درس گفتار

دوره‌ی آشنایی مقدماتی با نظریه‌ی نسبیت عام انیشتین

ارائه کننده: دکتر فرهنگ لران

تهیه کننده: مریم اشرفی

سیاه‌چاله

نور گسیل شده از اتمی که روی سطح یک ستاره قرار دارد هنگامی که از سطح ستاره دور می‌شود، به سمت قرمز جابه‌جا می‌شود. برای درک بهتر این موضوع، توپی را درنظر بگیرید که از سطح ستاره با سرعت اولیه‌ی مشخصی، به سمت بالا پرتاب می‌کنیم. روی سطح ستاره توپ فقط دارای انرژی جنبشی است. درحالی که در ارتفاع h از سطح ستاره، توپ علاوه بر انرژی جنبشی دارای انرژی پتانسیل گرانشی نیز هست. به دلیل پایستگی انرژی، در ارتفاع h انرژی جنبشی توپ کم می‌شود. زیرا مجموع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی در ارتفاع h باید برابر با انرژی جنبشی اولیه باشد.

برای نور نیز وضعیت به همین ترتیب است. روی سطح ستاره، انرژی متناسب با بسامد نور گسیل شده(ν) است. درحالی‌که در ارتفاع h از سطح ستاره، انرژی با مجموع بسامد(ν') و پتانسیل گرانشی متناسب است:

$$\nu = \nu' + \frac{\nu}{c^2} gh,$$

که در آن، c سرعت نور و g شتاب گرانش ستاره است. حال فرض کنید که پتانسیل گرانشی ستاره آنقدر زیاد است که اگر اتم را در فاصله‌ی مشخصی از ستاره قرار دهیم، بسامد نور گسیل شده از اتم هنگامی که به بی‌نهایت می‌رسد، صفر می‌شود. در این صورت ستاره، سیاه‌چاله نامیده می‌شود. نقطه‌ای که این اتفاق در آن رخ می‌دهد، «افق رویداد» سیاه‌چاله نامیده می‌شود. اگر اتم را کمی بالاتر از افق رویداد قرار دهیم، بسامد نور گسیل شده از اتم که به بی‌نهایت می‌رسد هیچ‌گاه صفر نمی‌شود.

سیاه‌چاله‌ها حل‌هایی از معادله‌ی اینشتین هستند که انتقال به قرمز گرانشی آن‌ها بی‌نهایت است.

❖ نحوه‌ی شکل‌گیری سیاه‌چاله

ستاره‌ای با جرم بزرگ را درنظر بگیرید. نیروی گرانش ستاره یک نیروی جاذبه است که تمایل به انقباض ستاره دارد. اما واکنش‌های هسته‌ای درون ستاره، مانع انقباض آن می‌شود. هنگامی که سوخت هسته‌ای ستاره تمام

می‌شود، تمام هیدروژن آن به هلیوم تبدیل می‌شود. اگر گرانش ستاره به اندازه‌ی کافی قوی باشد، ستاره متراکم شده و هلیوم آن به آهن و نیکل تبدیل می‌شود.

اگر تراکم ادامه پیدا کند، به دلیل چگالی زیاد، الکترون‌ها و پروتون‌ها به هم برخورد می‌کنند و نوترون و نوترینوی الکترون تولید می‌شود. چون قدرت برهمکنش نوترینوها ضعیف است از سطح ستاره فرار می‌کنند و ستاره به یک هسته که تقریباً ۹۷ درصد آن نوترون است، تبدیل می‌شود. چون نوترون‌ها فرمیون هستند، اصل طرد پائولی مانع تراکم بیشتر ستاره می‌شود. درحالی که اگر ستاره بسیار سنگین باشد، گرانش بر اصل طرد پائولی غلبه می‌کند و رمبش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که سطح ستاره از فاصله‌ی مشخصی (افق رویداد) عبور کند. در این صورت ستاره به سیاه‌چاله تبدیل می‌شود.

❖ درون سیاه‌چاله چیست؟

ناظری را درنظر بگیرید که به سمت سیاه‌چاله‌ای حرکت می‌کند. با نزدیک شدن ناظر به افق، بسامد امواجی که ناظر به بیرون می‌فرستد به سمت صفر میل می‌کند. بنابراین مطابق مکانیک کلاسیک هنگامی که ناظر از افق عبور می‌کند، ناظر بیرون افق نمی‌تواند اطلاعاتی از ناظر درون سیاه‌چاله به‌دست آورد. ادعا می‌شود که با به‌کارگیری مکانیک کوانتومی، می‌توان اطلاعاتی از درون سیاه‌چاله به‌دست آورد.

یک جفت الکترون که اسپین آن‌ها در حالت تک‌تایه فراهم شده است، درنظر بگیرید:

$$|S\rangle = \frac{|\uparrow\downarrow\rangle - \langle\downarrow\uparrow|}{\sqrt{2}}$$

که در آن $\uparrow$ و $\downarrow$ به ترتیب نشان دهنده‌ی اسپین رو به بالا و اسپین رو به پایین است. فرض کنید که این دو الکترون به اندازه‌ی کافی از هم دور هستند. با اندازه‌گیری روی اسپین یکی از الکترون‌ها به‌سادگی می‌توان اسپین الکترون دیگر را پیدا کرد. به‌عنوان‌مثال، اگر اسپین الکترونِ اول را بالا اندازه‌گیری کردیم، بدون اندازه‌گیری روی اسپین الکترون دوم می‌دانیم که قطعاً اسپین آن رو به پایین است. در این‌جا چون با اندازه‌گیری روی اسپینِ یکی از الکترون‌ها اطلاعاتِ راجع به اسپین الکترون دیگر را به صورت آنی به‌دست می‌آوریم، ظاهراً به‌نظر می‌رسد که میان مکانیک کوانتومی و نسبیت خاص تناقض وجود دارد. اما نشان داده می‌شود که مکانیک کوانتومی در فرمول‌بندی نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی، با نسبیت خاص در تناقض نیست.

حال فرض کنید که یکی از الکترون‌ها بیرون افق رویداد سیاه‌چاله و دیگری داخل سیاه‌چاله باشد. مطابق اصل هم‌ارزی، الکترونی که وارد سیاه‌چاله می‌شود در افق با چیز غیرعادی مواجه نمی‌شود. بدین‌ترتیب با اندازه‌گیری روی حالت الکترونی که بیرون سیاه‌چاله است می‌توان اطلاعاتی از درون سیاه‌چاله به‌دست آورد.