اهمیت گرانش کوانتومی

وحیدی‌نیا، محمدحسن
دانشجوی دکتری بخش فیزیک دانشگاه شیراز
vahidinia@shirazu.ac.ir

قرن بیستم میلادی سرآغاز پیشرفت عمیقی در فیزیک نظری بود. در ابتدای این قرن فیزیکدانان پی‌بردند که برخی از قوانین و مفاهیم مکانیک نیوتون و الکترومغناطیس ماکسول در شرایط خاص نیاز به تصحیح دارند. این تصحیحات منجر به مطرح شدن نظریه‌های نسبیت خاص، نسبیت عام و مکانیک‌کوانتومی گردید که هر یک در جای خود تغییرات اساسی در نگرش فیزیکدانان نسبت به طبیعت به وجود آورد.

در نسبیت خاص، اینشتین با این فرض که تمام دستگاه‌های لخت[1] برای مطالعه‌ی پدیده‌های فیزیکی یکسانند و سرعت نور نسبت به تمامی این دستگاه‌ها ثابت است، مفاهیم "فضا" و "زمان" را درهم آمیخت و مفهوم جدید فضا زمان را ارائه داد. این مهم سبب پیوستن مفاهیم انرژی و تکانه و شکل‌گیری قضیه‌ی معروف هم ارزی جرم و انرژی شد. نظریه نسبیت خاص نشان داد که در سرعت‌های نزدیک به سرعت نور، مکانیک نیوتونی اعتبار خود را از دست می‌دهد.

اینشتین در سال ۱۹۱۶ نشان داد که تعمیم نظریه نسبیت خاص به دستگاه‌های مرجع غیر لخت[2] به نظریه‌ی نسبیت عام منجر می‌گردد. این نظریه به خودی خود، گرانش را هم در بر می‌گیرد. در اصل بر اساس این نظریه، وجود اجرام فضا زمان را به شکل خمیده در می‌آورد و خمیدگی فضا زمان در حرکت اجسام مختلف تاثیر می‌گذارد. به موجب این نظریه در مطالعه‌ی میدان‌های گرانشی قوی قانون ساده‌ی گرانش نیوتون معتبر نیست.

از سوی دیگر پژوهش‌های چند تن از فیزیکدانان بزرگ درباره‌ی رفتار میکروسکوپیک ماده منجر به پدید آمدن نظریه‌ای موسوم به نظریه‌ی مکانیک کوانتومی‌گردید. این نظریه نشان می‌دهد که در ابعاد اتمی و زیراتمی نیز مکانیک نیوتونی اعتبار کافی ندارد. از مهمترین نمودهای این نظریه، **اصل عدم قطعیت هایزنبرگ** است که به موجب آن حاصل‌ضرب عدم قطعیت در اندازه‌گیری تکانه و مکان یک ذره، عددی ثابت است. این بدان معنا است که ***هیچ گاه*** نمی‌توانیم در ***یک لحظه*** و با ***دقت کامل*** موقعیت و سرعت یک ذره را **اندازه گیری** کنیم.

موفقیت‌ها و پیش‌بینی‌های شگفت انگیز این نظریه‌ها، این انگیزه را در ذهن فیزیکدانان تقویت کرد که قوانین نسبیت و کوانتوم، سنگ بنای اصلی قوانین طبیعت می‌باشند. از آنجایی که در طبیعت موجودات زیر اتمی با سرعت‌هایی نزدیک به سرعت نور وجود دارند، از همان ابتدا تلاش برای ارایه‌ی نظریه‌ای سازگار، بر مبنای مکانیک کوانتومی و نسبیت آغاز شد. در نخستین گام از این تعمیم، نظریه‌ی مکانیک کوانتومی نسبیتی پدیدار گشت که به علت پاره‌ای از مشکلات فنی مورد قبول واقع نشد؛ اما ادامه‌ی این پژوهش‌ها به نظریه‌ی بسیار موفق میدان‌های کوانتومی انجامید.

در نظریه‌ی میدان کوانتومی، مفهوم میدان کلاسیک بر اساس نظریه‌های مکانیک کوانتومی و نسبیت خاص، تعمیم داده شده‌است.[3] به کمک چنین دیدگاهی، فیزیکدانان موفق به توصیف شگفت‌آوری از سه برهم‌کنش الکترومغناطیسی، ضعیف و قوی هسته‌ای شده‌اند. نکته قابل توجه این است که

[1] دستگاهی که در آن قانون اول نیوتون بر قرار است.

[2] دستگاه‌های شتابدار و چرخان نمونه‌هایی از دستگاه‌های غیر لخت می‌باشند.

[3] برای مثال نظریه الکترومغناطیس با در نظر گرفتن مفهوم میدان های الکترومغناطیسی یک نظریه ی میدان کلاسیک می باشد. حال اگر این میدان را کوانتیده کنیم و فوتون‌ها (ذرات نور) را به عنوان کوانتوم‌های میدان الکترومغناطیس در نظر بگیریم با یک نظریه‌ی میدان کوانتومی برای الکترومغناطیس سروکار داریم.

ذرات بنیادی غالباً به واسطه‌ی این سه نیرو، با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند و بنابراین مدل استاندارد ذرات بنیادی براساس این سه برهم‌کنش پایه‌ریزی شد (در این نظریه از اثر نیروی گرانشی صرف نظر می‌شود). با استفاده از مدل ذرات استاندارد می‌توان کمیت‌هایی مربوط به طول عمر ذرات، نحوه‌ی برهمکنش، آهنگ خلق و نابودی آن‌ها و... را محاسبه کرد.

دقت پیش‌بینی‌های نظریه‌ی میدان کوانتومی ستودنی است. به عنوان مثال می‌توان به تطابق الکترودینامیک کوانتومی (نظریه‌ی کوانتومی میدان‌های الکترومغناطیسی) با آزمایش اشاره کرد. این نظریه ضریب ژئومغناطیس الکترون را تا یازده رقم اعشار، به درستی پیش‌بینی می‌کند[۱]. چنین دقتی معادل اندازه‌گیری فاصله‌ی زمین تا ماه با دقت میلیمتر است!

متاسفانه با وجود موفقیت‌های خیره کننده‌ی نظریه‌ی میدان کوانتومی، این نظریه هیچ توضیح قابل قبولی از نیروی گرانش به صورت کوانتومی ارایه نمی‌کند. به واقع سازگاری بین گرانش در قالب نسبیت عام اینشتین و فیزیک کوانتومی ناممکن به نظر می‌رسد. به عنوان یک مثال شهودی به این بحث توجه کنید: اگر بخواهیم فضا زمان را در مقیاس‌های فضا زمانی بسیار کوچک بررسی کنیم، بنابر اصل عدم قطعیت بایستی انرژی و اندازه حرکت زیادی به کار بریم. اگر بخواهیم مقیاس‌های اندازه‌گیری را تا مقیاس‌های طول پلانک ($۱۰^{-۳۴}$متر) و زمان پلانک ($۱۰^{-۴۲}$ ثانیه) کوچک کنیم، انرژی مورد نیاز به اندازه‌ای است که بتواند در آن ناحیه از فضا زمان یک سیاه‌چاله ایجاد کند. جالب آن که اگرچه سیاه‌چاله‌ها موجودات شگفت انگیزی هستند که نظریه نسبیت عام امکان وجود آن‌ها را پیش‌بینی می‌کند، اما خود از توصیف دقیق و کامل آن‌ها عاجز می‌ماند! به بیانی روشن‌تر هرگاه می‌خواهیم با دقت $۱۰^{-۳۴}$ متر فضا را مطالعه کنیم ناگهان با پدید آمدن یک سیاه‌چاله همه چیز به هم می‌ریزد!

از آنجا که نیروی گرانش در ابعاد ریزمقیاس بسیار ضعیف است، ممکن است این گونه قلمداد شود که حوزه‌ی اهمیت گرانش و فیزیک کوانتومی از یکدیگر جدا می‌باشند. برای مثال، در بررسی ساختار ریز طبیعت، می‌توان از برهم‌کنش گرانشی چشم پوشی کرد، از طرفی در جهان بزرگ مقیاس که نیروی گرانشی قالب است، ویژگی‌های کوانتومی تاثیر چندانی ندارند و می‌توان جنبه‌های کوانتومی رویدادها را نادیده گرفت.

برای نمونه در بررسی اتم هیدروژن ما با خیال آسوده می‌توان از نیروی گرانش بین الکترون و پروتون نسبت به نیروی جاذبه الکتریکی بین الکترون و پروتون صرف نظر کرد. زیرا در این حالت نیروی گرانشی $۱۰^{۴۰}$ بار از نیروی الکتریکی بین آن دو کوچک‌تر است. این عدد معادل با مقایسه‌ی شعاع جهان قابل مشاهده ۹×۱۰^{۱۰} متر با شعاع هسته‌ی اتم $۱۰^{-۱۵}$متر است. به بیان غیر دقیق در نظر گرفتن نیروی گرانش در محاسبات اتم هیدروژن معادل است با اندازه گیری شعاع عالم با دقت شعاع هسته که ابلهانه به نظر می‌رسد. بنابر این طبیعی است که فرض کنیم در بررسی ساختار ریز طبیعت می‌توان گرانش را فراموش کرد. از سوی دیگر در بررسی ابعاد بزرگ نجومی مانند فاصله‌ی سیاره‌ها و ستارگان و بالاتر برهم‌کنش غالب گرانش است و می توان با خیال آسوده از نیروی الکترومغناطیس و برهم‌کنش‌های هسته‌ای صرف نظر کرد. اگرچه این نگاه تا حدودی قابل قبول است، اما ذهن باریک‌بین را به هیچ عنوان قانع نمی‌کند. این نکته را از سه دیدگاه مختلف می‌توان بررسی کرد:

۱- تصور آن که یک ذره بتواند از دید گرانش رفتار کلاسیکی داشته باشد و از دید سایر برهم‌کنش‌ها رفتار کوانتومی داشته باشد، با ذات مکانیک کوانتومی در تضاد است. ذره‌ای مانند الکترون را در نظر بگیرید. مکان و تکانه‌ی این ذره را از دید مکانیک کوانتومی نمی‌توان همزمان به شکل دقیق اندازه گیری کرد. حال آن که از نقطه نظر یک نظریه‌ی گرانش کلاسیک، مکان و اندازه حرکت الکترون به طور دقیق مشخص است. روشن است که این دو برداشت بایکدیگر ناسازگار هستند.

۲- بررسی گرانش در سطح کوانتومی، در شرایطی که تاثیرات کوانتومی و گرانشی هر دو در کنار یکدیگر مهم هستند، اهمیت پیدا می‌کند. برای مثال می‌توان به کیهانشناسی در لحظه‌های نخستین و سیاه‌چاله‌ها اشاره کرد. مشاهدات رصدی گواه بر این است که جهان طی یک انفجار، موسوم به انفجار بزرگ، خلق شده است. در لحظه های بسیار کوتاه پس از این انفجار (زمانی معادل با زمان پلانک، $۱۰^{-۴۲}$ ثانیه)، شعاع عالم تنها در حدود طول پلانک $۱۰^{-۳۴}$ متر بوده است. در چنین دنیای داغ، پر انرژی و کوچکی بی شک اثرات گرانشی و کوانتومی هر دو سهیم بوده‌اند. از طرفی نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین وجود اجسامی بسیار سنگین و چگالی به نام سیاه‌چاله‌ها

را پیش‌بینی می‌کند. بررسی ویژگی سیاه‌چاله‌ها نشان می‌دهد که این اجسام دارای آنتروپی هستند[۲]. از سویی دیگر، از مکانیک آماری می‌دانیم که آنتروپی هر سیستم به لگاریتم طبیعی تعداد درجات آزادی میکروسکوپیک آن سیستم مربوط می‌گردد. برای بررسی این درجات آزادی در سیاه‌چاله‌ها نیز، به بررسی گرانش و فضا زمان در ابعاد کوانتومی احتیاج داریم.

۳- از دیدگاه دیگری نیز می‌توان درباره‌ی وجود منطقی یک نظریه‌ی گرانش کوانتومی مبتنی بر نظریه‌ی میدان کوانتومی و نسبیت عام بحث کرد. همانگونه که عنوان شد، نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی از تعمیم نظریه‌ی میدان کلاسیکی بر مبنای نسبیت خاص و مکانیک کوانتومی حاصل می‌گردد. از سوی دیگر می‌دانیم که تعمیم منطقی نسبیت خاص، نظریه‌ی نسبیت عام است. بنابراین طبیعی است که فرض کنیم که می‌توان نظریه‌ی میدان کوانتومی تعمیم یافته‌ای را بر اساس نسبیت عام و مکانیک کوانتومی ارایه کرد!

عدم وجود نظریه‌ی گرانش کوانتومی و همچنین رویای وحدت چهار نیروی بنیادی گرانش، الکترومغناطیس، ضعیف و قوی هسته‌ای در چارچوب یک نظریه‌ی واحد، منجر به تلاش برای دستیابی به نظریه‌هایی ورای میدان‌های کوانتومی و نسبیت عام شد. یکی از این نظریه‌ها، نظریه‌ی ریسمان می‌باشد. به بیان ساده این نظریه با تعمیم ذرات بی‌بعد، به ریسمان‌های یک بعدی بر پایه مکانیک کوانتومی و نسبیت خاص، افق‌های امیدوار کننده‌ای برای شناخت گرانش کوانتومی و وحدت نیروهای بنیادی به ارمغان آورده است. در واقع گرانش در این نظریه‌ی کوانتومی به شکل خود به خودی وجود دارد! دست‌آوردهای استرومینجر و کامران وفا برای توضیح ماهیت میکروسکوپیک آنتروپی سیاه‌چاله‌ها در نظریه ریسمان، این نظریه را به نامزد اصلی گرانش کوانتومی تبدیل کرده است و این مهم توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است[۳و۴].

با این حال شاید این گونه به نظر برسد که این مطالعات تنها جنبه‌ی نظری دارند و از تجربه و کاربرد بسیار دور هستند. اما حدس متحیرکننده‌ی مالدسنا که در سال۱۹۹۷ بر اساس مطالعه‌ی گرانش از دید نظریه‌ی ریسمان[۴] انجام گرفت، اهمیت بررسی گرانش را بیش از پیش آشکار کرده است. بنابر حدس مالدسنا نظریه‌ی گرانش در فضا زمانی با هندسه‌ای ویژه، موسوم به AdS با نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی همدیس در مرز آن فضا زمان متناظر است[۵]. این حدس مهم به بیان ساده و غیر فنی، بدین معنا است که یک نظریه‌ی گرانش کلاسیک در یک فضا زمان D بعدی با یک نظریه‌ی میدان کوانتومی در یک فضا زمان D-۱ بعدی که در آن گرانش وجود ندارد، یکسان است. بنابراین می‌توان محاسباتی را که با استفاده از گرانش کلاسیک (نظریه‌ای شبیه به نسبیت عام) در یک فضای D بعدی انجام داد و از نتایج آن برای بررسی جنبه‌های ناشناخته‌ی نظریه‌ی میدان کوانتومی در فضا زمان D-۱ بعدی استفاده کرد.[۶] و یا با بررسی نظریه‌ی میدان کوانتومی در فضا زمان D-۱ به شناختی در مورد گرانش کوانتومی در فضا زمان D بعدی دست پیدا کرد[۵].[۷]

اهمیت این موضوع زمانی بیشتر نمایان می‌گردد که در نظر داشته باشیم که در بررسی شاخه‌های گوناگون فیزیک نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی اهمیت زیادی دارد. در واقع فیزیکدان‌ها از نظریه‌ی میدان‌ها برای بررسی فیزیک ذرات بنیادی، فیزیک حالت جامد، ابرشارگی، ابررسانایی و... استفاده می‌کنند. بنابراین شاید با استفاده از گرانش بتوان به شناخت بسیار عمیق‌تری از دیگر شاخه‌های دیگر فیزیک دست یافت. به یاد داشته باشید بسیاری از این شاخه‌ها ارتباط تنگاتنگی با فناوری دارند.

از آنچه که گفته شد روشن است که اهمیت گرانش و مطالعه‌ی آن بیش از یک کنجکاوی هیجان‌انگیز، در فیزیک نظری است.

---

[۴] نظریه ی ریسمان، نظریه ای است که در آن فرض می شود در طبیعت به جای ذرات نقطه ای، ریسمان های یک بعدی بسیار کوتاهی وجود دارد که نوسان های گوناگون آن خواص مختلفی را برای ریسمان به ارمغان می آورد. برای مثال اگر یک ریسمان با یک مد خاص نوسان کند به صورت الکترون دیده می شود و در مد دیگر به شکل کوارک.

[۵] این حدس به تناظر Anti de Sitter/Conformal Field Theory شهرت دارد که به اختصار آن را AdS/CFT می نامند.

[۶] توجه داشته باشید که محاسبات گرانش کلاسیک در بسیاری از موارد آسان تر از محاسبات نظریه ی میدان کوانتومی می باشد.

[۷] تناظر و هم ارزی بین فیزیک در یک فضا زمان D بعدی و مرز آن فضا زمان که یک فضا زمان D-۱ است، بسیار شبیه به تصاویر هولوگرافیک می باشد که در آن اطلاعات مربوط به یک فضای ۳بعدی در یک صفحه ی ۲بعدی یک هولوگرام ثبت می گردد. از این رو به این گونه نظریه ها، نظریه های هولگرافیک می باشد. شواهد بسیار جالبی بر هولوگرافیک بودن نیروی گرانش و جود دارد!

منابع:

-۱
Feynman R.P. “QED, the strange theory of light and matter”, (Princeton University press, ۱۹۸۵).

-۲
J. D. Bekenstein, Phys. Rev. D۹, ۳۲۹۲ (۱۹۷٤).

-۳
A. Strominger and C. Vafa,Phys. Lett. B۳۷۹ (۱۹۹٦), arXiv:hep-th/۹٦۰۱۰۲۹.

-٤
B. Zwiebach , “ A First Course in String Theory” ,(Cambridge University press, ۲۰۰۳).

-٥
J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. ۲, ۲۳۱ (۱۹۹۸) , arXiv:hep-th/۹۷۱۱۲۰۰.

٦- وحیدی نیا، محمد حسن. ترمودینامیک نظریه‌ی M، ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۸۸).