این سکه نسبت به زمین رفتار لَخت، و اما نسبت به خودرو رفتار تالَخت (شتاب مرکزگریز) از خود نشان می‌دهد. خودرو فقط وقتی که روی زمین در خطی مستقیم و با سرعت ثابت در حرکت است، واجد شرایط دستگاه مرجعی لَخت است.

سرعت معنای مطلقی ندارد، ولی به نظر می‌رسد که شتاب دارای معنای مطلق است. شتاب در یک دستگاه مرجع لَخت، همانند شتاب در دستگاه مرجع لَخت دیگر است. وقتی شتاب‌ها [در دو چارچوب] باهم فرق کنند، این امر نشانه‌ی آن است که از دستگاه مرجعی نالخت (مثل خودروی در حال ترمز کردن) استفاده می‌شود.

لَخت بودن چارچوب مرجع را چگونه می‌توان تشخیص داد؟ پاسخ این پرسش در مکانیک کلاسیکِ (یا فیزیکِ حرکتِ) آیزاک نیوتون این است که لَختی صرفاً یکی از خواص ذاتی مربوط به فضاست. این پاسخ از نظر بسیاری قانع‌کننده نبود. قوی‌ترین استدلال در مخالفتِ با این دیدگاه را ارنست ماخ ارائه کرد، که اظهار داشت در عالم تهی هیچ معنایی برای حرکت نمی‌توان قائل شد. اگر در عالم نقاط مرجعی نباشند، آیا می‌توانیم بگوییم خودرو به طرف جلو شروع به حرکت می‌کند، حرکتش را کند می‌کند، دور می‌زند، یا این‌که می‌چرخد و پیچ و تاب می‌خورد؟ [در چنین جایی] هیچ مقاومتی نمی‌تواند در مقابل شتاب وجود داشته باشد (چرا که در این جا شتاب هیچ معنایی ندارد)، و در نتیجه هیچ‌گونه لَختی‌ای نمی‌توان یافت. اگر این دیدگاه درست باشد، در این صورت لَختی و تعیین این که شتاب چه چیزی هست و چه چیزی نیست باید از ماده‌ی موجود در عالم حاصل شود. در این جا، روی کره‌ی زمین، گرایش خودروی در حالِ حرکت و مقاومت آن در برابر پیچیدن یا ترمز کردن را باید ناشی از برهم‌کنش‌های خودرو با ستارگان دوردست دانست.

این دیدگاه، که به نام اصل ماخ شناخته می‌شود، آشکارا با نظریه‌ی کلاسیکی حرکت نیوتون در تناقض است. این که آیا این دیدگاه با نظریه‌ی نوین مبتنی بر کارهای آلبرت اینشتین سازگاری دارد یا نه، خیلی کمتر روشن است. اینشتین خیلی تحت تأثیر نظرات ماخ بود، و نظریه‌ی نسبیت عام او به پیش‌بینی‌هایی منجر می‌شود که ظاهراً با اصل ماخ، به ویژه با پس‌کشیِ چارچوب‌های لَخت، سازگاری دارند. یکی از نمونه‌های روشن این سازگاری آن است که چارچوب‌های مرجع لَخت (بدون دوران) در نزدیکی زمین اندکی تحت تأثیر حرکت زمین که جرم زیادی دارد قرار می‌گیرند، و بنابراین نسبت به ستارگان دور اندکی می‌چرخند. این اثر چندان ناچیز است که حدود ۱۰ میلیون سال طول می‌کشد تا این چارچوب‌های مرجع لَخت یک دور نسبت به ستارگان دور پس کشیده شوند و عقب بمانند. با این حال، انتظار می‌رود با آزمایشی که به کمک ژیروسکوپ‌های سوار بر ماهواره انجام می‌شود بتوانند پیش از پایان قرن بیستم این اثر را اندازه بگیرند. نظریه‌ی اینشتین، گرچه از جهاتی یادآور حال و هوای نظرات ماخ است، اما از جنبه‌های دیگر با اصل ماخ تناقض آشکار دارد. به‌ویژه، بنابراین نظریه حتی در فضای تهی هم چارچوب‌های لَخت وجود دارند.

اصل ماخ به صورتی نسبتاً مبهم بیان شده است: لَختی را باید ناشی از برهم‌کنش‌های اجسام مادی دانست. به جهت این ابهام، ممکن است همیشه درباره‌ی مضمون دقیق این اصل و این که آیا در نظریه‌ی خاصی مانند نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین می‌گنجد یا نه، اختلاف نظر وجود داشته باشد.

**همچنین نگاه کنید به: جرم؛ جرم لَختی؛ چارچوب مرجع؛ چارچوب مرجع لَخت؛ قانون‌های نیوتون؛ ماخ، ارنست؛ مکانیک نیوتونی؛ نسبیت عام، نظریه‌ی**

## کتاب‌شناسی

FEUER, L. S. *Einstein and the Generations of Science* (Basic Books, New York, 1974).

GRAVES, J. C. *The Conceptual Foundations of Contemporary Relativity Theory* (MIT Press, Cambridge. MA, 1971).

MACH, E. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development,* trans. by K. Menger (Open Court Publishing, LaSalle, IL, 1960).

● RICHARD H. PRICE

MACH'S PRINCIPLE

# اصل مکملیت

در فلسفه و علوم طبیعی هرگاه بین دو دیدگاه متضاد قرار بگیریم که در عین حال هر دو هم درست باشند، با مفهوم مکملیت سروکار پیدا می‌کنیم. در این جا، برای بررسی موضوعی خاص دو رهیافت وجود دارد که هر دو در فهم ماهیت آن موضوع به یک اندازه اساسی هستند، ولی این رهیافت‌ها با یکدیگر مانعةالجمع‌اند. همچنین این دو وجه مکمل به قدری در ارتباط تنگاتنگ با یکدیگرند که برای هر دو واژه‌ی واحدی را به کار می‌بریم، و این هم ناشی از ابهام زبان است. این نوع ابهام، همیشه ما را با مسئله‌ی معرفت‌شناختیِ در خور توجهی روبه‌رو می‌کند. ظهور نمونه‌ای از این دوگانگی را در اوایل دهه‌ی ۱۹۲۰ در مورد نور شاهد بودیم. دو وجه متفاوت این پدیده‌ها ــ یعنی امواج نور و کوانتوم‌های نور ــ رابطه‌ی مانعةالجمع آن‌ها را نشان می‌داد. نور در آزمایش‌های متفاوت، یکی از خصوصیت‌های موجی یا ذره‌ای خود را بروز می‌دهد: خصوصیت موجی نور در پدیده‌های پراش و تداخل آشکار می‌شود، در حالی که رفتار ذره‌ای فوتون در پدیده‌های برهم‌کنشِ فوتون ـ الکترون، مانند اثر کامپتون و اثر فوتوالکتریک،

ظاهر می‌شود. کار بدیع نیلس بور، فیزیکدان دانمارکی، در این بود که دوگرایی بین تصویرهای موجی و ذره‌ای را به عنوان نقطه‌ی آغاز مناسبی برای تعبیری از مکانیک کوانتومی برگزید.

این دوگرایی فقط منحصر به خواص تابش نیست. لوئی دوبروی نشان داد که هر ذره‌ی در حال حرکت (الکترون، نوترون، پروتون، اتم، یون، مولکول) با انتشار موج همراهی می‌شود؛ [یعنی] ماهیت مکملِ موج ـ ذره در مورد این اشیاء قابل مشاهده است. فوتون‌ها، الکترون‌ها، و اشیای دیگری که در بالا ذکر شدند، هرگز در یک زمان هم به عنوان موج و هم به صورت ذره عمل نمی‌کنند. مفاهیم موج و ذره هر دو معتبرند، ولی هیچ یک به تنهایی برای توصیف سیستم فیزیکی در همه‌ی شرایط کافی نیست. نقش مکمل بودن که با خصوصیت موجی و ذره‌ای تابش و ماده ایفا می‌شود، در اصل مکملیت بور (۱۹۲۸) گنجانده شده است. بنابراین اصل، هر دو مفهوم موج و ذره در توصیف رفتار سیستم‌های فیزیکی مکمل یکدیگرند، ولی همزمان نمی‌توانند ظاهر شوند. در میان جنبه‌های مکمل تابش، در انرژی‌های کم (یا بسامدهای کم نور) خواص موجی نور حکم‌فرماست، در حالی که در انرژی‌های زیاد (یا بسامدهای زیاد نور) خواص ذره‌ای آن آشکار می‌شود. در انرژی‌های کم، مثلاً در نور مرئی، نظریه‌ی موجی نور پدیده‌های تداخل و پراش را با دقت توصیف می‌کند. زمانی که انرژی نور افزایش می‌یابد، خصوصیت موجی کم رنگ‌تر می‌شود و تابش خصوصیت ذره‌ای بیشتری پیدا می‌کند. در انرژی‌های تابشی زیاد، مانند انرژی پرتوهای گاما، فوتون‌ها مثل ذرات منفرد عمل می‌کنند. اصل عدم قطعیتِ ورنر هایزنبرگ پیامدی از خصوصیت موجی ـ ذره‌ای نور و ماده را نشان می‌دهد، و نمونه‌ای از رابطه‌ی مکملیت به شمار می‌آید. هایزنبرگ نشان داد که اندازه‌گیری مکان و تکانه‌ی هر ذره به طور همزمان و با دقت نامحدود غیرممکن است.

اصل مکملیت در دهه‌ی ۱۹۲۰ و در همان زمانی که نظریه‌ی کوانتومیِ اتم فرمول‌بندی می‌شد، در طی بحث‌های متعددی بین نیلس بور، آلبرت اینشتین، ورنر هایزنبرگ، اروین شرودینگر، ولفگانگ پاؤلی، جورج گاموف و دیگران، سربرآورد. آزمایش‌های فکریِ آرمانی در این میان نقش مهمی ایفا می‌کرد. اینشتین آزمایش‌هایی مطرح می‌کرد که از نظر او تضاد درونی تعبیرهای بور را به‌وضوح نشان می‌داد.

کنفرانس‌های سولوِی در سال‌های ۱۹۲۷ و ۱۹۳۰ برای این مباحثات بین اینشتین و بور فرصت‌های مناسبی بودند. یکی از نمونه‌های کلاسیک این مباحثات، طرح آزمایشی بود که در آن سه پرده‌ی موازی مستطیلی در فواصلی از هم به طور قائم نصب می‌شدند. در اولین پرده یک شکاف افقی وجود داشت، در دومین پرده دو شکاف وجود داشت، و از سومین پرده به عنوان صفحه‌ی عکاسی استفاده می‌شد. باریکه‌ای از الکترون‌ها (یا فوتون‌ها) از سمت چپ روی پرده‌ی اول فرود می‌آمد. باریکه‌ی موازی شده، پس از عبور از اولین شکاف، به طرف پرده‌ی دوم که دو شکاف داشت می‌رفت. امواج مربوط به ذرات گذرنده از دو شکاف در پرده‌ی دوم، با یکدیگر تداخل می‌کردند و یک نقش تداخلی ایجاد می‌شد که شامل نوارهای موازی متناوباً روشن و تاریک روی صفحه‌ی عکاسی بود. این تصویر از اثرگذاری مشترک تعداد زیادی فرایند منفرد (الکترون‌ها) حاصل می‌شود، به طوری که هر یک از آن‌ها در محلی که الکترون با صفحه‌ی عکاسی برخورد می‌کند یک لکه‌ی بسیار کوچک ایجاد می‌کند. نتیجه‌ی این آزمایش نشان می‌دهد که از یک طرف، مطابق مفهوم ذره، تک‌تک الکترون‌ها در نقطه‌های مشخص با صفحه برخورد می‌کنند، و از سوی دیگر توزیع لکه‌ها روی صفحه از قانونی تبعیت می‌کند که بر اساس مفهوم تداخل موج‌های الکترونی قابل درک است.

نظر اینشتین این بود که بررسیِ تکانه‌ای که الکترون‌های ورودی به صفحه منتقل می‌کنند، تعیین خواهد کرد که الکترون‌ها از کدام یک از دو روزنه عبور کرده‌اند. از دیدگاه او، پیدا کردن مکان و حرکت ذره با دقت نامحدود امکان‌پذیر بود. بور در پاسخ گفت که اگر واقعاً می‌توانستیم سرعت و مکان الکترون را قبل از عبور از شکاف‌ها با دقت زیاد تعیین کنیم، آنگاه طبق قانون علیت این را نیز باید بدانیم که الکترون از کدام شکاف پرده عبور می‌کند و در کجا با صفحه‌ی عکاسی برخورد خواهد کرد. طبق نظر بور، باز یا بسته بودن شکاف بالا بر حرکت الکترون‌هایی که از شکاف پایین عبور می‌کنند هیچ تأثیری نخواهد داشت. اما اگر شکاف بالایی را بپوشانیم نقش تداخلی از بین می‌رود، چون الکترون‌هایی که می‌دانیم از شکاف پایین می‌گذرند قادر به «مشاهده‌ی» باز یا بسته بودن شکاف دیگر نیستند. هر اندازه‌گیری‌ای که بتواند تعیین کند که الکترون از کدام شکاف عبور کرده است، تغییری در وضعیت آزمایش ایجاد می‌کند که مشاهده‌ی نقش تداخلی را غیرممکن می‌سازد. حرکت پس‌زنیِ پرده براثر تغییر جهتِ الکترون نیز مشمول روابط عدم‌قطعیت می‌شود، و بررسی این‌که الکترون به‌طرف بالا یا پایین حرکت می‌کند غیرممکن خواهد شد.

در ششمین کنگره‌ی بین‌المللی فیزیک سولوِی در ۱۹۳۰، اینشتین آزمایش دیگری را مطرح کرد که در آن انرژی کوانتوم نور از طریق وزن کردنِ چشمه‌ی تابش، قبل و بعد از گسیل کوانتوم، قابل اندازه‌گیری بود. یک جعبه‌ی آرمانی را درنظر بگیرید که داخل آن با آینه‌های کامل پوشیده شده باشد و بتواند انرژی تابشی را در درون خود برای همیشه حفظ کند. جعبه را وزن کنید. سپس در زمان معینی، که با یک ساعت کنترل می‌شود، دریچه‌ای آرمانی را باز کنید تا بخشی از نور به بیرون گسیل شود. جعبه را دوباره وزن کنید. تغییر جرم جعبه، تعیین‌کننده‌ی انرژی نور گسیل شده است. طبق ادعای اینشتین این آزمایش می‌توانست، در تناقض با اصل عدم قطعیت، انرژی گسیل شده و زمان گسیل این انرژی را با هر دقت دلخواهی به دست دهد. پاسخ بور با استفاده از همان جعبه‌ی آرمانی بود که آن را روی ترازویی فنری درنظر گرفت. بور اظهار داشت که چون جعبه در پیِ تغییر وزن به طور قائم حرکت می‌کند، در سرعت قائم آن و در ارتفاع آن از سطح

میز عدم قطعیت‌هایی وجود خواهد داشت. به‌علاوه، عدم قطعیت در ارتفاع آن از سطح زمین به عدم قطعیت در آهنگ کار ساعت منجر خواهد شد، زیرا طبق نظریه‌ی گرانش اینشتین آهنگِ کار ساعت، تابعی از مکان ساعت در میدان گرانشی است. بور نشان داد که عدم قطعیت‌های زمان و تغییر جرمِ جعبه، از همان رابطه‌ی عدم قطعیتی پیروی می‌کنند که به‌زیر سؤال برده شده بود.

اصل مکملیت پیامدهای مهمی در فیزیک دارد. از یک سو، با استفاده از پراش پرتو ایکس و با بهره‌گیری از ماهیت موجی نور، ساختار مواد تعیین می‌شود. از سوی دیگر، در طیف‌نماییِ فوتوالکترونی پرتو ایکس، انرژی جنبشی فوتوالکترون‌هایی که بر اثر فرایند فوتوالکتریک از سطح نمونه گسیل می‌شوند، مشخصه‌ای از عناصر موجود در نمونه و حاکی از اطلاعاتی درباره‌ی ترکیب عنصریِ سطح و حالت شیمیایی اتم‌هاست. با توجه به خصوصیات موجی الکترون‌ها، برای مطالعه‌ی ساختارِ سطوح از ابزارهایی تحلیلی، مانند پراشِ بازتابی الکترون‌های پرانرژی یا پراشِ الکترون‌های کم‌انرژی، استفاده می‌شود. میکروسکوپ الکترونی، به کمک امواج الکترونی با طول موج‌های بسیار کوتاه‌تر از نور مرئی و در انرژی ۱۰۰ کیلوالکترون ولت، می‌تواند جزئیات نمونه‌ها را با بزرگ‌نمایی ۲۵۰٬۰۰۰ نشان دهد.

**همچنین نگاه کنید به: اثر فوتوالکتریک؛ اثر کامپتون؛ اصل عدم‌قطعیت؛ الکترون، پراش؛ اینشتین، آلبرت؛ بور، نیلس هنریک داوید؛ پاؤلی، ولفگانگ؛ شرودینگر، اروین؛ کامپتون، آرتور هولی؛ مکانیک کوانتومی؛ هایزنبرگ، ورنرکارل**

## کتاب‌شناسی

BLAEDEL, N. *Harmony and Unity: The Life of Niels Bohr* (Science Tech. Publishers, Madison, WI, 1988).

GAMOW, G. *The Great Physicists From Galileo to Einstein* (Dover, New York, 1988).

ROZENTAL, S., ed. *Niels Bohr. His Life and Work as Seen by His Friends and Colleagues* (Interscience, New York, 1967).

● PAWEL MROZEK

COMPLEMENTARITY PRINCIPLE

# اصل هم‌ارزی

چهارصدسال قبل، گالیلئو گالیله فیزیکدان ایتالیایی پی‌برد که شتاب اجسام در حال سقوط به طرف زمین مستقل از ترکیب مادی این اجسام است ـ چوب‌های مختلف، سنگ‌ها، فلزات و غیره جملگی (با چشم‌پوشی از مقاومت هوا) با آهنگ یکسانِ حدود $۹٫۸\ m.s^{-۲}$ سقوط می‌کنند. چنددهه بعد، وقتی آیزاک نیوتون قوانین اساسیِ فیزیک ریاضیاتی‌اش را فرمول‌بندی می‌کرد، کشف گالیله وی را بر آن داشت که مفهوم جرم لَختی را در قانون نیروی گرانش خود به کار ببرد. وی چنین فرض کرد که هر جسمی دارای یک جرم لَختی است، و همین جرم لَختی است که وقتی جسم تحت تأثیر نیرویی قرار می‌گیرد شتاب (یا آهنگ تغییر سرعت) آن‌را تعیین می‌کند

$$\text{شتاب} \times \text{جرم (لختی)} = \text{نیرو}$$

نیوتون، سپس نیروی گرانشی وارد بین هردو جسمی را متناسب با حاصل‌ضرب جرم‌های (لَختی) این اجسام (و متناسب با عکس مجذور فاصله‌ی بین این اجسام) در نظر گرفت:

$$\text{نیروی گرانشی بین } A \text{ و } B \sim \frac{\text{جرم (لَختی) } A \times \text{جرم (لَختی) } B}{D^{۲}_{AB}}$$

به این ترتیب، همان‌طور که گالیله پی برده بود، شتاب گرانشی هر جسمی از جرم آن جسم مستقل است. تا اوایل قرن بیستم، آزمایش‌هایی که با دقت روزافزون انجام شده بودند یکسان بودن آهنگ سقوطِ آزاد مواد مختلف را با دقت حدود یک قسمت در هر میلیارد قسمت تأیید کردند.

آلبرت اینشتین در ۱۹۰۶ متوجه شد که این یکسانی آهنگ سقوط آزاد گرانشی به این معنی است که گرانی به طور موضعی با استقرار در دستگاه مختصات شتاب‌دار هم‌ارز است. او چنین استدلال کرد که فرض کنید شخصی در اتاقی بدون گرانش، ولی شتاب‌دار قرار داشته باشد. در این صورت، به نظر می‌رسد تمام اشیایی که در این اتاق آزادانه به حال خود گذاشته می‌شوند دقیقاً با آهنگ یکسانی به طرف کف اتاق «سقوط می‌کنند»، زیرا در واقع کف اتاق با حرکت شتاب‌دار به اشیای مختلف نزدیک می‌شود. اینشتین این بینش ساده را در اصل هم‌ارزی خود به این صورت تعمیم داد که بین پدیده‌های فیزیکی مشاهده شده در موقعیت‌های گرانشی و پدیده‌های مشاهده شده در چارچوب‌های مرجع بدون گرانش ولی شتاب‌دار، نباید هیچ‌گونه اختلافی وجود داشته باشد. با تحلیل برخی موقعیت‌های فرضی در چارچوب‌های مرجع شتاب‌دار، اینشتین توانست در زمینه‌ی تأثیر گرانی بر انتشار نور و بر رفتار ساعت‌ها به دو پیش‌بینیِ زیر دست یابد. اصل او حاکی از آن بود که نور به خط مستقیم انتشار نمی‌یابد، بل‌که به طرف چشمه‌ی گرانی منحرف می‌شود. نتیجه‌ی دیگری که شاید انقلابی‌تر است این بود که این اصل ایجاب می‌کند ساعت‌هایی که به چشمه‌ی گرانی نزدیک‌ترند، صرفاً به دلیل همین نزدیکی، از ساعت‌های مشابه کُندتر کار می‌کنند.

امروزه مشاهده می‌شود هنگامی که خط دید ستارگان و