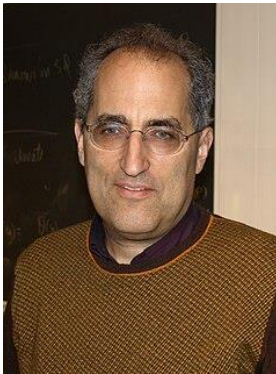


فضازمان کوانتومی

کوانتیزاسیون هندسه | اصل عدم قطعیت



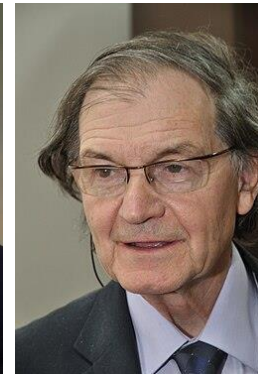
Edward Witten⁴



Lee Smolin³



Abhay Ashtekar²



Roger Penrose¹

Quantum spacetime

فضازمان کلاسیک^۵ درک ما از جهان هستی را بشدت تغییر داده است. فضازمان کوانتومی فراتر می‌رود و نشان می‌دهد که فضازمان نه پیش از بلکه پس از رویدادهای کوانتومی می‌آید و این که اصل عدم قطعیت بدون در نظر گرفتن گرانش صحت ندارد.

فشرده

نظریه فضازمان کوانتومی سعی در توصیف منشاء، شیوهی شکل‌گیری و چپستی فضا و زمان از نواسانات کوانتومی، در راستای کوانتیزاسیون هندسه در مقیاس پلانک (10^{-35} متر) دارد. این نظریه، بعکس نظریه‌های موجود، یعنی نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی، فضا و زمان را برای توصیف جهان هستی پیش‌فرض نمی‌کند. دیدگاهی که در صورت عملی شدن، به معنای ایجاد وحدت میان دو نظریه مزبور در شکل نظریه گرانش کوانتومی نیز می‌باشد.

دانش و تصویر کنونی ما از جهان هستی متکی بر یافته‌هاییست که با یاری دو نظریه نامبرده با پیش‌فرض فضا و زمان بدست آمده‌اند. بی‌آن‌که وجود و چپستی چنان پیش‌فرض مهم و تعیین کننده‌ای پیشاپیش نشان داده شده باشد. این در حالی است که فضا و زمان برای دو نظریه مزبور نه فقط ابزاری برای توصیف رویدادهای طبیعی به حساب می‌آیند، بلکه بدون چنان پیش‌فرضی امکان بنایشان نبود. در مقاله^۵ گفتیم که اینشتین در سال ۱۹۱۶، یعنی یک سال پس از ارایه نظریه نسبیت عام، نظریه‌ای که فضازمان و میدان گرانشی را کمیت‌های یکسانی می‌داند، می‌نویسد:

"الزام هموردایی عام^۶ (*general covariance*)، آخرین بقایای عنیت فیزیکی فضا و زمان را از بین می‌برد."^۶

از آنجا که تمامی بخش‌های شناخته شده فیزیکی تا اندازه‌ای ویژگی‌های کوانتومی دارند، می‌توان تصور کرد که فضازمان نیز به عنوان نمود (تجلی) یک میدان فیزیکی از چنان ویژگی‌هایی برخوردار باشد.

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ می‌گوید، می‌توان برای مثال مکان یک ذره را در یک میدان الکترومغناطیسی با هر دقت دلخواهی اندازه‌گیری کرد. آیا این بیان درست است؟

در این مقاله می‌خواهیم پس از پیشگفتار و برشمردن مشکلات شناخته شده تاکنون در بنای نظریه فضازمان کوانتومی، بازنمودهایی (توضیحاتی) را در باره‌ی کوانتیزاسیون هندسه ارایه دهیم تا در ادامه به بررسی شرایط لازم و کافی برای اصل عدم قطعیت بپردازیم.

یادآوری:

۱. در مقاله^۵ 'فضازمان کلاسیک'، با یافته‌های ۲۵ قرن گذشته در باره فضازمان کلاسیک و لزوم اصلاح آنها آشنا شدیم.
۲. در مقاله^۷ 'معنای فضازمان'، به طرح مسئله‌ی فضازمان در رابطه با نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی پرداختیم.
۳. در مقاله^۸ 'محدودیت‌های شناخت فضازمان'، محدودیت‌ها را از جمله اختلاف در ساختارهای نظری ملاحظه کردیم.

در آغاز لازم می‌دانم نکته مهمی را که ماکس بورن، فیزیکدان آلمانی (۱۸۸۲-۱۹۷۰) در خاطراتی از آلبرت اینشتین در یادنامه به مناسبت شصدمین سالگرد تولد ورنر فون هایزنبرگ بیان داشته، ذکر کنم. بورن می‌نویسد:

'پیش‌بینی‌های علمی، مستقیماً به «واقعیت» اشاره نمی‌کنند. بلکه به دانش ما از واقعیت. یعنی، به اصطلاح «قوانین طبیعی» اجازه می‌دهند از دانش محدود و تقریبی کنونی، در مورد یک وضعیت آینده نتیجه‌گیری کنیم که البته آنهم فقط به‌طور تقریبی قابل توصیف است.'

همان‌گونه که در بالا اشاره کردیم، فضا و زمان در نظریه‌های مطرح حاضر، یعنی نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی، پیش‌فرض شده‌اند، بی‌آن‌که تعریف قابل سنجشی از آنها ارایه شده باشد. روشن است که یک چنین روشی را نمی‌توان از نظر علمی رضایت‌بخش دانست، هرچند با نتایج چشم‌گیری همراه باشد. از این‌رو، شناخت منشأ، شیوه‌ی شکل‌گیری و چیرستی فضا و زمان امریست ضروری و اجتناب‌ناپذیر.

در قرن بیستم، آلبرت اینشتین سعی در ایجاد وحدت میان میدان الکترومغناطیسی و میدان گرانشی (فضازمان) داشت. از آن پس به این‌سو فیزیک‌دانانی، مانند جان ا. ویلر (John A. Wheeler) جان ه. شوارز (John H. Schwarz)، مایکل گرین (Michael Green)، ادوارد ویتن (Edward Witten)، راجر پنروز (Roger Penrose)، ابهی اشتکار (Abhay Ashtekar)، لی اسمولین (Lee Smolin)، ند جاکوبسن (Ted Jacobson) و کارلو رولی (Carlo Rovelli) سعی در ایجاد وحدت میان ۴ نیروی پایه‌ای فیزیک (نیروی هسته‌ای قوی، هسته‌ای ضعیف، الکترومغناطیسی و گرانشی) و شناخت فضازمان کردند. شناخته شده‌ترین مدل‌های نظری در این رابطه عبارتند از: نظریه گرانش کوانتومی و نظریه ریسمان‌ها.

پژوهش‌ها در راستای نظریه فضازمان کوانتومی همچنان ادامه دارد. اما، تاکنون جز موفقیت‌های نسبی، مانند فضازمان کوانتومی حلقه‌ای (loop quantum gravity) آن‌هم فقط در شکل ۳ بُعدی، به پاسخ رضایت‌بخشی دست نیافته‌ایم. از دهه‌ی هشتاد قرن گذشته بیش‌ترین امید معطوف به بنای 'نظریه گرانش کوانتومی حلقه‌ای'، یعنی شکل‌گیری فضا از نوسانات کوانتومی متشکل از واحدهای گسسته (هندسه کوانتومی) بود. اما، این امید اکنون همچون نظریه ریسمان‌ها، با رکود مواجه شده است. شکی نیست که پژوهش در مقیاس پلانک، به‌ویژه به‌خاطر نبود شناخت از قوانین مربوطه بسیار دشوار است. با این حال، می‌توان امیدوار بود از طریق پژوهش سیاهچاله‌ها و اجسام کیهانی مشابه راه برای فهم یک چنان بخش مهم و بنیادی طبیعت هموار شود.

بی‌تردید، بنای نظریه فضازمان کوانتومی دشوار و زمان‌بر است. یک بخش از دشواری این مسئله به دیدگاه‌های مختلف در نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی نسبت به فضا و زمان و اصولن پیش‌فرض فضا و زمان در آنها برمی‌گردد. فضا و زمان در نظریه کوانتومی به‌عنوان یک پس‌زمینه مستقل و غیرقابل تغییر و در نظریه نسبیت عام فرم‌پذیر به‌عنوان یک متغیر پویا که مستقیماً با ماده مرتبط است، در نظر گرفته شدند. در مقابل، نظریه فضازمان کوانتومی از جمله سعی در برطرف کردن یک چنان وضعیت ناهنجار دارد. در عین حال، کامیابی در این امر به‌معنای هماهنگ‌سازی (تطبیق) و وحدت دو نظریه نسبیت عام و کوانتومی نیز خواهد بود.

آنچه در حال حاضر می‌دانیم

در حال حاضر، دانش ما از جهان هستی شامل یافته‌هایی می‌شود که عمدتاً با یاری نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی کسب شده‌اند. نظریه‌هایی که امکان کشف دنیای بی‌نهایت بزرگ ماکروسکوپی با طول عمر حدود ۱۳/۸ میلیارد سال از زمان پیدایش کیهان تاکنون و دنیای شگرف و بی‌نهایت کوچک میکروسکوپی ذرات بنیادی را تا حدودی مهیا کرده‌اند. بی‌شک، در چنین عرصه گسترده‌ای مسائلی هستند که هنوز کشف نشده‌اند، از جمله و به‌ویژه مسئله فضازمان و همین‌طور آنچه به اصطلاح ماده تاریک و انرژی تاریک نامیده می‌شود. مسئله اول، یعنی موضوع مقاله حاضر، مربوط به بخشی از طبیعت می‌شود که نمی‌توان آن را براساس دانش و قوانینی که دو نظریه نسبیت و کوانتومی برپایه آنها بنا شده‌اند بررسی و بنا کرد. زیرا، چنان قوانینی در مقیاس پلانک (10^{-35} متر)، یعنی بخش مربوط به فضازمان کوانتومی، کارایی خود را از دست می‌دهند. برای مثال، در ناحیه سیاهچاله‌ها، اجسام کیهانی مشابه و یا مراحل اولیه پیدایش کیهان.

مکانیک نیوتنی، نظریه نسبیت خاص و نظریه کوانتومی، همه با پیش‌فرض فضازمان ایستا به‌عنوان پس‌زمینه رویدادها بنا شده‌اند. در حالی‌که فضازمان در نظریه نسبیت عام نه پیش‌فرض و ایستا بلکه پویا (دینامیکی) می‌باشد. از این‌رو، یک مشکل مفهومی در ترکیب این نظریه‌ها ناشی از نقش زمان در آنهاست. زمان، در نظریه کوانتومی مطلق و جهانشمول پنداشته می‌شود، اما در نظریه نسبیت عام به‌عنوان یک متغیر پویا که مستقیماً با ماده مرتبط است تلقی می‌شود.

مشکلات شناخته شده تاکنون در بنای نظریه فضا زمان کوانتومی

به نظر، اختلاف در ساختار نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی مانع از ایجاد وحدت میان این دو به یک نظریه واحد به نام نظریه فضا زمان کوانتومی یا نظریه گرانش کوانتومی است. به طور مشخص، مسایل تاکنون شناخته شده در این راستا عبارتند از: ۱. مسئله زمان در دو نظریه نسبیت عام و کوانتومی ۲. مسئله تکینگی در نظریه نسبیت عام ۳. مسئله کوانتیزاسیون نظریه نسبیت عام ۴. مسئله اصل عدم قطعیت در میدان الکترومغناطیسی ۵. نبود امکان اندازه گیری دقیق انرژی ها در نظریه کوانتومی ۶. در دسترس نبودن انرژی های لازم برای بررسی برهمکنش ها در مقیاس پلانک ۷. مورد سؤال بودن اعتبار عام مسائلی مانند تقارن^۹ و باز بهنجارش پذیری^۸ ۸. مسئله پیش فرض فضا زمان در نظریه های کلاسیک و کوانتومی. ۹. مسئله تایید نظریه فضا زمان کوانتومی و قوانین آن در تجربه، در صورت کامیابی در ارایه آنها.

در رابطه با نکات بر شمرده، لازم است روی سه مطلب تاکید شود: ۱. نظریه نسبیت عام، میدان گرانشی و فضا زمان را کمیت های فیزیکی یکسانی می داند. اما، در عین حال، همان گونه که در بالا گفتیم، "الزام هموردایی عام (general covariance)"، آخرین بقایای عنیت فیزیکی فضا و زمان را از بین می برد.^۶ ۲. تمام بخش های شناخته شده فیزیکی تا حدی ویژگی کوانتومی دارند. از این رو، به نظر این امر مهم در مورد فضا زمان به عنوان نمود یک میدان فیزیکی نیز صدق می کند. ۳. "توصیف فضا زمان در شکل منیفلد شبه ریمانی (Pseudo-Riemannian manifold)"، ریاضیات مربوط به نظریه نسبیت عام، نمی تواند بدون تغییر منجر به فضا زمان گرانشی شود.^{۱۱}

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در میدان الکترومغناطیسی؟

اصل عدم قطعیت می گوید: نمی توان دو کمیت مکمل مانند مکان و تکانه (یا سرعت) یک ذره را هم زمان و با دقت دلخواه اندازه گیری کرد. به این معنا که هر چه دقت اندازه گیری یکی از آن دو کمیت ها بیش تر شود، دقت اندازه گیری کمیت دیگر کمتر می شود. البته لازم به تاکید است که این امر هیچ ربطی به ضعف ابزار های اندازه گیری و یا سنجش گر ندارد. یعنی، اصل عدم قطعیت یک ویژگی بسیار مهم و بنیادی دنیای کوانتومی، جهان هستی، است.

اعتبار اصل عدم قطعیت به هیچ وجه محدود به نظریه کوانتومی ای که اساس آن در دهه سوم قرن گذشته، از جمله توسط هایزنبرگ، ریخته شد و در دهه های سپسین (بعدی) توسعه یافت، نمی شود. اما، موضوع مهمی که در این رابطه کمتر به آن توجه شده و می شود، نقش گرانش است. باز نموده در باره ی اصل عدم قطعیت به شکلی است که گویی این اصل فارغ از گرانش صحت دارد.

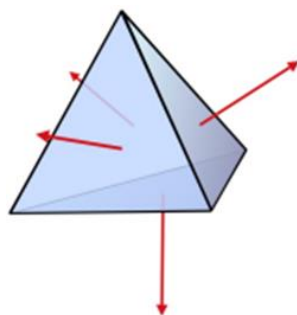
تاریخچه: در سال ۱۹۲۷ ورنر فون هایزنبرگ، اصل عدم قطعیت را کشف کرد. در سال ۱۹۳۱ لو لاندائو (Lew D. Landau)، فیزیکدان روسی (۱۹۰۸-۱۹۶۸) در مقاله^{۱۱} با همکاری رودولف پیرلز (Rudolf Ernst Peierls) فیزیکدان آلمانی- بریتانیایی (۱۹۰۷-۱۹۹۵) بر این نظر بود که اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در میدان الکترومغناطیسی صحت ندارد. اصلی که می گوید، می توان برای مثال، مکان یک ذره را با دقت دلخواه اندازه گیری کرد. اما، نیلز بوهر (Niels Bohr)، فیزیکدان دانمارکی (۱۸۸۵-۱۹۶۲) با همکاری لئون روزنفلد (Leon Rosenfeld)، فیزیکدان بلژیکی (۱۹۰۴-۱۹۷۴) در سال ۱۹۳۳ در مقاله^{۱۲} ادعا کردند که اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در نظریه میدان الکترومغناطیسی صحت دارد.

در سال ۱۹۳۶ ماتوئی پتروویچ برونشتاین (Matwei Petrowitsch Bronstein) فیزیکدان روسی (۱۹۰۶-۱۹۳۸) واکاوی (تجزیه و تحلیل) بوهر - روزنفلد را تکرار می کند. اما، او بجای میدان الکترومغناطیسی، به کاوش میدان گرانشی می پردازد با این نتیجه که درک شهودی لاندائو درست بود.^{۱۰} به این معنا که در صورت صرف نظر نکردن از نظریه نسبیت عام (اثر گرانش)، نمی توان اندازه ی دقیق دلخواهی از مکان یک ذره داشت. یعنی، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ آن گونه تصور می شد و تجزیه و تحلیل بوهر - روزنفلد نشان داد، صحت ندارد. به شیوه ی واکاوی و استدلال برونشتاین در دستیابی به این نتیجه بسیار مهم در زیر، پس از باز نموده های در باره ی کوانتیزاسیون هندسه، می پردازیم.

کوانتیزاسیون هندسه

برای آشنایی اولیه با مسئله ی کوانتیزاسیون هندسه، یک حسم هندسی ساده مانند یک چهاروجهی کوچک را که الزام ننباید منظم باشد در نظر می گیریم (تصویر ۲). هندسه ی این جسم از جمله با طول اضلاع، مساحت سطوح، حجم، زوایای دو وجهی و زوایای رؤس سطوح مشخص شده است. مشخصاتی که جملگی معنای توابع محلی میدان گرانشی را دارند. چهار بُردار علامت گذاری شده در تصویر ۲ دارای ویژگی های زیر هستند: ۱- جمع بُردارها برابر با صفر است. ۲- بُردارها تمام اندازه های هندسی دیگر، مانند مساحت، حجم، زوایای بین رؤس سطوح و زوایای دووجهی را معین می کنند.

۳- مساحت هر سطح برابر با اندازه بُردار عمود بر آن (حاصل از ضرب بُرداری دو ضلع مربوطه) و ۴. حجم جسم چهاروجهی برابر با حاصلضرب سه‌گانه‌ی سه مساحت دلخواه است.



تصویر ۲: جسم هندسی چهاروجهی به‌عنوان بخشی از فضا با چهار بُردار عمود بر سطوح آن.^{۱۰}

پس از این آشنایی فشرده (بدون شرح جزئیات مربوطه) با ویژگی‌های کلاسیک هندسه‌ی چهاروجهی، می‌پردازیم به کوانتیزاسیون آن به‌عنوان مثالی برای کوانتیزاسیون هندسه (فضا). بررسی این مسئله برای درک فضا‌مان کوانتومی در راستای شناخت از ویژگی‌های کوانتومی کمیت‌های هندسی آن ضروریست.

گفتیم که در نظریه کوانتومی، اندازه‌گیری هم‌زمان و دقیق دو کمیت مکمل مانند مکان و تکانه (یا سرعت) یک ذره امکان ندارد (اصل عدم قطعیت). همین وضع در مورد بُردارهای عمود بر سطوح هندسه‌ی چهاروجهی، به‌عنوان کمیت‌های مکمل، نیز صدق می‌کند. به این معنا که اندازه‌گیری هم‌زمان و دقیق دو بُردار از چهار بُردار چهاروجهی امکان ندارد. در نتیجه، نمی‌توان فضا (در مثال ما فضای چهاروجهی) را به قطعات کوچک دلخواه تقسیم کرد. یعنی، حجم چهاروجهی فقط در گام‌های گسسته می‌تواند افزایش یابد. و این به‌معنای آنست که فضا در بنیاد، کوانتیزه شده است. به عبارت دیگر، باور به پیوسته بودن فضا در دنیای کلاسیک (ماکروسکوپی) معنایی جز شناخت تقریبی از آن ندارد. باوری که به بهای چشم‌پوشی از تاثیر گرانش حاصل می‌شود. اما، در واقع "کمیت‌های طول، مساحت و حجم که آزاد از تاثیر گرانش باشند وجود ندارد. جالب است بدانیم که بررسی‌های نظری نشان می‌دهند، تعداد 'حدود' 10^{100} کوانتوم حجم' در یک سانتیمتر مکعب جا می‌شوند!^{۱۱}

استدلال برونشتاین و رد ادعای بوهر - روزنفلد

گفتیم که لو لاندائو معتقد بود، یک مکان‌یابی فضا‌مانی با دقت دلخواه در میدان الکترومغناطیسی در تضاد با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است. اما، نیلز بوهر و لئون روزنفلد براین نظر بودند که اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در میدان الکترومغناطیسی صدق می‌کند. چندی بعد، ماتوئی پتروویچ برونشتاین نتیجه بررسی بوهر - روزنفلد را نه با واکاوی میدان الکترومغناطیسی بلکه با میدان گرانشی تکرار می‌کند. با این نتیجه که درک شهودی لاندائو درست بود.^{۱۲} یعنی، در صورت چشم‌پوشی (انصراف) نکردن از اثر گرانش (از نظریه نسبیت عام)، اندازه‌گیری هم‌زمان و دقیق دلخواه یک کمیت مکمل، برای مثال مکان یک ذره، ممکن نیست.

برای فهم نتیجه بررسی برونشتاین لازم است با شیوه‌ی واکاوی و استدلال او که منجر به رد نتیجه کاوش (تجزیه و تحلیل) بوهر - روزنفلد شد، آشنا شویم و ببینیم او چگونه به یک چنان نتیجه مهمی دست‌یافته و چه راه‌حلی را ارایه می‌کند. به‌منظر، راه‌حل برونشتاین، ارایه شده در دهه سی قرن گذشته، اولین قدم مهم در بنای فضا‌مان کوانتومی است.

پیش از پرداختن به راه‌حل برونشتاین لازم است باز‌نموده‌هایی را، هرچند تکراری، در باره‌ی اصل عدم قطعیت هایزنبرگ یادآوری کنیم. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ می‌گوید: نمی‌توان کمیت‌های مکملی (جفت‌های مشخصی از خواص فیزیکی) مانند مکان (x) و تکانه (p) (یا سرعت v) را هم‌زمان با دقت دلخواه اندازه‌گیری کرد. به بیان دیگر، افزایش دقت در اندازه‌گیری یکی از آن دو (برای مثال مکان x)، مترادف است با کاهش دقت در اندازه‌گیری کمیت دیگر (مانند تکانه p) و بعکس. این اصل یکی از اصول بنیادین نظریه کوانتومی و جهان هستی است و به محدودیت‌های سنجش‌گر و با ابزارهای سنجش مربوط نمی‌شود.

برای تعیین یک مکان (localization) L، لازم است $\Delta x < L$ باشد (به‌معنای انحراف x) و از آنجاکه بیان ریاضی اصل عدم قطعیت به شکل $\Delta x \Delta p > \hbar$ است، می‌توان آن را به شکل $\Delta x > \hbar / \Delta p$ و یا $\Delta p > \hbar / \Delta x$ نیز نوشت ($\hbar$ ضریب پلانک، p تکانه و Δp انحراف تکانه). و چون میانگین p^2 بزرگتر از $(\Delta p)^2$ است، بنابراین $(\hbar / L)^2 < p^2$ می‌باشد. در نتیجه، تعیین دقیق یک مکان نیازمند تکانه بالا، یعنی انرژی E بالا است (< به‌معنای کوچکتر، > به‌معنای بزرگتر): بنابر نظریه نسبیت عام، انرژی و جرم با هم نسبت مستقیم دارند. این نسبت با فرمول معروف $E = mc^2$ نشان

داده می‌شود (m جرم و c سرعت نور). نسبت مزبور، گویای آنست که هر نوع انرژی (برای مثال، انرژی الکترومغناطیسی، جنبشی و حرارتی) نوعی جرم گرانشی محسوب می‌شود. از طرف دیگر، ما می‌دانیم که جرم (یا ماده) فضازمان اطراف خود را دگرگون (تحریف) می‌کند. برای مثال، خمیدگی (انحنای) نور در نزدیکی خورشید بیان از دگرگونی فضای اطراف خورشید توسط جرم ستاره دارد. و هرچه جرم متمرکزتر باشد، به همان میزان نیز خمیدگی فضای اطراف آن شدیدتر است. تمرکز جرم می‌تواند چنان شدید باشد که جسمی مانند خورشید در شعاع R حدود ۳ کیلومتر و یا زمین در شعاع حدود ۱ سانتی‌متر به یک سیاهچاله تبدیل شوند. در این حالت، هرچیزی که به آنها نزدیک شود آن را می‌بلعد و هیچ چیز از جمله نور نمی‌تواند از آنها خارج شود. همین‌طور است، "چنانچه اندازه مکان یک شیء، یعنی مکان L ، را کوچک و کوچکتر کنیم. در این‌صورت انرژی متمرکز تا نقطه‌ای افزایش می‌یابد که در آن R بزرگتر از L می‌شود. اما، در این حالت مکان L در پشت سیاهچاله پنهان می‌شود و امکان مکان‌یابی از دست می‌رود."^{۱۰}

به‌طور خلاصه: وجود گرانش اندازه‌گیری دقیق، در مثال ما مکان در میدان الکترومغناطیسی، را مختل می‌کند. به بیان دیگر، اصل عدم قطعیت با در نظر گرفتن تأثیر گرانش، اندازه‌گیری دقیق و همزمان دو کمیت مکمل را امکان‌پذیر نمی‌داند. یعنی، L را می‌توان فقط تا یک حداقل ($L = R$) کوچک کرد و نه تا اندازه دلخواه. حداقل اندازه‌ای که یک ذره کوانتومی می‌تواند در آن متمرکز شود، بدون این‌که افق خودش آن را بپوشاند، برابر با طول پلانک (10^{-35} متر) است.

نتیجه

بررسی‌های فضازمان کوانتومی نشان می‌دهند: ۱. یک حداقل طول در مقیاس پلانک وجود دارد. ۲. فیزیک فضازمان کوانتومی به‌عنوان بخش جدیدی از فیزیک، از نوع فیزیک کلاسیک و یا کوانتومی مفروض بر فضازمان نیست. ۳. اصل عدم قطعیت، بدون ملاحظه گرانش صحت ندارد. ۴. نظریه جدید می‌تواند شیوه‌ی شکل‌گیری فضازمان را نشان دهد و میان دو نظریه، نسبیت عام و کوانتومی، هماهنگی و وحدت ایجاد کند.

مراجع

1. https://de.wikipedia.org/wiki/Roger_Penrose
2. <https://science.psu.edu/news/abhay-ashtekar-honored-einstein-prize>
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Lee_Smolín
4. https://de.wikipedia.org/wiki/Edward_Witten
5. حسن بلوری، 'فضازمان کلاسیک'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه اکتبر سال ۲۰۲۵
6. Albert Einstein, Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie, Annalen der Physik, 49, S. 769-822
7. Hassan Bolouri, The mystery of spacetime, relativity and quantum
۷. حسن بلوری، 'معمای فضازمان'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه ژوئن سال ۲۰۲۵
8. Hassan Bolouri, The limitations of our knowledge of spacetime
۸. حسن بلوری، 'محدودیت‌های شناخت فضازمان'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه اوت سال ۲۰۲۵
9. Hassan Bolouri, **Symmetry**: the key to recognizing the cosmos
۹. حسن بلوری، 'تقارن: کلید شناخت کیهان'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه مارچ سال ۲۰۲۰
10. Carlo Rovelli and Francesca Vidotto, Covariant Loop Quantum Gravity, Cambridge University Press, United Kingdom, 2020, S. 65
11. Landau, L. D., and Peierls, R Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie, Zeitschrift für Physik, 1931, **69**, 56-69
12. Bohr, N., and Rosenfeld, L., Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabbs. Mathematiks-fysike Meddeleser, **12**, 65