

## جایزه «راهگشایی در فیزیک بنیادی» سال ۲۰۱۷



محمد مهدی شیخ‌جباری\*

جایزه Breakthrough (راهگشایی یا پیشگامی) در فیزیک بنیادی، در سال ۲۰۱۷ به سه فیزیکدان تعلق گرفت: جوزف پولچینسکی (Polchinski)، اندرو استرومینجر (Strominger)، و کامران وفا. جایزه جوزف پولچینسکی به خاطر معرفی D-غشاهای (D-branes) در نظریه ریسمان در سال ۱۹۹۵، و جایزه وفا و استرومینجر به خاطر کار مشترک این دو در حوزه جنبه‌های کوانتومی فیزیک سیاهچاله‌ها اهدا شد. در این مقاله به چرایی اهمیت ایده وفا-استرومینجر و کارهایی که در تکمیل این ایده مطرح شده‌اند می‌پردازیم. بدین منظور ابتدا نیاز داریم مسئله را طرح و تبیین کنیم.

یکی از مسائل مهم و باز در حوزه فیزیک نظری مسئله سیاهچاله‌هاست. جواب‌های معادلات نظریه نسبیت عام اینشتین عموماً در سه دسته امواج گرانشی، سیاهچاله‌ها، و جواب‌های کیهان‌شناختی قرار می‌گیرند (هرچند که این دسته‌بندی جامع و مانع نیست، بسیاری از جواب‌های شناخته‌شده را در بر می‌گیرد). سیاهچاله‌ها مهم‌ترین جواب‌های پایای (استاتیکی) نسبیت عام هستند. در چارچوب نسبیت عام «کلاسیک» (غیرکوانتومی) این جواب‌ها عموماً دارای یک افق رویداد هستند که فضا-زمان را به دو بخش که ارتباط دو طرفه علی با هم ندارند تقسیم می‌کند، بدین معنا که مواد و حتی پرتوهای نوری که در بیرون سیاهچاله هستند می‌توانند با گذر از افق به «درون سیاهچاله» بیفتند اما دیگر امکان خروج از آن را ندارند؛ افق رویداد مانند یک غشای یک‌طرفه عمل می‌کند. سرانجام محتوم ماده یا نوری که به پشت افق می‌رود سقوط در تکینگی است که عموماً «پشت افق» قرار گرفته است. تکینگی معمولاً پشت افق نشسته و در دیدرس ناظران بیرون افق قرار ندارد. علی‌رغم این که وجود تکینگی خبر از ناکارآمدی نظریه در نزدیکی تکینگی می‌دهد، انتظار می‌رود این مشکل در ارائه توصیف علی از فیزیک سیاهچاله از دید

\* پژوهشکده فیزیک

ناظرانی که بیرون افق قرار دارند نمودی نباید و خالی وارد نکند. در نیمه اول دهه ۱۹۷۰ و بیشتر به واسطه تحقیقات بکنشتاین و هاوکینگ، دید فیزیکدان‌ها در مورد سیاهچاله‌ها از پایه دگرگون شد. بکنشتاین به مطالعه سیستم‌های ترمودینامیکی معمول در حضور یک سیاهچاله پرداخت و پی برد که شرط برقرار ماندن قوانین ترمودینامیک در حضور سیاهچاله ایجاب می‌کند که خود سیاهچاله از دید ناظر بیرون افق، مانند یک سیستم ترمودینامیکی رفتار کند، به خصوص باید به سیاهچاله «آنتروپی» نسبت داد. تقریباً همزمان با بکنشتاین، هاوکینگ یک سیستم کوانتومی را در حضور سیاهچاله بررسی کرد. وی به طور مشخص این پرسش را مطرح کرد که رفتار فوتون‌ها (کونتا‌های نور) در حضور سیاهچاله چگونه خواهد بود. نتیجه مطالعه هاوکینگ آن بود که افق دیگر یک غشای یک‌طرفه نیست و فوتون‌ها می‌توانند از آن به بیرون «نشت» کنند: دقیقاً به همان صورت که یک قطعه آهن نقتیده از خود نور تابش می‌کند، سیاهچاله نیز از خود تابش می‌کند. در فیزیک به این نوع تابش «تابش جسم سیاه» می‌گویند. مشخصه تابش جسم سیاه، بسامد مشخصه (رنگ) و توزیع فرکانسی پرتویی است که تابش شده، که آن هم با دمای سیستم تعیین می‌شود؛ هر چه دما بالاتر باشد بسامد مشخصه پرتو تابشی بیشتر است. تصویر هاوکینگ از سیاهچاله یک سیستم گرمایی در دمایی مشخص بود، و تابش جسم سیاهی که در مورد سیاهچاله «تابش هاوکینگ» نام دارد. یافته‌های هاوکینگ و بکنشتاین، هرچند نتیجه دو بررسی مستقل و ظاهراً نامربوط به یکدیگر بود، هر دو به تصویر سیاهچاله به عنوان یک سیستم گرمایی انجامید. همچنین چون ترمودینامیک و نظریه کوانتومی هر دو از بخش‌های بسیار بنیادی فیزیک هستند از این تقارن نتایج بسیار جدی به دست آمد. یکی از پیامدهای تابش هاوکینگ آن است که سیاهچاله جرم خود را از دست می‌دهد و نهایتاً تبخیر می‌شود و از بین می‌رود. اما این تصویر

جدید مسئله‌ای بسیار بنیادی در مورد کل فرمول‌بندی فیزیک، به‌ویژه در مورد سازگاری نسبیت عام اینشتین و فیزیک کوانتومی با خود به همراه آورد: سیاهچاله از ماده معمولی طی فرایند رمبش (فرو ریزش) گرانشی تشکیل می‌شود و پس از تبخیر فقط تابشی از آن باقی می‌ماند که نشانی از ماده اولیه‌ای که به داخل سیاهچاله فروریخته ندارد: سیاهچاله به منزله ماشینی عمل می‌کند که اطلاعات موجود در سیستم‌های فیزیکی (قبل از فرو ریزش) را از بین می‌برد. بقای اطلاعات از بنیادی‌ترین بخش‌های فیزیک کوانتومی است. از این رو به این مسئله، باطل‌نمای اطلاعات نیز می‌گویند. به علاوه، فرایند تشکیل و تبخیر سیاهچاله فرایندی برگشت‌ناپذیر است در حالی که فرمول‌بندی متعارف نسبیت عام، تحت وارونی جهت زمان متقارن است.

ساده‌ترین ایده برای حل مسئله اطلاعات در فیزیک سیاهچاله‌ها به یادآوردن این نکته است که در هیچ سیستم گرمایی که به طور روزمره نیز با آن سروکار داریم، «اطلاعات» بقا ندارد. به عنوان مثالی دم‌دستی، اگر یک کتاب را بسوزانیم مستقل از این که محتوای کتاب چه بوده، دست آخر صرفاً مشتی خاکستر برجای می‌ماند. به علاوه، فرایندهایی که در اطراف خود می‌بینیم معمولاً برگشت‌ناپذیر هستند و همه اطلاعات موجود با گذشت زمان الزاماً قابل دستیابی نیستند. این ویژگی معمولاً با کمیتی به نام آنتروپی سنجیده و اندازه‌گیری می‌شود: در تحول سیستم‌های گرمایی آنتروپی همیشه افزایش می‌یابد. معمولاً از آنتروپی به عنوان بی‌نظمی سیستم نیز یاد می‌شود. نکته مهم در سیستم‌های متعارف گرمایی آن است که کمیت‌های ترمودینامیکی نظیر دما، حجم، فشار، و انرژی گرمایی در واقع بیانگر متوسط آماری از سیستم در سطح میکروسکوپی هستند و نه خاصیتی بنیادین؛ همیشه یک زیرسیستم (در سطح اتمی و مولکولی، «در سطح میکروسکوپی») وجود دارد که تحول آن برگشت‌پذیر است و اطلاعات در این زیرسیستم از بین نمی‌رود. به بیان دیگر، از بین رفتن اطلاعات و برگشت‌ناپذیری در تحول سیستم‌های ترمودینامیکی صرفاً به دلیل رفتن به سطح سیستم‌های بزرگ و نادیده گرفتن زیرسیستم آماری است.

تلاش‌های زیادی از سال‌های میانی دهه ۱۹۷۰ تا به امروز در جریان است تا نشان دهند که ایده و تصویری که در بالا توصیف شد برای سیاهچاله نیز کارایی دارد؛ یعنی سیاهچاله که در سطح کلاسیک جوابی از نظریه نسبیت عام است و یک فضا-زمان را با متریک معین توصیف می‌کند، در سطح «نیمه کوانتومی» به صورت یک سیستم ترمودینامیکی، مانند هر سیستم گرمایی معمول و متعارف، رفتار می‌کند و دارای یک سطح زیرین «میکروسکوپی» است. در اینجا «نیمه کوانتومی» به معنای لحاظ کردن فضا-زمان زمینه به صورت کلاسیک (نسبیت عامی) است و بقیه فیزیک در زمینه این سیاهچاله به صورت کوانتومی است. البته تثبیت این تصویر مستلزم نشان دادن وجود زیرسیستم آماری برای سیاهچاله است. در این خصوص هم دو ایده وجود داشته و دارد: یکی این که یافتن زیرسیستم آماری یک سیاهچاله، و به اصطلاح «ریزحالات» آن مستلزم رفتن به سطح «کامل کوانتومی» و بررسی متریک زمینه در سطح کوانتومی، به اصطلاح در سطح «گرانش کوانتومی»

است. ایده دیگر این است که سطح «نیمه کوانتومی»، صرفاً با اصلاحاتی چند در نظریه نسبیت عام و اصل هم‌ارزی و لحاظ کردن برخی اثرات کوانتومی برای یافتن و توضیح ریزحالات سیاهچاله، کافی است و نیازی به سطح گرانش کوانتومی نیست. هرچند این دو دیدگاه متناقض هم نیستند، هر یک طرفداران و مدافعان خود را دارند.

در سال ۱۹۹۶، استرومینجر و وفا با استفاده از ایده D-غشا که پولچینسکی یک سال قبل از آن ارائه کرده بود قدمی مهم در تثبیت تصویر اول یعنی معرفی (با به طور دقیق‌تر «شمارش» و نه تعیین دقیق) ریزحالات کوانتومی سیاهچاله در چارچوب نظریه ریسمان -- به عنوان یک نظریه گرانش کوانتومی -- برداشتند. استرومینجر و وفا یک سیاهچاله با دمای صفر ابرمتقارن را چارچوب نظریه ریسمان و به عنوان حالتی مقید از D-غشاهاى مختلف مدل‌سازی کردند و نشان دادند که در این سیاهچاله مدل شده می‌توان زیرسیستم آماری را تشخیص داد و توانستند با شمارش تعداد حالت‌های این زیرسیستم آماری که همگی به یک سیاهچاله مربوط بودند، آنتروپی سیاهچاله را محاسبه کنند. در حدود ۲۰ سالی که از ارائه مدل استرومینجر و وفا می‌گذرد فیزیکدان‌های بسیاری نشان داده‌اند که این ایده به سیاهچاله‌های متعدد دیگری، همگی در چارچوب نظریه ریسمان، با دمای صفر و با حضور ابرمتقارن قابل تعمیم است. علی‌رغم جالب بودن ایده استرومینجر و وفا، این ایده برای سیاهچاله‌های عمومی‌تری که دمای غیرصفر دارند و ابرمتقارن نیستند -- و اتفاقاً سیاهچاله‌های جالب و آنهایی که در طبیعت وجود دارند در این دسته قرار می‌گیرند -- به کار نمی‌آید.

تلاش‌های بسیاری برای تعمیم ایده استرومینجر و وفا در مورد سیاهچاله‌های واقعی و جالب‌تر انجام شده اما تا کنون نتیجه متقنی نداشته‌اند. احتمالاً پاسخ به این پرسش و تبیین ریزحالات سیاهچاله‌های عمومی در چارچوب ایده استرومینجر و وفا امکان‌پذیر نیست و باید به دنبال ایده‌های بهتر و جایگزین بود. تلاش‌های مختلفی در این جهت از جمله توسط استرومینجر در دو دهه اخیر انجام شده اما هیچ یک هنوز به نتیجه‌ای تثبیت‌شده و مطلوب منجر نشده است. در این خصوص، اخیراً نگارنده با همکاری حمیدرضا افشار، دانیل گرومیلر و حسین یاورتو نظریه و مدلی برای یک سیاهچاله عمومی اما در سه بعد ارائه داده‌ایم که محدودیت‌ها و کاستی‌های ایده استرومینجر و وفا را ندارد. مدل ما در زمره ایده‌هایی است که در آنها فهم ریزحالات سیاهچاله در سطح «نیمه کوانتومی» انجام می‌پذیرد و نیازی به نظریه خاص گرانش کوانتومی مانند نظریه ریسمان ندارد. ایده ما، فقط شمارش ریزحالات را انجام نمی‌دهد بلکه آنها را تعیین نیز می‌کند. در مقاله‌ای که در آینده‌ای نزدیک منتشر خواهیم کرد نشان داده‌ایم که مدل ما برای سیاهچاله‌هایی در فضا-زمان چهاربعدي که به سیاهچاله‌های واقعی نزدیک‌تر هستند نیز قابل استفاده است. سیاهچاله‌ها در دمای صفر تابش هاوکینگ ندارند و برای آنها مسئله باطل‌نمای اطلاعات نیز موضوعیت ندارد. برای سیاهچاله‌های عمومی بعد از تبیین ریزحالات باید به مسئله اطلاعات پرداخت که به عقیده بسیاری، کلید فرمول‌بندی گرانش کوانتومی در آن نهفته است. ■