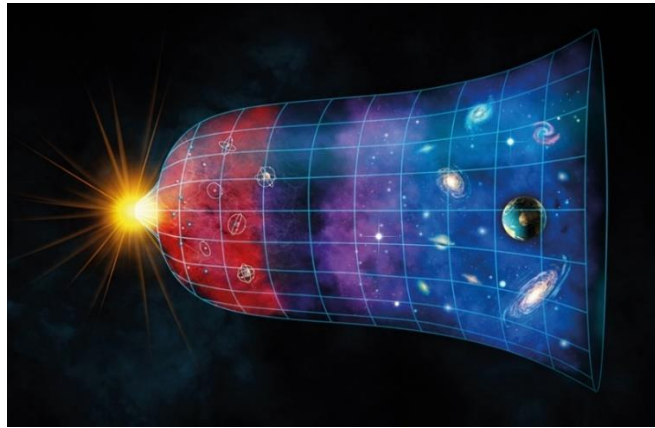


علیتِ سرنوشت‌ساز



Crucial causality¹

فشرده

ما برای بیان رخداد‌های طبیعی همواره، خواسته یا ناخواسته، از مقوله فضا‌زمان استفاده می‌کنیم. بی‌آن‌که بگوئیم و یا اصولاً بدانیم فضا‌زمان چیست. آیا در چنین حالتی ما مجاز هستیم یافته‌های خود را علمی به نامیم؟ به عبارت دیگر، آیا علمی دانستن یافته‌هایمان مفروض بر وجود فضا‌زمان نیست؟ ما با چه برهانی فضا‌زمان را بستر نظریه‌های بنیادی انگاشته‌ایم؟ در حالی‌که می‌دانیم فیلسوفان و دانشمندان بسیاری در طول قرن‌ها سعی در شناخت فضا‌زمان کرده‌اند بدون آن‌که به نتیجه مطلوب دست یابند. به‌منظرم پاسخ به این پرسش‌ها از یک طرف نیاز به درک درست از شکل‌گیری دستگاه ادر اکمان و مقوله فضا و زمان در آن در طول فرگشت، تکامل، دارد و از طرف دیگر به بیان یک نظریه علمی متکی بر منطق ریاضی با توان تایید یافته‌های نظریه کوانتوم، نظریه نسبیت عام و ارائه راه حلی برای رفع کاستی‌های آنها.

شاید دلیل ناتوانی ما در ارائه یک نظریه علمی در باره‌ی چیستی فضا‌زمان ناشی از دانش ناکافی ما از توپولوژی (ساختار) فضا باشد. شاید هم اصولاً فضا‌زمان بشکلی که ما تصور می‌کنیم وجود ندارد. اگر چنین باشد لازم است رخداد‌های طبیعی را فارغ از مقوله فضا‌زمان بیان و مستدل نماییم. بی‌شک اجرای چنین چیزی نیازمند نظریه‌ایست که اگر ارائه آن ناممکن نباشد اما بسیار دشوار است. به قول اینشتین این خواست شبیه آن است که آدمی بخواهد در مکانی بدون اکسیژن تنفس کند.

موانع فراوانی که در شناخت و توضیح چیستی فضا‌زمان وجود دارند فیزیکدان‌های نظری را بر آن داشته است مدل‌هایی را بررسی کنند که احتمال دریافت پاسخ مناسب به مسئله‌ی فضا‌زمان را می‌دهند. از آن‌جمله است مدلِ علیتِ سرنوشت‌ساز.

در این مقاله می‌کوشم پس از پیش‌گفتاری ایده یا مدل علیتِ سرنوشت‌ساز را که در دهه‌ی هشتاد میلادی قرن گذشته مطرح گردید توضیح دهم. فیزیکدان نظری رافائل سورکین شتاب انبساط کیهان بر اثر انرژی تاریک را که چند سال بعد کشف شد و او آن را در مدل مزبور پیش‌بینی نموده بود دال بر درست بودن ایده علیتِ سرنوشت‌ساز می‌داند.

تذکر: سلسله مقالات حاضر در باره‌ی فضا‌زمان (گرانش کوانتومی) بنحوی نگاشته شده‌اند که مستقل از هم قابل مطالعه می‌باشند. پیشتر:

* در مقاله 'خاستگاه فضا و زمان'^۲ ایده‌ی مرتبط با نظریه نسبیت، نظریه کوانتوم و ترمودینامیک را بررسی و به آماری بودن فضا‌زمان بر مبنای قوانین ترمودینامیک پرداختیم.

* در مقاله 'کوانتای فضا و زمان'^۳ ایده‌ی فضا‌زمان در فرم بافتاری را تحت عنوان گرانش کوانتومی حلقه بررسی کردیم و گفتیم که در این مدل فضا نه پس‌زمینه‌ی رخدادها بلکه ابژکتی محسوب می‌شود دینامیکی (دربرگیرنده‌ی زمان) که از قوانین نظریه کوانتوم پیروی می‌کند.

* در مقاله 'فضا‌زمان آیر سیال'^۴ ایده‌ی فضا‌زمان با ویسکوزیته قابل اغماض را بررسی کردیم و گفتیم که در این‌جا فضا‌زمان شکل‌گرفته از اثرات ذرات کوانتومی آن تصور می‌شود که در کوچکترین سطح به واحدهای ناپیوسته (کوانتومی) در مقیاس پلانک (حدود 10^{-35} متر) تقسیم شده است.

پیش‌گفتار

در باره‌ی مفهوم علیت: در این‌باره در مقاله 'معلول و علت'^۵ می‌خوانیم:

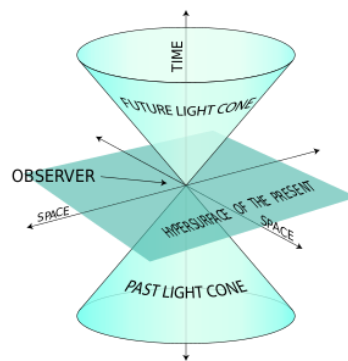
"... دو پدیده تحت شرایط مشابهی از یک حالت اولیه مشابه، از روندی مشابه برخوردار هستند."^۵ و یا "چنانچه حالت حاضر یک سیستم ایزوله در تمامی ابعادش دقیقاً شناخته شده باشد، قادریم حالت‌های آتی آن را محاسبه کنیم."^۵

ما در باور دیرینه‌ی خود به علیت (و نامتقارن بودن علت و معلول) مقوله‌ی دترمینسم را ابداع نموده‌ایم که می‌گوید:

"چنانچه تمامی ابعاد تعیین‌کننده‌ی یک سیستم ایزوله برای یک زمان معین دقیقاً مشخص باشند، می‌توان نتایج سنجش‌های آتی بر آن را برای زمان‌های دیگر محاسبه نمود."^۵

دیدگاه ذکر شده مدت زمان طولانی در فلسفه و فیزیک نیوتنی معتبر بود و هنوز هم این‌جا و آن‌جا کارائی دارد. اما از اوایل قرن بیستم از دو سو مورد پرسش قرار گرفت: از جانب نظریه نسبیت و نظریه کوانتوم. در واقع این دو نظریه یک‌سویه و جهانشمول بودن علیت را که تا آن زمان بی‌چون و چرا معتبر محسوب می‌شد به چالش کشیده و آن را درست نمی‌دانند.

در نظریه نسبیت، فضا-زمان به ۴ حوزه‌ی مختلف تقسیم می‌شود. آینده: جایگاه اثرگذاری رویدادها؛ گذشته: جایگاه علت‌های رویدادها؛ و دو بخش فضاگونه spacelike: فارغ از رابطه علت و معلولی (تصویر ۲).



تصویر ۲: مخروط نوری ۶

در نظریه کوانتوم بعکس آنچه از فیزیک نیوتنی می‌شناسیم میان علت و معلول تقارن وجود دارد. یعنی، معلول می‌تواند پیش از و یا پس از علت رخ دهد:

"به دلیل آن‌که پروسه‌های طبیعی در فضا و زمان بررسی می‌شوند لذا نیاز به ارایه دقیق مکان و زمان و ابعاد تعیین‌کننده‌ی دیگر ابژه مورد بررسی می‌باشد. اصل عدم قطعیت (ورنر هایزنبرگ) نشان می‌دهد که نمی‌توان برای مثال مکان و زمان یک شیء را همزمان دقیق اندازه گرفت. یعنی، در نظریه کوانتوم تعیین رابطه‌ی علت و معلول بشکلی که در مکانیک نیوتنی مرسوم است ناممکن می‌باشد. ... به عبارت دیگر، اصل عدم قطعیت اساس قانون علیت را زیر سؤال می‌برد. فیزیکدان‌ها در نقاط مختلف جهان (اتریش، دانشگاه وین ۲۰۱۵ و کانادا، دانشگاه واترلو ۲۰۱۷) موفق شده‌اند در آزمایش‌های پیچیده‌ی کوانتومی شرایطی را به‌وجود آورند که در آن‌ها دیگر رابطه‌ی علت و معلولی میان رویدادها قابل تشخیص نبود."^۵

ایده علیت سرنوشت‌ساز که به آن مدل مجموعه‌ی علی (causal set model) نیز می‌گویند در میان مدل‌های ارائه شده برای توضیح چپستی فضا-زمان از منطقی ساده برخوردار است. این مدل در واقع بر پایه تعداد قابل شماری از عناصر تشکیل دهنده‌ی فضا-زمان بنا شده است. مدل علی در طول توسعه خود به نوعی فرمالیسم ریاضی دست یافته است که در آن مقوله زمان در شکل‌گیری عناصر جدید فضا (نقاط ریاضی، پیوندها یا رویدادها، تصویر ۲) از گذشته به آینده نقش بازی می‌کند. به این معنا که هر رویداد (هر نقطه) قبلی می‌تواند بر هر رویداد (بر هر نقطه) بعدی تاثیر بگذارد اما نه بر عکس.

مجموعه علی (causal set)

مجموعه علی به مجموعه‌ای گفته می‌شود که بر روی عناصر آن یک نظم (ترتیب) جزئی تعریف شده است (partially ordered set, teilweise geordnete Menge). دقیق‌تر: مجموعه علی مجموعه‌ایست با تعداد قابل شماری از عناصر اساسی فضا-زمان، رویدادهای بنیادی (elementary events, Elementarereignisse). توضیحات بیشتر در پائین.

تاریخچه مجموعه علی

مجموعه علی، تاریخی بسیار طولانی دارد. برای مثال، زنون از فیلسوفان یونان باستان در قرن پنجم پیش از میلاد در ارتباط با موضوع وحدت هستنده‌ها مسئله‌ی تقسیم‌پذیری فضا را (به معنای ریاضی و گسسته discrete آن) مطرح می‌کند.^۷ ایده‌ی مجموعه علی در قرن‌های اخیر از جمله از جانب گئورگ فردریش برنهارد ریمان G. F. Bernhard Riemann، ریاضیدان آلمانی (۱۸۶۶-۱۸۲۶) قرن نوزدهم پی‌گیری می‌شود. ریمان در سخنرانی معروف دهم ژوئن ۱۸۵۴ می‌گوید:

"پرسش در مورد اعتبار پیش‌پندارهای هندسه در بینهایت کوچک‌ها مرتبط است با پرسش در مورد علت درونی تناسبات فضا ... که می‌توان آن را بخشی از آموزه فضا دانست. در واقع در یک منیفلد (تعداد زیاد و متنوع، manifold Mannigfaltigkeit) گسسته اصل تناسبات در مقوله منیفلد گنجانده شده است، اما در یک منیفلد پیوسته می‌باید جداگانه به آن افزوده شود. بنابر این لازم است یا آنچه واقعیت‌های اساسی فضا را تشکیل می‌دهند منیفلدی گسسته باشد یا علت تناسبات را در ورای آن جستجو کرد."^۸

به این ترتیب "ریمان می‌خواهد بداند که اصولاً کدام ساختار فضا امکان آن را می‌دهد که تناسبات فضا مانند فاصله، مساحت، زاویه و حجم را با خواص قابل سنجش تعیین نمود. ریمان برای این منظور دو نوع ساختار از فضا را با هم مقایسه می‌کند: منیفلد پیوسته و منیفلد گسسته. در یک منیفلد پیوسته مانند فضای هندسه اقلیدسی میان دو نقطه بینهایت نقطه‌های دیگر وجود دارند. در این هندسه می‌توان هر حجمی را به حجم‌های کوچک و کوچکتر تقسیم نمود بی‌آنکه این روند پایانی داشته باشد. در مقابل در یک منیفلد گسسته هر ناحیه‌ی بسته شامل تعداد قابل شماری از عناصر می‌شود. در صورت تقسیم هر یک از این ناحیه‌ها به ناحیه‌های کوچکتر پس از تعداد محدودی گام به کوچکترین ساختار می‌رسیم. یعنی، فضای گسسته بطور طبیعی اطلاعات در مورد تناسبات را دربردارد. ... در مقابل برای یک فضای پیوسته (منیفلد پیوسته) هیچ امکانی برای شمارش عناصر وجود ندارد (پاسخ برای هر ناحیه بینهایت است) و لازم است منشاء تناسبات به شیوه‌های دیگر بیان گردد"^۹

جالب است بدانیم که یک قرن بعد (۱۹۵۴) آلبرت اینشتین در باره‌ی ساختار ۴ بعدی فضا-زمان می‌نویسد:

"منظور من از نظریه ناپیوستگی [ناپیوسته برای اینشتین همانی است که ریمان آن را گسسته می‌نامد] نظریه‌ایست که در آن هیچ ضریب دیفرانسیالی (differential quotient) وجود ندارد. در یک چنین نظریه‌ای نمی‌تواند فضا و زمان وجود داشته باشد، بلکه تنها اعداد [وجود دارند]. به‌ویژه دشوار خواهد بود از یک چنین طرحی چیزی تقریباً شبیه نظم فضا-زمان کسب نمود. من نمی‌توانم تصور کنم که اصل موضوعه‌ی [axiomatic skeleton, das axiomatische Gerippe] یک چنین فیزیکی چگونه می‌تواند باشد. اما فکر می‌کنم کاملاً امکان‌پذیر است که توسعه منجر به آن خواهد شد."^{۱۰}

راستینه ژرفتر

بیشتر گفتیم که قرن‌ها تلاش فیلسوفان و دانشمندان برای شناخت و توضیح چیستی فضا-زمان به نتیجه مطلوب نیانجامیده است و اضافه کردیم که شاید دلیل آن در ناکافی بودن دانش ما از توپولوژی (ساختار) فضا باشد. ما توپولوژی فضا را از گذشته‌های دور - بی شک به‌خاطر تجربیات روزمره و دانش محدودمان - منیفلدی پیوسته انگاشته‌ایم. در ادامه نه تنها فیزیک نیوتنی بلکه دو نظریه مهم و اساسی، یعنی نظریه نسبیت و نظریه کوانتوم را نیز بر همان مبنا بنا نموده‌ایم اما اکنون با مسائلی مواجه شده‌ایم انکارناپذیر که به احتمال زیاد ریشه در برداشت ما از ساختار فضا دارند. از جمله و به‌ویژه این‌که ما از یک طرف نظریه کوانتوم را نظریه‌ای گسسته (discrete) می‌دانیم و از طرف دیگر آن را در بستر فضا-زمان پیوسته بیان می‌داریم. مشکل دیرینه‌ی دیگر، وحدت نظریه‌های کوانتوم و نسبیت (عام) است که تاکنون حل نشده باقیمانده است. ما هیچ اطلاعی نداریم که نیروی گرانشی در کوچکترین مقیاس به چه شکلی تحت تاثیر نظریه کوانتوم است، یعنی ما هنوز نظریه‌ای به نام نظریه گرانش کوانتومی نداریم. اما چنانچه ما فضا را ساختاری گسسته (مانیفلد گسسته) بدانیم در این‌صورت طبق نظریه ریمان (هندسه ریمان) هر ناحیه‌ی محدود از آن شامل تعداد قابل شماری از عناصر می‌شود. بنابر توضیحات بالا فضای گسسته بطور طبیعی اطلاعات در مورد تناسبات را دربردارد. در این‌صورت می‌باید که بتوان از

مجموعه علی نظم زمانی ذکر شده در فضا زمان رایج را نتیجه گرفت:

"رویدادهای نقطه‌های شکل فضا زمان رایج در شبکه‌ای پیچیده که اطلاعات مربوط به رابطه‌ی نقاط همجوار، فاصله‌ها و زمان‌ها، را در بر دارد قرار گرفته‌اند. با این حال تنها چیزی که ما در مورد رابطه‌ی بین رویدادهای اساسی یک مجموعه علی می‌دانیم ... [این است که]: برای بعضی از زوج‌های عناصر مجموعه x, y (و نه برای همه آنها!) x قبل از y می‌آید و در موارد دیگر x بعد از y . از نگاه فیزیک می‌توان این نظم را معادل میکروسکوپی واژه‌های 'پیش از' و 'پس از' تصور کرد، به شکلی که آنها را از دنیای ماکروسکوپی می‌شناسیم. ... (صفت 'علی' وارد عمل می‌شود زیرا این جمله که یک رویداد A پس از یک رویداد دیگر B رخ می‌دهد باید معادل با جمله‌ای باشد که واقعه B در اصل می‌تواند علت وقوع A باشد.)"

قابل توجه است که یک چنین ساختاری کافی است تا با دقت بالا همه‌ی آن چیزهایی را بازسازی کنیم که تحت نام هندسه فضا زمان می‌فهمیم. ... به زبان ساده منظور 'نظم + عدد = هندسه' است. برای درک این مطلب لازم است بدانیم: طبق نظریه نسبیت عام می‌توان هندسه فضا زمان (یا به بیان دیگر، میدان گرانشی) را با ده مشخصه عددی [توضیحاتی در این باره در مقاله: تقارن^{۱۱}] دقیقاً توصیف کرد. نه از ده مشخصه مزبور از طریق چگونگی انتشار نور در فضا زمان مربوطه قابل بازسازی است - به این دلیل ساده که هندسه فضا زمان چگونگی انتشار نور را [با سرعت بالا ولیکن محدود، تصویر ۲] تعیین می‌کند. ... حجم یک ناحیه‌ی فضا زمانی برابر است با تعداد عناصر مجموعه علی آن. ... مثال: ناحیه‌ی از فضا زمان با حجمی برابر با یک سانتی‌متر مکعب و انبساط زمانی برابر با یک ثانیه از 10^{139} عنصر تشکیل شده است!! این تعداد از عناصر نشان می‌دهند که چرا ما تاکنون متوجه "اتمی بودن" [توضیحاتی در این باره در مقاله‌های: کوانتای فضا زمان^۳ و فضا زمان آبر سیال^۴] فضا زمان نشده‌ایم.^{۱۲}

طرحی مشابه طرح دما

فیزیکدان نظری رافائل سورکین Rafael Sorkin از انستوی پرایمتر در واترلو کانادا از پیشگامان مدل مجموعه علی می‌گوید:

"می‌توان تصور کرد که فضا به همان شکل از تک نقاط ناشی می‌شود که دما از اتم‌ها ناشی می‌شود. هیچ معنایی نمی‌دهد در مورد دمای یک تک اتم بپرسید. برای کارکرد آن نیاز به چندین مورد دارید."^{۱۳}

سورکین معتقد است که نقاط مربوطه انرژی درونی ضعیفی را بوجود می‌آورند که سبب تسریع انبساط کیهان می‌شوند. در نیمه دوم دهه هشتاد قرن گذشته سورکین تعداد نقاط کیهان قابل ملاحظه را تخمین می‌زند. او کشف انرژی تاریک در چند سال بعد از آن را که دلیل انبساط سریعتر کیهان تلقی گردید گواه بر درستی مدل خود ارزیابی می‌کند.^{۱۳}

تذکر: برای نگارنده این ادعای سورکین که "نقاط مربوطه انرژی درونی ضعیفی را بوجود می‌آورند" نه تنها گویا نیست بلکه آن را کافی برای درست بودن ایده علیت سرنوشت‌ساز جهت توضیح چپستی و شکل‌گیری فضا نمی‌داند.

از اوایل دهه نود قرن گذشته چندی از فیزیکدانان نظری شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای برای ارزیابی مدل مجموعه علی را مطرح کردند. با این هدف که عناصر ناشناخته شده‌ی فضا زمان را با یاری بخش‌های بسیار ریز فضا زمان رایج (در فرم هرم‌های چهاربُعدی Hyperpyramid) در رابطه با نوسانات کوانتومی (quantum fluctuations) و با در نظر گرفتن اصل علیت مطالعه و بدست آورند. حاصل کار آنها با کنار هم چیدن اجزاء فضا زمانی کسب نموده کیهانی^۴ بعدی با خواصی شبیه کیهان ما بود.^{۱۳}

سال‌ها بعد سورکین موفق به ارائه دینامیکی برای مدل علیت سرنوشت‌ساز شد. علاوه بر این او نشان داد که می‌توان دینامیک مربوطه را توسط شرایط کاملاً عام و تقریباً بدون ابهام تعریف کرد.^{۱۴}

خلاصه: فضا زمان در مدل علیت سرنوشت‌ساز توسط یک مجموعه به نام مجموعه نقطه (point set, Punktmenge) با ساختار علی توضیح داده می‌شود. در واقع این ایده می‌گوید: یک ساختار علی هندسه‌ای را تعریف می‌کند که تا حد یک عنصر (عنصر حجم) تعیین شده و در مورد مجموعه گسسته حتی این عنصر حجم نیز شناخته شده است.

1. <https://www.scientia.global/dr-peter-evans-retro-causality-unravelling-the-mysteries-of-quantum-cosmology/>
 2. Hassan Bolouri: The origin of space and time
 ۲. حسن بلوری، 'خاستگاه فضا و زمان'، منتشر شده در سایت‌های فارسی زبان، ماه مارچ ۲۰۲۱
 3. Hassan Bolouri: Then Quanta of Space and Time
 ۳. حسن بلوری، 'کوانتای فضا و زمان'، منتشر شده در سایت‌های فارسی زبان، ماه آوریل ۲۰۲۱
 4. Hassan Bolouri, Superfluid Spacetime
 ۴. حسن بلوری، 'فضازمان ابرسیال'، منتشر شده در سایت‌های فارسی زبان، ماه می ۲۰۲۱
 5. Hassan Bolouri, Causal Asymmetry
 ۵. حسن بلوری، 'معلول و علت'، منتشر شده در سایت‌های فارسی زبان، ماه می ۲۰۱۹
 6. https://en.wikipedia.org/wiki/Light_cone
 7. <https://www.einstein-online.info/explandict/zeno-von-elea>
 - 8a. Bernhard Riemann, Ueber die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen. Aus dem dreizehnten Bande der Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Transcribed by D. R. Wilkins Preliminary Version: December 1998 Corrected: April 2000
 - 8b. <https://bbs.pku.edu.cn/attach/f1/c7/f1c79b173bf775dc/Geom.pdf>
 9. <https://www.einstein-online.info/spotlight/>
 10. Albert Einstein in einem Brief an H. S. Joachim, 14. August 1954, In: J. Stachel, Einstein and the Quantum: Fifty Years of Struggle, in From Quarks to Quasars, Philosophical Problems of Modern Physics, U. Pittsburgh Press, 1986
 11. Hassan Bolouri, Symmetry: the key to recognizing the cosmos
 ۱۱. حسن بلوری، 'تقارن: کلید شناخت کیهان'، منتشر شده در سایت‌های فارسی زبان، ماه مارچ ۲۰۲۰
 12. <https://www.einstein-online.info/spotlight/kausalmengen/>
 13. Rafael Sorkin, In: Theoretical physics: The origins of space and time in Nature 500, 2013
 14. http://www.mathphys.uni-freiburg.de/physik/filk/public_html/Skripte/Texte/Raumzeit.pdf
- XX