



Metaphysics
University of Isfahan E-ISSN: 2476-3276
Vol. 17, Issue 1, No. 39, Spring and summer 2025

(Research Paper)

Newton versus Lagrange: Two Rival Interpretations of Spacetime

Mohammad Ebrahim Maqsudi

Department of Philosophy of Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
moh.maghsoudi@student.sharif.ir

Seyed Ali Taheri Khorramabadi 

Department of Philosophy of Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
ataheri@sharif.edu

Abstract

The conflict between the Newtonian and the Leibnizian picture of spacetime is well-known and widely discussed in the literature. However, two competing metaphysical pictures of spacetime have not been addressed so far: The Newtonian and the Lagrangian pictures. According to the Newtonian picture, spacetime can be considered as the time evolution of a spatial hypersurface. According to the Lagrangian picture, spacetime is a unified whole that can be examined in an all-at-once manner, and its (temporal) evolution is not meaningful, except locally or quasi-locally. Although the Newtonian picture has been the dominant metaphysical picture since Newton's time, our explicit familiarity with these two competing pictures is recent. It is rooted in Smolin's criticism of modern cosmology and Wharton's research on the foundations of quantum mechanics. Here, we describe the views of Smolin and Wharton, then we will argue that two famous formulations of general relativity, namely the Hamiltonian formulation and the Lagrangian formulation, require the Newtonian and the Lagrangian picture, respectively. Also, we will argue that: (1) the Lagrangian picture is more compatible with the philosophy of relativity theory than the Newtonian picture, while the Newtonian picture is only acceptable for practical and computational purposes. And, (2) the Lagrangian picture is universal and applicable to any spacetime, while the Newtonian picture can only be used for certain spacetimes. Therefore, the Lagrangian picture is a more plausible metaphysical picture than the Newtonian.

Keywords: Spacetime, Lagrangian, Hamiltonian, Smolin, Wharton, Newtonian Schema.

– Corresponding Author

This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)



Maqsudi, M. E., & Taheri Khorramabadi, S. A. (2024). Newton versus Lagrange: Two Rival Interpretations of Spacetime. *Metaphysics*, (), -. doi: 10.22108/mp.2024.141023.1552



: [10.22108/mp.2024.141023.1552](https://doi.org/10.22108/mp.2024.141023.1552)



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



دوفصلنامه علمی متافیزیک

دوره ۱۷، شماره اول (پیاپی ۳۹)، بهار و تابستان ۱۴۰۴ ص ۸۷-۱۰۰

تاریخ وصول: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

(مقاله پژوهشی)

نیوتن در برابر لاگرانژ: دو تفسیر از فضا زمان

محمد ابراهیم مقصودی، دانشجوی دکترا گروه فلسفه علم، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

moh.maghsoudi@student.sharif.ir

سید علی طاهری خرم آبادی ^{ID}،*، استادیار گروه فلسفه علم، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

ataheri@sharif.edu

چکیده

درباره مناقشه میان تصویر نیوتنی از فضا زمان و تصویر لایبنیتزی از آن تا کنون بسیار بحث شده است؛ اما دو تصویر متافیزیکی رقیب دیگر از فضا زمان وجود دارند که تا کنون بررسی نشده‌اند. این دو تصویر عبارت‌اند از: «تصویر نیوتنی» و «تصویر لاگرانژی». در «تصویر نیوتنی»، فضا زمان را می‌توان به صورت تحول زمانی رویه‌ای فضایی در نظر گرفت. در «تصویر لاگرانژی»، فضا زمان کلی یکپارچه است که تمام آن به صورت یکجا بررسی می‌شود و تحول (زمانی) جزئی از آن، مگر به صورت موضعی یا محلی، معنادار نیست. اگرچه تصویر نیوتنی تصویر متافیزیکی غالب بوده است، آشنایی ما با این دو تصویر رقیب جدید است و در انتقادات اسمولین به کیهان‌شناسی مدرن و پژوهش‌های وارتون در مبانی مکانیک کوانتومی ریشه دارد. در این نوشتار، آرای اسمولین و وارتون را شرح می‌دهیم و استدلال خواهیم کرد که دو صورت‌بندی معروف نسبیت عام، یعنی صورت‌بندی هامیلتونی و صورت‌بندی لاگرانژی، به ترتیب از تصویر نیوتنی و تصویر لاگرانژی بهره می‌برند. همچنین، استدلال می‌کنیم (۱) تصویر لاگرانژی بیش از تصویر نیوتنی با روح و فلسفه کلی نظریه نسبیت سازگار است؛ در حالی که تصویر نیوتنی فقط برای مقاصد عملی و محاسباتی قابل قبول است و (۲) تصویر لاگرانژی جهان‌شمول است و برای هر فضا زمانی کاربرد دارد؛ در حالی که تصویر نیوتنی فقط در رابطه با فضا زمان‌هایی ویژه به کار می‌رود؛ بنابراین، تصویر لاگرانژی نسبت به تصویر نیوتنی تصویر متافیزیکی پذیرفتنی‌تری است.

واژگان کلیدی. فضا زمان، لاگرانژی، هامیلتونی، اسمولین، وارتون، طرح‌واره نیوتنی.

* نویسنده مسئول

This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)



مقصودی، محمد ابراهیم & طاهری خرم آبادی، سید علی. (۱۴۰۳). نیوتن در برابر لاگرانژ: دو تفسیر از فضا زمان متافیزیک



: 10.22108/mp.2024.141023.1552

۱- مقدمه

درباره مناقشه میان تصویر نیوتنی از فضا زمان^۱ و تصویر لایب‌نیتزی از آن تا کنون بسیار بحث شده است. بخشی بزرگ از ادبیات فلسفه فضا زمان به این مناقشه اختصاص یافته است که فضا زمان همچون ظرفی است که ماده عالم در آن ریخته شده است یا چیزی نیست جز نسبت فضایی زمانی میان اجزای ماده موجود در عالم. قدمت این مناقشه به دیرزمانی پیش از ارائه نسبیت عام بازمی‌گردد؛^۲ اما نسخه‌هایی دائماً به‌روزشونده از آن ارائه شده‌اند؛^۳ اما این دو تصویر تنها دو گانه مناقشه‌برانگیز در رابطه با فهم ما از فضا زمان نیستند. دو تصویر متافیزیکی رقیب دیگر از فضا زمان را می‌توان ارائه کرد که می‌توانند به اندازه مناقشه میان تصویر نیوتنی و تصویر لایب‌نیتزی پراهمیت باشند. این دو تصویر متافیزیکی رقیب را که موضوع نوشتار حاضر هستند، «تصویر نیوتنی» و «تصویر لاگرانژی» می‌نامیم.

در «تصویر نیوتنی»، فضا زمان عبارت است از تحول زمانی فضا؛ البته این به معنای آن نیست که تصویر نیوتنی به فضا و زمان مستقل از هم پایبند است و با روح نظریه نسبیت در تعارض قرار می‌گیرد. طبق این تصویر، اگرچه فضا به نحو مستقل از زمان و زمان به نحو مستقل از فضا وجود ندارد، هویت متحد فضا زمان را می‌توان به صورت

تحول زمانی رویه‌ای فضایی در نظر گرفت.^۴ در «تصویر لاگرانژی»، فضا زمان کلی یکپارچه است که تمام آن به صورت یکجا بررسی می‌شود و تحول (زمانی) جزئی از آن، مگر به صورت موضعی^۵ معنادار نیست. دو صورت‌بندی معروف نسبیت عام، یعنی صورت‌بندی هامیلتونی و صورت‌بندی لاگرانژی، به ترتیب از تصویر نیوتنی و تصویر لاگرانژی بهره می‌برند. اگرچه تصویر نیوتنی تصویر متافیزیکی غالب بوده است، آشنایی ما با این دو تصویر رقیب در انتقادات لی اسمولین^۶، فیزیکدان برجسته و یکی از بنیان‌گذاران گرانش کوانتومی حلقه‌ای، به کیهان‌شناسی مدرن ریشه دارد.

در این نوشتار، ابتدا مروری خواهیم داشت بر انتقادات اسمولین که به معرفی طرح‌واره^۷ نیوتنی و رقیب آن انجامید؛ یعنی طرح‌واره لاگرانژی که توسط کن وارتون^۸، فیزیکدان کوانتومی، معرفی شد (بخش ۲). استدلال خواهیم کرد که این دو طرح‌واره رقیب زمانی که در رابطه با فضا زمان به کار گرفته شوند، به دو تصویر رقیب مورد بحث ما از فضا زمان، یعنی تصویر نیوتنی و تصویر لاگرانژی، خواهند انجامید. سپس، استدلال می‌کنیم (۱) تصویر لاگرانژی بیش از تصویر نیوتنی با روح و فلسفه کلی نظریه نسبیت سازگار است و (۲) تصویر لاگرانژی جهان‌شمول است و در رابطه با هر فضا زمانی کاربرد دارد؛ در حالی که تصویر نیوتنی فقط در رابطه با

^۴ در بخش ۳، به این مطلب بازمی‌گردیم. در اینجا، لازم است توجه شود که منظور از «تصویر نیوتنی» همان است که تعریف آن آمد و در بخش ۳ نیز به تفصیل ارائه خواهد شد. این تصویر با رویکرد مطلق‌انگاره نیوتنی در رابطه با فضا ارتباطی ندارد؛ زیرا در رویکرد نسبت‌گرایانه لایب‌نیتزی نیز کاربرد دارد. اینکه چرا اسمولین این تصویر را نیز «نیوتنی» نامیده است، دلیلی دیگر دارد که در بخش ۳ روشن خواهد شد.

^۵ local

^۶ Lee Smolin

^۷ schema

^۸ Ken Wharton

^۱ داوری محترم یادآور شده‌اند که بحث میان نیوتن و لایب‌نیتز، به لحاظ تاریخی، در واقع ناظر به فضا (و زمان) بوده است، نه فضا زمان. فقط در صورت‌بندی‌های امروزی است که مناقشه میان آن‌ها ناظر به «فضا زمان»، به عنوان یک هویت واحد، تقریر می‌شود. در اینجا، ما به منظور هم‌خوانی بیشتر با بحث خودمان که ناظر به فضا زمان است، به صورت‌بندی‌های متأخر آن مناقشه اشاره کرده‌ایم. برای آشنایی بیشتر، نگاه کنید به (Earman 1989).

^۲ به لحاظ تاریخی، این مناقشه در مکاتبات لایب‌نیتز و کلارک ریشه دارد. برای مطالعه بیشتر، نگاه کنید به (Brown 2023). برای آشنایی

به‌روزتر با این مناقشه نگاه کنید به (Earman, 1989).

^۳ به عنوان نسخه‌ای جدید نگاه کنید به (North, 2018).

فضا/زمان‌هایی ویژه به کار می‌رود (بخش ۳). در نهایت، نتیجه می‌گیریم تصویر لاگرانژی نسبت به تصویر نیوتنی تصویر متافیزیکی پذیرفتنی‌تری است و تصویر نیوتنی فقط برای مقاصد عملی و محاسباتی قابل قبول است (بخش ۴).

۲- طرح‌واره نیوتنی در برابر طرح‌واره لاگرانژی

اسمولین ضمن انتقاد به کیهان‌شناسی جدید، به بروز بحرانی در فیزیک اشاره کرده است:

بحران به دلیل ناتوانی ما در پیش‌روی بیشتر [نسبت به مدل استاندارد ذرات بنیادی و مدل استاندارد کیهان‌شناسی و] ارائه تصویری یکپارچه از فیزیک یا تبیین عناصر این مدل‌ها است. این مدل‌ها جهانی را به تصویر می‌کشند که از نظر عقلانی یا زیبایی‌شناختی غیرطبیعی است و هر کدام مشتمل بر فهرستی بلند از پارامترهایی هستند که باید به طریقی بسیار ظریف تنظیم شده باشند تا با آزمایش‌ها هم‌خوانی داشته باشند. پیشنهادهایی زیاد برای توضیح مقادیر این پارامترها ارائه شده‌اند که هیچ کدام توفیق نیافته‌اند (Unger & Smolin, 2015, p. 354).

او یادآور می‌شود:

اگر توجه خود را فقط به داده‌ها معطوف کنیم، بحرانی در کار نیست. ... به کمک نسبت عام استاندارد و نظریه میدان‌های کوانتومی می‌توانیم مشاهدات را مدل‌سازی کنیم. ... بحران زمانی خود را نشان می‌دهد که تلاش می‌کنیم فراتر از مدل‌سازی برویم و داده‌ها را تبیین کنیم. ... زمانی با بحران روبه‌رو می‌شویم که جاه‌طلبی خود را ارتقاء می‌دهیم و تلاش می‌کنیم تا از توصیف جهانی که مشاهده می‌کنیم به نظریه‌ای درباره کل جهان دست یابیم (Unger & Smolin, 2015, p. 360). تأکید از ما است.

برای غلبه بر این بحران، اسمولین تلاش کرده است تا در مفاهیم «تبیین علمی» و «قانون طبیعی» بازنگری کند (نک. Unger & Smolin, 2015 و Smolin, 2009)؛^۱ نقطه شروع او این پرسش است: چه میزان از فهم ما از قوانین طبیعی از یافته‌های ما در آزمایشگاه به

دست آمده است؟ ما در آزمایشگاه، بنا به تعریف، کل جهان را بررسی نمی‌کنیم، بلکه زیرسامانه‌ای کوچک، به لحاظ زمانی و مکانی، را بررسی می‌کنیم که با صرف‌نظر کردن از ابزارهایی که برای اندازه‌گیری به کار می‌بریم و مداخلاتی که حین اندازه‌گیری در آن انجام می‌دهیم، تا حدی مناسب می‌توان آن را سامانه‌ای منزوی قلمداد کرد. سپس، برای آنکه «قانون طبیعی» را بیابیم، فرض می‌کنیم می‌توان آن سامانه را بارها و بارها، در زمان‌های دیگر و در مکان‌های دیگر، بر پا و آزمایش را تکرار کرد؛ در حالی که اجزای آن ثابت ولی پیکربندی آن اجزاء هر بار متفاوت باشد. الگویی که در همه این وضعیت‌ها برقرار بماند را «قانون طبیعی» می‌نامیم و تفاوت‌ها را به تفاوت در «شرایط اولیه» نسبت می‌دهیم. این نوع از بررسی است که امکان تمایزگذاری قاطع میان «قانون طبیعی» و «شرایط اولیه» را فراهم می‌آورد. این تمایز به یکی از عمومی‌ترین و پرکاربردترین مفاهیم فیزیکی می‌انجامد؛ یعنی مفهوم «فضای حالت»^۲. فضای حالت فضای همه حالت‌ها یا وضعیت‌های ممکن سامانه است. ما فرض می‌کنیم این فضا به نحوی «پیشینی»^۳ و «بیرون از زمان» موجود است و می‌توان آن را به نحوی مستقل از قوانین حرکت صورت‌بندی کرد.

از این منظر، قوانین حرکت تحول سامانه را از نقطه‌ای در این فضا، موسوم به شرایط اولیه، به نقاط دیگر متعین می‌کنند. اسمولین این رویکرد به تبیین علمی را «طرح‌واره نیوتنی» (نک. Smolin, 2009) یا «پارادایم نیوتنی» (نک. Smolin, 2015 و Unger & Smolin, 2015) می‌نامد. اساس این طرح‌واره مبتنی است بر:

۱. مشخص کردن زیرسامانه‌ای از جهان و منزوی فرض کردن آن تا حدی که می‌توان از بده‌بستان

^۲ state space

^۳ به نظر می‌رسد منظور اسمولین از «پیشینی» همان معنای معمول آن است؛ زیرا او این فضا را شی‌ای ریاضی می‌داند که قبل از بررسی تجربی قوانین حرکت ساخته می‌شود (نک. Smolin, 2015, pp. 91-92).

^۱ همچنین (نک. Burton, 2021) که مصاحبه‌ای است با اسمولین.

آن با محیط پیرامونش صرف نظر کرد؛

۲. مشخص کردن فضای حالت‌های ممکن آن سامانه؛ و

۳. مشخص کردن نحوه تحول سامانه در زمان.

این سه گام در کنار یکدیگر «روش‌شناسی استاندارد فیزیک» (Unger & Smolin 2015, p. 373) را شکل می‌دهند.

گام نخست مستلزم آن است که مشاهده‌گر به همراه ساعتی که زمان را اندازه‌گیری می‌کند در بیرون از سامانه واقع شوند. این مشاهده‌گر ممکن است آزمایش‌گری باشد که به واسطه ابزارهای اندازه‌گیری بر سامانه تحت بررسی‌اش تأثیر می‌گذارد؛ اما این تأثیرگذاری یا قابل چشم‌پوشی است یا اثر آن در معادله تحول سامانه در زمان غایب است، مانند وضعیتی که درباره نظریات رُمبشی^۱ در رابطه با سامانه‌های کوانتومی با آن روبه‌رو هستیم. گام دوم را صورت‌بندی سینماتیک نظریه و گام سوم را صورت‌بندی دینامیک نظریه می‌نامند.

ساختارهایی که برای صورت‌بندی سینماتیک و دینامیک به کار گرفته می‌شوند، به ترتیب، عبارت‌اند از: (الف) فضای پیکربندی^۲ یا فضای فاز^۳ در مکانیک نیوتنی و فضای هیلبرت در مکانیک کوانتومی و (ب) برگ‌بندی^۴ از فضاهای بالا به نحوی که خانواده‌ای از مسیرهایی در فضا ایجاد بشوند که از هر نقطه از فضا فقط و فقط یک مسیر عبور کند.

همچنین، گام نخست نشانه آن است که نتایج طرح‌واره نیوتنی تقریبی هستند. این طرح‌واره برای سامانه‌های منزوی به کار گرفته می‌شود؛ اما هیچ سامانه واقعی منزوی نیست. هر سامانه واقعی با سایر سامانه‌ها در

برهم‌کنش است. «در [بهترین] حالت، به لحاظ فیزیکی غیرممکن است بتوانیم از تأثیرپذیری امواج گرانشی که از بیرون سامانه می‌آیند، جلوگیری کنیم» (Smolin, 2015, p. 18). زمانی که سامانه‌ای را منزوی در نظر می‌گیریم، از برهم‌کنش‌ها چشم‌پوشی کرده‌ایم؛ بنابراین، طرح‌واره نیوتنی تصویری کاملاً دقیق را از جهان ارائه نمی‌کند، هرچند تقریبی موفق ارائه کرده است.^۵

اسمولین این طرح‌واره را «نیوتنی» نامیده است؛ زیرا، دست‌کم از زمان نیوتن، دستورالعمل سه‌مرحله‌ای بالا برای مدل‌سازی ریاضی و حل مسائل فیزیک به طور گسترده به کار گرفته شده است.^۶ همچنین، باید توجه داشت طرح‌واره نیوتنی، برخلاف نامش، به درون مرزهای مکانیک نیوتنی محدود نمی‌شود، بلکه گستره به‌کارگیری آن مکانیک کلاسیک، مکانیک کوانتومی، نسبیت عام، نظریه میدان‌های کوانتومی، گرانش کوانتومی و برخی از مدل‌های محاسباتی را نیز درمی‌نوردد (نک. Unger & Smolin, 2015, p. 359 Smolin, 2015, p. 15; و نیز Wharton, 2015).

طرح‌واره نیوتنی با مشکلاتی روبه‌رو است.^۸ از منظر

^۵ این حقیقتی نیست که از چشم فیزیک‌دانان پنهان مانده باشد و چنانکه اسمولین یادآور شده است، فیزیک‌دان‌ها بهترین نظریه‌ها و مدل‌های علمی، همچون کرومودینامیک کوانتومی، نسبیت عام و مدل استاندارد ذرات بنیادی را نظریات میدان مؤثر (effective field theories) یا مدل‌های منتج از آن‌ها قلمداد می‌کنند (نک. Unger & Smolin 2015, p. 375) (و Smolin, 2015).

^۶ ما مطلع نیستیم که آیا اشاره‌ای صریح یا ضمنی در آثار نیوتن به این دستورالعمل انجام شده است یا خیر. این پرسش می‌تواند موضوع پژوهشی تاریخی باشد.

^۷ اسمولین یادآور می‌شود طرح‌واره نیوتنی چارچوب اصلی علوم کامپیوتر و بررسی‌های مدل‌های ریاضی مرسوم در علوم زیستی و اجتماعی را نیز فراهم می‌آورد (نک. Unger & Smolin 2015, p. 373).

^۸ وارتون مشکلات آن در تبیین پدیده‌های کوانتومی را بررسی است (نک. Wharton, 2015). همچنین، طرح‌واره نیوتنی قربانی زیاد با رویکردی در رابطه با قوانین طبیعت، موسوم به «تولید پویا» (dynamic production) دارد. بر مبنای تولید پویا، قوانین حاکم بر طبیعت معادلات دیفرانسیلی برحسب زمان هستند که با گرفتن

^۱ collapse

^۲ configuration

^۳ phase

^۴ foliation

گذشت حدود ۱۴ بیلیون سال نیز افزایش آن، طبق قانون دوم ترمودینامیک، هنوز نتوانسته است به رسیدن به بیشینه آنتروپی در وضعیت تعادل ترمودینامیکی بینجامد^۲؛ بنابراین، پرسش اکنون این است که: چرا جهان با چنین آنتروپی ناچیزی آغاز شده است؟ یا به بیانی دیگر، چرا جهان با وضعیتی تا به این حد نامحتمل آغاز شده است؟ اسمولین این سه پرسش را اساسی‌ترین چالش‌های پیش‌روی کیهان‌شناسی کنونی می‌داند که ریشه آن‌ها در کاربرست نادرست طرح‌واره نیوتنی است.

جایگزین طرح‌واره نیوتنی چه چیزی می‌تواند باشد؟ اسمولین پیشنهادی ویژه را مطرح نکرده است. او فقط اشاره می‌کند که پاسخی کامل برای این پرسش در دست نیست که «فیزیک بدون تمایز قاطع میان قانون و شرایط اولیه چگونه خواهد بود؟»؛ اما اسمولین به مطلبی دیگر نیز اشاره کرده است که می‌تواند راهی را برای غلبه بر بحران فیزیک و کیهان‌شناسی مدرن بگشاید: او یادآور شده است در ورای «بحران» مورد بحث ما، بحرانی گسترده‌تر قرار دارد؛ بحرانی پیش روی فلسفه مکانیکی یا نسخه تناسخ یافته آن، فلسفه محاسباتی^۴.

این ایده سرمست‌کننده که هر چیزی که وجود دارد طبیعی و فیزیکی است اکنون بیش از هر زمان دیگری پذیرفتنی به نظر می‌رسد؛ بخشی به دلیل پیشرفت‌های فیزیک و فناوری‌های دیجیتال، اما بیشتر به خاطر راه‌بردهای فروکاست‌گرایانه در زیست‌شناسی و پزشکی؛ اما این ایده بابت پذیرش این استعاره قدیمی که طبق آن جهان یک ماشین است، هنوز در بحران است. در تجدید حیات جدیدش، فلسفه مکانیکی در قالب فلسفه محاسباتی ظاهر شده است که طبق آن هر چیزی، از جمله خود ما، رایانه‌ای دیجیتال است که از روی الگوریتمی

اسمولین، این طرح‌واره از پاسخ‌گویی به سه پرسش کیهان‌شناختی مهم عاجز است^۱:

۱. چرا این قوانین دینامیکی ویژه و نه قوانینی دیگر بر جهان حکم‌فرما هستند؟
۲. چرا جهان با این شرایط اولیه ویژه و نه شرایطی دیگر آغاز شده است^۲؟
۳. چرا جهان، پس از گذشت حدود ۱۴ بیلیون سال، هنوز به تعادل ترمودینامیکی نرسیده است؟

قوانین دینامیکی و شرایط اولیه (و فضای حالت‌ها) «ورودی»های طرح‌واره نیوتنی هستند و نه «خروجی»های آن؛ بنابراین، می‌توان گفت دل‌خواهی بودن انتخاب آن‌ها نشانه آن است که این طرح‌واره نسبت به دو پرسش نخست ساکت است. پرسش سوم ممکن است حالتی ویژه از پرسش دوم قلمداد شود؛ پاسخ این پرسش در چارچوب طرح‌واره نیوتنی ممکن است این باشد که کیهان با شرایطی مرزی آغاز شده است که بر مبنای آن آنتروپی اولیه کیهان آنچنان کم بوده است که پس از

وضعیت سامانه در لحظه‌ای معین، وضعیت بعدی آن را تولید می‌کنند (برای مثال، نک. [Maudlin 2007, chap. 4](#)). تولید پویا با مشکلاتی روبه‌رو است. برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: ۱. مفاهیم موجبیت‌گرایی و پیش‌بینی‌پذیری را به‌خوبی از هم متمایز نمی‌کند، ۲. تصویر متافیزیکی مطلوبی را از فیزیک کوانتومی در اختیار نمی‌گذارد و ۳. مشخص نیست چطور می‌توان آن را به نحوی مناسب در رابطه با فضا/ زمان‌هایی به کار گرفت که دربردارنده «اولین» لحظه زمان نیستند؛ همچون فضا/ زمان‌هایی که دربردارنده تکینگی اولیه هستند یا فضا/ زمان‌هایی که دربردارنده خم‌های بسته زمان‌گونه هستند (نک. [Adlam, 2022](#) و [Chen & Goldstein, 2022](#)).

^۱ داوری محترم به‌درستی یادآور شده‌اند که روشن نیست که چنین پرسش‌هایی اساساً به لحاظ فلسفی معنادار یا در چارچوب متافیزیکی دیگری، غیر از طرح‌واره نیوتنی، قابل پاسخ‌گویی باشند، یا دست‌کم این مطلب در بدو امر روشن نیست و باید برای آن استدلالی مجزا ارائه شود. این ممکن است نقدی مهم به اسمولین باشد؛ اما ما در اینجا قصد بررسی آرای او را نداریم و این مهم را به پژوهشی دیگر موکول می‌کنیم.

^۲ اسمولین دو پرسش نخست را در کنار هم «معضل چشم‌انداز» (the landscape problem) نامیده است (نک. [Smolin, 1997](#)).

^۳ اسمولین یادآور می‌شود بخش‌هایی از جهان، همچون تابش زمینه کیهانی، در تعادل ترمودینامیکی هستند؛ اما بخش بزرگ‌تر آن از تعادل ترمودینامیکی بسیار فاصله دارد (نک. [Burton, 2021](#)).

^۴ computational

ثابت به پیش می‌رود، یا با چنین رایانه‌ای یک‌ریخت^۱ است (Unger & Smolin, 2015, p. 356).

از منظر اسمولین، ریشه بحران کنونی علم آن است که روش علمی مرسوم خود را به این آموزه پایبند کرده است که «جهان نوعی ماشین است»، یا معادل آن «جهان نوعی رایانه است»^۲. این آموزه دقیقاً همان چیزی است که وارتون، فیزیک‌دان برجسته کوانتومی، آن را نقد کرده است. به عقیده او، طرح‌واره نیوتنی جهان را همچون سازوکاری محاسباتی می‌پندارد که وضعیت‌های اولیه را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و وضعیت‌های آتی را به عنوان خروجی یا محصول آن سازوکار محاسباتی تولید می‌کند.

چطور ممکن است نگرشی تا این اندازه فراگیر نادرست باشد؟ وارتون نکته‌ای را یادآور شده است که هم روشن می‌کند اشکال طرح‌واره نیوتنی کجا است و هم روشن می‌کند چرا این آموزه تا این حد فراگیر است و بر ذهن بیشتر فیزیک‌دانان و فلاسفه مستولی است. او معتقد است طرح‌واره نیوتنی *انسان‌محورانه*^۳ است؛ به این معنا که جهان فیزیکی را همان‌طوری تصور می‌کند که ما انسان‌ها پرسش‌های فیزیک را پاسخ می‌دهیم.

اگر نقادانه بنگریم، فرضیه «جهان طرح‌واره نیوتنی» دقیقاً همان نوعی از استدلال انسان‌محورانه است که فیزیک‌دانان از آن روی‌گردان هستند. این فرضیه در اساس این است که روشی که ما انسان‌ها مسائل فیزیک را حل می‌کنیم، باید همان طریقی باشد که جهان طبق آن عمل می‌کند (Wharton, 2015, p. 178).

از منظری انسان‌محورانه، انسان‌ها در مرکز جهان قرار دارند. انسان‌محوری خوانشی معرفت‌شناختی دارد که طبق آن توصیف و تبیین‌های ما از پدیده‌های طبیعی به نحوی

است که گویا ما انسان‌ها در مرکز جهان قرار گرفته‌ایم؛ اما نوعی از انسان‌محوری که وارتون با آن مخالف است، خوانش هستی‌شناختی از آن است؛ خوانشی که بر مبنای آن جهان همان‌طوری است که ما انسان‌ها به اندیشیدن درباره آن بدان شیوه خو گرفته‌ایم. طبق این نوع از انسان‌محوری، جهان همان‌گونه است که تجربیات دست‌اول ما به ما می‌گویند. این همان نوع خطایی است که به نظریه زمین مرکزی انجامید که بیش از دو هزار سال نظریه غالب در رابطه با ساختار منظومه شمسی بود. اکنون همین خطا خود را در قالبی دیگر آشکار کرده است: طرح‌واره نیوتنی جهان را به مثابه رایانه‌ای در نظر می‌گیرد که ورودی‌هایی را دریافت می‌کند و سپس، قوانین حاکم بر آن خروجی‌هایی را تولید می‌کنند؛ زیرا، دست‌کم از زمان نیوتن، ما انسان‌ها مسائل فیزیک را در قالب معادلات دیفرانسیلی برحسب زمان صورت‌بندی و حل کرده‌ایم.

اگرچه طرح‌واره نیوتنی با تجربیات روزمره ما موافق و با شهود و فهم متعارفی ما هم‌خوان است، این دلیل نمی‌شود که چارچوب متافیزیکی مناسبی برای نظریه‌های فیزیکی باشد. به ویژه باید توجه کرد شناخت سطح بنیادی واقعیت وظیفه‌ای است که بر دوش نظریه‌های فیزیکی گذاشته شده است و نه فهم متعارف^۴.

اما اگر طرح‌واره نیوتنی را کنار بگذاریم، چه چیزی برای ما باقی می‌ماند؟ پیشنهاد وارتون این است که «طرح‌واره لاگرانژی» را جایگزین طرح‌واره نیوتنی کنیم. این طرح‌واره جدید از دستورالعمل سه‌مرحله‌ای طرح‌واره نیوتنی پیروی نمی‌کند؛ در عوض، طبق طرح‌واره لاگرانژی، معادلات حرکت از کمینه‌سازی کُنش به دست می‌آیند که انتگرال زمانی اسکالری موسوم به لاگرانژی است. مبنای این طرح‌واره صورت‌بندی لاگرانژی از مکانیک کلاسیک است (نک. Thornton & Marion, 2004). ممکن است اعتراض شود صورت‌بندی‌های

^۴ اگرچه این مطلب ممکن است مخالفانی داشته باشد، دست‌کم فضای حاکم بر فیزیک و فلسفه فیزیک سالیان گذشته، بلکه قرن گذشته، چنین بوده است. ما نیز در اینجا چنین فرض می‌کنیم.

^۱ isomorphic

^۲ او در Unger & Smolin, 2015 و در جایی دیگر (Smolin, 2012)

یادآور شده است این بحران به بحران سومی انجامیده است که برنامه هوش مصنوعی قوی و نظریات این‌همانی در فلسفه ذهن را به چالش می‌کشند.

^۳ anthropocentric

شامل می‌شوند و زاویه‌های تابش یا بازتاب ورودی‌های آن نیستند، بلکه خروجی اصل فرما هستند؛ بنابراین، اینکه معادلات دینامیکی صورت‌بندی‌های نیوتنی، لاگرانژی و هامیلتونی از یکدیگر قابل استخراج هستند، مستلزم این نیست که این صورت‌بندی‌ها روال محاسباتی یکسانی دارند. آیا این تفاوت می‌تواند نشانه تفاوتی عمیق‌تر در ساختار ریاضیاتی یا تصویر فیزیکی یا متافیزیکی زیربنایی این صورت‌بندی‌ها باشد؟ پاسخ مثبت است.

نورث به برخی از تفاوت‌های ریاضیاتی و متافیزیکی صورت‌بندی‌های مختلف مکانیک کلاسیک اشاره کرده است (نک. (2021a; 2021bNorth, 2009)).^۲ او یادآور شده است اگرچه ظاهراً صورت‌بندی‌های نیوتنی، لاگرانژی و هامیلتونی همگی وجود داشتن اجرام نقطه‌ای را در سطح بنیادی فرض می‌کنند، بر سر اینکه در هر صورت‌بندی چه چیزی بنیادی است و چه چیزی غیربنیادی است، تفاوت‌هایی وجود دارد:

- در مکانیک نیوتنی، جهان در سطح بنیادی دربردارنده ذرات و نیروهای بین آن‌ها است که مفاهیم اولیه و تقلیل‌ناپذیر هستند.
- در مکانیک لاگرانژی، جهان در سطح بنیادی دربردارنده ذرات و انرژی‌ها است و تفاوت میان انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل مفهومی بنیادی است. ویژگی‌های دینامیکی حقیقی ذرات کمیت‌های پیکربندی‌گونه هستند که بسیار شبیه به مکان رفتار می‌کنند. کمیت‌های سرعت‌گونه به صورت مشتق اول کمیت‌های پیکربندی‌گونه برحسب زمان تعریف می‌شوند. نیرو مفهومی بنیادی

متفاوت صرفاً نقطه‌نظریاتی متفاوت هستند که به یک نظریه واحد می‌انجامد و به لحاظ فیزیک یا متافیزیکی که توصیف‌کننده آن است معادل هستند. عمدتاً، کتب درسی فیزیک مروج چنین ادعایی هستند؛^۱ اما این ادعا لزوماً درست نیست. صورت‌بندی‌های مختلف ممکن است مستلزم ساختارهای ریاضی متفاوت یا چارچوب‌های فیزیکی یا متافیزیکی متفاوتی از طبیعت باشند.

برای روشن شدن این مطلب، اجازه دهید صورت‌بندی‌های مختلف مکانیک کلاسیک را در نظر بگیریم. در مکانیک کلاسیک، دیدگاه رایج این است که صورت‌بندی‌های نیوتنی، لاگرانژی و هامیلتونی دوجه‌دو با یکدیگر معادل هستند؛ زیرا معادلات دینامیکی آن‌ها را می‌توان از یکدیگر استخراج کرد؛ اما وارتون یادآور شده است این استدلال «تا حدی دوری» است؛ زیرا معادلات دینامیکی تنها جزء اصلی نظریه نیستند.

استدلال متداول [در دفاع از هم‌ارزی ادعا شده] استفاده کردن از اصل فرما [یعنی قانون لاگرانژی‌گونه مربوط] برای استخراج قانون شکست اسنل، یعنی قانون نیوتنی‌گونه مربوط، است. می‌توان نشان داد در حالت کلی، کمینه‌سازی کنش همواره به چنین قوانین دینامیکی می‌انجامد (در این بافتار، قوانین گفته‌شده را با عنوان معادلات اوایلر - لاگرانژ می‌شناسند)؛ اما قانون دینامیکی همه چیز طرح‌واره نیوتنی نیست [...]. ورودی‌ها و خروجی‌های [آن قانون] متفاوت هستند: قانون اسنل ورودی‌هایی متفاوت را نسبت به اصل فرما دریافت می‌کند و خروجی متفاوتی را نیز تولید می‌کند که پیشاپیش در کمینه‌سازی کنش مقید شده بود، یعنی موقعیت مکانی پرتوهای بازتاب (Wharton, 2015, p. 182).

در حالی که قانون اسنل زاویه تابش یا بازتاب را به عنوان ورودی دریافت می‌کند، اصل فرما ورودی‌هایی را دریافت می‌کند که وضعیت‌های اولیه و نهایی سامانه را

^۲ نورث استدلال کرده است فضای حالت‌ها در صورت‌بندی لاگرانژی ساختاری ریمانی دارد؛ در حالی که این فضا در صورت‌بندی هامیلتونی ساختاری سیمپلکتیک دارد. او نتیجه می‌گیرد از آنجا که ساختار سیمپلکتیک ساده‌تر است، مکانیک کلاسیک در اساس هامیلتونی است. کوریل با نورث مخالف است. او معتقد است مکانیک کلاسیک در اساس لاگرانژی است. (نک. Curiel, 2014).

^۱ برای مثال (نک. Goldstein et. al. 2001, p. 334 و Thornton & Marion 2004, pp. 257-258).

نیست و از انرژی به دست می‌آید.

- در مکانیک هامیلتونی، جهان در سطح بنیادی دربردارنده ذرات و انرژی‌ها است و انرژی کل مفهومی بنیادی است. ویژگی‌های دینامیکی حقیقی ذرات کمیت‌های پیکربندی‌گونه و تکانه‌گونه، هر دو، هستند که به صورت مستقل از یکدیگر تعیین می‌شوند. نیرو مفهومی بنیادی نیست و از انرژی به دست می‌آید (نک. Baez & Wise, North 2021a ;

2019 و Lanczos, 1952).

بنابراین، صورت‌بندی‌های مختلف مکانیک کلاسیک از نظر ساختار ریاضی و چارچوب متافیزیکی هم‌ارز نیستند. همین مطلب در رابطه با صورت‌بندی‌های لاگرانژی و هامیلتونی نسبت عام نیز صحیح است (در بخش بعد این مطلب را بررسی خواهیم کرد).

آنچه مشخصه طرح‌واره لاگرانژی است و سبب تمایز آن از طرح‌واره نیوتنی می‌شود، چنانکه وارتون یادآور شده است، این است که در طرح‌واره لاگرانژی رفتارهای سامانه‌ها توسط «زنجیره‌ای الگوریتم‌گونه از علت‌ها و معلول‌ها» (Wharton, 2015, p. 181) تبیین نمی‌شود، بلکه به صورت سراسری تبیین می‌شود.

به طور خلاصه، طرح‌واره لاگرانژی نگاشتنی دوسویه و قابل معکوس‌سازی میان رویدادهای فیزیکی و پارامترهای ریاضیاتی است که آن پارامترها را به طور جزئی روی مرزی فضازمانی در ابتدا و انتها مقید می‌کند و سپس، قانونی سراسری را برای به دست دادن پارامترهای نامقید به کار می‌گیرد. پارامترهای محاسبه‌شده حاصل را می‌توان [به کمک نگاشت دوسویه گفته‌شده] به هویت فیزیکی منتسب کرد (Wharton, 2015, p. 182).

در حقیقت، طرح‌واره لاگرانژی، برخلاف طرح‌واره نیوتنی، از نقطه‌نظری سراسری یا کل‌گرایانه بهره می‌برد. یوشیرو نامبو^۱، برنده جایزه نوبل فیزیک، نیز نکته‌ای مشابه

را یادآور شده است:

نظریه فاینمن [یعنی صورت‌بندی لاگرانژی مکانیک کوانتومی] اگرچه از جهات بسیار با مکانیک کوانتومی معمولی معادل است، در روش‌هایی که می‌توان مسئله‌ای معین را تحلیل کرد، آزادی و تنوعی بسیار بیشتر را آشکار می‌سازد. برای مثال، می‌توان برخی از متغیرهای دینامیکی، یعنی میدان‌ها، را حذف کرد و کنش از دور معادلی را جایگزین کرد. اگرچه اگر چنین کنیم، سامانه دینامیکی همتای حاصل در چارچوب صورت‌بندی هامیلتونی مرسوم جای نمی‌گیرد و باید سامانه‌ای «ناموضعی» در نظر گرفته شود، یعنی سامانه‌ای که [به‌جای معادلات دیفرانسیلی] از معادلات انتگرالی به عنوان معادلات حرکت آن باید استفاده کرد. در پرتوی این دستاورد، وسوسه‌کننده است که پژوهش‌های خود را به نحوی گسترش دهیم که سامانه‌های با مشتقات مرتبه بالاتر، از جمله سامانه‌های ناموضعی، را نیز شامل شوند (Nambu, 1952, p. 2).

وارتون مدعی است طرح‌واره لاگرانژی، به عنوان چارچوب متافیزیکی زیربنای نظریه کوانتومی، با مشکلاتی مواجه نیست که طرح‌واره نیوتنی با آن‌ها روبه‌رو بود. او تصویری متافیزیکی از جهان کوانتومی را که طرح‌واره لاگرانژی مستلزم آن است تعمیم طبیعی تصویری می‌داند که طرح‌واره نیوتنی ارائه می‌کرد. همچنین، او استدلال می‌کند گارچه بهترین دلیل ما برای برگزیدن طرح‌واره لاگرانژی مبتنی بر حوزه کوانتومی است؛ در حوزه غیرکوانتومی نیز می‌توان شواهدی از برتری طرح‌واره لاگرانژی نسبت به طرح‌واره نیوتنی را یافت^۲.

۳- تصویر نیوتنی از فضازمان در برابر تصویر لاگرانژی

صورت‌بندی‌هایی متعدد از نسبت عام وجود دارند که

^۲ همچنین (نک. Lanczos, 1952, xxiv-xxv). او دلایلی را ارائه می‌کند مبنی بر اینکه چرا صورت‌بندی لاگرانژی بستری مناسب‌تر برای طرح نسبت عام است. دلایل او را می‌توان دلایلی به نفع طرح‌واره لاگرانژی قلمداد کرد.

^۱ Yoichiro Nambu

است، ابرسطح S را فقط یک بار قطع کند. این به منزله آن است که M دارای توپولوژی

$$\mathbb{R} \times \Sigma,$$

باشد. اگر چنین باشد، می‌توان خمینه فضا/زمانی M را به ابرسطح‌های S برگ‌بندی کرد که آن‌ها را سطوح کوشی^۵ می‌نامند. ابرسطح‌های S را می‌توان با پارامتر t شاخص‌گذاری کرد که مختصه زمانی سراسری در نظر گرفته می‌شود و انتخاب آن کاملاً اختیاری است.^۶ شکل ۱ را ببینید.

این حقیقت کاملاً شناخته شده است که این دو صورت‌بندی از نظر کاربردی هم‌ارز تلقی نمی‌شوند. صورت‌بندی لاگرانژی به معادلات حرکت مرتبه دوم می‌انجامد؛ در حالی که صورت‌بندی هامیلتونی به معادلات حرکت مرتبه اول می‌انجامد.^۷ صورت‌بندی هامیلتونی برای شبیه‌سازی‌های عددی (نک. [Cook, 2000](#)), کوانتومی کردن گرانش (نک. [Wallace, 2000](#)) و بررسی مسائل مقدار اولیه یا کوشی (نک. [Arnowitt et al., 2008](#)) ترجیح دارد. صورت‌بندی لاگرانژی برای طرح نظریات میدان کوانتومی و مدل‌های فیزیک ذرات، از جمله مدل استاندارد ذرات بنیادی، ترجیح دارد و ارتباط میان نظریات میدان کوانتومی و نظریات گرانش را به‌خوبی برقرار می‌کند و این امکان را فراهم می‌آورد که گرانش را به مثابه میدان بدون جرم اسپین-۲ قلمداد کنیم. همچنین، صورت‌بندی لاگرانژی بستری مناسب‌تر برای بررسی تقارن‌های نظریه، کمیت‌های بقا و تعمیم‌های احتمالی آن‌ها است.

از نظر مفهوم هندسی که به کمک آن فضا/زمان خمیده را می‌توان توصیف کرد با یکدیگر تفاوت دارند (نک. [Krasnov, 2020](#)). از منظری دیگر، دو صورت‌بندی لاگرانژی یا استاندارد و هامیلتونی یا کانونیک از نسبت عام وجود دارند که تفاوت آن‌ها در نحوه‌ای است که دینامیک را توصیف می‌کنند.

در صورت‌بندی لاگرانژی، معادلات میدان اینشتین از وردش^۱ کنش هیلبرت برای گرانش محض، یعنی بدون ثابت کیهان‌شناختی،

$$S_H = \frac{1}{16\pi} \int R \sqrt{-g} d^4x, \quad (۱)$$

نسبت به متریک قابل استخراج هستند که در آن g دترمینان متریک و R اسکالر ریچی است. متغیر دینامیکی در اینجا متریک است. کنش کامل شامل کنش هیلبرت به علاوه کنش میدان مادی است. در کنش بالا، انتگرال‌گیری بر روی ناحیه‌ای چهاربُعدی از فضا/زمان یا کل آن انجام می‌شود (برای دیدن جزئیات بیشتر نک. [Jha, 2022](#)).

صورت‌بندی هامیلتونی مستلزم تجزیه خمینه چهاربُعدی فضا/زمان به زیرخمینه‌های فضایی سه‌بُعدی و زمانی یک‌بُعدی است. به بیان دقیق‌تر، صورت‌بندی هامیلتونی مستلزم غوطه‌ور کردن^۲ ابرسطحی^۳ سه‌بُعدی در خمینه چهاربُعدی اصلی فضا/زمان است. به کمک این تجزیه، می‌توان میدان‌هایی تحول‌یابنده را در گذر زمان بررسی کرد که بر روی ابرسطح فضایی تعریف شده هستند. این بررسی به کمک معادلات حرکت هامیلتون انجام می‌شود. برای این منظور، لازم است فرض شود خمینه فضا/زمان M به طور سراسری هذلولوی^۴ است؛ یعنی می‌توان ابرسطح فضاگونه S که زیرخمینه جهت‌پذیر و سه‌بُعدی M است را به‌نحوی در M تعریف کرد که هر خم زمان‌گونه یا نورگونه که فاقد نقطه انتها

^۵ Cauchy

^۶ برای جزئیات بیشتر (نک. [Jha, 2022](#) و [Kroon, 2022](#)).

^۷ البته هر معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم را می‌توان به صورت دو معادله دیفرانسیل جفت‌شده مرتبه اول نوشت؛ اما این مطلب به منزله عدم تفاوت و هم‌ارزی این دو صورت‌بندی از نظر سهولت در مدل کردن مسئله یا نوع و آسانی یا دشواری محاسباتی که با آن‌ها سروکار داریم نیست.

^۱ variation

^۲ embedding

^۳ hypersurface

^۴ globally hyperbolic

«طرح‌واره نیوتنی» مدنظر قرار می‌دهیم؛ زیرا این دو عبارت برای توصیف نگرشی جامع‌تر به کار می‌روند که به‌جز فضا‌زمان، میدان‌ها، ذرات و هر هویت فیزیکی دیگری را نیز در بر می‌گیرد.

در انتهای این بخش، در دفاع از این ادعا که تصویر لاگرانژی نسبت به تصویر نیوتنی تصویر متافیزیکی مناسب‌تری از فضا‌زمان در سطح بنیادی است، دو دلیل ارائه می‌کنیم:

۱. در تصویر لاگرانژی از فضا‌زمان، هیچ تفاوتی میان فضا و زمان وجود ندارد؛ در حالی که در تصویر نیوتنی از فضا‌زمان تفاوتی میان آن‌ها وجود دارد.

۲. تصویر نیوتنی از فضا‌زمان به اندازه تصویر لاگرانژی از فضا‌زمان جهان‌شمول نیست.

مقصود از «تصویر متافیزیکی مناسب‌تر» در اینجا این است که زمانی که (۱) «فضا‌زمان» را به‌طور عام مدنظر داریم و نه فضا‌زمانی ویژه را، و زمانی که (۲) فضا‌زمان را در سطح بنیادی واقعیت در نظر می‌گیریم و نه آنچه را که از آن بر ما جلوه‌گر می‌شود، تصویر لاگرانژی نسبت به تصویر نیوتنی به حقیقت نزدیک‌تر است.

توضیح دلیل اول: حذف مفاهیم مکان و زمان به عنوان مفاهیم مستقل و ارائه مفهوم فضا‌زمان دستاورد فلسفی اصلی نظریه نسبیت است که مینکوفسکی آن را این‌طور بیان کرده است:

از اکنون به بعد، فضا به‌خودی‌خود و زمان به‌خودی‌خود به‌طور کامل کنار می‌روند و به سایه‌هایی بدل می‌شوند و فقط اتحادی از آن دو است که موجودیتی مستقل می‌یابد (Minkowski, 2012, p. 39).

تصویر لاگرانژی بر خلاف تصویر نیوتنی به‌خوبی این آموزه اساسی نظریه نسبیت را به تصویر می‌کشد. در تصویر نیوتنی از فضا‌زمان تفاوتی میان فضا و زمان به چشم می‌خورد: این تصویر مستلزم وجود متغیر زمانی مرجحی است که تحول ابرسطوح فضاگونه بر حسب آن توصیف می‌شود. در برخی موقعیت‌ها، همچون تک ذره

آنچه کم‌تر شناخته شده است، این است که این دو صورت‌بندی به لحاظ تجربی نیز هم‌ارز نیستند. معادله اوایلر – لاگرانژ به نحو تقریبی از لاگرانژی به دست می‌آید. در حقیقت، اثبات ادعا شده در کتب درسی از هم‌ارزی دو صورت‌بندی نیز که پیش‌تر از آن یاد کردیم (نک. پاورقی ۲۶) فقط زمانی معتبر است که از جملات مرتبه بالاتر صرف‌نظر شود؛ بنابراین، زمانی که جملات مرتبه بالاتر به لحاظ تجربی اهمیت پیدا می‌کنند، این دو صورت‌بندی به نتایج تجربی متفاوتی می‌انجامند.^۱

چنانکه در بخش قبل گفته شد، صورت‌بندی‌های لاگرانژی و هامیلتونی ممکن است به لحاظ ساختار ریاضی یا تعبیر فیزیکی یا متافیزیکی متفاوت باشند. تفاوت‌های کاربردی و تجربی آن‌ها که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، ممکن است نشانه‌ای از این تفاوت‌های عمیق‌تر باشد. تفاوت‌های این دو صورت‌بندی به لحاظ ساختار ریاضی به‌طور مستقیم به بحث ما مربوط نیست؛^۲ در عوض، توجه خود را به تفاوت فیزیکی و متافیزیکی این دو صورت‌بندی معطوف می‌کنیم.

صورت‌بندی هامیلتونی نسبت به طرح‌واره نیوتنی به عنوان تصویر متافیزیکی زیربنایی بهره می‌برد. در مقابل، از آنجا که انتگرال در رابطه ۱ بالا بر روی ناحیه‌ای چهاربُعدی از فضا‌زمان یا کل آن گرفته می‌شود، صورت‌بندی لاگرانژی از طرح‌واره لاگرانژی به عنوان تصویر متافیزیکی زیربنایی بهره می‌برد و نگرشی کل‌گرایانه را در رابطه با فضا‌زمان اتخاذ می‌کند. در حقیقت، در صورت‌بندی لاگرانژی از نسبیت عام، «می‌توان به [فضا‌زمان] به چشم یک مسئله مقدارمرزی چهاربُعدی و سراسری نگریست» (Wharton, 2015, p. 186). از آنجا که بحث ما به متافیزیک فضا‌زمان محدود است، «تصویر لاگرانژی از فضا‌زمان» و «تصویر نیوتنی از فضا‌زمان» را به‌جای، به‌ترتیب، «طرح‌واره لاگرانژی» و

^۱ برای دیدن نمونه‌ای از این مورد (نک. Chen & Wu, 2016 و Wu et al., 2015).

^۲ برای آشنایی (نک. Krasnov, 2020).

راه‌هایی متعدد برای تسهیل کردن [دشواری‌های کار کردن با] زمان چندشاخه و کاوش کردن در فضا/زمانی وجود دارد که در هر نقطه از آن زمان با آهنگی متفاوت می‌گذرد؛ اما رایانه زمانی به کارآمدترین نحو ممکن برنامه‌ریزی شده است که فقط از یک دستورالعمل واحد پیروی کند. آسان‌ترین شیوه برای توصیف کردن ابرسطوحی پی‌درپی که هندسه بر روی آن‌ها تعریف شده باشد، استفاده از مقادیر متوالی یک متغیر زمانی t است. (Misner et al., 1973, pp. 505-506).

برای اینکه بتوان فضا/زمان را محاسبه کرد باید آن را به صورت «فضا به علاوه زمان» در نظر گرفت که البته با فلسفه اتحاد فضا و زمان کاملاً هم‌سو نیست. تصویر نیوتنی از جهتی دیگر، اما نزدیک به آنچه گفته شد، نیز توصیف حقیقی فضا/زمان در سطح بنیادی نیست: تصویر هامیلتونی تحول را به خوبی به تصویر می‌کشد؛ اما نسبیت عام در اساس نظریه‌ای در رابطه با تحول سامانه در زمان نیست، بلکه نظریه‌ای درباره خود فضا/زمان، هندسه و توپولوژی آن است.^۴

توضیح دلیل دوم: فقط در مواردی ویژه، همچون فضا/زمان‌های به طور سراسری هذلولوی، می‌توان فضا/زمان را به عنوان تحول ابرسطحی فضاگونه در زمان در نظر گرفت و نه همواره و در حالت کلی. دلیل این مطلب آن است که مسائل مقدار مرزی (یا مسائل کوشی) در نسبیت عام، به خاطر وجود انحنا، بسیار دشوارتر از سایر حوزه‌ها هستند. در نسبیت عام، ارائه هندسه (موضعی) فضا/زمان به مثابه مسئله مقدار مرزی است که باید حل شود. راه حل متداول این است که فضا/زمان را به صورت مجموعه‌ای از برش‌های فضاگونه در نظر بگیریم که در آن می‌توان شرایط مرزی را بر برشی معین اعمال کرد و تحول آن شرایط را در طول زمان و بر برش‌های بعدی به وسیله معادلات حرکت بررسی کرد؛ اما در حالت کلی، نمی‌توان این روش را برای هر فضا/زمانی به کار

در حال حرکت، ویژه‌زمان انتخابی طبیعی برای آن متغیر زمانی مرجح است، زیرا انتخابی است که فوراً صورت‌بندی نظریه را هم‌وردای عام می‌کند. اما در حالت کلی صورت‌بندی هامیلتونی مستلزم وجود متغیر زمانی‌ای است که همه جا به‌طور هم‌واری تعریف‌شده باشد. با وجود این مطلب، نه نسبیت خاص و نه نسبیت عام، هیچ کدام انتخابی طبیعی از متغیر زمانی مرجح یا برگ‌بندی ویژه‌ای از فضا/زمان را به صورت کلی و عام پیشنهاد نمی‌کنند. در نسبیت خاص، به دلیل قراردادی بودن هم‌زمانی^۱، فضا/زمان‌های نسبیت ویژه، همچون مینکوفسکی و ریندلر^۲، هیچ برگ‌بندی مرجح عینی‌ای را نمی‌پذیرند و هر نوع ترجیحی از نوع ترجیح عملی و به منظور راحتی محاسبه است. همین مطلب در نسبیت عام نیز برقرار است؛ در صورت‌بندی هامیلتونی، هر انتخاب متغیر زمانی مرجح فقط به منظور راحتی و برای مقاصد عملی است و بیانگر هیچ حقیقت عینی در جهان نیست.

از همین رو، تصویر نیوتنی در بدو امر تصویر متافیزیکی مناسبی از فضا/زمان نیست و تصویری نیست که به طور طبیعی انتخاب شود، بلکه ما آن را برای منظوری ویژه برمی‌گزینیم: «ما فضا/زمان را برش می‌زنیم تا آن را محاسبه کنیم» (Misner et al., 1973, p. 506).

تصویر نیوتنی تصویری مناسب از فضا/زمان است؛ زمانی که می‌خواهیم فضا/زمان را به مثابه رایانه در نظر بگیریم و به همین دلیل است که این تصویر بخشی از طرح‌واره نیوتنی است. چنانکه اشاره شد، نسبیت عام هیچ برگ‌بندی مرجحی را پیشنهاد نمی‌کند. این مطلب به رویکردی در رابطه با زمان می‌انجامد موسوم به چندشاخه‌گی^۳ که بر مبنای آن متغیرهای زمانی مختلفی به نقاط مختلف فضا/زمان نسبت داده می‌شوند. در کتاب شناخته‌شده گراتش که کتاب مرجع فیزیک‌دانان محسوب می‌شود، می‌خوانیم:

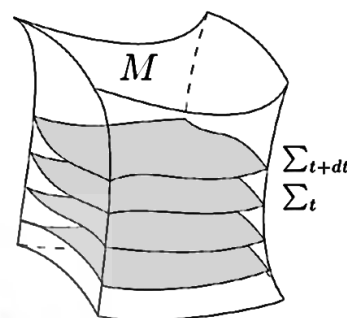
^۱ برای دیدن جزئیات بیشتر (نک. Janis, 1983).

^۲ Rindler

^۳ many-fingered

^۴ جارامیلو و کم نیز به این نکته اشاره کرده‌اند (نک. Jaramillo & Lam, 2021).

بست. فقط فضازمان‌هایی را که به طور سراسری هذلولوی باشند، ضرورتاً می‌توان به وسیله تحول شرایط اولیه در زمان به نحوی درست توصیف کرد. البته صورت‌بندی هامیلتونی در برخی از مواردی که فضازمان به طور سراسری هذلولوی نیست نیز قابل به‌کارگیری است (نک. Friedman, 2004)؛ اما این مطلب هنوز قاعده‌ای کلی نیست و بنابراین، این ادعا همچنان صادق است که فقط در مواردی ویژه می‌توان فضازمان را به صورت تحول زمانی ابرسطحی فضاگونه در نظر گرفت.



شکل ۱. برگ‌بندی فضازمان به طور سراسری هذلولوی (برگرفته از Jha, 2022, p. 13 با تغییرات).

۴- نتیجه‌گیری

- «طرح‌واره»‌های گوناگون ممکن است از نظر ساختارهای ریاضی که استخدام می‌کنند، پیش‌بینی‌های تجربی‌شان و تصاویر متافیزیکی که متضمن آن هستند، با یکدیگر متفاوت باشند. دو طرح‌واره رقیب، یعنی طرح‌واره نیوتنی و طرح‌واره لاگرانژی، زمانی که در رابطه با فضازمان به کار گرفته شوند، به دو تصویر رقیب از فضازمان خواهند انجامید: تصویر نیوتنی در برابر تصویر لاگرانژی. تصویر لاگرانژی بیش از تصویر نیوتنی با روح و فلسفه کلی نظریه نسبیت سازگار است. همچنین، تصویر لاگرانژی جهان‌شمول است و در رابطه با هر فضازمانی کاربرد دارد، در حالی که تصویر نیوتنی فقط در رابطه با فضازمان‌هایی ویژه به کار می‌رود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت

تصویر لاگرانژی نسبت به تصویر نیوتنی تصویر متافیزیکی پذیرفتنی‌تری از فضازمان است زمانی که (۱) «فضازمان» را به طور عام مد نظر داریم، نه فضازمانی ویژه را و نیز زمانی که (۲) فضازمان را در سطح بنیادی واقعیت در نظر می‌گیریم و نه آنچه را که از آن بر ما جلوه‌گر می‌شود. در مقابل، تصویر نیوتنی فقط برای مقاصد عملی و محاسباتی قابل قبول است. تصویر نیوتنی به صورت موضعی، یعنی به نحوی که ما به جهان دسترسی تجربی داریم، پذیرفتنی است. به یاد آورید که همه اندازه‌گیری‌های فضایی زمانی ما موضعی یا شبه‌موضعی هستند. زمانی که هدف ما بررسی عددی و محاسباتی است، تصویر نیوتنی به عنوان تصویری از ناحیه‌ای از فضازمان ممکن است پذیرفتنی باشد.

- چنانکه اسمولین و وارتون یادآور شده‌اند، این اشتباه است که جهان یا فضازمان را نوعی رایانه در نظر بگیریم. تصویر نیوتنی از فضازمان نوعی از رایانه‌انگاری جهان و فضازمان است. این باور اگرچه برای مقاصد عملی و محاسباتی کارآمد و مفید است، تبیینی قابل قبول را از جهان و فضازمان ارائه نمی‌دهد. در مقابل، طرح‌واره لاگرانژی، با کنار گذاشتن این وجه از فلسفه مکانیکی و فلسفه محاسباتی و با استخدام نوعی از کل‌گرایی، تصویر متافیزیکی بهتری را از فضازمان در اختیار ما قرار می‌دهد.

References

- Adlam, E. (2022). Determinism beyond time evolution. *European Journal for Philosophy of Science*, 12(4), 73. <https://doi.org/10.1007/s13194-022-00497-3>
- Arnowitt, R., Deser, S., & Misner, Ch. W. (2008). Republication of: The dynamics of general relativity. *General Relativity and Gravitation*, 40, 1997–2027. <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>
- Baez, J. C., & Wise, D. K. (2019). *Lectures on classical mechanics*. Manuscript.

- Lanczos, C. (1952). *The Variational Principles of Mechanics*. University of Toronto Press.
- Maudlin, T. (2007). *Metaphysics within Physics*. Oxford University Press.
- Minkowski, H. (2012). Space and Time. In V. Petkov (Ed.), F. Lewerto & V. Petkov (Trans.), *Space and Time. Minkowski's Papers on Relativity* (pp. 39–53). Minkowski Institute Press.
- Misner, Ch. W., Thorne, K. S., & Wheeler J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman and Company.
- Nambu, Y. (1952). On Lagrangian and Hamiltonian formalism. *Progress of Theoretical Physics*, 7(2), 131–170. <https://doi.org/10.1143/ptp/7.2.13>
- North, J. (2009). The “structure” of physics: A case study. *The Journal of Philosophy*, 106(2), 57–88. <https://doi.org/10.5840/jphil2009106213>
- North, J. (2018). A New Approach to the Relational–Substantial Debate. In K. Bennett & D. W. Zimmerman (Eds.), *Oxford Studies in Metaphysics* (Vol. 11), Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198828198.003.0001>
- North, J. (2021a). Formulations of classical mechanics. In E. Knox & A. Wilson (Eds.), *The Routledge Companion to Philosophy of Physics* (pp. 21–32). Routledge.
- North, J. (2021b). *Physics, structure, and reality*. Oxford University Press.
- Smolin, L. (1997). *The Life of the Cosmos*. Oxford University Press.
- Smolin, L. (2009). The unique universe. *Physics World*, 22(06), 21–26. <https://doi.org/10.1088/2058-7058/22/06/36>
- Smolin, L. (2012). The culture of science divided against itself. *Brick Magazine*, 88.
- Smolin, L. (2015). Temporal naturalism. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 52, 86–102.
- Thornton, S. T., & Marion, J. B. (2004). *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Brooks/Cole -Thomson Learning.
- Unger, R. M., & Smolin, L. (2015). *The singular universe and the reality of time*. Cambridge University Press.
- Wallace, D. (2000). *The quantization of gravity - an introduction*. arXiv:gr-qc/0004005 [gr-qc]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.gr-qc/0004005>
- Wharton, K. (2015). The Universe is not a Computer. In A. Aguirre, B. Foster & Z. Merali (Eds.), *Questioning the Foundations of Physics: Which of Our Fundamental Assumptions Are Wrong?* (pp. 177–189). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13045-3_12
- Wu, X., Mei, L., Huang, G., & Liu, S. (2015). Analytical and numerical studies on differences between Lagrangian and Hamiltonian <https://math.ucr.edu/home/baez/classical/textfile/s/2005/book/classical.pdf>.
- Brown, G. (Ed.) (2023). *The Leibniz–Caroline–Clarke Correspondence*. Oxford University Press.
- Burton, H. (2021). *Examining Time: A conversation with Lee Smolin, Ideas Roadshow conversations*. Open Agenda Publishing.
- Chen, E. K., & Goldstein, Sh. (2022). Governing Without a Fundamental Direction of Time: Minimal Primitivism about Laws of Nature. In Y. Ben-Menahem (Ed.), *Rethinking the Concept of Law of Nature: Natural Order in the Light of Contemporary Science* (pp. 21–64). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96775-8_2
- Chen, R.-Ch., & Wu, X. (2016). A Note on the Equivalence of Post-Newtonian Lagrangian and Hamiltonian Formulations. *Communications in Theoretical Physics*, 65(3), 321. <https://doi.org/10.1088/0253-6102/65/3/321>
- Cook, G. B. (2000). Initial data for numerical relativity. *Living reviews in relativity*, 3(5). <https://doi.org/10.12942/lrr-2000-5>
- Curiel, E. (2014). Classical Mechanics Is Lagrangian; It Is Not Hamiltonian. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 65(2), 269–321. <https://doi.org/10.1093/bjps/axs034>
- Earman, J. (1989). *World Enough and Space-time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. The MIT Press.
- Friedman, J. L. (2004). The Cauchy problem on spacetimes that are not globally hyperbolic. In T. Piotr & F. Helmut (Eds.), *The Einstein Equations and the Large-Scale Behavior of Gravitational Fields: 50 Years of the Cauchy Problem in General Relativity* (pp. 331–346). Springer Basel AG. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7953-8_9
- Goldstein, H., Poole, Ch., & Safko, J. (2001). *Classical mechanics*. Addison Wesley.
- Janis, A. I. (1983). Simultaneity and conventionality. In *Physics, Philosophy and Psychoanalysis: Essays in Honour of Adolf Grunbaum* (pp. 101–110). https://doi.org/10.1007/978-94-009-7055-7_5
- Jaramillo, J. L., & Lam, V. (2021). Counterfactuals in the initial value formulation of general relativity. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 72(4), 1111–1128.
- Jha, R. (2022). *Introduction to Hamiltonian Formulation of General Relativity and Homogeneous Cosmologies*. arXiv: 2204.03537 [gr-qc]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.03537>
- Krasnov, K. (2020). *Formulations of general relativity: Gravity, spinors and differential forms*. Cambridge University Press.
- Kroon, J. A. V. (2022). *Conformal methods in general relativity*. Cambridge University Press.

approaches at the same post-Newtonian order.
Physical Review D, 91(2).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.024042>

