‌ها نیز بشود. وی این سه اصل را این گونه تعریف کرده است (Einstein, 1916a: 148-154):

اصل نسبیت: قوانین فیزیک می‌بایست از چنان ماهیت و طبیعتی برخوردار باشند که آنها [به‌طور یکسان][۱۲] برای دستگاه‌های مرجع در هر نوع از حرکت به کار روند.

اصل هم‌ارزی: فرض می‌کنیم K' یک چارچوب مرجع است که دارای شتاب انتقالی یک‌نواخت نسبت به یک چارچوب لخت است. K' می‌تواند به طور هم‌ارز به صورت یک چهارچوب بدون شتاب تعبیر شود که در آن، فضا–زمان تحت تأثیر یک میدان گرانشی قرار دارد.

اصل هم‌وردایی عام: قوانین عمومی طبیعت به گونه‌ای به وسیله معادلات بیان می‌شوند که برای همه دستگاه‌های مختصات معتبر باشند، یعنی این که، نسبت به همه تعویض‌ها [یِ مختصات] هر چه باشد هم‌وردا باشند (به طور عمومی هم‌وردا).

اینشتین در تبیین اصل نسبیت، بیان کرده است که یک نقص معرفت‌شناسی ذاتی در مکانیک کلاسیک و نظریه نسبیت خاص وجود دارد که توسط ارنست ماخ به آن اشاره شده است. سپس وی با ارائه آزمایش فکریِ «دو جسم چرخان» به تبیین مطلب پرداخته است. از آن‌جا که تبیین اینشتین حاوی نکات مهمی است که ناظر به آنها مطالبی بیان خواهد شد، ترجمه این بخش از مقاله وی ذکر می‌شود:

> [دو جسمِ نرم و انعطاف‌پذیر با اندازه و جنس یکسان به طور آزادانه در فضا در فاصله‌ای بسیار زیاد از همه جرم‌های دیگر و با فاصله‌ای ثابت و نسبتاً زیاد از یک‌دیگر معلّقند به طوری که فقط نیاز است نیروهای گرانشی ناشی از برهم‌کُنش اجزای مختلف یک جسم بر دیگری مد نظر قرار گیرد. این دو جسم، حول خط واصلشان، با سرعت زاویه‌ای ثابت در حال چرخش نسبت به یکدیگرند (شکل ۱).] فقط حرکت نسبی دو جسم است که قابل تشخیص و تأیید است. حال اجازه دهید تصور کنیم که هر یک از اجسام با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیریِ ساکن نسبت به خود، مورد بررسی قرار گرفته و کروی بودن سطح S_1 تأیید شود و سطح S_2 نیز به علت چرخش، یک بیضی‌گون به‌دست آید. حال این سؤال را مطرح می‌کنیم: چه چیزی سبب این تفاوت در دو جسم است؟ هیچ پاسخی نمی‌تواند از نظر معرفت‌شناختی رضایت‌بخش باشد،[۱۳] مگر این که دلیل یا علت ذکر شده، یک واقعیتِ قابل مشاهده از تجربه باشد. قانون علیت به‌عنوان یک بیان درباره جهان تجربه، اهمیت ندارد، مگر وقتی که واقعیاتِ قابل مشاهده درنهایت به عنوان علل و معلول‌ها ظاهر شوند.
>
> مکانیک نیوتنی یک پاسخ رضایت‌بخش به این پرسش نمی‌دهد. بیان آن چنین است: قوانین مکانیک، نسبت به فضای R_1 به کار می‌رود، که نسبت به آن، جسم S_1 ساکن است، نه نسبت به فضای R_2 که نسبت به آن، جسم S_2 ساکن است. اما فضای ارجح R_1 گالیله، که این گونه معرفی شده، صرفاً یک علت مجازی است، و نه یک چیزی که

قابل‌مشاهده باشد. بنابراین روشن است که مکانیک نیوتنی واقعاً نمی‌تواند نیاز علیت را در این موردِ تحت بررسی، برآورده کند، بلکه فقط از لحاظ ظاهری می‌تواند چنین کاری کند، چرا که آن ایجاب می‌کند که علت مجازی R_1 مسؤول تفاوتِ قابل مشاهده در جسم‌های S_1 و S_2 باشد.

تنها پاسخ رضایت‌بخش می‌بایست این گونه باشد که سیستم فیزیکی متشکل از S_1 و S_2، در بین خودش هیچ علت قابل تصوری که رفتار متفاوت S_1 و S_2 بتواند به آن ارجاع داده شود را نشان ندهد. بنابراین آن علت می‌بایست در خارج از این سیستم قرار گرفته باشد. ما باید این را بدانیم که قوانین عمومی حرکت، که در حالت خاص شکل S_1 و S_2 را مشخص می‌کند، می‌بایست به گونه‌ای باشند که رفتار مکانیکی S_1 و S_2، در جنبه‌های کاملاً ضروری، به وسیله اجرام دور دست که ما آنها را در سیستمِ تحتِ بررسی به‌حساب نیاورده‌ایم، به طور جزئی تعیین شود. این اجرام دوردست و حرکاتشان نسبت به S_1 و S_2 می‌بایست به عنوان محل عللِ رفتار متفاوت دو جسم S_1 و S_2 در نظر گرفته شود (آن عللی که می‌بایست قابل مشاهده باشد). آنها [یعنی اجرام دوردست] جایگزین نقش علت مجازی R_1 می‌شوند. از همه فضاهایِ [مختصاتِ] قابل تصور R_1، R_2 و غیره، در هر حالتی از حرکت نسبت به یکدیگر، هیچ موردی وجود ندارد که ما بدون مواجه شدن با ایراد معرفت‌شناختی فوق الذکر، بتوانیم آن را به طور پیشین به عنوان یک دستگاه ارجح تلقی کنیم. قوانین فیزیک می‌بایست از چنان ماهیت و طبیعتی برخوردار باشند که آنها برای دستگاه‌های مرجع در هر نوع از حرکت به کار روند. در امتداد این مسیر، ما به یک توسعه از اصل نسبیت می‌رسیم (Einstein, 1916a: 148-149).

شکل ۱. آزمایش فکری دو جسم چرخان اینشتین: دو جسم، در حال چرخشِ نسبی حول خط واصلشان هستند.

با دقت در آزمایش فکری که اینشتین در توضیح اصل عام نسبیت مطرح کرد، روشن می‌شود که از نظر وی اگر غیر از دو جسم S_1 و S_2، هیچ جسم دیگری در عالم وجود نداشته باشد، آنگاه با وجود چرخش نسبی یک جرم نسبت به دیگری حول خط واصل آنها، هیچ تفاوتی در شکل ظاهری آنها نسبت به یکدیگر وجود نخواهد داشت. این نتیجه، در تقابلی

آشکار با مکانیک نیوتنی است. این مطلب به وضوح نشان می‌دهد که مسأله «نسبی یا مطلق‌بودن حرکت»، موضوعی صرفاً فلسفی و بدون کاربردهای عملی نیست.

نیوتن اثرات دینامیکی مشاهده شده در اجسام متحرک (مانند فرورفتگی سطح آب در آزمایش سطل نیوتن و غیره) را ناشی از شتاب آنها نسبت به فضای مطلق می‌دانست. اینشتین با دنبال کردن ایده‌های ماخ به خوبی می‌دانست که اگر بتواند نشان دهد که «حرکت» امری کاملاً نسبی است و اثرات لختی، در واقع، ناشی از شتاب جسم نسبت به ماده دوردست در عالم است، نه نسبت به فضای مطلق، آنگاه توانسته است مفاهیم نیوتنی «فضای مطلق» و «شتاب مطلق» را به کلی کنار بگذارد. انتقاد صریح اینشتین نسبت به استفاده از مفهوم «فضای مطلق» در مکانیک نیوتنی، نشان می‌دهد که وی در تلاش بوده است تا نظریه خود را به گونه‌ای پیش ببرد که در آن، «حرکت» امری کاملاً نسبی باشد نه مطلق. بیان اینشتین در توضیح اصل نسبیت نشان می‌دهد که وی تعریف ارائه شده برای این اصل را برای ارضای اصل ماخ نیز کافی دانسته است. ظهور عبارت پایانی اینشتین در توضیح اصل نسبیت، حاکی از این است که وی ایراد اصلیِ مکانیک نیوتنی در عدم توانایی ارضای اصل نسبیت (که اینشتین فکر می‌کرد شامل مفاد اصل ماخ نیز می‌باشد) برای حالات شتاب‌دار را این نکته دانسته است که: در این نظریه [مکانیک نیوتنی]، قوانین حرکت به طور یکسان برای همه دستگاه‌های در حال حرکت، قابلِ بکارگیری نیستند.[۱۴]

پس از بیان اصل هموردایی عام، اینشتین توضیح داده است که:

> روشن است که یک نظریه فیزیکی که این اصل [هموردای عام] را ارضا می‌کند، برای اصل عام نسبیت نیز مناسب خواهد بود. برای این که مجموع همه تعویض‌ها [یِ مختصات] در هر صورت شامل آنهایی که منطبق با همه حرکات نسبی دستگاه‌های مختصات سه بعدی می‌باشد، می‌شود (Einstein, 1916a: 153).

و در ادامه، بیان کرده است که:

«اصل عام نسبیت، منجر به این التزام می‌شود که معادلات فیزیک در صورت هر تعویضِ مختصات x_1, x_2, x_3, x_4 هموردا باشند» (Einstein, 1916a: 156-157).

نقل‌قول‌های فوق نشان می‌دهد که اینشتین در زمان ارائه مقاله ۱۹۱۶م.، که در آن بنیادهای صورت‌بندی نهایی نظریه نسبیت عام را ارائه کرده است، بر این باور بوده است که صِرف صورت‌بندی هموردای یک نظریه فیزیکی (یعنی صورت‌بندی تانسوری)، معنای مورد انتظار وی از «نسبیت» را تضمین خواهد کرد.[۱۵] با این وجود، کرچمان در مقاله ۱۹۱۷م. با عنوان

«درباره معنای فیزیکی اصول نسبیت، نظریه نسبیت جدید و اصلی اینشتین» (Kretschmann, 1917) نشان داد که هر قانون مفروضی (از جمله، قوانین حرکت نیوتن، که به هیچ وجه، در مورد حرکات شتاب‌دار، معنای مورد انتظار اینشتین از نسبیت را ارضا نمی‌کنند)، می‌تواند به شکل همموردای عام صورت‌بندی شود، بنابراین ارضاکنندهٔ اصل همموردایی عام خواهد بود. در نتیجه، نیاز به این که یک نظریه دارای شکل همموردای عام باشد، هیچ محدودیتی برای گسترهٔ نظریه‌های قابل قبول ایجاد نمی‌کند، البته که یک چالش برای هوش و ابتکار ریاضی‌دانان است. بنابراین اصل نسبیت ضرورتاً معنای دیگری غیر از همموردایی عام را می‌طلبد؛ چرا که اصل همموردایی عام به هیچ وجه مستلزم این نیست که قوانین ضرورتاً ارضاکنندهٔ اصل نسبیت (شامل شرط «عدم وجود مفاهیم فضا و حرکت مطلق») باشند.

اینشتین در مقاله‌ای بسیار کوتاه که در سال ۱۹۱۸م. با عنوان «درباره پایه‌های نظریه نسبیت عام» منتشر کرد (Einstein, 1918a)، اشکال کرچمان را پذیرفت. اشکال کرچمان باعث شد که اینشتین معنای ماخیِ حرکت را به طور صریح از تحت اصل عام نسبیت خارج کرده و آن را به عنوان یک اصل‌موضوع با عنوان «اصل ماخ» به طور جداگانه ذکر کند (اینشتین در پاورقی ذکر کرده است که برای اولین بار است که وی اصل نسبیت و اصل ماخ را به طور آشکار از یکدیگر جدا کرده است). همچنین از آنجا که اینشتین در این مقاله، معنای اصل همموردایی عام را در اصل نسبیت وارد کرده است، دیگر نیازی به اصل‌موضوع قراردادنِ «اصل همموردایی عام» به طور مجزا (مانند کاری که در مقاله ۱۹۱۶م. انجام داده بود) ندیده است. وی در ابتدای این مقاله، سه اصل زیربنایی نظریه نسبیت، یعنی اصل نسبیت، اصل هم‌ارزی و اصل ماخ را این گونه تعریف کرده است:

اصل نسبیت: قوانین فیزیک صرفاً عباراتی درباره انطباق‌های زمانی–فضایی (temporal-spatial coincidences) هستند؛ بنابراین، آنها تنها بیان طبیعی خود را در معادلات هم‌وردای عام می‌یابند.

اصل هم‌ارزی: لختی (اینرسی) و گرانش در طبیعت پدیده‌های یکسانی (Identical) هستند. از این و از نظریه نسبیت خاص ضرورتاً نتیجه می‌شود که "تانسور بنیادی" متقارن $(g_{\mu\nu})$ خواص متریک فضا، رفتار لختی اجسام در این فضا و همچنین اثرات گرانشی را معین می‌کند. ما حالت فضا که به وسیله این تانسور بنیادی توصیف می‌شود را "G–میدان" (G-field) می‌نامیم.

اصل ماخ: G–میدان به طور کامل به وسیله جرم اجسام معین می‌شود. از آن جا کـه جـرم و انرژی– بر طبق نتایج نظریه نسبیت خاص– یکسان (the same) هستند، و از آن جا که انرژی بـه وسیله تانسور انرژی ($T_{\mu\nu}$) توصیف می‌شود، نتیجه می‌شود که G–میدان به وسیله تانسور انـرژیِ ماده ایجاد و معین می‌شود.

در ادامهٔ این مقاله، اینشتین با پذیرش اشکال کرچمان، این گونه پاسخ داده است:

> کرچمان توجه داده است که اصل نسـبیت، بیـان شـده بـه ایـن صـورت، بیـانی دربـاره واقعیت فیزیکی نیست، یعنی این که بیانی درباره محتوای قوانین طبیعت نیسـت، بلکـه یـک نیاز و تقاضـایی اسـت نسـبت بـه صـورت‌بنـدی ریاضـیاتی آنهـا. ... او فکـر مـی‌کنـد کـه ضروری است معنای متفـاوتی بـه اصـل نسـبیت تخصـیص داده شـود. مـن اسـتدلال اول کرچمان را درست می‌دانم اما باور نـدارم کـه نـوآوری پیشـنهادی وی قابـل توصـیه باشـد. درحالی که هر قانون تجربی می‌تواند به شکل همموردای عام در آورده شـود، اصـل نسـبیت [هموردایی عام] همچنین دربردارنده بار ابتکاریِ قابل توجهی اسـت، کـه خـود را بـه طـور عالی قبلاً در مسأله گرانش اثبات کرده اسـت. ایـن نکتـه چنـین اسـت. در بـین دو دسـتگاه نظری، هـر دو منطبـق بـر تجربـه، فـرد، آنـی را تـرجیح مـی‌دهـد کـه از دیـدگاه حسـاب دیفرانسیل مطلق [حساب تانسوری]، ساده‌تر و روشـن‌تـر باشـد. فـرد فقـط بایـد مکانیـک گرانش نیوتنی را به شکل معادلات همموردای مطلق (چهار بعدی) در بیاورد و دقیقـاً متقاعـد خواهد شد که اصل نسبیت [هموردایی عام]، این نظریه را رد می‌کند، نـه بـر اسـاس اصـول نظری، بلکه بر اساس زمینه‌های عملی! (Einstein, 1918a: 34)

بیان اینشـتین در سـطور پایـانیِ نقـل قـول فـوق، حـاکی از ایـن اسـت کـه بـه زعـم وی، صورت‌بندیِ تانسوریِ مکانیک گرانش نیوتنی، به معادلات بسیار پیچیده‌تر و مبهم‌تری نسبت بـه نظریه نسبیتِ عام منجر خواهـد شـد و همـین امـر، نشـان‌دهنـدهٔ اهمیـت نقـش اصـل نسـبیت (اصل هموردایی عام) در انتخـاب و تـرجیح یـک نظریـه فیزیکـی از میـان مجموعـهٔ نظریـات رقیب است که همه منطبق بر تجربه‌اند. اما بر خلاف این ادعای اینشتین، ارائه یک صورت‌بنـدی تانسوری برای مکانیک گرانش نیوتنی به وسیله کارتـان در سـال ۱۹۲۳م. (Cartan, 1923, 1924, 1925) و چند سال بعد توسط فـردریش (Friedrichs, 1928) نشـان داد کـه ایـن صـورت‌بنـدی، خیلی پیچیده‌تر از صورت‌بندی نظریه نسبیت عام نیست.[۱۶] بنـابراین اینشـتین بـا ارجـاع‌دادن بـه واژه‌هایی مثل «سادگی» و «زیبایی» نیـز نمـی‌توانـد توجیـه‌گـر کـار خـود در تخصـیص معنـای همموردایی عام به اصل نسبیت باشد.

با توجه به اشکال کرچمان روشن است که آن چه که سبب تعمیم نظریه نسبیت خاص به نظریه نسبیت عام از لحاظ فیزیکی شده است، در واقع، دو اصل هم‌ارزی و ماخ هستند، نه اصل نسبیت (هموردایی عام).

برخی نتایج حاصل از نظریه نسبیت عام، ماخی بودن این نظریه را با اشکال مواجه کرده‌اند. به طور مثال، پاسخ شوارتس‌شیلد برای معادلات میدان نظریه نسبیت عام برای شرایط مرزی «در بی‌نهایت»، هندسه مطلق و تخت مینکوفسکی را ارضا می‌کند. این بدین معناست که هندسه، به طور کامل به وسیله ماده مشخص نشده است. اینشتین برای جلوگیری از چنین پاسخ‌هایی که ماخی بودن نظریه را با اشکال مواجه می‌کنند، یک ثابت کیهان‌شناسی λ به معادلات خود اضافه کرد (Einstein, 1917) تا با تضمینِ بسته (متناهی) بودن فضا، مشکل غیرماخی بودن شرایط مرزی در بی‌نهایت رفع شود. اما این پیشنهاد نیز نتوانست مشکل را حل کند؛ چرا که دسیته برای این معادلات جدید، یک پاسخ برای جهانی خالی از ماده ($T_{\mu\nu} = 0$) به دست آورد (de Sitter, 1917; Kerszberg, 1989).

همچنین تاوب، پاسخ‌هایی از معادلات میدان (با فرض $\lambda = 0$) به دست آورد که یک فضازمان منحنی را حتی بدون وجود ماده اجازه می‌دهد (Taub, 1951). روشن است که در جهانی خالی از ماده ($T_{\mu\nu} = 0$)، امکان تعریف «سکون» یا «حرکت یکنواخت» (مربوط به پاسخ‌های تخت خلأ) یا تعریف «شتاب» یا «میدان گرانشی» (مربوط به پاسخ‌های غیرتخت خلأ) اساساً در تعارض با اصل ماخ است. وجود پاسخ‌های خلأ (اعم از تخت و غیرتخت) برای معادلات میدان در نظریه نسبیت عام نشان می‌دهد که این نظریه به طور کامل عاری از فضازمان مطلق نیست. به علاوه، گودل پاسخ‌هایی از معادلات میدان نسبیت عام به دست آورد که در آن، عالم به عنوان یک کل، در حال چرخش نسبت به یک چارچوب لخت موضعی بود (Gödel, 1949). چرخش عالم به عنوان یک کل، تنها نسبت به «فضای مطلق» قابل تصور است نه به عنوان امری نسبی در ارتباط با ماده موجود در عالم.

در مورد ماخی بودن نظریه نسبیت عام، شرودینگر اشکالی مطرح کرده است که قابل‌توجه است. وی در مقاله‌ای با عنوان «امکان تحقق و ارضای شرط نسبیت در مکانیک کلاسیک» که در سال ۱۹۲۵م. منتشر شد بیان کرده است که: مشاهدات اخترشناسان، پیشروی حضیض عطارد را نسبت به پس‌زمینه ستارگان ثابت اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که نظریه نسبیت عام این پیشروی را نسبت به یک سیستم مختصات که در آن پتانسیل‌های گرانشی، شرایط مرزی مشخصی را در بی‌نهایت ارضا می‌کنند، محاسبه می‌کند. به هر حال، ارتباط بین

این شرایط مرزی و حضور جرم‌های ستارگان ثابت به هیچ گونه روشن نیست، چرا که جرم‌های ستارگان ثابت اصلاً در محاسبات وارد نشدند. بنابراین انطباق مشاهده با محاسبه ظاهراً اتفاقی است (Schrödinger, 1925).

با این وجود، اعتقاد رایجی وجود دارد مبنی بر این که نظریه نسبیت عام، دستگاه‌های مختصات ارجح-یعنی چارچوب‌های لخت- مربوط به فضا و زمان مطلق در فیزیک نیوتنی را کنار گذاشته است (Einstein, 2003: 105, 1924: ch. 18; Born, 1962: ch. VII; Mashhoon, 1994). اما باید توجه داشت که کنار گذاشتن چارچوب‌های لختیِ مکانیک نیوتنی، معادلِ ارائه تبیینی کاملاً نسبی از «حرکت» و پیدا کردن یک منبع برای نیروهای لختی است که به طور اساسی با فضازمان مطلق متفاوت باشد. یک جایگزین طبیعی، این تصور است که لختی، معلول تأثیر گرانشی دیگر اجرام در عالم باشد (Einstein, 1916a: 148-149, 2003; Born, 1962: ch. VII). به این طریق، فیزیک کلاسیک تنها شامل کمیت‌های قابل اندازه‌گیری خواهد بود و مفاهیمی مانند فضازمان مطلق کنار گذاشته خواهند شد (Mashhoon, 1994). اما نشان داده شده است که با فرض اعتبار اصل هم‌ارزی اینشتین، تاثیرات گرانشی ماده دوردست نمی‌تواند منشأ اثر لختی باشد (Brans, 1962, 1977). بنابراین «نیروی لختی» در نظریه نسبیت عام کماکان عنصری مطلق است نه نسبی. این مطلب نشان می‌دهد که نظریه نسبیت عام، اصل ماخ۲ (با این تعریف: «منشأ اعمال نیروهای لختی، ماده موجود در عالم است، نه فضازمان مطلق») را ارضا نمی‌کند، و در نتیجه، از ارضای اصل ماخ۱ (با این تعریف: «حرکت امری کاملاً نسبی است») نیز عاجز است.

از آنجا که در نظریه نسبیت عام، یک زمینِ غیرچرخان که توسط یک پوستهٔ ستاره‌ای چرخان احاطه شده است (فرض اول) و یک زمینِ چرخان که توسط یک پوستهٔ ستاره‌ای غیرچرخان احاطه شده است (فرض دوم)، وضعیت‌های متمایزی هستند (Earman, 1970)، می‌توان نتیجه گرفت که مفهوم «چارچوب ارجح» کماکان در نظریه نسبیت عام حضور دارد. به‌علاوه، ترجیح یکی از دو فرض مذکور بر دیگری ما را با مشکل بزرگتری روبرو می‌کند. به‌طور مثال، فرض کنید که نظریه نسبیت عام، وضعیتِ «یک زمینِ چرخان که توسط یک پوستهٔ ستاره‌ای غیرچرخان احاطه شده است» را تأیید کند. با توجه به این که برای سنجش «چرخش»، همواره نیازمند یک معیار هستیم، به هر حال، سؤال اساسی این است که در نظریه نسبیت عام، چرخش زمین و عدم چرخش پوسته ستاره‌ای، نسبت به چه چیزی سنجیده شده است؟ اگر چرخش زمین نسبت به پوسته ستاره‌ای سنجیده شده است، سؤال این است که

عدم چرخش پوسته ستاره‌ای نسبت به چه چیزی سنجیده شده است؟ از آنجا که اگر چرخش زمین نسبت به پوسته ستاره‌ای سنجیده شده باشد، معقول نیست عدم چرخش پوسته ستاره‌ای نسبت به زمینِ چرخان سنجیده شده باشد، در نتیجه، تنها گزینه‌ای که می‌توان عدم چرخش پوسته ستاره‌ایِ را به آن نسبت داد، «فضای مطلق» است.[۱۷] بنابراین از دو حال خارج نیست. یا باید بپذیریم که «چرخش» امری کاملاً نسبی است، یا این که به هر حال باید وجود «فضای مطلق» را بپذیریم. از آنجا که در نظریه نسبیت عام، چرخش، امری نسبی نیست، بنابراین «فضای مطلق» به طور اجتناب‌ناپذیری در این نظریه وجود دارد. آن چه در مورد «چرخش» بیان شد، در مورد «شتاب انتقالی» نیز قابل تطبیق است. این توضیحات نشان می‌دهد که حتی اگر نظریه‌ای اصل ماخ۲ (بدین معنا: منشأ اعمال نیروهای لختی، ماده موجود در عالم است، نه فضازمان مطلق) را ارضا کرد اما از ارضای اصل ماخ۱ (بدین معنا: حرکت، امری نسبی است) ناتوان بود، حضور «فضازمان مطلق» در آن نظریه، اجتناب‌ناپذیر است.[۱۸]

با توجه به مطالب فوق، می‌توان چنین نتیجه گرفت که علی‌رغم اعتقاد رایجی که وجود دارد (Einstein, 2003: 105, 1924: ch. 18; Born, 1962: ch. VII)، منشأ نیروهای لختی در نسبیت عام ضرورتاً مشابه آن در نظریه نیوتن است، یعنی شتاب می‌بایست نسبت به فضازمان مطلق در نظر گرفته شود (Mashhoon et al., 1984: 742; Mashhoon, 1988). بنابراین علی‌رغم این که نظریه نسبیت عام قرار بود بر مفاهیم نسبی بنا شود، بر خلاف نامش هنوز شامل عناصر مطلق (مانند «نیروی لختی» و «فضازمان مطلق») است و مشکل منشأ لختی را حل نکرده است (Lichtenegger et al., 2007). در حقیقت، اصل ماخ نه به طور صریح در اصول‌موضوعه نظریه نسبیت عام گنجانده شده و نه از آن نتیجه می‌شود، یعنی این که فضازمان مطلق کماکان در نظریه اینشتین حضور دارد.

بعد از این که روشن شد، اصل نسبیت (همووردایی عام) دارای محتوایی فیزیکی نیست و پذیرش آن هیچ الزامی نسبت به ارضای اصل ماخ ایجاد نمی‌کند، سؤال اساسی بعدی این است که آیا جهت ارضای اصل ماخ بهتر نیست استفاده از دستگاه مختصات در صورت‌بندی قوانین فیزیک را به کلی کنار بگذریم و از همان ابتدا قوانین را بر حسب کمیات نسبی (فاصله نسبی، سرعت نسبی، شتاب نسبی و غیره) صورت‌بندی کنیم با توجه به این که ظاهراً استفاده از این روش، ساده‌ترین راه تحقق هدف نظریه نسبیت است؟ در ادامه، به این پرسش می‌پردازیم.

اینشتین در مقاله‌ای با عنوان «گفتگو درباره ایرادات و مخالفت‌ها نسبت به نظریه نسبیت» که در سال ۱۹۱۸م. منتشر کرد (Einstein, 1918b)، بین کمیاتی که متعلق است به یک دستگاه

فیزیکی آن گونه که هست (مستقل از انتخاب دستگاه مختصات) و کمیاتی که وابسته به دستگاه مختصات است، تمایز قائل شده است. به بیان وی، یک خواستهٔ روشن و ساده‌ترین راهِ تحققِ هدفِ نظریه نسبیت این است که فیزیک تنها از کمیات نوع اول در قوانینش استفاده کند (یعنی این که به عنوان مثال، در تعریف قوانین مکانیک کلاسیک به جای استفاده از مختصات، تنها از فاصله نسبی بین نقاط مادی و مشتقات آن استفاده شود). وی در ادامه با استشهاد به سیر تکامل تاریخی علم، به غیرعملی بودن این راه حکم کرده و چنین نتیجه گرفته است: «نظریه نسبیت نمی‌تواند از مختصات صرف نظر کند، و بنابراین می‌بایست از مختصات به‌عنوان کمیاتی که نتیجه اندازه‌گیری‌های معینی نیستند استفاده کند» (Einstein, 1918b).

به عنوان یک مثال برای به کارگیری یک کمیت وابسته به دستگاه مختصات در یک قانون فیزیکی می‌توان به کمیت سرعت $\mathbf{v}$ در قانون نیروی لورنتز $\mathbf{F} = q\,(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$، اشاره کرد؛ چرا که در تعبیری که اینشتین در قالب نظریه نسبیت خاص از قانون نیروی لورنتز ارائه داده است، کمیت سرعت موجود در این قانون، کمیتی وابسته به دستگاه مختصات است. البته اینشتین در متن مقاله، قبل از بیان مطلبی که از وی نقل کردیم، به عنوان مثالی برای یک کمیت وابسته به دستگاه مختصات، کمیت «سرعت» در معادله انرژی جنبشی را بیان کرده است.

همان طور که اشاره شد، اینشتین با اشاره به سیر تکامل تاریخی علم، نتیجه گرفته است که تبیین پدیده‌های طبیعی با استفاده از کمیات نسبی (مانند فاصله نسبی، سرعت نسبی، شتاب نسبی و غیره) و بدون به کارگیری دستگاه مختصات، عملاً غیرممکن است، واقعیتی که در علم هندسه، خلاف آن محقق شده است. همان طور که می‌دانیم، در علم هندسه برای بیان و اثبات قضایا از دو روش استفاده می‌شود: یکی استفاده از دستگاه مختصات (روی‌کرد هندسه تحلیلی دکارتی) و دیگری استفاده از کمیات نسبی (روی‌کرد هندسه اقلیدسی). در هندسه اقلیدسی، قضایای هندسه بر اساس کمیات نسبی (فاصله نسبی و زاویه نسبی و غیره) بیان و اثبات می‌شوند اما بعد از اختراع (و یا کشف) و به کارگیری دستگاه مختصات و پایه‌گذاری هندسه تحلیلی توسط دکارت، این امکان به وجود آمد تا علاوه بر امکان بیان قضایای هندسه بر حسب کمیات نسبی، بتوان آنها را بر اساس مؤلفه‌های دستگاه مختصات نیز تجزیه (تحلیل) و بیان کرد. این امر موجب می‌شود تا در بسیاری از موارد، اثبات قضایا ساده‌تر صورت گیرد. با این وجود، هر قضیه‌ای که در هندسه اقلیدسی بر اساس کمیات نسبی قابل بیان و اثبات باشد، در هندسه تحلیلی دکارتی نیز بر اساس مؤلفه‌ها (کمیات وابسته به دستگاه مختصات) قابل بیان و اثبات است. از طرف دیگر، هر قضیه‌ای که در هندسه تحلیلی دکارتی قابل بیان و اثبات باشد،

در هندسه اقلیدسی نیز قابل بیان و اثبات است. به عبارت دیگر، این دو هندسه، کاملاً هم‌ارز هستند. به خلاف علم هندسه، اینشتین ادعا کرده است که در علم فیزیک، تاریخ علم، غیرعملی بودن استفاده از روش کمیات نسبی جهت تبیین پدیده‌ها را نشان داده است. آیا این ادعای اینشتین با واقعیت تاریخی سازگار است؟

عجیب این است که ظاهراً اینشتین اطلاعی از کارهای وبر (۱۸۰۴–۱۸۹۱) در زمینه الکترودینامیک در نیمه قرن نوزدهم (Assis, 1994) که ماکسول نیز آنها را در اثر معروف خود آورده و به شدت تحسین کرده است (Maxwell, 1954) نداشته است. در دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، تیسراند کارهای وبر در حوزه الکترودینامیک را به حوزه گرانش تعمیم داد (Whittaker, 1973: 1/207-208) که ظاهراً اینشتین نسبت به آنها نیز بی اطلاع بوده است. وبر در سال ۱۸۴۶م. بر اساس کمیات نسبی (فاصله نسبی، سرعت نسبی و شتاب نسبی) قانونی برای نیروی بین دو بار الکتریکی ارائه کرد که قادر به تبیین بسیاری از پدیده‌های الکترومغناطیسی است و رقیبی برای نظریه الکترومغناطیس ماکسول محسوب می‌شود (Cavalleri et al., 1998, 2003; Assis, 2000; Wesley, 1990a, b, c). در دهه‌های اخیر، نشان داده شده است که با پذیرش نیروهای گرانشی و الکترودینامیکی وبر[۱۹] به عنوان اصل‌موضوع، می‌توان نظریه‌ای فیزیکی بر اساس کمیات نسبی ارائه کرد که حتی توان تبیین برخی از پدیده‌های نسبیتی و پیشروی حضیض سیارات را دارد (Assis, 2017).

اینشتین سال‌ها بر این عقیده بود که نظریه نسبیت عام، با ارتباط دادن منشأ لختی به ماده موجود در عالم (به عنوان جایگزینی برای فضای مطلق) توانسته است اصل ماخ را به طور کامل ارضا کند، اما او در اواخر عمر، اصل ماخ را ناسازگار با نظریه میدان دانست و رد کرد (Einstein, 1949: 29). با این وجود، وی دو سال قبل از مرگش، ارضای اصل ماخ و غلبه بر مفهوم فضای مطلق را نیازمند تلاشی نمایان و کوششی شگرف دانسته است (Jammer, 1993: xvi).

با توجه به اهمیت اصل ماخ، در دهه‌های اخیر تلاش‌هایی جهت ارائه یک نظریه فیزیکی منطبق با این اصل صورت گرفته است (Sciama, 1953; Brans et al., 1961; Hoyle et al., 1964; Assis, 2017). نظریه شیاما (Sciama, 1953) و برنز–دیکی (Brans et al., 1961) بر مفاهیم «میدان» و «کنش تدریجی» بنا شده‌اند اما نظریه مکانیک نسبی وبر–اسیس (Assis, 2017) و نظریه گرانش هویل–نارلیکار (Hoyle et al., 1964) بر مبنای مفهوم «کنش از راه دور» (action at a distance) استوارند. از بین این تلاش‌ها، نظریه گرانش برنز–دیکی با اقبال بیشتری

روبه‌رو شده است. از این رو، در ادامه، به طور بسیار خلاصه، چارچوب کلی این نظریه را بیان می‌کنیم.[۲۰]

در سال ۱۹۶۱م. برنز و دیکی، بر اساس این تعریف از اصل ماخ: «منشأ لختی (اینرسی) یا جرم یک ذره، یک کمیت دینامیکی است که بوسیله محیط اطراف یا به طور مشخص به وسیله بقیه ماده موجود در عالم تعیین می‌شود»، جایگزینی برای نظریه نسبیت عام ارائه کردند (Brans et al., 1961). این نظریه، یک نظریه گرانش عددی–تانسوری (scalar-tensor) است که در آن، اندرکنش گرانشی، به واسطه میدان تانسوری نسبیت عام و یک میدان عددی محقق می‌شود. ثابت گرانش G، ثابت فرض نمی‌شود. در این نظریه، G^{-1} برابر با یک میدان عددی در نظر گرفته می‌شود که به وسیله ماده موجود در عالم تعیین می‌شود و می‌تواند نسبت به مکان و زمان تغییر کند.

در سال ۱۹۵۳م. دنیس شیاما رابطه‌ای بین ثابت گرانش و ساختار بزرگ–مقیاس جهان به‌دست آورد (Sciama, 1953). یک مثال از چنین رابطه‌ای را در کیهان‌شناسی‌های استاندارد فریدمن می‌توان یافت:

$$\rho_0 = \frac{3{H_0}^2}{4\pi G} q_0 \qquad (۱)$$

حال با استفاده از رابطه $R_0 = c/H_0$ به عنوان طول ویژه و $M_0 = 4\pi\rho_0{R_0}^3/3$ به عنوان جرم ویژه عالم، رابطه فوق را می‌توان چنین نوشت:

$$\frac{1}{G} = \frac{M_0}{R_0 c^2} {q_0}^{-1} \sim \frac{M_0}{R_0 c^2} \sim \sum \frac{m}{r c^2} \qquad (۲)$$

برنز و دیکی با تمسک به معادله فوق، برای محاسبه G^{-1} در یک نقطه از فضا (در فاصله r از جرم m)، از اثر برهم‌نهی (superposition) خطی توزیع $\frac{m}{rc^2}$ استفاده کردند. از آنجا که حل $\frac{m}{r}$ یک معادله موج اسکالر با یک منبع نقطه‌ای با قدرت m است، برنز و دیکی به عنوان اصل‌موضوع پذیرفتند که G به صورت معکوسِ یک میدان اسکالر رفتار می‌کند:

$$G \sim \varphi^{-1} \qquad (۳)$$

که انتظار می‌رود φ یک تابع موج اسکالر که منبعش تمام ماده عالم است را ارضا کند.

با توجه به تعریف G، از بروز پاسخ‌های خلأ نظریه نسبیت عام جلوگیری می‌شود، اما مشکل وجود پاسخ‌های گودل برای نظریه برنز–دیکی نیز همچنان پابرجاست (Agudelo at al., 2016). همان طور که گذشت، به طور کلی، نظریه برنز–دیکی یا هر نظریه‌ای دیگر، در صورتی

می‌توانند ادعا کنند که کاملاً عاری از مفاهیم فضا و حرکت مطلق هستند که علاوه بر حل مشکل منشأ نیروهای لختیِ مرتبط با تجربه روزمره، در آن نظریات، وضعیت‌های سینماتیکیِ هم‌ارز، دارای پاسخ‌های دینامیکی مرتبط و سازگاری باشند.

با توجه به اهمیت معرفت‌شناختی اصل ماخ، تلاش برای ارائه یک نظریه فیزیکی کارآمد منطبق با این اصل همچنان ادامه دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، تلاش اینشتین جهت ارضای اصل ماخ به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. اینشتین در ابتدا معتقد بود که پذیرش اصل نسبیت مستلزم ارضای اصل ماخ و حذف مفاهیم فضا و حرکت مطلق از فیزیک می‌باشد؛ اما خیلی زود روشن شد که اصل نسبیت (یا هموردایی عام) دارای محتوایی فیزیکی نیست و هیچ الزامی نسبت به ارضای اصل ماخ ایجاد نمی‌کند. با این وجود، اعتقاد رایجی وجود دارد مبنی بر این که نظریه نسبیت عام، دستگاه‌های مختصات ارجح (چارچوب‌های لخت) مربوط به فضازمان مطلق را کنار گذاشته است. اما واقعیت این است که اصل ماخ به معنای «نسبی بودن حرکت» یا به این معنا: «منشأ اعمال نیروهای لختی، ماده موجود در عالم است، نه فضازمان مطلق»، نه در اصول‌موضوعه نظریه نسبیت عام گنجانده شده و نه از آن نتیجه می‌شود. در واقع، مشکل منشأ لختی در نسبیت عام، مشابه مشکل آن در فیزیک نیوتنی است. نشان داده شد که عناصر مطلق مانند «چارچوب ارجح»، «شتاب مطلق»، «نیروی لختی مطلق» و «فضازمان مطلق» کماکان در نظریه نسبیت عام حضور دارند. با توجه به اهمیت معرفت‌شناختی اصل ماخ، تلاش برای ارائه یک نظریه فیزیکی کارآمد منطبق با این اصل همچنان ادامه دارد.

پی‌نوشت‌ها

۱. آن چه در انتهای همین بخش از مقاله با عنوان «اصل ماخ۱» تعریف می‌شود، اشاره به همین اعتقاد ماخ دارد.

۲. اصطلاح «هم‌وردا» به وسیله مینکوفسکی در سال‌های ۱۹۰۷–۱۹۰۸م.، معرفی شده بود. اصطلاح «هموردایی» توسط وی در معنای «این‌همانی یا یکسان‌بودن شکل معادلات در دستگاه‌های مختصات مختلف» به کار رفته بود.

۳. بنابراین بهتر این است که «اصل نسبیت» به معنای «نسبی بودن حرکت» باشد نه به معنای اصل همومردایی عام. اینشتین در جایی بیان کرده است که عنوان «نظریه همومردایی عام» برای نظریه وی، با مسمی تر از عنوان «نظریه نسبیت عام» است؛ چرا که نظریه وی کاملاً نسبی نیست و کماکان مفهوم فضا و حرکت مطلق در آن حضور دارد.

۴. لایبنیتز، جهتِ پاسخ به چنین سؤالاتی، از دو اصلِ فلسفی خود یعنی اصلِ «این‌همانیِ تمایزناپذیرها (تشخیص‌ناپذیرها)» (Principle of identity of indiscernibles) و اصل «جهت کافی» (Principle of sufficient reason) بهره گرفته است (Alexander, 1977; Erlichson, 1967). مراد لایبنیتز از این دو اصل به آن چه که ما از آن به عنوان اصلِ «امتناع ترجُّح بلا مرجح» و اصلِ «امتناع ترجیح بلا مرجح» یاد کردیم بسیار نزدیک است.

۵. باید توجه داشت که تأکید بر لزوم وجود علتی فیزیکی و مادی برای یک پدیده فیزیکی، نه تنها به معنای نفی وجود علتی غیرمادی برای جهان فیزیکی و مادی نیست، بلکه خود دلیلی بر لزوم وجود آن است. در تاریخ علم در فرهنگ غرب، معمولا چنین بود که در جایی که علت یک پدیده فیزیکی را نمی‌یافتند آن را به خداوند نسبت می‌دادند گویا این که اگر در جایی علتی طبیعی برای یک پدیده فیزیکی یافته شد، دیگر نیازی به وجود خداوند نیست. اما در فرهنگ اسلامی و قرآنی، یافتن علت فیزیکی برای یک پدیده، نه تنها مانع از نسبت دادن آن پدیده به خداوند نیست بلکه وجود پدیده‌های محدودِ مادی، خود دلیلی بر ضرورت تحقق وجودی نامتناهی و غیرمادی است. در فرهنگ اسلامی، اصرار بر نسبت دادن همه پدیده‌ها به خداوند است که البته این منافاتی با نقش علل مادی (که خود، مسخر قدرت اویند) نیز ندارد. آیات قرآنی، ساده‌ترین امور مثل حرکت ابرها را، هم به خداوند نسبت داده است و هم به بادهایی که مسخر قدرت اویند. آیه «فَلَم تَقتُلُوهُم وَلَكِنَّ اللهَ قَتَلَهُم وَ مَا رَمَيتَ إذ رَمَيتَ وَلَكِنَّ اللهَ رَمَى» (الأنفال: ۱۷) نیز مصداقی از همین معناست. معمولا چنین است که خداوند متعال بوسیله اسباب و علل مادی، جریان امور طبیعی را به پیش می‌برد اما چنین نیست که این امر، عقلاً تخلف‌ناپذیر باشد.

۶. به نظر می‌رسد که ارسطو به این سؤالات نپرداخته است. حتی در جایی که بیان کرده است: «تغییر [یا حرکت] گاهی تند و گاهی کند است، در حالی که زمان چنین نیست؛ به دلیل این که تند و کند به وسیله زمان تعریف می‌شوند اما زمان به وسیله زمان تعریف نمی‌شود. ... بنابراین به طور آشکار، زمان، حرکت نیست.» (Aristotle, Physics 4.10, 218^{b}10-20)، به نظر می‌رسد که منظور وی بررسی حرکت یک یا چند متحرک است نه در نظر گرفتن تغییر سرعت همه حرکات موجود در عالم. اما پاسخ نیوتن که زمان را مطلق می‌داند کاملاً روشن است. از نگاه وی اگر سرعت همه حرکات موجود در عالم، به طور مثال، دو برابر شود و یا حتی اگر همه حرکات موجود در عالم

متوقف شوند، باز هم، زمان به طور همگن و یکنواخت (مستقل از حرکت یا سکون اجسام عالم) به جریان خود ادامه می‌دهد.

۷. البته مطالب گفته شده در حق چون منی صادق است که در حصار مکان و زندان زمان به سختی گرفتار است. زمان و مکان شاید به کلی جور دیگری باشد. چشم‌ها را باید شست، جور دیگر باید دید. چشم امید و هزاران تمنا که باد فیضی وزیدن بگیرد و کامی تشنه نیز کاسهٔ تهی رو به آسمان گرفته باشد!

۸. عبارت «Special principle of relativity» که به وسیله اینشتین در این منبع (Einstein, 1924: Ch.18) به‌کار رفته است، به طور دقیق‌تر می‌بایست به صورت «اصل خاص نسبیت» ترجمه شود اما ترجمه آن به صورت «اصل نسبیت خاص» برای ذهن مأنوس‌تر به نظر می‌رسد.

۹. اینشتین معتقد بوده است که مفاد اصل نسبیت آن گونه که بیان شد، مستلزم این است که «هیچ دستگاه لخت ارجحی وجود ندارد» (Einstein, 1924: ch.18). در ادامه، روشن خواهد شد که این اعتقاد اینشتین صحیح نیست.

۱۰. بسیاری معتقدند که به کارگیری گرانش در چارچوب نظریه نسبیت خاص و دست‌یابی به یک نظریه گرانش نسبیتی، هدف اصلی اینشتین از توسعه نظریه نسبیت خاص و ایجاد نظریه نسبیت عام بوده است (نقل از: Rindler, 1977: 10). این اعتقاد ناشی از خلط «هدف» با «وسیله» است.

۱۱. قبل از اینشتین، کرچمان در مقاله (Kretschmann, 1915a, 1915b) به استدلال انطباق نقطه‌ای اشاره کرده است. کرچمان در مقاله ۱۹۱۷م. بر اساس پذیرش استدلال انطباق نقطه‌ای، اشکالی جدید علیه اینشتین مطرح کرد (Giovanelli, 2013). وی نشان داد که تخصیص معنای «هموردایی عام» به اصل نسبیت توسط اینشتین در مقاله ۱۹۱۶م. (Einstein, 1916) بیانی درباره واقعیت فیزیکی، یعنی درباره محتوای قوانین طبیعت نیست، بلکه یک نیاز و تقاضایی است نسبت به صورت‌بندی ریاضیاتی آنها. بنابراین این تعریف ارائه شده توسط اینشتین برای اصل نسبیت، توان ارضای معنای فیزیکی مورد نظر وی (یعنی «حذف مفاهیم فضا و حرکت مطلق») را ندارد. در نتیجه، جهت حذف مفاهیم فضا و حرکت مطلق باید معنایی غیر از «هم‌وردایی عام» به اصل نسبیت تخصیص داده شود (Kretschmann, 1917).

۱۲. اینشتین در ادامه، توضیح داده است که این اصل، توسعه‌ای از اصل خاص نسبیت است. بنابراین به دلیل استفاده وی از عبارت بین قلاب در تعریف اصل خاص نسبیت، در اینجا نیز این عبارت را اضافه کردیم تا در فهم مطلب کمک کند.

۱۳. در اینجا، اینشتین این مطلب را به عنوان پاورقی اضافه کرده است: «البته یک پاسخ می‌تواند از دیدگاه معرفت‌شناختی رضایت‌بخش باشد، و هنوز از نظر فیزیکی نادرست باشد اگر در تعارض با دیگر تجربه‌ها باشد».

۱۴. در ادامه، روشن خواهد شد که تعریف ارائه شده توسط اینشتین برای اصل نسبیت، توان به‌دوش‌کشیدن معنایی که وی از این اصل انتظار داشته و در صدد تبیین و تعریف آن بوده است را ندارد.

۱۵. اصل هموردایی عام تا سال ۱۹۱۶م. نزد اینشتین جایگاه بسیار ویژه‌ای داشته است؛ چرا که وی این اصل را نه تنها برای ارضای اصل نسبیت عام (General Relativity principle) بلکه برای ارضای اصل هم‌ارزی نیز کافی می‌دانسته است (Einstein, 1916b).

۱۶. در کتاب درسی (Misner et al., 1973: ch.12)، بر مبنای روش کارتان، یک صورت‌بندی تانسوری برای مکانیک گرانش نیوتنی ارائه شده است.

۱۷. این گزاره همواره صحیح است، مگر این که قائل شویم اساساً چرخش برای پوسته ستاره‌ای ممتنع است.

۱۸. این گزاره همواره صحیح است، مگر این که یا چرخش زمین و یا چرخش پوسته ستاره‌ای را ذاتاً امری ممتنع بدانیم.

۱۹. قانون نیروی الکترودینامیکی وبر چنین است:

$$\mathbf{F}_{ji} = \frac{q_i q_j}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\hat{\mathbf{r}}_{ij}}{r^2{}_{ij}}\left(1 - \frac{\dot{r}^2{}_{ij}}{2c^2} + \frac{r_{ij}\ddot{r}_{ij}}{c^2}\right),$$

$\mathbf{F}_{ji}$ نیرویی است که از طرف بار q_j بر بار q_i وارد می‌شود. نقطه در بالای حروف، نشان‌دهنده مشتق نسبت به زمان است (دو نقطه، نشان‌دهنده مشتق دوم است). ε_0 ثابت گذردهی خلأ، c سرعت نور در خلأ، $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$ بردار فاصلهٔ نسبی ($\hat{\mathbf{r}}_{ij}$ بردار یکه در جهت $\mathbf{r}_{ij}$ است) و $\dot{r}_{ij}$ و $\ddot{r}_{ij}$ به ترتیب سرعت و شتاب نسبی بارها در امتداد خط واصلشان می‌باشد. قانون نیروی گرانشی وبر نیز مشابه قانون نیروی الکترودینامیکی وی است.

۲۰. در تبیین نظریه گرانش برنز–دیکی، نویسنده از مقاله (Narlikar, 2011) استفاده کرده است.

کتاب‌نامه

میراحمدی، سید سعید، سخاوتیان، سید امیر، محسن‌زاده گنجی، مجید (۱۴۰۱). «ارسطو و اصل ماخ»، فلسفه علم، ۱۲(۱)، ۱۸۳–۲۰۳.

Agudelo, J. A., Nascimento, J. R., Petrov, A. Y., Porfírio, P. J., Santos, A. F. (2016). "Gödel and Gödel-type universes in Brans–Dicke theory," Physics Letters B, 762, 96-101.

Alexander, H. G. (ed.) (1977). The Leibniz-Clarke Correspondence, Manchester: Manchester University Press.

Assis, A. K. T. (2017). Relational mechanics and Implementation of Mach's Principle with Weber's Gravitational Force, Montreal: Apeiron.

Assis, A. K. T. (1994). Weber's electrodynamics, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Assis, A. K. T. (2000). "Comment on 'Experimental proof of standard electrodynamics by measuring the self-force on a part of a current loop'," Physical Review E, 62(5), 7544.

Barbour, J. (2012). "Shape dynamics. An introduction." In: Quantum Field Theory and Gravity: Conceptual and Mathematical Advances in the Search for a Unified Framework (pp. 257-297). Basel: Springer Basel.

Barnes, J. (1984). Complete works of Aristotle, The revised Oxford translation. Princeton University Press.

Brans, C. H. (1962). Mach's principle and the locally measured gravitational constant in general relativity. Physical Review, 125(1), 388.

Berkeley, G. ([1710] 1988). The principles of Human Knowledge, Edited by Roger Woolhouse, London: Penguin Books.

Born, M. (1962). Einstein's Theory of Relativity, New York: Dover.

Brans, C. H., Dicke, R. H. (1961). "Mach's principle and a relativistic theory of gravitation," Physical review, 124(3), 925.

Brans, C. H. (1977). "Absence of Inertial Induction in General Relativity," Phys. Rev. Lett., 39 (14), 856-7.

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

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

Cartan, É. (1925). "Sur les variétés à connexion affine, et la théorie de la relativité généralisée (deuxième partie)," Ann. Sci. Éc. Norm. Supér, 42, 17-88. (In French)

Cavalleri, G., Bettoni, G., Tonni, E., Spavieri, G. (1998). "Experimental proof of standard electrodynamics by measuring the self-force on a part of a current loop," Physical review E, 58(2), 2505.

Cavalleri, G., Cesaroni, E., Tonni, E., Spavieri, G. (2003). "Interpretation of the longitudinal forces detected in a recent experiment of electrodynamics," The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics, 26(2), 221-226.

de Sitter, W. (1917). "On the curvature of space," In: (1918). Proc. Kon. Ned. Akad. Wet., Vol., 20, p. 229-243.

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

Einstein, A. (1905). "On the Electrodynamics of Moving Bodies." In: A. Einstein, H. A. Lorentz, H. Weyl and H. Minkowski (1952). The Principle of Relativity, p. 35-65, New York: Dover.

Einstein, A. (1907). “On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn from It.” In: Stachel, J., et al., Eds., Beck, A. (translators) (2002). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1900-1909, Vol. 2, p. 252-311, Princeton University Press, Princeton.

Einstein, A. (1912). “Is There a Gravitational Effect Which Is Analogous to Electrodynamic Induction?” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 126-129, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A., Grossmann, M. (1913a). “Outline of a Generalized Theory of Relativity and of a Theory of Gravitation.” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 151-188, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1913b). “Theory of Gravitation.” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 190-191, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1913c). “Physical Foundations of a Theory of Gravitation.” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 192-197, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1913d). “On the Present State of the Problem of Gravitation.” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 198-222, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1914a). “On the Theory of Gravitation.” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 291-292, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1914b). “On the Relativity problem.” In: A. Beck (translator) (1996). The Collected Papers of Albert Einstein, the Swiss Years: Writings, 1912-1914, Vol. 4, p. 306-314, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1916a). “The Foundation of the General Theory of Relativity.” In: A. Engel (translator) (1997). The Collected Papers of Albert Einstein, the Berlin Years: Writings, 1914-1917, Vol. 6, p. 146-200, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1916b). “On Friedrich Kottler’s Paper: ‘On Einstein’s Equivalence Hypothesis and Gravitation’.” In: A. Engel (translator) (1997). The Collected Papers of Albert Einstein, the Berlin Years: Writings, 1914-1917, Vol. 6, p. 237-239, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1917). “Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity.” In: A. Engel (translator) (1997). The Collected Papers of Albert Einstein, the Berlin Years: Writings, 1914-1917, Vol. 6, p. 421-232, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1918a). “On the Foundations of the General Theory of Relativity.” In: A. Engel (translator) (2002). The Collected Papers of Albert Einstein, the Berlin Years: Writings, 1918-1921, Vol. 7, p. 33-35, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1918b). “Dialogue about Objections to the Theory of Relativity.” In: A. Engel (translator) (2002). The Collected Papers of Albert Einstein, the Berlin Years: Writings, 1918-1921, Vol. 7, p. 66-75, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Einstein, A. (1982). “How I created the theory of relativity?” (Translated by Yoshimasa A. Ono from notes taken by Jun Ishiwara from Einstein’s lecture in Kyoto on 14 Dec 1922), Physics today, 35: 8, 45-47.

Einstein, A. (1924). Relativity: the special and the general theory. Methuen & Co Ltd.

Einstein, A. (2003). The Meaning of Relativity, Routledge.

Einstein, A. (1949). “Autobiographical Notes.” In: Albert Einstein, Philosopher-Scientist. Paul A. Schilpp, ed. Evanston, Illinois: Library of Living Philosophers.

Erlichson, H. (1967). “The Leibniz-Clarke controversy: absolute versus relative space and time,” American Journal of Physics, 35: 89–98.

Friedrichs, K. (1928). “Eine invariante formulierung des Newtonschen gravitationsgesetzes und des grenzüberganges vom Einsteinschen zum Newtonschen gesetz,” Mathematische Annalen, 98(1), 566-575. (in German)

Giovanelli, M. (2021). “Nothing but coincidences: the point-coincidence and Einstein’s struggle with the meaning of coordinates in physics,” European Journal for Philosophy of Science, 11(2), 45.

Giovanelli, M. (2013). “Erich Kretschmann as a proto-logical-empiricist: Adventures and misadventures of the point-coincidence argument,” Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 44(2), 115-134.

Gomes, H., Koslowski, T. (2012). “The link between general relativity and shape dynamics,” Classical and Quantum Gravity, 29(7), 075009.

Gomes, H., Koslowski, T. (2013). “Frequently asked questions about shape dynamics,” Foundations of Physics, 43, 1428-1458.

Gödel, K. (1949). “An example of a new type of cosmological solutions of Einstein’s field equations of gravitation,” Rev. Mod. Phys., 26, 447-450.

Grünbaum, A. (1957). “The philosophical retention of absolute space in Einstein’s General Theory of Relativity,” The Philosophical Review, 66(4), 525-534.

Hoefer, C. (1995). “Einstein’s Formulations of Mach’s Principle.” In: Barbour, J. B., Pfister, H. (Editors) (1995). Mach’s Principle — From Newton’s Bucket to Quantum Gravity, pages 67–87, Boston, Birkhäuser.

Hoyle, F., Narlikar, J. V. (1964). “A new theory of gravitation,” Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 282(1389), 191-207.

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

Kerszberg, P. (1989). "The Einstein-de Sitter Controversy of 1916-1917 and the Rise of Relativistic Cosmology." In: Howard, D., Stachel, J. (Eds.) (1989). Einstein and the History of General Relativity, Einstein Studies, Vol. 1, p. 325-366, Boston: Birkhauser.

Koslowski, T. A. (2014). "Shape dynamics," In: Relativity and Gravitation: 100 Years after Einstein in Prague (pp. 111-118), Springer International Publishing.

Kretschmann, E. (1915a). "Über die prinzipielle Bestimmbarkeit der berechtigten Bezugssysteme beliebiger Relativitätstheorien, Part I," Annalen der Physik, 23, 907–942. (In German)

Kretschmann, E. (1915b). "Über die prinzipielle Bestimmbarkeit der berechtigten Bezugssysteme beliebiger Relativitätstheorien, Part II," Annalen der Physik, 23, 943–982. (In German)

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)

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

Mach, E. (1960). The Science of Mechanics — A Critical and Historical Account of Its Development, La Salle, Illinois: Open Court Press, 6th edition. Translated by J. McCormack.

Markosian, N. (1993). "How fast does time pass?" Philosophy and Phenomenological Research, 53(4), 829-844.

Mashhoon, B. (1994). "On the origin of inertial accelerations," Il Nuovo Cimento B (1971-1996), 109(2), 187-199.

Mashhoon, B., Hehl, F. H., Theiss, D. S. (1984). "On the gravitational effects of rotating masses: the Thirring-Lense papers," General Relativity and Gravitation, 16:711–750.

Mashhoon, B. (1988). "Complementarity of absolute and relative motion," Physics Letters A, 126:393–399.

Maxwell, J. C. (1954). A Treatise on Electricity and Magnetism, New York: Dover, 2 volumes.

Mercati, F. (2018). Shape dynamics: Relativity and relationalism. Oxford University Press.

Misner, C. W., Thorne, K. S., Wheeler, J. A. (1973). Gravitation, Macmillan.

Narlikar, J. V. (2011). "Mach's principle," Resonance, 16(4), 310-321.

Newton, I. (1999). The principia: Mathematical principles of natural philosophy (I. B. Cohen & A. Whitman, Trans.). Berkeley: University of California Press (third edition of Principia originally published 1727).

Norton, J. D. (1984). "How Einstein Found His field Equations. 1912–1915," Historical Studies in the Physical Sciences, 14, 253–316.

Norton, J. D. (1987). “Einstein, the Hole Argument and the Reality of Space,” In: Forge, J. (Ed.) (1987) Measurement, Realism, and Objectivity. Essays on Measurement in the Social and Physical sciences, Dordrecht, Boston/London: Kluwer, 153–188.

Norton, J. D. (1995). “Mach’s principle before Einstein.” In: Barbour, J. B., Pfister, H. (Editors) (1995). Mach’s Principle — From Newton’s Bucket to Quantum Gravity, pages 9–57, Boston, Birkhäuser.

Norton, J. D. (2007). “Einstein, Nordström, and the early demise of scalar, Lorentz covariant theories of gravitation.” In: Janssen, M., Norton, J. D., Renn, J., Sauer, T., Stachel, J. (Eds.) (2007). The genesis of general relativity, Vol. 3, 413- 487.

Norton, J. D. (2022), “The Hole Argument,” The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2022 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL =

<https://plato.stanford.edu/archives/win2022/entries/spacetime-holearg/>.

Olson, E. T. (2009). “The rate of time’s passage,” Analysis, 69(1), 3-9.

Rindler, W. (1977). Essential relativity: special, general, and cosmological. (2nd Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schlick, M. (1915). “The philosophical significance of the principle of relativity.” In: H. L. Mulder, H. L., van de Velde-Schlick, B. F. B. (Editors) (1979). Philosophical Papers of Moritz Schlick, volume 1, pages 153–189. Reidel, Dordrecht. Translated by P. Heath.

Schrödinger, E. (1925). “The possibility of fulfillment of the relativity requirement in classical mechanics.” In: Barbour, J. B., Pfister, H. (Editors) (1995). Mach’s Principle — From Newton’s Bucket to Quantum Gravity, pages 147–158, Boston: Birkhäuser. (Translated by J. B. Barbour).

Sciama, D. W. (1953). “On the origin of inertia,” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 113(1), 34-42.

Smart, J. J. C. (1949). “The river of time,” Mind, 58.232, 483-494.

Stachel, J. (1980). “Einstein’s Search for General Covariance, 1912–1915.” The paper was first read at the Ninth International Conference on General Relativity and Gravitation, Jena in 1980; repr. In: Stachel, J. (2002). Einstein from ‘B’ to ‘Z’, Boston: Birkhäuser, 301-337.

Stachel, J. (2014). “The Hole Argument and Some Physical and Philosophical Implications,” Living Reviews in Relativity, 17, 1-66.

Stan, M. (2016). “Huygens on Inertial Structure and Relativity,” Philosophy of Science, 83(2), pp.277-298.

Suchting, W. A. (1961). “Berkeley’s Criticism of Newton on Space and Motion,” Isis, 58: 186–97.

Taub, A. H. (1951). “Empty space-times admitting a three parameter group of motions,” Ann. Math. 53, 472-490.

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

Wesley, J. P. (1990a). "Weber electrodynamics, Part I. General theory, steady current effects," Foundations of Physics Letters, 3(5), 443-469.

Wesley, J. P. (1990b). "Weber electrodynamics, part II unipolar induction, Z-antenna," Foundations of Physics Letters, 3(5), 471-490.

Wesley, J. P. (1990c). "Weber electrodynamics: part III. Mechanics, Gravitation," Foundations of Physics Letters, 3(6), 581-605.

Whittaker, E. T. (1973). A History of the Theories of Aether and Electricity, Vol. 1: The Classical Theories, Vol. 2: The Modern Theories, New York: Humanities Press.