

Symmetry in modern physics and its philosophical consequences

Zeinab Ansarian *

Afshin Shafiee **

Abstract

Symmetry is one of the most fundamental and widely used concepts in modern physics, playing a pivotal role in the development of new theories, particularly in areas such as general relativity, quantum field theory, and the unification of physical forces. In modern physics, the concept of symmetry extends beyond geometric and observable symmetries. In its contemporary sense, symmetry is defined as invariance under specific transformations and is more concerned with the laws of physics and theoretical structures than with physical objects. In other words, in the realm of theoretical physics, symmetry functions as a meta-law, imposing constraints on physical laws and shaping the overall structure of theories. The central role of this concept in modern physics has given rise to diverse philosophical discussions. This article provides an overview of the concept of symmetry, examines its historical introduction into modern physics, and explores how physicists have utilized this concept. Finally, it addresses the philosophical implications and issues associated with symmetry.

Keywords: Symmetry, Symmetry Argument, Curie's Principle, Symmetry Principles.

* Ph.D. Candidate of Philosophy of Science and Technology, Sharif University of Technology (Corresponding Author), ansarian.zh@gmail.com

** Associate Professor, Department of Chemistry, Sharif University of Technology, shafiee@sharif.edu

Date received: 14/06/2024, Date of acceptance: 03/09/2024



تقارن در فیزیک نوین و تبعات فلسفی آن

زینب انصاریان*

افشین شفیعی**

چکیده

تقارن یکی از بنیادی‌ترین و پرکاربردترین مفاهیم در فیزیک نوین است که نقشی کلیدی در توسعه نظریه‌های جدید ایفا می‌کند، خصوصاً در زمینه‌هایی چون نسبیت عام، نظریه میدان‌های کوانتومی و وحدت بخشی نیروهای فیزیکی. این مفهوم در فیزیک نوین فراتر از تقارن‌های هندسی و مشاهده‌پذیرهاست. در معنای نوین تقارن به صورت ناوردایی تحت تبدیلات مورد نظر تعریف می‌شود و بیشتر متوجه قوانین فیزیک و ساختارهای نظری است تا اشیا فیزیکی. به عبارتی در حوزه فیزیک نظری تقارن به مثابه یک ابر قانون عمل می‌کند که محدودیت‌هایی را بر قوانین فیزیکی و شکل نظریه به صورت کلی اعمال می‌کند. نقش محوری این مفهوم در فیزیک نوین موجب شکل‌گیری بحث‌های فلسفی متنوعی شده‌است. این مقاله مروری دارد بر مفهوم تقارن، بررسی تاریخی ورود آن به فیزیک نوین و نحوه استفاده فیزیکدانان از این مفهوم. در پایان به تبعات و مسائل فلسفی مرتبط با آن اشاره می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تقارن، استدلال تقارنی، اصل کوری، اصول تقارنی.

۱. مقدمه

در نگاه اول تقارن برخلاف مفاهیم پیچیده و انتزاعی فیزیک نوین مفهومی آشنا به نظر می‌رسد. ما تقارن را در طبیعت از بدن موجودات زنده گرفته تا اشکالی مثل برف و بلورها مشاهده

* دانشجوی دکترای فلسفه علم و تکنولوژی، دانشگاه صنعتی شریف (نویسنده مسئول)، ansarian.zh@gmail.com

** دانشیار گروه شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، shafiee@sharif.edu

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳



کرده‌ایم. انسان خود بسیاری از این تقارن‌ها را در معماری بازتولید کرده‌است اما تقارن در فیزیک و ریاضیات نوین نسبت به تقارنی که ما در ذهن داریم شکل انتزاعی‌تری دارد و بیشتر متوجه ساختارها و معادلات فیزیکی است. از اوایل قرن بیستم تقارن بر کل فیزیک نوین هم در حوزه نسبیت و هم بر مکانیک کوانتومی سیطره دارد. باری پارکر (Barry Parker) درباره پی‌بردن به نقش اساسی تقارن در فیزیک چنین می‌گوید:

دستاوردهای بزرگ علمی گاهی از چنان مسائل پیش پا افتاده‌ای حاصل می‌شوند که وقتی نهایتاً کشف صورت گرفت موجب پریشان حالی دانشمندان می‌شود. یکی از این موارد در نظریه میدان اتفاق افتاد. پدیده پیش پا افتاده در این مورد تقارن بود. بعد از سال‌های متمادی تشخیص این که تقارن نقش عمده‌ای در طبیعت بازی می‌کند، کلیدی بود که باعث حل معمای کشفیات مهمی شد که در یکی دو دهه گذشته صورت گرفته بود (Parker, 1987, 94).

در این مقاله قصد داریم مفهوم تقارن در فیزیک نوین، نحوه استفاده فیزیکدانان از آن و مباحث فلسفی پیرامون آن را بدون استفاده از ریاضیات پیچیده معرفی کنیم. بخش دوم تاریخچه مختصری از تقارن از دوران باستان تا عصر نوین ارائه می‌کند. این تاریخ را می‌توان به سه دوره تقسیم کرد: ۱) دوران باستان ۲) دوران کلاسیک و ۳) دوران نوین. بخش سوم مقاله، به مفهوم تقارن در فیزیک نوین را می‌پردازد و بخش چهارم ارتباط تقارن با قوانین بقا را توضیح می‌دهد. بخش پنجم نحوه استفاده فیزیکدانان از مفهوم تقارن و چگونگی توسعه این مفهوم در فیزیک نوین را بررسی می‌کند و در ادامه به چند تقارن شاخص در دوره معاصر اشاره می‌شود. بخش ششم به نقش تقارن در نظریه پردازی می‌پردازد. بخش انتهایی مقاله مروری اجمالی خواهد داشت بر بحث‌های فلسفی پیرامون این مفهوم.

۲. تاریخچه تقارن از عصر باستان تا دوران نوین

انسان از دیرباز تا کنون با مفهوم تقارن آشنایی داشته است. در طول تاریخ مفهوم تقارن ارتباط تنگاتنگی با هنر، توازن، زیبایی و وحدت داشته است. واژه تقارن در زبان انگلیسی از ترکیب واژه‌های یونانی sum به معنای "با هم" و metron به معنای "اندازه" بدست آمده است (Brading et. al., 2023). اقلیدس (قرن سوم پیش از میلاد) در کتاب اصول (Euclid's Elements) تقارن را اینگونه تعریف می‌کند که مقادیر (بلندی‌ها یا اندازه‌ها) که با یک مقیاس مشترک اندازه‌گیری می‌شوند، قابل اندازه‌گیری هستند (summetra)، و آنهایی که نمی‌توانند مقیاس مشترکی داشته باشند، غیر قابل اندازه‌گیری هستند (asummetra). ایزاک بارو (Isaac Barrow) (۱۶۳۰-۱۶۷۷)،

استاد ریاضیات در دانشگاه کمبریج، نظر اقلیدس را اینگونه توضیح می‌دهد که تقارن یا قابلیت اندازه‌گیری گاهی به معنای مقایسه هر چیزی از نظر کمیت (بلندی‌ها یا مقادیر دیگر) است؛ به گونه‌ای که این اصطلاح در تعریف گسترده‌تر کلمه اندازه‌گیری به معنای مقایسه مقادیر چیزها با یکدیگر است یا بررسی نسبت یک مقدار ناشناخته به مقدار شناخته شده. در این معنا، متقارن به معنای همگن است و غیرمتقارن به معنای ناهمگن؛ به همان اندازه که همه مقادیر یک نوع با یکدیگر نسبت دارند و بنابراین به این روش قابل اندازه‌گیری هستند؛ اما مقادیر انواع مختلف هیچ نسبتی با یکدیگر ندارند و بنابراین به هیچ وجه قابل اندازه‌گیری نیستند. بنابراین، همه خطوط نسبت به یکدیگر متقارن هستند، اما یک خط در مقایسه با سطح، یک جسم، زمان، سرعت یا وزن غیرمتقارن است. این مفهوم به تدریج دچار تطور شد. در قرن اول پیش از میلاد ویتوریوس (Marcus Vitruvius Pollio) معمار رومی تقارن را برحسب تناسب (Proportion) تعریف می‌کند. (Hon and Goldstein, 2005a) در این تعریف پیشانی از تقارن، این مفهوم به یک رابطه قابل اندازه‌گیری اشاره دارد. این رابطه یک نسبت مبتنی بر اعداد است که عملکرد آن هماهنگ‌سازی عناصر مختلف با یک کل واحد است. (Brading et. al., 2023) در این مفهوم از تقارن عناصر یک شکل متقارن، باید در نسبت مشخصی با کل قرار داشته باشند به نحوی که زیبایی و تناسب شکل تامین شود. مثلاً اجزا یک ساختمان باید نسبت‌های مشخصی (مثلاً نسبت طلایی) با کل بنا داشته باشند که ساختمان و یا تزئینات آن متقارن به نظر برسد. این تعریف از تقارن با زیبایی، هنر و معماری پیوند خورده و در کاربرد علمی از تقارن جایگاهی ندارد. (Hon & Goldstein, 2005b)

اگرچه تقارن در دوران باستان در نظریه‌های طبیعی نقش پررنگی داشت، اما این نقش با نقش امروزی آن کاملاً متفاوت بود. افلاطون در تیمائوس عناصر طبیعی را هم‌چون چندضلعی‌های منتظم تصور می‌کرده؛ آتش را به صورت چهاروجهی منتظم، آب بیست‌وجهی منتظم، خاک شش‌وجهی منتظم و آرایش جهان به صورت دوازده‌وجهی منتظم. این ایده بعدها از سوی کپلر به این شکل به کار گرفته شد که از این اشکال منتظم به عنوان پایه‌های توصیف فیزیکی استفاده کرد (Brading et. al., 2023). یونانی‌ها معتقد بودند که تقارن در حرکت اشیای سماوی به طور آشکار بازتاب دارد، آنان آسمان را جهانی کامل می‌پنداشتند که به دلیل این کمال باید تقارن در همه چیز از جمله شکل ظاهری کرات و مسیر حرکتشان رعایت می‌شد. اما در برخی موارد برداشت شهودی خام یونانیان باستان از تقارن با تجربه در تعارض بود. مثلاً آنها انتظار داشتند که اجرام آسمانی در مدارهای دایره‌ای حرکت کنند، ولی مدار سیارات چنین

تقارنی را نداشت و این موضوع از نظر آنان نامطلوب بود. بعدتر نیوتن نشان داد که این معادلات حرکت اجرام است که از برخی تقارن‌ها تبعیت می‌کند، نه خود مسیر حرکت اجرام. برداشت نیوتن این بود که تقارن‌های اساسی در حرکت اشیاء ظاهر نمی‌شود، به عنوان مثال لازم نیست مسیر حرکت یک ذره، شکلی متقارن مثل دایره باشد، بلکه تقارن در مجموعه تمام حرکت‌های ممکن ظاهر می‌شود بنا بر این معادلات حرکت، متقارن هستند نه حل‌های خاص این معادلات. به طور مثال قانون جهانی گرانش نیوتن تقارن کروی دارد اما مسیر حرکت سیارات بیضوی است (Griffiths, 2008).

همان طور که بیان شد مفهوم تقارن و تعاریف آن طی قرن‌های متمادی دچار تغییر شده است. از قرن هفدهم به بعد مفهوم متفاوتی از تقارن شکل گرفت. مفهوم جدید نه بر پایه تناسبات بلکه بر پایه تساوی اجزای متفاوت یک شکل با هم بود. علاوه بر تساوی این اجزا در یک شکل متقارن، اگر این اجزا با هم تعویض شوند شکل نهایی با شکل اولیه برابر است. این مفهوم از تقارن طی چندین مرحله به مفهوم نوین تقارن ارتقا پیدا کرد. بنابراین در یک شکل متقارن هم اجزا مورد نظر با هم تساوی دارند و هم در صورت تعویض این اجزا با هم شکل نهایی ناوردا باقی می‌ماند. این مفهوم از تقارن به دانشمندان اجازه داد که تقارن را نه فقط برای اشکال هندسی بلکه برای موجودات انتزاعی همچون معادلات ریاضی نیز بکار برند. این مفهوم از تقارن طی چندین مرحله به مفهوم نوین تقارن ارتقا پیدا کرد که معطوف به ویژگی ناوردایی (invariance) یا عدم تغییر معادلات در فیزیک می‌شد. (Brading et. al., 2023) البته در قرن هفده و هجده تقارن در موارد بسیار نادری در متون علمی بکار رفته است آن‌هم در متون دسته اول و ردپایی از آن در متون درجه دوم دیده نمی‌شود. به علاوه هنوز روایت منسجمی از تقارن در روش علمی وجود نداشت. اولین تعریف دقیق از تقارن توسط آدرین ماری لژاندر (Adrien-Marie Legendre) در سال ۱۷۹۴ در هندسه جامدات ارائه شد. لژاندر و به تبع او آگوستین لویی کوشی (Augustin Louis Cauchy) تعریف دقیقی از تقارن را صورت‌بندی کردند و با استفاده از آن به عنوان یک ابزار، نتایج حیرت‌آوری را در هندسه جامدات بدست آوردند. (Hon and Goldstein, 2006) او تقارن را به این شکل تعریف کرد که یک جسم یا شکل هندسی نسبت به یک نقطه، خط یا صفحه دارای تقارن است، اگر با انجام تغییراتی مانند دوران، بازتاب یا انتقال، شکل به حالت اولیه خود بازگردد. این تعریف به عنوان یکی از مهم‌ترین تحولات در هندسه جامدات شناخته می‌شود. (Hon and Goldstein, 2005b)

استفاده صریح از خواص ناوردای معادلات در فیزیک به اوایل قرن نوزدهم برمی‌گردد. هامیلتون، ریاضیدان و فیزیکدان ایرلندی (۱۸۰۵-۱۸۶۵) در پی پیدایش مکانیک لاگرانژی صورتبندی جدیدی از مکانیک کلاسیک ارائه کرد. مکانیک هامیلتونی این امکان را فراهم می‌کرد که (همانند مکانیک لاگرانژی) بتوان معادلات حرکت ذرات را بدون اعتناء به نیروهای وارده بر آنها و هندسه پیچیده حاکم بر آن به‌دست آورد. در مقایسه با مکانیک نیوتنی مکانیک هامیلتونی روش ساده‌تری برای حل مسائل بود. ژاکوبی ریاضیدان آلمانی (۱۸۰۴-۱۸۵۱) برای حل معادلات حرکت روشی را توسعه داد که در آن تبدیلاتی از متغیرها به کار گرفته می‌شود که معادلات هامیلتونی را ناوردا (بدون تغییر) نگه می‌داشت. با استفاده از این تبدیلات مسأله اولیه به مسأله جدیدی تبدیل می‌شد که هم ارز آن بود اما حل آن بسیار ساده‌تر می‌شد. نظریه تبدیلات کانونی ژاکوبی اگر چه در ابتدا تنها یک ابزار کارآمد برای حل مسائل بود منجر به برنامه پژوهشی بسیار مهمی شد که تبعات حاصل خیزی داشت برای نمونه این امکان را فراهم آورد که بتوان در سطح فرمالیسم با کمک براکت‌های پواسون و تبدیل آنها به عملگر جابه‌جایی هایزنبرگ، گذار از مکانیک کلاسیک به کوانتوم را توضیح داد؛ همین‌طور می‌توان به نتایج این برنامه پژوهشی در ناوردهای انتگرالی پوانکاره، نظریه تبدیلات پیوسته کانونی لی و در نهایت ارتباط بین نظریه جبری و هندسی ناوردهای فیزیکی اشاره کرد. (Brading et. al., 2023)

پوانکاره اهمیت توجه به ناوردایی قوانین فیزیک تحت تبدیلات مختلف را روشن ساخت. او نخستین کسی بود که تبدیلات لورنتس را به شکل نوین و نظام‌مند ارائه کرد. پوانکاره بر اساس مقارن بودن محیط موج توانست نتایجی را از معادلات موج استخراج کند و به این ترتیب، او به ناوردایی کامل معادلات ماکسول دست یافت که در فرمول‌بندی نظریه نسبیت خاص نقش مهمی ایفا می‌کرد (Wigner, 1967).

در اواخر قرن نوزدهم فیزیکدان فرانسوی، پیر کوری (۱۸۵۹-۱۹۰۶) به طور صریح از استدلال‌های تقارنی سخن گفت. کوری به مطالعه ارتباط بین خواص فیزیکی و خواص تقارنی سیستم‌های فیزیکی پرداخت. او برای اینکار خواص گرمایی، الکتریکی و مغناطیسی بلورها را بررسی کرد و این ویژگی‌ها را مستقیماً به ساختار کریستال‌ها یعنی تقارن موجود در آنها ارتباط داد. او نتایج خود را در کتاب "تقارن در پدیده‌های فیزیکی" (sur la symetrie dans les phenomenes physiques) منتشر کرد. این نتایج را در دو اصل زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱. عدم تقارن چیزی است که باعث خلق یک پدیده می‌شود.

۲. عناصر تقارنی علت باید در معلول وجود داشته باشد اما عکس این قضیه صادق نیست.

اصل اول و دوم کوری به هم وابسته‌اند اما این اصل دوم است که در متون فیزیکی به اصل کوری معروف است (Brading and Castellani, 2003: 10). جو روزن (Joe Rosen) اصل کوری را اصلی بنیادی در ملاحظات تقارنی می‌داند و تمام کاربردهای تقارن را به این اصل تقلیل می‌دهد. او این اصل را که "معلول دست کم همان تقارن‌هایی را باید داشته باشد که علت دارد" به زبان نظریه گروه برمی‌گرداند به این شکل که: "گروه تقارنی علت یکی از زیرگروه‌های گروه تقارنی معلول است یا به عبارت دیگر تبدیل تقارنی علت، تبدیل تقارنی معلول نیز هست" (Rosen, 2008: 97).

در بند قبل به نظریه گروه اشاره شد. با توجه به اهمیت نظریه گروه لازم است به عنوان آخرین مطلب در این بخش کمی به این موضوع پردازیم. تقارن عملی است که روی یک سیستم انجام می‌شود و بر اثر آن، سیستم ناوردا باقی می‌ماند؛ یعنی صورت‌بندی جدید از صورت‌بندی اولیه قابل تمیز نیست. برای آنکه مسأله تحت این عمل تمیزناپذیر باقی بماند، مجموعه تبدیلات تقارنی باید ویژگی‌های یک گروه را داشته باشد. گروه از جمله مهم‌ترین ساختارهای جبری است که نقش اساسی در جبر مجرد دارد و در علوم مختلف مانند بلورشناسی، شیمی و فیزیک از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع، نظریه گروه، مطالعه روشمند تقارن است (Griffiths, 1987).

فکر تشکیل نظریه گروه‌ها زمانی شکل گرفت که ریاضیدانان مشاهده کردند ساختارهایی را که مطالعه می‌کنند در خواصی مشترک هستند و اگر بتوان همه این خواص را در مورد یک ساختار مشخص بررسی کرد، در حقیقت بخش وسیعی از ساختارهای مشابه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و به این ترتیب علاوه بر صرفه‌جویی در زمان، ساختارهای نظری کمتری در مدلی که از یک پدیده ساخته می‌شود بکار رفته است. این امر نقش پررنگی در سادگی و زیبایی که از ارزش‌های نظری نظریه پردازی به حساب می‌آیند، بازی می‌کند.

نظریه گروه‌ها به عنوان یک شاخه مستقل از ریاضیات در قرن نوزدهم شکل گرفت. اولین ایده‌های مرتبط با گروه‌ها در کارهای ریاضیدانانی مانند ژوزف-لوئی لاگرانژ و پائولو روفینی (Paolo Ruffini, 1765-1822) دیده می‌شود. اواریسست گالوا (Évariste Galois, 1811-1832) را می‌توان پدر نظریه گروه به حساب آورد. گالوا از گروه‌ها برای مطالعه حل‌پذیری معادلات چندجمله‌ای استفاده کرد و مفاهیم پایه‌ای مانند زیرگروه‌ها و گروه‌های جابجایی را معرفی نمود. پس از او، ریاضیدانانی مانند آرتور کیلی (Arthur Cayley, 1821-1895) و فردیناند گئورگ

فروبنیوس (Ferdinand Georg Frobenius, 1849-1917) به توسعه این نظریه کمک کردند. در قرن بیستم، نظریه گروه به یکی از ابزارهای اصلی در فیزیک نظری تبدیل شد، به نحوی که از یک مفهوم انتزاعی ریاضی به یکی از ابزارهای اساسی در فیزیک نظری تبدیل شده است. این نظریه به فیزیکدانان کمک می‌کند تا تقارن‌های سیستم‌های فیزیکی را درک کنند و از آن‌ها برای پیش‌بینی رفتار ذرات و میدان‌ها استفاده کنند. اگرچه در فیزیک کلاسیک، گروه‌های تقارنی برای توصیف سیستم‌های مکانیکی و هندسی مورد استفاده قرار گرفته بود اما با ظهور مکانیک کوانتومی، نظریه گروه‌ها نقش کلیدی در توصیف حالت‌های کوانتومی و برهمکنش‌های ذرات ایفا کرد. به ویژه، یوجین ویگنر و هرمان وایل از پیشگامان استفاده از نظریه گروه در فیزیک کوانتومی بودند (Sternberg, 1994). در جای خود به نقش گروه‌های تقارنی در مکانیک کوانتومی خواهیم پرداخت.

با توجه به آنچه گفته شد، توجه به این نکته حائز اهمیت است که پیش از دوران نوین تقارن به صورت یک مفهوم ضمنی استفاده می‌شده است، یعنی تقارن به عنوان یک مفهوم علمی دقیق و تعریف‌شده مطرح نبود، بلکه بیشتر به صورت شهودی و در قالب زیبایی‌شناسی، هنر، یا طراحی به کار می‌رفت. اما استفاده متأخر از آن در فیزیک جدید متکی به یک نگرش و تلقی جدید از تقارن است، که با معنا و مفهوم تقارن در دوران پیشامدرن کاملاً متفاوت است. این تفاوت بین استفاده ضمنی و صریح از تقارن، نشان‌دهنده تحول مفهوم تقارن از یک ایده شهودی به یک ابزار علمی دقیق است. (Brading et. al., 2023)

۳. تعریف تقارن در فیزیک نوین

از دیرباز تقارن توسط دانشمندان و مهندسان بکار گرفته شده است اما امروزه، این مفهوم در فیزیک نوین چنان نقش ویژه‌ای پیدا کرده است که فیلیپ وارن اندرسون^۱ (Philip W. Anderson, 1923-2020) فیزیک را علم مطالعه تقارن می‌داند (Anderson, 1972: 394). جو روزن نیز می‌گوید: «علم، نگاه ما به طبیعت از درون عینک تقارن است. ... ما طبیعت را با زبان تقارن می‌فهمیم.» (Rosen, 2008: VIII). از اوایل قرن بیستم تقارن بر کل فیزیک نظری هم در حوزه کوانتوم و هم در حوزه نسبیت سیطره دارد. از نیمه دوم قرن بیستم این اصول به فراگیرترین مفهوم برای اکتشاف و فرمول‌بندی قوانین بنیادی فیزیک تبدیل شده‌اند (Gross, 1996: 14256).

تقارن به این معناست که سیستم نسبت به تغییرات ممکن/ایمنی دارد (Rosen, 2008: 4). به عنوان مثال شکل ظاهری بدن انسان را در نظر بگیرید اگر سمت راست و چپ آن را با هم

عوض کنیم بدن به همان شکل قبلی خود باقی می ماند یا اگر یک مربع را نود درجه حول یکی از قطره‌هایش بچرخانیم شکل بدست آمده کاملاً شبیه همان مربع قبلی است. این‌ها نمونه‌هایی از تقارن هندسی است اما تقارن مد نظر فیزیک نوین شکل انتزاعی تری دارد و عموماً بر قوانین فیزیک اعمال می شود. در فیزیک نوین تقارن بر حسب ناوردایی تحت گروه خاصی از تبدیلات تعریف می شود (Brading et. al., 2023). به عبارت دیگر تقارن عملگری است که اشیاء تحت تبدیلیش را در جنبه‌های خاصی بدون تغییر (ناوردا) باقی می گذارد (Dasgupta, 2021: 1). قانون دوم نیوتن را در یک دستگاه مختصات در نظر بگیرید با تبدیل یک دستگاه مختصات ساکن به دستگاهی که با سرعت ثابت نسبت به دستگاه اول در حرکت است قانون دوم نیوتن تغییری نمی کند، این عدم تغییر در رابطه (۱.۱) نشان داده شده است. به عبارت دیگر قانون دوم نیوتن تحت این تبدیل تقارنی (انتقال) ناوردا باقی می ماند، علاوه بر قانون دوم کمیت‌هایی همچون سرعت‌های نسبی، فواصل نسبی و شتاب نیز ناوردا باقی می ماندند.

$$\left\{ \begin{array}{l} F = m \frac{dx}{dt} \\ \text{تبدیل تقارنی انتقال} \\ x \longrightarrow x + vt \end{array} \right. \rightarrow \dot{F} = m \frac{d(x+vt)}{dt} = m \frac{dx}{dt} = F \quad (1.1)$$

به بیان دیگر اگر دو جهان ممکن را در نظر بگیریم که تفاوت یکی نسبت به دیگری این باشد که در جهان دوم تمام سرعت‌ها به طور یکنواخت افزایش پیدا کرده است آنگاه قوانین فیزیکی حاکم بر جهان ممکن دوم دقیقاً مشابه قوانین جهان اول است و این دو جهان از لحاظ فیزیکی کاملاً تمیزناپذیرند. وقتی می‌گوییم قوانین فیزیک نسبت به فضا و زمان متقارن هستند، به این معنی است که قوانین فیزیک تحت تبدیل انتقالی در فضا و زمان ناوردا باقی می‌مانند. به عبارت دیگر، این که ما قادریم آزمایش‌ها را در زمان‌ها و مکان‌های متفاوت تکرار کنیم و به نتایج یکسانی دست یابیم به ناوردایی قوانین طبیعت تحت انتقال فضا-زمان برمی‌گردد. تقارن زمان (همگنی زمان) و تقارن مکان (همگنی فضا) سبب می‌شود قوانین فیزیک در زمان‌های متفاوت و مکان‌های مختلف شکل یکسانی داشته باشد (Gross, 1996: 14256).

۴. تقارن و قوانین بقا

یکی از دلایل اهمیت تقارن در فیزیک نوین ارتباط آن با قوانین پایستگی است. در سال ۱۹۱۵ دیوید هیلبرت (David Hilbert, 1862-1943) و فلیکس کریستیان کلاین (Felix Christian Klein, 1849-1925) ریاضیدانان آلمانی برای فهم نظریه نسبیت عام انیشتین از امی نوتر (Emmy

Neother, 1882-1935) دعوت کردند تا به دانشگاه گوتینگن بیاید. این همکاری به مقاله مشهور نوتر در سال ۱۹۱۸ منجر شد. او در این مقاله دو قضیه ارائه داد که در سال‌های بعد نقشی کلیدی در فیزیک نوین بازی کردند. در قضیه اول او تقارن را به قوانین پایستگی پیوند زد و در قضیه دوم به تعدادی از نتایج مربوط به تقارن‌های موضعی پرداخت. (Brading and Castellani, 2003: 8). البته نوتر در جبر مجرد نیز نظراتی ارائه کرده بود؛ اما آنچه او را در فیزیک نوین تاریخ ساز کرد این قضیه است که «برای هر تقارن (پیوسته) موجود در یک سامانه، یک کمیت پایستار وجود دارد.» تا پیش از این قضیه فیزیکدان‌ها با تعدادی از قوانین بقا سرو کار داشتند، مثل قانون بقای انرژی و قانون بقای تکانه و از آن‌ها به طور گسترده استفاده می‌کردند. در عین حال تقارن‌هایی هم‌چون همگنی (تقارن انتقالی) و همسانگردی (تقارن چرخشی) فضا و تقارن زمان در فیزیک کلاسیک پیش فرض به حساب می‌آمد، اما ارتباط تقارن و قوانین بقا با هم به صورت صریح تا پیش از این قضیه مورد توجه قرار نگرفته بود.

در حال حاضر با کشف هر تقارن فیزیکدانان به دنبال قانون بقای مرتبط با آن تقارن می‌گردند و با کشف هر قانون بقا در صدد کشف تقارن مرتبط با آن بر می‌آیند. بعضی از تقارن‌ها و قانون‌های بقای مرتبط با این تقارن‌ها به شرح زیر آمده است:

- تقارن انتقالی در زمان منجر به قانون بقای انرژی می‌شود.
- تقارن انتقالی در فضا (همگنی فضا) منجر به قانون بقای تکانه خطی می‌شود.
- تقارن چرخشی در فضا (همسانگردی فضا) منجر به قانون بقای تکانه زاویه‌ای می‌شود.
- تقارن پیمانه‌ای منجر به قانون بقای بار می‌شود. (Griffiths, 1987)

۵. کاربرد تقارن در فیزیک نوین

تقارن در فیزیک کاربردهای مختلفی دارد و به شیوه‌های گوناگونی از آن استفاده می‌شود. پیش از آنکه به نحوه دقیق استفاده از تقارن در فیزیک پردازیم لازم است به یک تمایز مفهومی مهم اشاره کنیم: تمایز بین تقارن به عنوان یک ویژگی (Property) و تقارن به عنوان نوعی از استدلال (Argument). تقارن می‌تواند ویژگی طبیعت یا ویژگی یک نظریه فیزیکی و یا یک مدل فیزیکی باشد. برای مثال، کتاب برجسته "تقارن"^۲ اثر هرمان وایل تماماً به مفهوم تقارن به عنوان یک ویژگی پرداخته است. ویژگی تقارنی نشان‌دهنده یک خاصیت ذاتی سیستم است، در حالی که استدلال تقارنی کاربردی است از آن ویژگی تقارنی برای تحلیل و پیش‌بینی نتایج مورد نظر.

ویژگی تقارنی نشان‌دهنده مقاومت سیستم در برابر تغییر است، در حالی که استدلال تقارنی به بهره‌برداری از این مقاومت برای نتیجه‌گیری و تبیین رفتار سیستم می‌پردازد. در ادامه ابتدا استدلال‌های تقارنی را معرفی می‌کنیم، سپس به نوع ویژه‌ای از ویژگی‌های تقارنی یعنی **اصول تقارنی** می‌پردازیم که اهمیت ویژه‌ای در توسعه فیزیک نوین پیدا کرده است.

۱.۵ استدلال تقارنی

هرگاه تقارن در یکی از عناصر استدلال یعنی در مقدمات و یا اصول استنتاج وارد شود، ما با یک استدلال تقارنی مواجه هستیم (Hon and Goldstein, 2006). هر پدیده یا موقعیت فیزیکی ممکن است ویژگی‌های تقارنی داشته باشد که با استفاده از آن بتوان نتایج خاصی را بدست آورد. البته با تعریف نوین از تقارن هر سیستم یا مدلی حتی اگر در ظاهر متقارن نباشد تقارن‌هایی خاص خود دارد، یعنی برای هر سیستمی تبدیلاتی وجود دارد که سیستم تحت آن تبدیلات ناوردا باقی می‌ماند. مسئله در این است که آیا استدلال‌های تقارنی در یک مسئله خاص کارآمد و مفید فایده خواهند بود یا خیر.

نمونه‌هایی از استدلال‌های تقارنی را می‌توان در استدلال‌های باستانی دید. به عنوان نمونه می‌توان به قانون تعادل ارشمیدس برای موازنه و استدلال انکسیماندر برای عدم تحرک زمین^۳ اشاره کرد. در این نوع استدلال‌های تقارنی یک وضعیت تقارنی با اصل دلیل کافی (PSR, Principle of Sufficient Reason) ترکیب می‌شود. استدلال‌هایی به این شکل را در یک جمله می‌توان خلاصه کرد که هیچ عدم تقارنی نمی‌تواند منشا خودبخودی داشته باشد یا عدم تقارن تنها از عدم تقارن خلق می‌شود (van Fraassen, 1989). با وجود نمونه‌هایی از استقلال تقارنی در دوران باستان، اولین فرمولبندی واضح از استدلال‌های تقارنی در فیزیک را پیر کوری (Pierre Curie, 1859-1906) در اواخر قرن نوزدهم ارائه داد. او بیان کرد: «هنگامیکه علل مشخصی معلول‌های مشخصی را تولید می‌کنند، عناصر تقارنی علت‌ها باید در معلول‌ها نیز پیدا شود ... در عمل، معکوس این ... صادق نیست، یعنی معلول‌ها می‌توانند متقارن‌تر از علت‌ها باشند.» (Hon and Goldstein, 2006: 429)

با الهام از اصل کوری، استدلال‌های تقارنی در فیزیک نوین را می‌توان به دو دسته تقسیم بندی کرد. استدلال‌های نوع اول استدلال‌هایی است که از تقارن‌های علت به تقارن‌های معلول می‌رسد. جو روزن این استدلال را کاربرد حداقلی (Minimalistic application) از تقارن می‌نامد و گیورا و هون آن را استدلال اصل موضوعی (Axiomatic) می‌نامند. در این نوع استدلال تقارنی

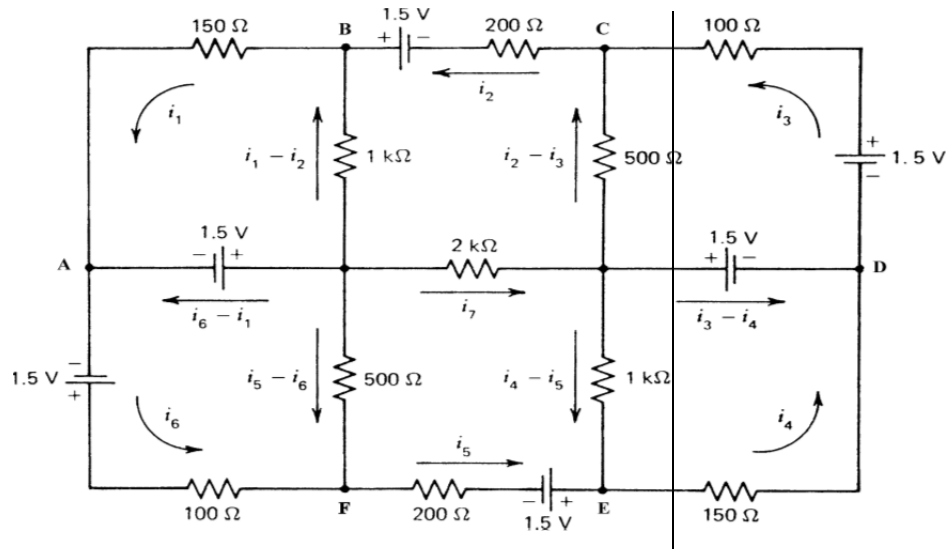
قوانین و علت‌های یک مسئله خاص مشخص است سپس با استفاده از تقارن ما همه یا برخی از معلول‌ها را پیدا می‌کنیم. این روش، بیشتر در کاربردهای عملی، فنی مهندسی و آموزشی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rosen, 2008: 107). در این نوع استدلال قانون استنتاج از طریق یک تبدیل تقارنی بر وضعیت اولیه مسئله اعمال می‌شود و مقدمات از لحاظ ریاضی به شکل ساده‌تری تبدیل می‌شوند بطوریکه نتایج به آسانی در دسترس باشند. این سادگی در حل مسئله در حالی اتفاق می‌افتد که شکل ساده‌تر مسئله با شکل پیچیده اولیه از لحاظ فیزیکی هم ارز است. (Hon and Goldstein, 2006: 429)

در زیر یک مثال ساده از این نوع استدلال را آورده‌ایم. یک مدار DC به شکل (۱) را در نظر بگیرید. می‌خواهیم جریان و اختلاف پتانسیل در هر شاخه را بدست آوریم. برای حل عادی مسئله باید هفت جریان دلخواه را انتخاب کنیم و شش جریان دیگر را بر حسب آن‌ها بنویسیم. سپس با استفاده از قانون کیرشهوف هفت معادله بدست می‌آید که حل آنها مقدار جریان‌ها را مشخص می‌کند. برای بدست آوردن اختلاف پتانسیل هر دو نقطه دلخواه از مدار هم باید قانون اهم را برای آن دو نقطه بنویسیم. بنابراین راه طولانی‌ای در پیش داریم.

با توجه به شکل درمی‌یابیم که شکل نسبت به صفحه عمود بر مقاومت ۲ کیلو اهمی، تقارن ۱۸۰ درجه‌ای دارد. در این مسئله ۶ تا باتری، ۱۱ تا مقاومت و اتصالاتشان علت‌های ما را تشکیل می‌دهند و معلول‌ها شامل ۱۳ تا جریان و اختلاف پتانسیل‌های مرتبط با آن‌هاست. طبق استدلال تقارنی نوع اول معلول‌ها باید همان تقارن‌های علت‌ها را در خود داشته باشند. با استفاده از این تقارن بدست می‌آوریم:

$$i_1 = i_4 \quad i_2 = i_5 \quad i_3 = i_6 \quad i_7 = -i_7 \rightarrow i_7 = 0$$

$$V_{AF} = V_{DC} \quad V_{CE} = V_{FB}$$



شکل ۱. شکل نسبت به صفحه‌ای که از مقاومت ۲ کیلو اهمی می‌گذرد و بر صفحه مدارها عمود است تقارن چرخشی ۱۸۰ درجه‌ای دارد.

این تقارن‌ها نیمی از راه حل را به ما می‌دهند و ما به جای هفت معادله تنها لازم است سه معادله را حل کنیم.

نوع دوم استدلال تقارنی استدلالی است که در آن از معلول به علت می‌رسیم. در تحقیقات بنیادی ما عموماً با داده‌های تجربی و پدیده‌های فیزیکی‌ای روبرو هستیم که هنوز علت آنها را به درستی نمی‌شناسیم و به دنبال قوانین حاکم بر آنها می‌گردیم. با استفاده از تقارن دانشمندان تلاش می‌کنند بین این داده‌ها نظم برقرار کنند، برای این پدیده‌ها قانون وضع کنند و نظریه‌ای را توسعه دهند که بتواند داده‌های تجربی را توضیح دهد. روزن این نوع استدلال را استفاده حداکثری (*Maximalistic*) می‌نامد (Rosen, 2008: 125) و گیورا و هون آن را استدلال اکتشافی (*Heuristic*) می‌نامند (Hon and Goldstein, 2006: 429). در این نوع استدلال دانشمند هنوز به مدل یا نظریه کاملی دست نیافته‌است، قوانین و علت‌های رخ دادن یک پدیده عموماً ناشناخته‌است. با استفاده از این نوع استدلال تقارنی تلاش می‌شود تا نظریه‌ای کارآمد طراحی شود و یا نظریه فعلی توسعه یابد. مثال‌های این نوع استدلال را در بخش اصول تقارنی بررسی خواهیم کرد.^۴

پیش از این گفتیم که اگر چه شواهدی از استفاده از تقارن در دوران باستان و حتی فیزیک کلاسیک وجود دارد اما استفاده صریح از تقارن در فیزیک با تلقی امروزی آن به اواخر قرن

تقارن در فیزیک نوین و تبعات فلسفی آن (زینب انصاریان و افشین شفیعی) ۷۱

نوزدهم و صورت بندی کوری از تقارن برمی گردد. استفاده جدیدتری از تقارن نیز وجود دارد که به نام اصول تقارنی شناخته می شود.

۲.۵ اصول تقارنی

گاهی دانشمندان ویژگی های تقارنی خاصی را به پدیده ها یا قوانین نسبت می دهند. این ویژگی های تقارنی اصول تقارنی یا اصول ناوردایی نامیده می شوند. به عبارت دیگر دانشمندان فرض می کنند که تقارن های مشخصی از لحاظ فیزیکی شاخص اند. در این روش تقارن مربوط به یک پدیده منفرد یا یک قانون خاص نیست بلکه تقارن به مجموعه بزرگی از پدیده ها یا قوانین تعمیم داده می شود. این روش تا پیش از قرن بیستم سابقه نداشته است. (Brading et. al., 2023) اصول تقارنی را می توان ترکیبی از تقارن به عنوان یک ویژگی (در مقابل تقارن به عنوان یک استدلال) با یک استدلال تقارنی اکتشافی (حداکثری) در نظر گرفت. در این روش تقارن های مشخصی فرض گرفته می شوند آنگاه ما به دنبال معادلات دینامیکی یا مدل هایی می گردیم که حائز چنین تقارن هایی باشند (ibid). این پیش فرض ها، یعنی اصول تقارن، در گام اول ممکن است از یک مسئله یا یک پدیده خاص الهام گرفته شده باشند اما پس از مشاهده کارآمدی یک اصل در یک مسئله خاص، این تقارن علاوه بر سیستمی که از آن الهام گرفته شده، به سایر وضعیت های مشاهده نشده مشابه تعمیم داده می شود. این تعمیم از لحاظ معرفتی، تعمیمی خطرناک است و هیچ ضمانت پیشینی ای برای صدق آن (صدق تعمیم یک ویژگی تقارنی به جهان) وجود ندارد اما به تعبیر پیتر کوزو، پیشرفت در علم مستلزم خطر کردن از لحاظ معرفتی است^۵ (Kosso, 2000: 486). این نحوه استفاده از تقارن نقطه عطفی در استفاده از تقارن در دوران نوین به حساب می آید (e.g. Brading et. al., 2023; Gross 1996; Parker 1987).

فیزیک نوین به دو بخش عمده نسبیت و کوانتوم تقسیم می شود و تقارن در هر دو حوزه نقش برجسته و منحصر بفردی بازی می کند. در ادامه نقش تقارن در این دو حوزه را بررسی خواهیم کرد.

۱.۲.۵ نسبیت و تقارن فضا-زمان

تمام قوانین مکانیک کلاسیک یعنی قانون بقای تکانه، قوانین حرکت نیوتن و قانون بقای انرژی تحت تبدیلات گالیله هموردا هستند. در صورتی تبدیلات گالیله از اعتبار جهانی برخوردار خواهد بود که تمام قوانین فیزیک تحت این تبدیلات ناوردا باشند؛ اما قوانین ماکسول

تحت این تبدیلات ناوردا نبودند (Weidner & Sells, 1980). اینشتین در تلاش برای حل این مشکل در سال ۱۹۰۵ مقاله‌ای با عنوان «درباره الکترودینامیک اجسام متحرک» ارائه داد. نظریه نسبیت خاص که در این مقاله تشریح شده است روی دو فرض بنا شده است:

۱. سرعت نور مستقل از سرعت منبع نور بوده و همیشه دارای مقدار ثابت c است.
۲. اصل نسبیت: قوانین فیزیک در تمام چارچوب‌های لخت یکسان، یا ناوردا هستند؛ یعنی شکل ریاضی یک قانون فیزیکی در تمام چارچوب‌های مرجع لخت یکسان است. (Weidner & Sells, 1980, 42)

اینشتین اصل نسبیت را وضع کرد تا شکل قوانین را در تمام چارچوب‌های لخت ناوردا نگه دارد. ^۶ اینشتین از ترکیب این اصل با اصل اول، یعنی ثابت بودن سرعت نور، به تبدیلات لورنتس رسید. در نظریه نسبیت خاص تمامی قوانین فیزیک تحت تبدیلات لورنتس، در واقع تحت تمام تبدیلات گروه پوانکاره (Poincaré group)، ناوردا هستند. این تبدیلات متفاوت از تبدیلات گالیله هستند که مکانیک نیوتنی تحت آن‌ها ناوردا بود. مینکوفسکی (Hermann Minkowski, 1864-1909) که در توسعه ریاضیات نسبیت خاص با اینشتین همکاری می‌کرد با بازنویسی نظریه نسبیت خاص نشان داد که فضا و زمان به جای اینکه دو مفهوم جداگانه باشند، بخشی از یک ساختار واحد چهاربعدی به نام فضا-زمان هستند که فضا-زمان مینکوفسکی نام گرفت (Brading et. al., 2023). کارهای مینکوفسکی نشان داد که تبدیلات تقارنی گروه پوانکاره قسمتی از ساختار فضا-زمان است به همین دلیل ویگنر این تقارن‌ها را تقارن‌های هندسی-در مقابل تقارن‌های دینامیکی که تقارن‌های درونی مکانیک کوانتومی هستند- نامید (Wigner, 1967). اگرچه اینشتین از نسبیت به عنوان یک اصل تقارنی نام نبرده است اما این اصل با تلقی نوین از تقارن یک اصل تقارنی است. اینشتین در چهار مقاله‌ای که به مقالات شگفت‌انگیز معروف اند، مقالات سال ۱۹۰۵ که سهم به سزایی در تکوین فیزیک نوین و تغییر دیدگاه ما از فضا، زمان، جرم و انرژی بازی کرد، از عبارت به خاطر تقارن (wegen der Symmetrie; aus Symmetriegründen) استفاده کرده است که به استدلال تقارنی نوع اول شبیه است. او از اصل نسبیت به عنوان اصل تقارنی نام نبرده است اما نحوه استفاده او از نسبیت دقیقاً کاری است که فیزیکدانان با تقارن در دوران نوین انجام می‌دهند. برای اطلاعات بیشتر رجوع کنید به (Hon and Goldstien, 2005; and 2006)

ویگنر (1967: 5) اظهار می‌کند که اینشتین اولین کسی بود که اعتبار و اهمیت کلی اصول تقارنی را تشخیص داد. پیش از او تقارن‌ها از قوانین حرکت استخراج می‌شدند (استدلال

تقارنیِ حدِ اقلی) اما به دلیل رهیافتی که او در نسبیت در پیش گرفت (استدلال تقارنیِ اکتشافی یا حداکثری) امروزه اعتبار قوانین بر اساس اصول تقارنیِ سنجیده می‌شود. او تقارن را به عنوان جنبه بنیادی طبیعت در نظر گرفت آنگاه قوانین دینامیکی مجاز را بر اساس آن بدست آورد (Gross, 1996: 14256).

نسبیت خاص نظریه‌ای است که تنها درباره چارچوب‌های مرجع لخت صحبت می‌کند؛ اما اکثر چارچوب‌ها از جمله کره زمین لخت نیستند، یا در یک میدان گرانشی قرار دارند و یا حرکتی شتابدار دارند. به همین دلیل نظریه‌ای لازم بود که شامل چارچوب‌های مرجع نالخت (شتابدار یا تحت گرانش) نیز باشد. این کار توسط اینشتین در سال ۱۹۱۶ با معرفی نظریه نسبیت عام انجام شد. این نظریه نیز با استفاده از یک اصل تقارنی ساخته می‌شود، اصل هموردایی عام. در نسبیت عام نیز یک اصل تقارنی یعنی اصل هموردایی عام هسته مرکزی نظریه را تشکیل می‌دهد و دیگر اجزا نظریه حول آن شکل می‌گیرد. این اصل فرض می‌کند که فضازمان دارای تقارن موضعی (Local)، در مقابل تقارن فراگیر، است و دینامیک میدان گرانشی با کمک این تقارن‌ها توضیح داده می‌شود (Brading et. al., 2023).

در نظریه نسبیت خاص ما با تقارن فراگیر فضازمان سروکار داریم که تنها به پارامترهای ثابت بستگی دارد. متریک فضازمان در نسبیت خاص که تابع هندسه اقلیدسی است فاصله (d) است؛ اما در نسبیت عام با یک تقارن عمیق تر روبه رو هستیم که تقارن موضعی نامیده می‌شود. این تقارن در تقسیم بندی و یکنر از تقارن‌ها-هندسی یا دینامیکی- در دسته دینامیکی قرار می‌گیرد. چراکه این تقارن به یک برهمکنش خاص که گرانش است مربوط است. در این بافت متریک فضازمان دیگر یک میدان پس‌زمینه‌ای یا یک شیء مطلق نیست، بلکه در عوض یک بازیگر دینامیکی است که به حل‌های متفاوت معادلات نسبیت عام بستگی دارد (ibid).

۲.۲.۵ اصول تقارن در مکانیک کوانتومی

به کاربردن نظریه گروه و نمایش‌های آن برای استخراج تقارن‌های موجود در مکانیک کوانتومی در ۱۹۲۰ را می‌توان نقطه عطف تاریخ تقارن‌های فیزیکی در قرن بیستم دانست. یوجین ویگنر (Eugene Paul Wigner) و هرمان وایل اولین کسانی بودند که به ارتباط عظیم گروه‌های تقارنی با فیزیک کوانتوم پی بردند (Brading et. al., 2023). ویگنر موفقیت بسیار زیاد اصول تقارنی در مکانیک کوانتومی را ناشی از طبیعت خطی مکانیک کوانتومی می‌دانست. این طبیعت خطی، خود ناشی از زیربنا بودن فضای هیلبرت در ریاضیات مکانیک کوانتومی است. این ویژگی

مستلزم این است که هر ترکیب خطی از بردارهای حالت خود یک بردار حالت متعلق به فضای هیلبرت باشد. اصل برهم نهی در مکانیک کوانتومی درواقع نتیجه چنین خاصیتی است که منجر به تبعات مهم و عجیبی در مکانیک کوانتومی می‌شود (Wigner, 1967). برخلاف تقارن‌های فضازمانی که به نظر بدیهی می‌رسند بعضی از تقارن‌های مکانیک کوانتومی چنین حالتی ندارند و گاهی حتی بسیار عجیب به نظر می‌رسند. یکی از این تقارن‌های عجیب تقارن پیمانه‌ای است.

۳.۲.۵ تقارن پیمانه‌ای

تقارن پیمانه‌ای (Gauge Symmetry) یکی از مفاهیم بنیادی در فیزیک نظری است که به آزادی در انتخاب یک چارچوب یا «پیمانه» برای توصیف سیستم‌های فیزیکی اشاره دارد. منظور از پیمانه مقیاس اندازه‌گیری است. به طور معمول ما هنگامی که چیزی را به عنوان مقیاس مشخص کردیم دیگر آن را تغییر نمی‌دهیم. تغییر مقیاس از نقطه‌ای به نقطه دیگر مفهوم اندازه‌گیری را برای ما بی‌معنی می‌کند؛ اما هرمان وایل این امکان را در نظر گرفت و آن را تغییر موضعی (local) پیمانه نامید. این تغییر موضعی در مقابل تغییر فراگیر (Global) پیمانه قرار دارد که به کل سیستم تغییر یکسانی اعمال می‌شود. به نظر می‌رسد این تغییر نباید در فیزیک جایگاهی داشته باشد اما در کمال تعجب نظریه الکترومغناطیس ماکسول چنین ویژگی دارد. (Parker, 1987)

برای واضح شدن معنی تقارن پیمانه‌ای به مثال زیر دقت کنید: تعدادی بار الکتریکی در نظر بگیرید که هر کدام پتانسیل الکتریکی متفاوتی دارند اگر به هر کدام از این بارها ۵۰ ولت انرژی بدهیم در وضعیت فیزیکی کل سیستم تغییری حاصل نمی‌شود. اختلاف پتانسیل الکتریکی به همان اندازه قبل خواهد بود این یک تغییر فراگیر است اما اگر به هر یک از بارها ولتاژ متفاوتی اعمال کنیم تغییرات موضعی پدیدار می‌شود. میدان الکتریکی ناوردایی پیمانه‌ای را ارضاء نمی‌کند اما بارهای الکتریکی متحرک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند که پتانسیل وابسته به آن تغییر پیمانه را جبران می‌کند؛ بنابراین اگرچه میدان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی به تنهایی تحت تبدیلات پیمانه‌ای ناوردا نیستند اما میدان الکترومغناطیسی ناوردای پیمانه‌ای است. (ibid.)

هرمان وایل در سال ۱۹۱۸ تلاش کرد تا نظریه گرانش و نظریه الکترومغناطیس را به عنوان دو جنبه از یک نظریه واحد توصیف کند. همان طور که پیشتر ماکسول توانسته بود میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی بخش‌هایی از یک میدان الکترومغناطیسی واحد، وحدت بخشد.

وایل برای این کار ایده تقارن موضعی را توسعه داد. او یک پتانسیل پیمانه‌ای به عنوان بخشی از ساختار فضازمان معرفی کرد. وایل با استفاده از تقارن پیمانه‌ای می‌خواست میدان‌های الکترومغناطیسی را با میدان گرانشی که توسط نظریه نسبیت عام توصیف می‌شد، وحدت بخشد. او با چنین رویکردی نظریه نسبیت عام را اصلاح کرد و همان طور که امیدوار بود نظریه ماکسول پدیدار شد. او نظریه‌اش را با اینشتین در میان گذاشت اما اینشتین نشان داد این پیش‌بینی با نتایج تجربی و نظریه نسبیت خاص در تضاد است، زیرا در نسبیت خاص، ساعت‌های متحرک با آهنگ‌های متفاوتی کار می‌کنند، اما این تفاوت به دلیل اتساع زمان (Time Dilation) است، نه به دلیل یک پتانسیل پیمانه‌ای. اینشتین به وایل نشان داد که اگر نظریه او درست باشد، ساعت‌ها باید به‌طور متفاوتی کار کنند، حتی در شرایطی که این تفاوت با نسبیت خاص سازگار نباشد. به همین دلیل، نظریه وایل کنار گذاشته شد. (O’Raifeartaigh, 1997) اگرچه تلاش وایل برای وحدت نظریه گرانش با الکترومغناطیس توسط نظریات پیمانه‌ای شکست خورد اما این ایده بذر موفقیت‌های بعدی را مکانیک کوانتومی کاشت.

در حال حاضر باور رایج این است که تمام برهمکنش‌های بین ذرات بنیادی توسط تقارن‌های پیمانه‌ای موضعی دیکته می‌شود؛ در نتیجه کمیت‌های فیزیکی پیوسته مثل بار الکتریکی و بار رنگ (باری که برای توصیف برهمکنش‌های قوی در نظر گرفته می‌شود و سه نوع مختلف دارد). نه فقط بصورت فراگیر بلکه در نواحی موضعی از فضا نیز پایسته هستند (Halzen and Martin, 1989: 311). نظریاتی که تحت تبدیلات پیمانه‌ای ناوردا باشند، نظریات پیمانه‌ای نامیده می‌شوند. بنابر آنچه در بالا گفته شد نظریه میدان‌های کوانتومی که چارچوبی نظری برای مدل‌های مکانیک کوانتومی فراهم می‌کند یک نظریه پیمانه‌ای است.

۴.۲.۵ تقارن جایگشتی

اولین تقارن غیر فضا-زمانی که به فیزیک ذرات معرفی شد و با تکنیک نظریه گروه با آن برخورد شد تقارن جایگشتی بود. این تقارن توسط هایزنبرگ در سال ۱۹۲۶ در ارتباط با عدم تمایز الکترون‌های یکسان در سیستم اتمی کشف شد. این تقارن یک تقارن گسسته است، یعنی تبدیلات آن برپایه گروهی متشکل از عناصر گسسته شکل گرفته است. این گروه هسته آمار کوانتومی یعنی آمار بوز-اینشتین (ذرات با اسپین عدد صحیح مثل فوتون) و آمار فرمی-دیراک (ذرات با اسپین نیم عدد صحیح مثل الکترون) است. این تقارن بر رفتار آماری آنسامبلی از انواع مشخصی از ذرات کوانتومی یعنی بوزون‌ها و فرمیون‌ها حاکم است. (Brading et. al., 2023)

این تقارن از لحاظ فلسفی اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا دو مسأله مهم را پیش می‌کشد. مسأله اول این است که تقارن جایگشتی شرطی از عدم تمایز فیزیکی ذرات هم‌سان (Identical Particles) یعنی ذرات از یک نوع در یک سیستم اتمی بدست می‌دهد. این شرط بحث پرباری را درباره اهمیت مفهوم هم‌سانی، فردیت (individuality) و عدم تمایز در محدوده کوانتومی برمی‌انگیزد. آیا این شرط به این معناست که ذرات منفرد نیستند و تشخیصی ندارند؟ آیا وجود هویت تمایزناپذیر فیزیکی که قابل شمارشند بر نقض اصل لاینیتز یعنی «این همانی هویت تمایزناپذیر» (Principle of the Identity of Indiscernibles) دلالت دارد؟ به علاوه وضعیت آزمون‌پذیری تجربی و نظری چنین اصل تقارنی‌ای چیست؟ آیا این اصل یک اصل موضوعه در مکانیک کوانتومی است یا می‌توان آن را به طور تجربی مورد ارزیابی قرار داد؟ در حال حاضر از این اصل برای توصیف طبیعت آمار کوانتومی فرمیونی و بوزونی استفاده می‌شود؛ اما چرا در طبیعت تنها دو نوع ذره یعنی فرمیون (Fermions) و بوزون (Bosons) وجود دارد، در حالی که تقارن جایگشتی امکان وجود ذرات انواع دیگر را نیز می‌دهد؟ (Brading et. al., 2023)

۵.۲.۵ تقارن CPT

نوع دیگری از تقارن، تقارن انعکاسی یا پاریته است. این تقارن با جابه‌جا شدن راست و چپ اتفاق می‌افتد، به عنوان مثال تصویر اشیاء در آینه پاریته دارد. اگرچه تقارن پاریته را در فیزیک کلاسیک نیز می‌توان فرض کرد اما فرض آن ویژگی اطلاع بخشی را که در فیزیک نوین داراست، ندارد. ویگنر بود که این تقارن را در فیزیک نوین با بیانی جدید مجدداً کشف کرد. او نتایج مهم طیف‌سنجی اتمی را برای اولین بار براساس رفتار نظریه گروهی تقارن‌های انعکاسی، چرخش و جایگشت توضیح داد (Brading et. al., 2023). در مورد واکنش‌های کوانتومی نیز این تصور وجود داشت که تمام برهم‌کنش‌های طبیعت پاریته دارند اما مشخص شد که تقارن پاریته در برهم‌کنش‌های ضعیف نقض می‌شود. نقض پاریته در قوانین بنیادی فصلی نو در یک چالش فلسفی قدیمی بود، چالش اشیاء دست‌گونه (chiral or handed objects) و طبیعت فضا؛ مثلاً اگر چه دست راست و چپ کاملاً مثل هم به نظر می‌رسند اما دستکش دست راست را نمی‌توان به دست چپ پوشاند؛ اما اگر پاریته با تقارن هم‌یوگی بار (Charge conjugate)، تقارن ذره-پادذره (C)، ترکیب شود تقارن ترکیبی پایسته است. باز هم مشخص شد که این ترکیب نیز دقیقاً پایسته نیست. در نهایت تقارن انعکاس زمان (T) به این دو اضافه شد و این سه تقارن امروزه به نام تقارن CPT شناخته می‌شود. (Brading et. al., 2023)

۶. شکست تقارن: از تقارن دقیق تا شکست خودبه‌خودی

شکست تقارن (Symmetry Breaking) یکی از مفاهیم کلیدی در فیزیک نظری و فلسفه‌ی علم است که به بررسی شرایطی می‌پردازد که در آن، تقارن یک سیستم فیزیکی به دلایل مختلف کاهش می‌یابد یا از بین می‌رود. این مفهوم نه تنها در فیزیک ذرات بنیادی و مواد چگال، بلکه در بسیاری از سیستم‌های پیچیده دیگر نیز کاربرد دارد. در این بخش، به بررسی انواع شکست تقارن، از جمله شکست صریح تقارن و شکست خودبه‌خودی تقارن، و پیامدهای فیزیکی و فلسفی آن‌ها می‌پردازیم. تقارن می‌تواند دقیق، تقریبی و یا شکسته شده باشد. تقارن دقیق به شرایطی اشاره دارد که در آن، قوانین فیزیکی تحت یک تبدیل خاص کاملاً ناوردا هستند. (Brading et. al., 2023)

تقارن تقریبی زمانی رخ می‌دهد که این ناوردایی تنها تحت شرایط خاصی برقرار باشد. به عنوان مثال، تقارن بار در حالت ایده‌آل (زمانی که تنها برهم‌کنش قوی وجود دارد) کامل است، زیرا پروتون و نوترون از نظر این برهم‌کنش کاملاً یکسان (متقارن) هستند. کامل بودن تقارن در این مثال به این معناست که با تعویض پروتون با نوترون وضعیت اتمی کاملاً یکسانی ایجاد می‌شود. اما در واقعیت، به دلیل وجود برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی و ضعیف و اصل طرد پائولی (Pauli exclusion principle)، این تقارن شکسته می‌شود. اما به دلیل اینکه برهم‌کنش قوی بسیار قوی‌تر از برهم‌کنش‌های دیگر است، تقارن بار کماکان به صورت تقریبی حفظ می‌شود. این مثال نشان‌دهنده اهمیت تقارن‌های تقریبی در فیزیک هسته‌ای و نقش آن‌ها در فهم رفتار سیستم‌های پیچیده است. (Rossen, 2008)

در نهایت، شکست تقارن به شرایطی اشاره دارد که تقارن سیستم به دلایل مختلف کاهش می‌یابد یا از بین می‌رود. به عبارت دیگر تقارن‌های معلول کمتر از تقارن‌های علت است. یکی از مثال‌های کلاسیک شکست خودبه‌خودی تقارن، تشکیل بلورها از یک مایع همگن است. در دمای بالا، مایع از تقارن کامل برخوردار است، اما با کاهش دما، نوسانات کوچک در چگالی مایع باعث تشکیل بلورهایی با تقارن کمتر می‌شوند. مثال دیگر، مغناطش خودبه‌خودی در مواد فرومغناطیس است. در دمای بالا، اسپین‌های الکترونی به طور تصادفی جهت‌گیری می‌کنند و سیستم از تقارن کامل برخوردار است، اما با کاهش دما، اسپین‌ها به طور خودبه‌خودی در یک جهت خاص هم‌راستا می‌شوند و تقارن سیستم شکسته می‌شود. (Rossen, 2008)

شکست تقارن در مورد اشیا فضایی و پدیده‌های روزمره از گذشته مشاهده شده و اهمیت فیزیکی چندانی ندارد. شکست تقارن در مورد قوانین فیزیکی است که در فیزیک نوین اهمیت

ویژه ای دارد. شکست تقارن به دو دسته شکست صریح تقارن (Explicit Symmetry Breaking) و شکست خودبخودی تقارن (Spontaneous Symmetry Breaking) تقسیم می شود:

- **شکست صریح تقارن:** شکست صریح تقارن زمانی رخ می دهد که معادلات دینامیکی سیستم به طور صریح تحت یک گروه تقارن خاص ناوردا نباشند. این به معنای آن است که در فرمولاسیون لاگرانژی یا هامیلتونی، عباراتی وجود دارند که به طور صریح تقارن سیستم را می شکنند. این عبارات می توانند به دلایل مختلفی ظاهر شوند:

۱. شکست تقارن بر اساس نتایج تجربی یا نظری ایجاد شده. به عنوان مثال، در نظریه میدان کوانتومی برهم کنش های ضعیف، تقارن آینه ای (پاریته) به طور صریح نقض می شود. این نقض تقارن بر اساس نتایج تجربی پیش بینی شده توسط لی و یانگ در سال ۱۹۵۶ تایید شد.

۲. اثرات کوانتومی و ناهنجاری ها: در برخی موارد، عبور از سطح کلاسیک به کوانتومی می تواند منجر به ظهور ناهنجاری هایی شود که تقارن کلاسیک را نقض می کنند.

۳. اثرات غیرقابل بازبهنجارشدن (Non-renormalizable Effects): در برخی نظریه های مؤثر، تقارن هایی وجود دارند که در نظریه ی بنیادی تر وجود ندارند. این تقارن های "اتفاقی" ممکن است توسط عبارات غیرقابل بازبهنجارشدن نقض شوند. (Brading et. al., 2023)

- **شکست خودبه خودی تقارن (SSB):** شکست خودبه خودی تقارن شرایطی است که در آن، با وجود تقارن در معادلات دینامیکی، راه حل هایی وجود دارند که تحت این تقارن ناوردا نیستند. این پدیده بدون نیاز به هیچ ورودی نامتقارن صریحی رخ می دهد و به همین دلیل "خودبه خودی" نامیده می شود. یک میله ی عمودی که تحت نیروی فشاری قرار دارد مثالی کلاسیک از این نوع شکست تقارن است. تا زمانی که نیرو کمتر از یک مقدار بحرانی باشد، میله مستقیم باقی می ماند و تقارن چرخشی سیستم حفظ می شود. اما هنگامی که نیرو از این مقدار بحرانی فراتر رود، میله خم می شود و تقارن چرخشی شکسته می شود. در این حالت، تعداد بی نهایت حالت پایدار نامتقارن وجود دارد که همه ی آنها از طریق تبدیل های تقارن به یکدیگر مرتبط هستند. (Brading et. al., 2023) در سیستم های کوانتومی، شکست خودبه خودی تقارن تنها در سیستم های بی نهایت (مانند فرومغناطیس ها یا ابررساناها) رخ می دهد. در این سیستم ها، حالت پایه (ground

(state) سیستم دیگر تحت تقارن ناوردا نیست، اما مجموعه تمام حالت‌های پایه ممکن تقارن سیستم را حفظ می‌کنند.

مکانیسم هیگز مثال معروف دیگری از شکست خودبخودی تقارن در ذرات فیزیک بنیادی است. در این مکانیسم، میدان هیگز یک مقدار مورد انتظار خلاء (vacuum expectation value) غیرصفر دارد که باعث شکست تقارن الکتروضعیف می‌شود. این شکست تقارن منجر به تولید جرم برای بوزون‌های پیمانه‌ای مانند بوزون‌های W و Z می‌شود. (Brading et. al., 2023)

شکست تقارن، به ویژه شکست خودبه‌خودی تقارن، مسائل فلسفی متعددی را مطرح می‌کند. اگر جهان فیزیکی که ما مشاهده می‌کنیم نامتقارن است، چه دلیلی برای باور به وجود تقارن‌های بنیادی وجود دارد؟ آیا قدرت پیش‌بینی و تبیین‌گری این نظریه‌ها دلیلی کافی برای پذیرش تقارن‌های پنهان است؟ وضعیت معرفت‌شناختی نظریه‌های مبتنی بر تقارن‌های پنهان را چگونه باید تفسیر کرد؟ اصل کوری بیان می‌کند که تقارن‌های علت باید در اثر نیز دیده شوند. در مورد شکست خودبه‌خودی تقارن، این اصل به این معناست که عدم تقارن‌های مشاهده‌شده باید ناشی از شکست تقارن قوانین بنیادی باشند. اما آیا این اصل یک اصل روش‌شناختی است یا یک اصل متافیزیکی؟ (Brading et. al., 2023)

شکست تقارن، به ویژه شکست خودبه‌خودی، به ما اجازه می‌دهد تقارن‌های بنیادی را با واقعیت‌های نامتقارن جهان فیزیکی آشتی دهیم. با مطالعه‌ی دقیق شکست تقارن، می‌توان به درک عمیق‌تری از ساختار بنیادی طبیعت و قوانین حاکم بر آن دست یافت. شکست تقارن نشان می‌دهد که چگونه نوسانات کوچک و تصادفی می‌توانند تأثیرات بزرگی بر رفتار سیستم‌ها داشته باشند و منجر به ظهور پدیده‌های جدید شوند. این مفهوم همچنین به ما کمک می‌کند تا درک بهتری از پیچیدگی طبیعت و نقش تقارن‌ها در قوانین بنیادی فیزیک داشته باشیم.

۷. نقش تقارن در نظریه‌پردازی

تقارن به لحاظ مفهومی نقش‌های متعددی در ساخت و پیشبرد نظریه‌ها دارد و از این‌رو روشی بسیار قدرتمند در ساخت نظریه‌ها و حل مسائل فیزیک ارائه می‌دهد. در نظریه‌پردازی نقش‌های زیر را به تقارن می‌توان نسبت داد:

۱. طبقه‌بندی هویت‌های (Entities) موجود در نظریه: تقارن قادر است برخی هویات

موجود در نظریه را برایمان طبقه‌بندی کند. طبقه‌بندی ذرات بنیادی در مدل استاندارد توسط نظریه گروه انجام گرفت. این نقش در هدایت برخی فلاسفه علم به سمت

واقع گرایی ساختاری موثر بوده است. راه های هشت گانه و ده گانه گلman برای طبقه بندی هادرون ها مثال مشهوری از این کاربرد تقارن است.

۲. پیش بینی هویت جدید: همانطور که در مورد اول گفته شد ذرات بنیادی توسط گلman در راه های هشت گانه و ده گانه طبقه بندی کرد. در این طبقه بندی ها نقاط خالی ای وجود داشت که هیچ ذره شناخته شده ای برای آن موجود نبود. گلman با استفاده از ویژگی های تقارنی ذرات جدیدی را برای این نقاط خالی پیش بینی کرد که بعدتر این ذرات کشف شد و نقش تقارن در فیزیک را تقویت کرد. کشف ذرات بنیادی جدیدی همچون Ω^- , $W^\pm$, Z^0 با استفاده از ملاحظات تقارنی انجام گرفت.

۳. وحدت بخشی اجزاء مختلف نظریه: در دهه ۱۹۶۰، شلدون گلاشو، عبدالسلام و استیون واینبرگ با استفاده از تقارن های پیمانه ای، موفق به وحدت بخشیدن به نیروهای الکترومغناطیسی و ضعیف هسته ای در قالب نظریه الکتروضعیف (Electroweak Theory) شدند. این نظریه نشان داد که در انرژی های بسیار بالا (مانند شرایط آغازین جهان)، این دو نیرو به صورت یک نیروی واحد عمل می کنند. در ادامه، فیزیک دانان تلاش کردند تا نیروی هسته ای قوی را نیز در قالب یک نظریه واحد با نیروی الکتروضعیف قرار دهند. این تلاش ها منجر به توسعه نظریه وحدت بزرگ (Grand Unified Theory یا GUT) شد، که در آن تقارن های پیمانه ای بزرگ تر، وحدت این نیروها را توصیف می کنند. اگرچه GUT هنوز به طور کامل تأیید نشده است، اما تقارن ها همچنان به عنوان ابزاری کلیدی برای وحدت بخشیدن به نیروهای بنیادی طبیعت مورد استفاده قرار می گیرند.

۴. نقش هنجاری یا اعمال محدودیت بر شکل نظریه: حذف قوانین یا جواب های نامتقارن و پذیرش قوانین یا جواب های دارای تقارن مطلوب با ملاحظات تقارنی انجام می شود. نظریه نیوتن به دلیل عدم تقارن نسبیتی و عدم سازگاری با اصول نسبیت خاص، به عنوان یک نظریه ناقص شناخته شد. اینشتین با معرفی نسبیت عام، نه تنها این مشکلات را حل کرد، بلکه تقارن های جدیدی را به فیزیک گراننش اضافه کرد. این مثال نشان می دهد که چگونه تقارن به عنوان یک معیار هنجاری عمل می کند و قوانین نامتقارن را حذف یا اصلاح می کند. اگر در فیزیک کلاسیک ملاحظات تقارنی در نظر گرفته می نظریه اتر همان ابتدا نه بدلیل نداشتن شواهد تجربی بلکه به دلیل ملاحظات تقارنی کنار گذاشته می شد.

تقارن در فیزیک نوین و تبعات فلسفی آن (زینب انصاریان و افشین شفیعی) ۸۱

۵. نقش تبیین‌گری: تقارن‌ها نه تنها ساختار قوانین فیزیکی را تعیین می‌کنند، بلکه می‌توانند توضیح دهند که چرا برخی پدیده‌ها رخ می‌دهند و برخی دیگر رخ نمی‌دهند. (Brading et. al., 2023)

- تبیین قوانین پایستگی: بر اساس قضیهٔ نودر، هر تقارن پیوسته در یک سیستم فیزیکی به یک قانون پایستگی منجر می‌شود. تقارن‌ها توضیح می‌دهند که چرا انرژی، تکانه و تکانه زاویه‌ای در سیستم‌های فیزیکی پایسته هستند.

- تبیین عدم وجود برخی پدیده‌ها: در الکترودینامیک، تقارن پیمانه‌ای توضیح می‌دهد که چرا فوتون (ذره حامل نیروی الکترومغناطیسی) فاقد جرم است. اگر فوتون جرم داشت، این تقارن شکسته می‌شد. در مدل استاندارد فیزیک ذرات، تقارن‌های خاصی توضیح می‌دهند که چرا برخی واپاشی‌های ذرات رخ نمی‌دهند، به عنوان نمونه واپاشی پروتون که تاکنون مشاهده نشده است.

- تبیین ساختار نظریه‌های فیزیکی: تقارن‌های پیمانه‌ای در نظریه الکتروضعیف توضیح می‌دهند که چرا نیروهای الکترومغناطیسی و ضعیف به صورت یک نیروی واحد در انرژی‌های بالا ظاهر می‌شوند. تقارن‌های نظریه ابرتقارن (Supersymmetry) توضیح می‌دهند که چرا ذرات ماده (فرمیون‌ها) و ذرات نیرو (بوزون‌ها) می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند.

- تبیین پدیده‌های مشاهده‌شده: تقارن‌های کریستال‌ها (Crystal Symmetries) توضیح می‌دهند که چرا برخی خواص فیزیکی مواد (مانند رسانایی الکتریکی یا خواص نوری) به صورت خاصی رفتار می‌کنند.

۶. حذف ساختارهای زائد از نظریه: این نقش برای تقارن بیشتر از طرف فلاسفه علم پیشنهاد شده است. (van Fraassen and Ismael, 2003) به عنوان یک مثال ساده شده در مکانیک نیوتونی شتاب، سرعت نسبی و فاصله مکانی و به صورت کلی قوانین فیزیک نیوتنی با تغییر یک جهان به جهان ممکن که همه سرعت‌ها در آن به یک مقدار مساوی افزایش پیدا کرده باشند (به روشی که در بند اول اشاره شد) ناوردا باقی می‌مانند اما سرعت مطلق ناوردا باقی نمانده و از جهانی به جهان ممکن دیگر تغییر می‌کند اما از لحاظ فیزیکی ما قادر نیستیم این کمیت را اندازه‌گیری و یا آشکارسازی کنیم. اندازه‌گیری مستلزم این است که شما آزمایشی ترتیب دهید، مثلاً دستگاهی طراحی کنید که مقدار

کمیت را با یک عقربه یا روی صفحه دیجیتال نشان می‌دهد. مسئله این است که قوانین فیزیک بر این آزمایش ترتیب داده شده هم حاکم اند، دستگاہی که قرار است کمیت وردا (variant)^۷ را برایمان اندازه‌گیری کند نیز تابع همین قوانین است. تقارن به این معناست که تغییر کمیت وردا هیچ تغییری در قانون ایجاد نمی‌کند. اگر قانون تغییر نکند یعنی تغییری ایجاد نشود چگونه می‌توان این کمیت را اندازه‌گیری کرد. بنابراین طبق طبق ملاحظات تقارنی، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت مطلق در مکانیک نیوتنی یک کمیت زائد است که در مکانیک کلاسیک نیازی به آن نیست. این ویژگی تقارن از نظر ریاضی - فیزیک این اهمیت را دارد که توابع ریاضی مرتبط با کمیت‌های وردا (در مقابل ناورد) را به عنوان کمیت‌هایی از نظر فیزیکی بی اهمیت معرفی می‌کند که می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت و نظریه‌ای ساده‌تر و جمع و جورتر ساخت. این ویژگی از لحاظ فلسفی چه اهمیتی دارد؟ برای زائد بودن چنین کمیت‌هایی دلایل مختلفی ابراز شده است از جمله اینکه این کمیت‌ها قوانین دینامیکی را تغییر نمی‌دهند، تفاوتی در نظریه ایجاد نمی‌کنند، قدرت تبیینی ندارند، وابسته به ناظر هستند. این دلایل به وضوح بار فلسفی دارند و باید در آن‌ها تأمل کرد. زائد بودن یک کمیت در یک نظریه با توجه به پیش‌فرض‌های فلسفی شخص به مدعیات مختلفی می‌انجامد: غیر واقعی بودن کمیت‌های وردا، عینی نبودن، غیرقابل آشکارسازی بودن از جمله این مدعیات است، چنین مدعیاتی فیزیک تقارن را با متافیزیک مرتبط می‌کند.

۸. بحث‌های فلسفی پیرامون تقارن

اگرچه تقارن، مبحث جدیدی در علم و فلسفه است، اما تقارن و ناوردایی ارتباط تنگاتنگی با مباحث قدیمی فلسفه علم هم‌چون قوانین پایستگی و قوانین طبیعت دارد. به علاوه ارتباط تقارن با نظریه گروه که بخشی از ریاضیات به حساب می‌آید، بحث فلسفی رابطه بین ریاضیات، نظریات فیزیکی و جهان خارج را پیش می‌کشد. هم‌چنین پیشنهاد فیزیک جدید توسط ریاضیات چالش فلسفی است که در مسأله تقارن نیز مطرح می‌شود (Brading et. al., 2023).

دو دسته مبحث در فلسفه پیرامون تقارن مطرح می‌شود. دسته اول ادبیاتی است که مفهوم تقارن و مسائل پیرامون آن را به صورت کلی مورد بحث قرار می‌دهد. دسته دوم مباحث فلسفی‌ای است که مربوط به یک تقارن خاص است. علاوه بر مباحث کلی مربوط به تقارن،

توجه فلاسفه علم به مباحث تقارنی از جمله تقارن پیمانه‌ای، هویت ذرات کوانتومی با توجه به تقارن جایگشتی، تقارن پارینه و نقض آن در نیروی ضعیف هسته‌ای و نقش شکست تقارن رو به افزایش است. هم‌چنین وضعیت تجربی اصول تقارنی نیز مورد بحث است.

بررسی نقش تقارن در نظریه‌پردازی‌ها نشان می‌دهد که این مفهوم توانسته است به مثابه یک آموزه روش‌شناختی بسیار قدرت‌مند در ساخت نظریات و حل مسائل عمل کند. آیا این قدرت روش‌شناختی به وضعیت هستی‌شناسی یا معرفت‌شناسی تقارن مربوط است؟ بر اساس دیدگاه هستی‌شناسانه، تقارن‌ها یک جزء بسیار اساسی از جهان فیزیکی هستند. تقارن‌ها یا نشان‌دهنده خواص موجود در طبیعت هستند یا ساختارهای فیزیکی را مشخص می‌کنند. این ادعا وجود دارد که وضعیت هستی‌شناسانه تقارن سبب موفقیت‌های روش‌شناسانه آن می‌شود؛ مثلاً پیش‌بینی کشف امگای منفی در ۱۹۶۷ با استفاده از خاصیت طبقه‌بندی تقارن و یا کشف $Z^0, W^\pm$ در سال ۱۹۸۳ از طریق نقش وحدت‌بخشی تقارن در نظریه پیمانه‌ای گلاشو-سلام-واینبرگ که در سال ۱۹۶۷ برای وحدت نیروهای الکترومغناطیس و ضعف وجود این ذرات را پیش‌بینی کرد، ادعاهای هستی‌شناسانه در رابطه با تقارن را تقویت می‌کند (Brading et. al., 2023). موفقیت تقارن و ارتباط آن با هستی‌شناسی از طریق استنتاج بر پایه بهترین تبیین (IBE) انجام می‌گیرد. به این شکل که بهترین تبیین برای موفقیت تقارن در پیش‌بینی وجود ذرات جدید این است که تقارن‌های مربوط نشان‌دهنده ساختار طبیعت هستند.

دلیل دیگر برای ارتباط تقارن با طبیعت تعبیر هندسی تقارن‌های فضا-زمانی است که بر اساس آن تقارن‌های فضا-زمانی قوانین فیزیک به عنوان تقارن خود فضا-زمان (ساختار هندسی جهان فیزیکی) تعبیر می‌شود. این نگاه را به تقارن‌های غیرخارجی (درونی) نیز می‌توان تعمیم داد؛ مثلاً فضاها را به عنوان فضای درونی در نظر گرفت که این تقارن‌ها ویژگی چنین فضاها می‌باشد (Brading et. al., 2023).

یکی از مسائل پیش روی دیدگاه هستی‌شناختی نسبت به تقارن این است که آیا تقارن را می‌توان به صورت مستقیم مشاهده کرد؟ به نظر می‌رسد وضع تجربی تقارن‌های مختلف با هم متفاوت است. تقارن‌های فراگیر پیوسته را می‌توان به صورت مستقیم مشاهده کرد، مثل هم‌ارزی چارچوب‌های لخت متفاوت (آزمایش کشتی گالیله)، اما تقارن موضعی پیوسته تنها به صورت غیرمستقیم قابل مشاهده است (Kosso, 2000). بردینگ و برون (2004) معتقدند در نظریاتی با تقارن‌های پیمانه‌ای موضعی میدان‌های مادی در یک میدان پیمانه‌ای جاسازی شده‌اند

و تقارن موضوعی خاصیت توأمان هر دو میدان است؛ بنا بر این آزمایشی مشابه آزمایش کشتی گاليله برای مشاهده چنین تقارن‌هایی وجود ندارد (Brading et. al., 2023).

مشاهده مستقیم تقارن‌های کلی فضا-زمان منجر به جنبه معرفت‌شناختی تقارن‌ها می‌شود. ویگنر اصول ناوردایی فضا-زمانی را پیش‌نیاز امکان کشف قوانین طبیعت می‌داند. اگر همبستگی بین رویدادها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف تغییر کند، کشف قوانین طبیعت غیر ممکن خواهد بود. از نظر ویگنر این مفهوم از اصول تقارن ناشی از جهل ماست. اگر ما قادر بودیم قوانین طبیعت را به طور مستقیم کشف کنیم نیازی به اصول تقارن برای جستجوی آن‌ها نبود. در اینجا منظور ویگنر تقارن‌های دقیق نیست. از نظر او از لحاظ معرفت‌شناسی نظم و پایداری رویدادها برای کشف قوانین طبیعت لازم است (Wigner, 1967). بعضی نیز عملکرد اصول تقارن را هم‌چون عملکرد اصول استعلاایی کانت می‌دانند (Mainzer, 1966).

یکی از مهم‌ترین نقش‌هایی که تقارن بازی می‌کند، طبقه‌بندی است، برای مثال طبقه‌بندی بلورها با استفاده از خواص تقارنی آن‌ها. در مدل استاندارد ذرات بنیادی، با استفاده از نمایش‌های تقلیل ناپذیر گروه‌های تقارنی، ذرات را طبقه‌بندی می‌کنند (Brading et. al., 2023) که در بخش ۷ مطرح شد. این طبقه‌بندی‌های تقارنی شامل تمام خواص ضروری‌ای (مثلاً تمام اعداد کوانتومی) می‌شود که یک شیء فیزیکی را توصیف می‌کند؛ بنابراین ما امکان تعریف هویت بر اساس خواص تبدیلی‌شان را پیدا می‌کنیم. این امر فلاسفه علم را به رهیافت ساختارگرایانه به هویت‌های فیزیک نوین، به طور خاص نگاه نظریه گروهی به اشیاء، رهنمون می‌کند (Brading et. al., 2023).

از مسائل فلسفی که پیرامون قضیه نوتر و ناوردایی مطرح می‌شود بحث عینیت است. نوزیک در کتاب *ناورداه‌ها: ساختار جهان عینی* (Invariances: The Structure of the Objective World) ادعا می‌کند که ناوردایی ریشه عینیت است. او با الهام از هرمان وایل که معتقد بود: «عینیت به معنای ناوردایی است.» (Weyl, 1952: 132) بر اساس عینیت اقامه می‌کند (Nozick, 2001: 76). نشانه‌های عینیت از جمله دسترسی از طریق زوایای مختلف، چندفاعلی و مستقل بودن از باور و تمایل ناظر را می‌توان بر حسب ناوردایی توضیح داد. او این ارتباط را به این شکل توضیح می‌دهد:

آمالی امی نوتر نشان داد که برای هر تقارن/ناوردایی که گروه لی را ارضا کند، کمیتی وجود دارد که پایسته است. متناظر با ناوردایی تحت انتقال در فضا، تکانه پایسته است. برای ناوردایی تحت انتقال در زمان، انرژی پایسته است. و براساس ناوردایی قوانین تحت اضافه کردن یک

مقدار اختیاری به فاز تابع موج، ظاهراً بار الکتریکی پایسته است. پس این عجیب نیست که قوانینی که تحت تبدیلات مختلف ناوردا هستند، عینی تر نگاه داشته می‌شوند. چنین قوانینی که متناظر با کمیتی هستند که پایسته است و چیزی که مقدار آن در این جهان نمی‌تواند تغییر کند، نقصان یابد یا زیاد شود، به عنوان عینی‌ترین چیزی که واقعا وجود دارد به حساب می‌آیند. (2001: 81)

اصول تقارنی توسط قضیه نوتر به قوانین بقا مربوط می‌شوند. قضیه نوتر بیان می‌کند در ازای هر تقارن در نظریه یک قانون بقا وجود دارد. به نظر می‌رسد قوانین بقا نسبت به دیگر قوانین موجود در نظریه در مرتبه بالاتری هستند برخی از جمله جان ارمن (Earman, 2002) و مارک لنگ (Lange, 2007) معتقدند اصول تقارن یا قوانین بقا ابر قوانینی هستند که دیگر قوانین را مدیریت می‌کنند. این ابر قانون بودن و ارتباط آن با واقعیت باید مورد بررسی قرار گیرد. به علاوه اصول تقارنی محدودیت‌هایی را از طرف جهان بر نظریه اعمال می‌کنند که به نظریه این اجازه را نمی‌دهد که هر شکلی داشته باشد، به نظر می‌رسد این قیود صرفاً از این لحاظ که نظریه را ساده‌تر و زیباتر می‌کنند اهمیت ندارند بلکه فراتر از آن می‌توانند نشان‌دهنده ارتباط نظریه با واقعیت جهان باشند. چرا نظریات باید شروط تقارنی را ارضا کنند؟ قدرتمندی این اصول از چه چیزی ناشی می‌شود؟ ارتباط این اصول با تجربه چیست؟ آیا آن‌ها مشاهده پذیر هستند؟ ارتباط این اصول با کفایت تجربی نظریه چیست؟ مطالعه در مورد چنین پرسش‌هایی علاوه بر فلسفه فیزیک می‌تواند بحث‌های جدیدی را وارد فلسفه علم خصوصاً مناقشه واقع‌گرایی-ضدواقع‌گرایی علمی کند. کما اینکه واقع‌گرایی ساختاری خصوصاً واقع‌گرایی ساختاری هستی‌شناختی شدت تحت تاثیر نظریه گروه و تقارن است. اوج این موضوعات جدید استنتاج تقارن-به سمت واقعیت است که ادعا می‌کند قادر است به عنوان روشی در متافیزیک مورد استفاده قرار گیرد. بررسی جوانب مختلف این استدلال می‌تواند افق‌های جدیدی را در مقابل مناقشه واقع‌گرایی-ضدواقع‌گرایی علمی و حتی متافیزیک علم بگشاید.

۹. نتیجه‌گیری

تقارن، به عنوان یکی از مفاهیم کلیدی در فیزیک، نه تنها در توصیف پدیده‌های فیزیکی بلکه در شکل‌دهی به قوانین بنیادی طبیعت و نظریه‌های علمی نقش اساسی ایفا می‌کند. در یک مرور کلی توضیح داده شد که چگونه این مفهوم از یک ایده شهودی و زیبایی‌شناختی به یک ابزار

علمی دقیق و قدرتمند در فیزیک نظری تبدیل گردید. همچنین به نقش‌های مختلفی که تقارن در نظریه پردازی ایفا می‌کند پرداختیم.

تقارن در فیزیک نوین همچون یک "ابر قانون" عمل می‌کند که محدودیت‌هایی را بر شکل و ساختار نظریه‌های فیزیکی اعمال می‌کند. این مفهوم فراتر از تقارن‌های هندسی و مشاهده‌پذیر است و بیشتر به ناوردایی قوانین فیزیکی تحت تبدیلات خاص مربوط می‌شود. تقارن‌های فیزیکی، مانند تقارن‌های فضازمانی و تقارن‌های پیمانه‌ای، به عنوان اصول بنیادی در نظریه‌هایی مانند نسبیت عام، نظریه میدان‌های کوانتومی و مدل استاندارد فیزیک ذرات عمل می‌کنند. این اصول نه تنها به وحدت بخشیدن به نیروهای بنیادی طبیعت کمک می‌کنند، بلکه به پیش‌بینی ذرات جدید و پدیده‌های فیزیکی ناشناخته نیز منجر شده‌اند.

تقارن به عنوان یک مفهوم بنیادی در فیزیک، بحث‌های فلسفی متعددی را در ارتباط با ابعاد روش‌شناختی و هستی‌شناختی آن برانگیخته است. از یک سو، تقارن‌های فیزیکی به عنوان ویژگی‌های ذاتی طبیعت تفسیر می‌شوند که ساختار قوانین فیزیکی را تعیین می‌کنند. از سوی دیگر، برخی فلاسفه علم تقارن را به عنوان یک ابزار روش‌شناختی در نظر می‌گیرند که به فیزیک‌دانان کمک می‌کند تا نظریه‌های ساده‌تر و کارآمدتری بسازند. به علاوه، چنانکه توضیح داده شد، مسائل و مباحث بنیادی درباره تقارن می‌تواند بر مسائل فلسفی دیگری مثلاً مورد عینیت قوانین فیزیکی، نقش ریاضیات در علم و ارتباط بین نظریه‌های فیزیکی و واقعیت جهان خارج نیز نور بیناندازد و ابعاد جدیدی از آن‌ها را روشن کند.

پی‌نوشت‌ها

۱. فیلیپ اندرسون به دلیل کارهای پیشگامانه‌اش در فیزیک ماده چگال، به ویژه در زمینه نظریه ناخالصی‌ها در جامدات، نظریه میدان میانگین و پدیده‌های موضعی شدن (Localization) شناخته می‌شود. او همچنین در توسعه نظریه شکست خودبه‌خودی تقارن (Spontaneous Symmetry Breaking) نقش کلیدی داشت، مفهومی که در فیزیک ذرات و کیهان‌شناسی نیز اهمیت زیادی دارد. اندرسون در سال ۱۹۷۷ به همراه نوبل فرانسیس مات (Nevill Francis Mott) و جان وان ولک (John Hasbrouck Van Vleck) جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد.

2. Weyl, H. (1952). *Symmetry*. Princeton University Press

این کتاب یکی از آثار کلاسیک در زمینه تقارن است و برای علاقه‌مندان به ریاضیات، فیزیک و فلسفه بسیار جذاب و آموزنده است. این کتاب به بررسی مفهوم تقارن در ریاضیات، هنر و طبیعت می‌پردازد. هرمان وایل، ریاضیدان و فیلسوف برجسته، در این اثر به تحلیل تقارن از دیدگاه‌های مختلف، از جمله

تقارن در فیزیک نوین و تبعات فلسفی آن (زینب انصاریان و افشین شفیعی) ۸۷

- هندسه، فیزیک و زیبایی‌شناسی می‌پردازد. این کتاب با عنوان "تقارن" توسط عبدالحسین مصحفی به فارسی نیز ترجمه شده است و در سال ۱۳۶۹ توسط انتشارات علمی و فرهنگی به چاپ رسیده است.
۳. قانون تعادل ارشمیدس: اگر دو وزنه یکسان به فاصله‌ای مساوی روی یک بازوی تعادل آویخته شده باشند، در تعادل خواهند ماند چرا که دلیلی ندارد حول نقطه تعادل بچرخند.
- استدلال انکسیماندر برای عدم تحرک زمین: زمین در مرکز کیهان که خود کروی است ساکن باقی می‌ماند چراکه دلیلی وجود ندارد که در یک جهت مرجح نسبت به دیگر جهات حرکت کند.
۴. برای مثال‌های بیشتر از استدلال‌های تقارنی می‌توانید به کتاب جو روزن (۲۰۰۸) فصل پنجم و مقاله هون و گولداشتاین (۲۰۰۶) مراجعه کنید.
۵. بر خلاف کوزو، ون فراسن حاضر به پذیرفتن چنین خطر معرفتی نیست و استدلال تقارنی‌ای را می‌پذیرد که ویژگی تقارنی‌ای را به طبیعت نسبت نمی‌دهد. از نظر او تقارن مطلوب یعنی "مسئله‌های مشابه راه حل‌های مشابه دارند." با توصیفی که ون فراسن ارائه می‌دهد استدلال تقارنی مطلوب یک استدلال پیشینی است که قدرت بسیار زیادی دارد اما هیچ اطلاعاتی از جهان به ما نمی‌دهد و پیشرفت معرفتی‌ای برای ما حاصل نمی‌کند (van Fraassen, 1989:260-261).
۶. در این جا نکته‌ای را می‌توان خاطر نشان کرد. نظریات به دو شکل ساخته می‌شوند. بعضی نظریات بر پایه یک واقعیت دانسته ساخته می‌شوند؛ اما بعضی از نظریات در ابتدا اصولی خاص را فرض می‌گیرند و سپس ساختارهای ممکن نظریه توسط این اصول محدود می‌شود (Brading et al., 2023). این اصل در اینجا اصل نسبیت است که نظریه را محدود کرده و اجازه نمی‌دهد ساختار آن هر شکلی داشته باشد.
۷. کمیت وردا در مقابل کمیت ناوردا، کمیتی است که با تغییر چارچوب فیزیکی این کمیت نیز تغییر می‌کند.

کتاب‌نامه

- Anderson, P. W. (1972). "More is Different". *Science* 177 (4047): 393-396.
- Baker, D., (2010), "Symmetry and the Metaphysics of Physics", *Philosophy Compass*, 5(12): 157–1166.
- Brading, Katherine, Elena Castellani, and Nicholas Teh, "Symmetry and Symmetry Breaking", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2023 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2023/entries/symmetry-breaking/>>.
- Brading, K. and Castellani, E. (eds.), (2003), *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Dasgupta, S. (2016). "Symmetry as an Epistemic Notion (twice over)". *The British Journal for the Philosophy of Science* 67: 837-878.
- Dasgupta, S. (2021). "Symmetry and Superfluous Structure: A Metaphysical Overview" in Knox, Eleanor and Alistair Wilson (eds.), *Routledge Companion to the Philosophy of Physics*, Routledge.

- Earman, J. (2002), "Laws, Symmetry, and Symmetry Breaking; Invariance, Conservation Principles, and Objectivity" (PSA 2002 Presidential Address), *Philosophy of Science*, 71 (2004): 1227–1241
- Griffiths, D. J. (2008). *Introduction to Elementary Particles* (2nd ed.). Wiley-VCH.
- Gross, David J. (1996), "The role of symmetry in fundamental physics", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* Vol. 93, pp. 14256–14259
- Hon, G., & Goldstein, B. R. (2005a). From proportion to balance: The background to symmetry in science. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 36(1), 1-21.
- Hon, G., & Goldstein, B. R. (2005b). Legendre's Revolution (1794): The Definition of Symmetry in Solid Geometry. *Archive for History of Exact Sciences*, 59(2), 107-155.
- Hon, Giora, and Goldstein, Bernard R., 2006, "Unpacking "For Reasons of Symmetry": Two Categories of Symmetry Arguments", *Philosophy of Science*, Vol. 73, No. 4, pp. 419-439
- Ismael, J. and B. van Fraassen (2003). "Symmetry as a Guide to Superfluous Theoretical Structure". In K. Brading and E. Castellani (eds), *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, p. 371-92. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kosso, P., 2000, "The empirical status of symmetries in physics", *British Journal for the Philosophy of Science*, 51: 81–98.
- Lang, Marc, (2007), "Laws and meta-laws of nature: Conservation laws and symmetries", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38 457–481
- Mainzer, K., (1996), "Symmetries of nature", Berlin: Walter de Gruyter.
- Nozick, Robert, (2001), "Invariances The Structure of the Objective World", Harvard University Press.
- O'Raifeartaigh, L. (1997). *The dawning of gauge theory*. Princeton University Press.
- Rosen, J., 2008, *Symmetry Rules: How Science and Nature Are Founded on Symmetry*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg.
- Sternberg, S. (1994). *Group Theory and Physics*. Cambridge University Press.
- van Fraassen, B. C. (1989). "Laws and symmetry". Oxford, New York: Oxford University Press.
- Weidner, R. T., & Sells, R. L. (1973). *Elementary Modern Physics* (2nd ed.). Allyn and Bacon.
- Weyl, H. (1952). "Symmetry". Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Wigner, E. P., (1967), "Symmetries and Reflections", Bloomington, IN: Indiana University Press.
- Wigner, E. P., Mehra, J., & Wightman, A. S. (1995). "Philosophical reflections and syntheses". Berlin; New York: Springer.