نظریهٔ شکل‌گیریِ سیاهچاله
از جایزهٔ نوبلِ فیزیک سهم می‌بَرَد•

هِدِر ام. هیل

راجِر پِنرُوز

راجِر پِنرُوز (Roger Penrose) نشان داد که شکل‌گیریِ سیاهچاله‌ها در عالم امکان‌پذیر و لازم است. او در اثباتِ خود تصویری توپولوژیک به‌کار برد که اینک یکی از شالوده‌های نسبیت عام شده است.

راجر پنروز در مقالهٔ سال ۱۹۶۹ خود نوشت: «می‌خواهم درخواست کنم که همه، سیاهچاله را جدی بگیرند و نتایجِ وجود سیاهچاله را با تفصیل کامل بررسی کنند، چون چه کسی می‌تواند بدون بررسیِ دقیق بگوید سیاهچاله نمی‌تواند نقش مهمی در شکل‌دادن به پدیده‌های قابل‌مشاهده داشته باشد؟» [1] نیمی از جایزهٔ نوبل فیزیک امسال، تأیید این نکته است که او در جلب توجه پژوهشگران و متقاعد کردن آنها به جدی‌گرفتنِ سیاهچاله‌ها موفق بوده است.

با چندین دهه شواهد برای وجودِ سیاهچاله، تصورش مشکل است که زمانی فیزیکدان‌ها در وجود سیاهچاله تردید داشتند. کارِ راینهارت گِنتسل و آندریا گِز که نیمِ دیگر جایزهٔ نوبل امسال را دریافت کردند، و تصویری که سال گذشته تلسکوپ افق رویداد (Event Horizon Telescope) برای همه به نمایش گذاشت (مقالهٔ دیمیتریوس پسالتیس و فریال اوزل: صفحهٔ ۷۰ شمارهٔ آوریل ۲۰۱۸ فیزیکس تودی)، بخشی از این شواهد است. نسبیت عام که پذیرای امکان وجود تکینگی‌هاست، جای پای خود را به‌منزلهٔ نظریهٔ استاندارد پدیده‌های گرانشی، و پایهٔ بسیاری از الگوهای کیهان‌شناختی محکم کرده است.

اما در دههٔ ۱۹۶۰ که راجر پنروز کار خود دربارهٔ سیاهچاله‌ها را آغاز کرد، این سرنوشت محتوم به‌نظر نمی‌رسید.

در سال ۱۹۶۵، پنروز در مقاله‌ای سه‌صفحه‌ای با شمار کمی معادله نشان داد که سیاهچاله نه یک پدیدهٔ عجیب و غریب ریاضی بلکه واقعیتی گریزناپذیر است [2]. پنروز با این مقاله چارچوب ریاضیِ توپولوژی را در نسبیت عام وارد کرد. مارتین ریس (Martin Rees) اخترفیزیکدان می‌گوید: «پس از اینشتین هیچ‌کس به اندازهٔ او در آنچه دربارهٔ گرانش می‌دانیم سهم نداشته است.»

فکر کلی

حتی در اواخر دههٔ ۱۷۰۰ هم، جان میچل (John Michell) و پی‌یر-سیمون لاپلاس (Pierre-Simon Laplace) فرضیهٔ وجودِ جسمی را پیش نهاده بودند که سرعت فرار از آن، بیش از سرعت نور باشد طوری که ذرات نور هم نتوانند از میدان گرانشیِ آن بیرون بروند. با استفاده از مکانیک نیوتونی، میچل و لاپلاس هر کدام دریافتند که

قرارگرفتن جرم کرویِ m درون شعاع کم‌تر از $2Gm/c^2$ به چنین وضعیتی منجر خواهد شد.

صد سال بعد همین شعاع دوباره ظاهر می‌شود: اینشتین نظریهٔ نسبیت عام خود را در سال ۱۹۱۵ منتشر کرد. در این نظریه اینشتین ریاضیات نامأنوس و مشکلی به کار برده بود که تنها با تقریب‌زدن قادر به حل معادلاتش بود. در اوایل سال ۱۹۱۶ کارل شوارتس‌شیلد (Karl Schwarzschild) که در جنگ جهانی اول در ارتش آلمان خدمت می‌کرد، اولین جواب معادلات میدان اینشتین را به‌دست آورد. در جواب او برای فضازمانِ خمیده حول‌وحوشِ مادهٔ کروی و متقارن به‌جرم m به‌ازای بعضی شعاع‌ها ریاضیاتِ غریبی ظاهر می‌شود به‌این صورت که بعضی از جملات به‌ازای $r = 0$ و $r = 2Gm/c^2$ صفر یا واگرا می‌شود.

آنچه به تکینگی در $r = 0$ معروف است، نقطه‌ای با چگالیِ بینهایت و کششِ گرانشیِ چنان شدید است که نور هم نمی‌تواند از آن فرار کند. اما پژوهشگران نمی‌دانستند نتیجه را چه طور باید تعبیر کرد. آیا تکینگی‌ها واقعی است یا تنها در نتیجهٔ گزینش مختصات حاصل می‌شود؟

بیست سال بعد جِی. رابرت اُپنهایمر تلاش کرد با تحلیل فروافت اَبرِ کرویِ مادّه، معنای این تکینگی‌های گرانشی را دریابد. او و دانشجویش، هارتلند اسنایدِر (Hartland Snyder) نخستین کسانی بودند که معنای دومین مقدار مهم r را که اکنون به افق رویداد معروف است دریافتند. ستارهٔ فروریزنده نمی‌تواند با مشاهده‌گرهای آن‌سوی افق ارتباط برقرار کند. اما فرض تقارن کروی اُپنهایمر این تردید را به‌وجود می‌آورد که چنین وضعیتی در عالم واقعی نمی‌تواند رخ دهد. آیا عدم تقارن مانع فرو ریختنِ ستاره در یک نقطه می‌شود؟ آیا ماده نمی‌تواند پس رانده شود؟ فیزیکدان‌های معروفی مثل یِوگِنی لیف‌شیتز (Evgeny Lifshitz)، ایساک خالاتنیکوف (Isaak Khalatnikov)، و جان ویلر (John Wheeler) می‌گفتند که چنین فروریزشی در شرایط واقعی امکان‌پذیر نیست.

به‌جز این کار، از اواسط دههٔ ۱۹۲۰ تا اواسط دههٔ ۱۹۵۰، تصور رایج این بود که نسبیت عام چیزی بیش از تصحیحاتی کوچک برای تصویر نیوتونیِ برهم‌کنش گرانشی نیست [3]. علاوه‌براین، دربارهٔ دقت نسبیت عام در مقایسه با دیگر نظریه‌های مطرحِ گرانش بحث بود.

یک پیش‌بینیِ نظریهٔ اینشتین یعنی انحراف نور در اثر کشش گرانش را مشاهدات نجومیِ آرتور ادینگتون (Arthur Eddington) طی خورشیدگرفتگیِ سال ۱۹۱۹ (مقالهٔ دَنیل کندریک در صفحهٔ ۳۷ شمارهٔ مارس ۲۰۰۹ فیزیکس تودی)و اندازه‌گیری‌های دیگرِ منجمانِ رصدخانهٔ لیک (Lick Observatory) در سال ۱۹۲۲ تأیید کرده بود.

پیشرفت بیشتر در شواهد تجربیِ نسبیت عام نیاز به پیشرفت فناوری داشت و نظریه‌های میدان واحد (unified field theory) دیگری نیز وجود داشت که انحراف نور را توضیح می‌داد. نظریه‌پردازان فیزیک توجه‌شان را به مکانیک کوانتومی معطوف کردند که آزمون‌های واضح و کاربردهای بالقوهٔ فراوان داشت.

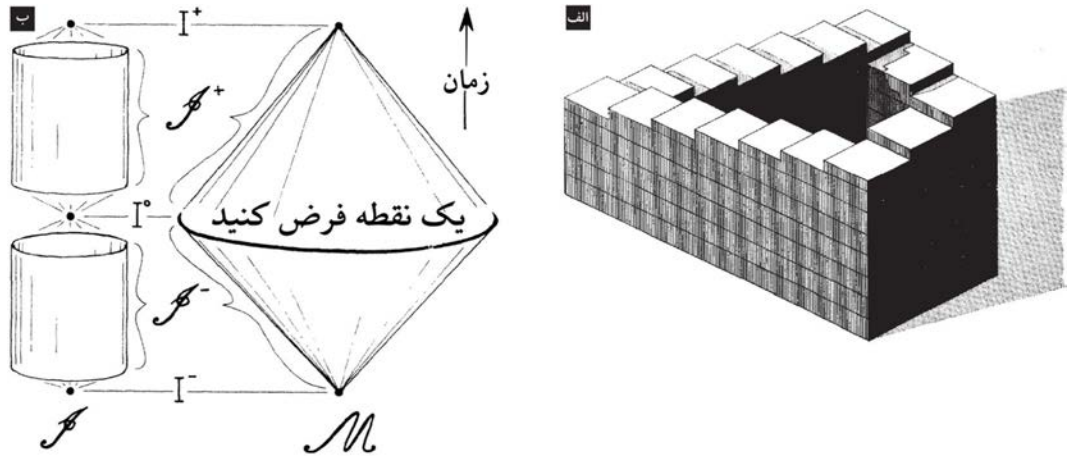
فیزیک و باززایش دیگر

پس از جنگ جهانی دوم، دورانی پیش آمد که نظریه‌پردازِ نسبیت عام، کلیفورد ویل (Clifford Will) «باززایش نسبیت عام» نامیده است [4]. در دوران جنگ، و در پی آن در جنگ سرد، فیزیک نقشی اساسی بازی کرده بود که نتیجه‌اش بودجهٔ بیشتر و جذب استعدادها بود. افزایش فرصت‌های پسادکتری به انتشار اندیشه‌های نو در جمع کوچک و پراکندهٔ نظریه‌پردازان نسبیت عام کمک کرد. این زمینهٔ پژوهشی بالاخره خوش‌تعریف شد و همایش‌ها و نشریات مختص خود را پیدا کرد.

ابزارهای سنجش دقیق مانند لیزر و ساعت اتمی، آزمون‌هایی را برای نسبیت عام امکان‌پذیر کرد که پیش‌تر عملی نبود. ویل می‌گوید که در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ شواهد قلیلی در تأیید نسبیت عام وجود داشت: «شواهدی وجود داشت اما شواهدی ضعیف». با پیدایش توانایی آزمودن جنبه‌های مختلف نظریه‌های گرانشی، توجه پژوهشگران جلب شد.

پس از کشف اختروش‌ها در اوایل دههٔ ۱۹۶۰ ، ستاره‌شناسان کم‌کم متوجه شدند که نسبیت عام شاید چیزی بیشتر از تصحیحات کوچک در نظریهٔ نیوتونی را توضیح دهد. اختروش(quasar)ها ظاهراً چشمه‌های فشرده‌ای هستند که میزانِ گسیل‌شان حتی در مقیاس روز و ساعت تغییر می‌کند و از تمامیِ یک کهکشان هم درخشان‌تر هستند. این بیرون‌ریزِ انرژی را نمی‌توان با گرانش نیوتونی توضیح داد. در همان زمان‌ها، آزمایش‌های رابرت پاؤند (Robert Pound) و گلِن رِبکا (Glen Rebka) با پرتو گاما پیش‌بینیِ دیگرِ نسبیت عام یعنی انتقال‌ـبه‌ـسرخِ گرانشی (gravitational redshift) را تأیید کرد.

در مرزهای نظری، رُی کِر (Roy Kerr) ریاضیدان، جواب شوارتس‌شیلد برای نظریهٔ میدان را به جرمِ گردان تعمیم داد و مارتین کروسکال (Martin Kruskal) و دیوید فینکلستین (David Finkelstein) جواب شوارتس‌شیلد را با استفاده از مختصات متفاوت دوباره بررسی کردند و تکینگیِ ظاهری در $r = 2Gm/c^2$



شکل ۱. بازی پنروز با ابعاد. در پلکان ناممکن و نمودارهای فضازمان: **(الف)** پلکان پنروز یکی از شیءهای ناممکن است که پنروز با پدرش طراحی کرد. چنین شیئی نمی‌تواند به آن‌صورت که ظاهر می‌شود یعنی پله‌هایی که مرتباً پایین می‌روند و حلقه می‌سازند وجود داشته باشد، اما می‌توان با شیئی واقعی که به دقت طراحی شود و از زاویهٔ خاصی نگریسته شود توهم آن را به وجود آورد [از مرجع 5 با تغییرات]. **(ب)** در نمودار پنروز با استفاده از ترفند تغییر دیدگاه، تمام عالم ترسیم می‌شود. در روشی که به تبدیل همدیس معروف است زوایا تغییر نمی‌کند اما فاصله تغییر می‌کند، با این تبدیل، در فضازمانِ همدیس $\mathscr{M}$ گذشتهٔ نامتناهی I^-، بینهایتِ مکانی I°، آیندهٔ نامتناهی I^+، و مسیر نور تا بینهایت ($\mathscr{I}^-$ و $\mathscr{I}^+$) متناهی و ترسیم‌پذیر می‌شود [از مرجع 6 با تغییرات].

برای مشاهده‌گر محلی را توضیح دادند. درس‌های فینکلستین در بارهٔ جواب شوارتس‌شیلد یکی از چیزهایی بود که باعث شد پنروز در سال ۱۹۶۴ کار روی این مسئله را شروع کند.

راجر!

مارتین ریس می‌گوید: «برخلاف بیشتر متخصصان نسبیت در ایالات متحده، پنروز به‌جای فیزیک ریاضیات خوانده بود. به همین دلیل است که در دههٔ ۱۹۶۰ چنین تأثیر متمایزی بر نسبیت گذاشت.»

پدر پنروز در یونیورسیتی‌کالج لندن استاد ژنتیک انسان بود و پنروز از آنجا مدرک ریاضیات گرفت. سپس تحصیلاتش را در دانشگاه کمبریج ادامه داد و در سال ۱۹۵۷ مدرک دکتری گرفت. حتی در مقایسه با همتایانش در ریاضیات، پنروز در دوران دانشجویی تفکر هندسی داشت و به‌جای اینکه مثلاً با تانسور عبارت‌های پیچیدهٔ ریاضی بنویسد، تصویر می‌ساخت. در کمبریج سراغ درس‌های خارج از زمینهٔ کار خودش می‌رفت از جمله درس‌های هرمَن بوندی (Hermann Bondi) در نسبیت و پل دیراک در مکانیک کوانتومی، و در همان سال‌ها در اثر سخنرانی‌های فردِ هویل (Fred Hoyle) دربارهٔ نجوم و کیهان‌شناسی در بی‌بی‌سی علاقه‌اش به نجوم بیشتر شد، از جمله به نظریهٔ حالت پایدار (steady-state) هویل که می‌گوید عالم در هر لحظه و هر مکان یکسان است (برای اینکه این نظریه با مشاهدات بخواند لازم است که مادهٔ جدید مرتباً در عالم زاده شود؛ مقالهٔ جفری بربیج، فرد هویل و جایانت و. نارلیکار را در صفحهٔ ۳۸ شمارهٔ آوریل ۱۹۹۹ فیزیکس تودی ببینید). هویل به این نکته اشاره کرد که کهکشانی که با سرعت نور حرکت کند از عالم قابل رؤیت ناپدید می‌شود. پنروز این مسئله را برحسب مخروط نوری بیان کرد و به‌نظرش بی‌معنی آمد. این معما یکی از اولین چیزهایی بود که در ملاقات با دنیس شیاما (Dennis Sciama) کیهان‌شناس به میان آورد. شیاما علاقهٔ پنروز به فیزیک را تشویق کرد.

در دوران تحصیلات تکمیلی، پنروز با کارهای ام. سی. اِشِر (M. C. Esher) هم آشنا شد و تمایل پیدا کرد که طرح‌های مشابهی با الهام از ریاضیات بیافریند. او و پدرش اشیاءِ غیرممکن خود را طراحی کردند و برخی از آنها در نشریهٔ روان‌شناسی بریتانیا منتشر شد [5]. یک نمونه معروف به پلکان پنروز (Penrose stairs) در شکل ۱ـالف نمایش داده شده است. یکی از نتایج دیگر این علاقهٔ پنروز طراحیِ الگوی غیرتناوبیِ کاشی‌هایی بود که صفحه را می‌پوشاند و به کاشیکاری پنروز (Penrose tiling) معروف شده است. این الگو بعدها در شبه‌بلورها ظاهر شد که موضوع جایزهٔ نوبل شیمی سال ۲۰۱۱ بود (مقالهٔ صفحهٔ ۱۷ شمارهٔ دسامبر ۲۰۱۱ فیزیکس تودی).

ریس می‌گوید: «روشن است که او نه تنها فکری عمیق دارد، بلکه تفکر او خصلتی غیرمعمول و هندسی دارد. دفترچه‌های او مثل دفترچه‌های لئوناردو داوینچی است.»

بینهایت‌های متناهی

با پیشرفت فناوریِ تجربی و بازشدن چشم‌اندازهای تازه، ابزارهای نظری هم دیدگاه‌های تازه‌ای بر عالم گشودند. در بین آنها، نمودار پنروز که در مقالهٔ سال ۱۹۶۲ پنروز ظاهر شد، بسیار قدرتمند است [6]. این نمودار نمایندهٔ تمام فضازمان است و پس از آنکه دانشجوی شیاما، برَندنِ کارتر (Brandon Carter)، آن را رواج داد در مقالات دههٔ ۱۹۶۰ مربوط به فیزیک سیاهچاله‌ها فراوان دیده می‌شود و در آموزش و پژوهشِ نسبیت عام به ابزار استاندارد تبدیل شده است.

این نمودار از نمودارهای سال ۱۹۰۷ مینکووسکی (Minkowski diagrams) گرفته شده که در آنها محورِ عمودی زمان است و محور افقی یک بُعدِ فضا، نور روی خط °۴۵ حرکت می‌کند. مشاهده‌گر نمی‌تواند تندتر از نور حرکت کند و فضازمان در دسترس او را مخروط °۴۵ تعریف می‌کند. اما فیزیکدان‌ها در معنا و تعبیر این نمودارها اختلاف داشتند. فیزیکدان‌ها اغلب به رفتار میدان‌های مختلف در بینهایت نظر دارند اما بینهایت یک نقطه نیست و در بینهایت، مشاهده‌گر هم وجود ندارد.

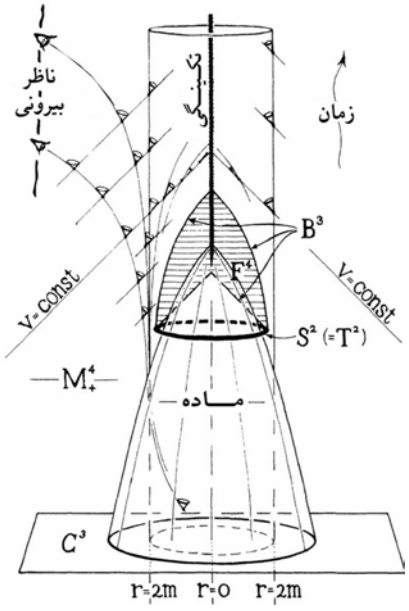
پنروز با کاربرد تبدیل‌های همدیس (conformal transformations) که زوایا را تغییر نمی‌دهد، راهی پیدا کرد تا به بینهایت، شکل مشخص بدهد. پس از این تبدیل، بینهایت تبدیل به مرز ناحیه‌ای متناهی می‌شود. مورخ علم، آرون رایت (Aaron Wright) می‌گوید: «می‌توانید عالم را رسم کنید که پیش از این روشِ جدید عملاً غیرممکن بود.» گذشتهٔ نامتناهی I^-، بینهایت‌های مکانی I°، و آیندهٔ نامتناهی I^+ به نقطه‌ای در پایین، حلقه‌ای در وسط، و نقطه‌ای در بالای فضازمان همدیس $\mathscr{M}$ تبدیل می‌شود (سمتِ راستِ شکل ۱ـب). مرزهای مخروط نمایش مسیر نور روی خط‌های °۴۵ تا بینهایت است.

نمودار پنروز در حال‌وهوای همان اشکال معماگونه‌ای‌ست که پنروز با پدرش طراحی می‌کرد. با حرکت چشم روی نمودار، رابطهٔ فضاییِ بیننده با صفحه تغییر می‌کند. در نمودار پنروز، مقیاس فاصله در لبه‌های بینهایت به‌شکلی چشم‌گیر از مقیاس فاصله در مرکز نمودار کوچک‌تر است. ویل می‌گوید این ترسیم‌ها «همان تأثیری را در زمینهٔ کار ما داشت که نمودارهای فاینمن در فیزیک ذرات». نمودار پنروز فقط آنچه را رخ می‌دهد تصویر نمی‌کند بلکه شیئی صوری و ریاضی است که می‌توان برای انجام محاسبات به کار برد و بدون چند صفحه معادله به نتایج کمّی دست یافت.

تله

تحلیل با نمودار برای پنروز خوب نتیجه داد. در سال ۱۹۶۴ جان ویلر دوباره به بررسیِ فروافتِ گرانشی پرداخت و دراین‌باره با پنروز مشورت کرد. پنروز در بررسی مسئله، فرض تقارن کروی و دیگر فرض‌های ایده‌آلِ مرسوم را کنار گذاشت.

نکات اصلی یافته‌های پنروز که در سال ۱۹۶۵ منتشر شد در شکل ۲ خلاصه شده است. در این شکل، دو بُعدِ فضایی دیده می‌شود و زمان محور سوم است. از پایین که شروع کنیم، مادّه به‌سوی $r = \circ$ فرو می‌افتد و از دیدگاهِ مادّه، در زمانی متناهی از افق رد می‌شود و چیز خاصی رخ نمی‌دهد. اما از دیدگاه ناظر بیرونی مادّه تا ابد در حال فروافُتادن به‌سوی افق رویداد است (در شکل، استوانه به‌شعاع $r = ۲m$ برحسب یکاهایی که به‌ازای آنها $G = c = ۱$) اما هیچ‌وقت از آن نخواهد گذشت.



شکل ۲. مادّه در سیاهچاله فرو می‌افتد. زمانی که r، شعاعِ فضایی که مادّه‌ای به جرم m اشغال کرده است، از $۲m$، فاصلهٔ معروف به افق رویداد (استوانه در شکل)، کم‌تر شود، سطحی به‌تله‌افتاده (حلقهٔ سیاه در میانهٔ شکل) در فضای خالیِ اطراف ماده پدیدار خواهد شد. روی این سطحِ بسته حتی نور هم نمی تواند از تکینگی دور شود و به‌این ترتیب این سطح، نشانهٔ شکل‌گرفتنِ سیاهچاله است که از آن گریزی نیست. اما ناظر بیرونی هیچگاه نمی‌بیند که ماده از افق رویداد بگذرد. با اینکه این تصویر برای مادّه‌ای با تقارنِ کروی ترسیم شده، پنروز ثابت کرد که همین نتیجه برای هر شکل دیگر نیز صادق است [از مرجع 2 با تغییرات].

پنروز نقطهٔ بدون بازگشتِ شکل‌گیریِ سطحی را مشخص کرد که او سطح به‌تله‌افتاده (trapped surface) نامید، پس از آن فروافتادن به تکینگی، به عبارت دیگر سیاهچاله، ناگزیر و غیرقابل‌اجتناب است. با گذر از افق رویداد، ماده‌ای که فرو می‌افتد خود را در فضایی خالی می‌بیند که میزبان سطحِ به‌تله‌افتاده است. در این حبابِ فضازمان،

فضا و زمان خصوصیات‌شان را با هم مبادله می‌کنند: فضا، زمان‌گونه و مسیرها یک‌سویه می‌شود. به‌وجود آمدنِ سطح به‌تله‌افتاده به‌ناگزیر به پیدایش تکینگی منجر می‌شود.

حتی اگر توزیعِ ماده مرز مشخصی نداشته باشد، نامتقارن باشد، یا در حال چرخیدن باشد، سطح به‌تله‌افتاده باز هم شکل می‌گیرد. به‌واقع روش پنروز برای بررسی فروافت ستاره بر تعداد کمی از فرض‌های معادلات اینشتین استوار است و کاربرد نظریهٔ گرانشی رقیبی هم که کارل برَنس (Carl Brans) و رابرت دیکی (Robert Dicke) براساس کارهای پاسکوال یوردان (Pascual Jordan) ساخته‌اند، کیفیت برهان پنروز را تغییر نمی‌دهد. هر زمان که جرم کافی، فضای مشخصی را اشغال کند فشار نمی‌تواند با گرانش مقابله کند و سیاهچاله شکل خواهد گرفت.

آثار علّیتی

پس از آنکه پنروز فروافت گرانشی را تحلیل کرد، سیاهچاله توضیح غالب برای اختروش‌ها شد. کار پژوهشی او در تغییر عقیدهٔ جامعهٔ علم که سیاهچاله را صرفاً موجودی نظری و غیرمحتمل می‌پنداشت، سهم داشت. سیاهچاله اینک توضیحی پذیرفتنی برای اختروش‌ها، بلازار(blazar)ها، و دیگر هسته‌های فعال کهکشانی (active galactic nuclei) است، مثلاً، توضیح فعلی برای آنچه اختروش‌ها گسیل می‌کنند، آزادشدنِ جرم سکون در اثر تنش گرانشی و اصطکاک هنگام فروریزش ماده درون سیاهچاله است.

پنروز به کارش ادامه داد و ساختار، دینامیک، و سرشت سیاهچاله را روشن‌تر کرد. برای نمونه، در سال ۱۹۷۱ او متوجه شد که انرژی دورانیِ سیاهچاله را می‌توان به‌شکل فیزیکی از سیاهچاله بیرون کشید. هر جرمِ چرخان، فضازمان را به دنبال خود می‌کشد و به آن حرکتی گردابی می‌دهد. هیچ ناظری نمی‌تواند از چرخش با این حرکتِ گردابیِ فضازمانِ اطرافِ سیاهچالهٔ چرخان پرهیز کند. اگر پرتابه‌ای در حال چرخش با این فضازمان، دو تکه شود طوری که یک تکه از سیاهچاله بگریزد، تکهٔ گریزان می‌تواند به علت انرژی دَورانیِ سیاهچاله بیش از پرتابهٔ اولیه انرژی داشته باشد.

پنروز با استیون هاوکینگ هم که در آن زمان دانشجوی شیاما بود همکاری کرد و کاربردِ همان برهانِ سطح به‌تله‌افتاده برای تکینگی‌های کیهان‌شناختی، وجود تکینگی درگذشته یعنی وجود مهبانگ را تأیید کرد.

نظریه‌پرداز فیزیک، لی اسمولین (Lee Smolin)، می‌گوید که «اهدای جایزهٔ نوبل» به پنروز و نسبیت عام «بسیار دیر صورت گرفته است» (حتی اینشتین هم جایزهٔ نوبل را برای اثر فوتوالکتریک دریافت کرد و نه نسبیت عام). تأکید اسمولین بر تأثیر پنروز بر ریاضیاتی چون ساختارهای همدیس است که در نسبیت عام به کار می‌رود.

ویل می‌گوید با نتایج پرسروصدای اخیر در ارتباط با نسبیت عام، مانند مشاهدهٔ امواج گرانشی (موضوع جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۲۰۱۷: صفحهٔ ۱۶ شمارهٔ دسامبر ۲۰۱۷ فیزیکس تودی) «در آستانهٔ باززایش کاملاً جدیدی هستیم که نسبیت عام را به حوزهٔ گرانش قوی گسترش خواهد داد.» بیشتر نتایج باززایش دوران پس از جنگ جهانی دوم به میدان‌های ضعیف و حرکاتی مربوط می‌شود که در مقایسه با سرعت نور کُند است. میدان‌های قوی، مثلاً در گردش دو سیاهچاله به دور یکدیگر با سرعتی نصف سرعت نور و افق‌های در تماس با یکدیگر، ظاهر می‌شود. در این وضعیت ماده چه رفتاری خواهد داشت؟

ترجمهٔ نادر حیدری

(ویراستار مجری پیشین مجلهٔ فیزیک مرکز نشر دانشگاهی)

• **Heather M. Hill**, *The theory of black hole formation shares the Nobel Prize in Physics*, Physics Today **73** (2020), 14.

مراجع

1 **Roger Penrose**, *Gravitational collapse: The role of general relativity*, Riv. Nuovo Cimento **1** (1969), 252.

2 **Roger Penrose**, *Gravitational collapse and space-time singularities*, Phys. Rev. Lett. **14** (1965), 57.

3 **A. Blum**, **D. Giulini**, and **J. Renn**, *Editorial introduction to the special issue "The Renaissance of Einstein's Theory of Gravitation"*, Eur. Phys. J.H **42** (2017), 95.

4 **Clifford M. Will**, *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*, Basic Books, New York, 1986.

5 **L.S. Penrose** and **R. Penrose**, *Impossible objects: A special type of visual illusion*, Br. J. Psychol. **49** (1958), 31.

6 **R. Penrose**, *Asymptotic properties of fields and space-times*, Phys. Rev. Lett. **10** (1963), 66.

7 **A. Wright**, *The advantages of bringing infinity to a finite place: Penrose diagrams as objects of intuition*, Hist. Stud. Nat. Sci. **44** (2014), 99.