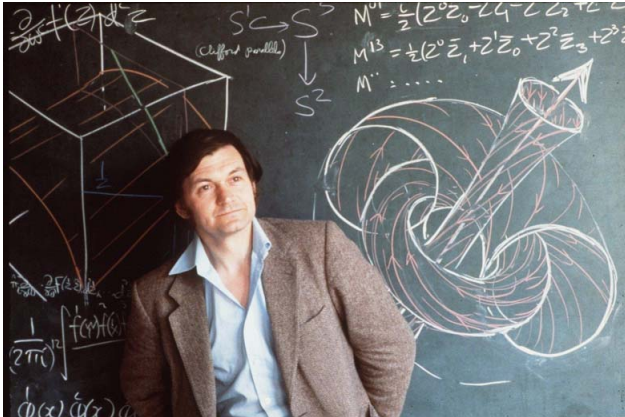


ÚJABB NOBEL-DÍJ A FEKETE LYUKAK KUTATÁSÁÉRT

Dálya Gergely
ELTE



1. ábra. A Nobel-díj felét elnyert Roger Penrose az 1980-as években.

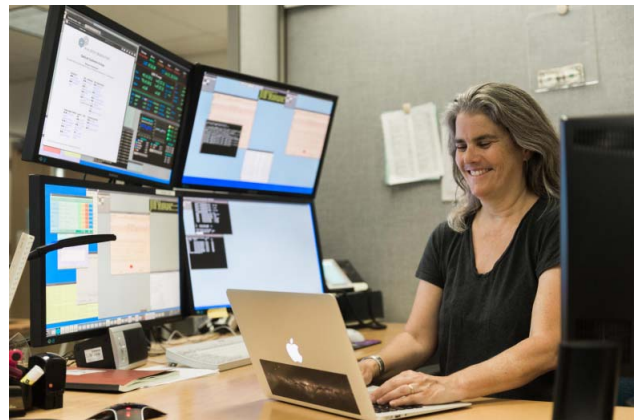
2017-ben a fekete lyukak összeolvadásából származó gravitációs hullámok első közvetlen észleléseért kapta meg a fizikai Nobel-díjat a felfedezést tevő LIGO kollaboráció három vezető kutatója. Három év elteltével pedig ismét a fekete lyukakkal kapcsolatos eredményekért ítélték oda a világ legrangosabb fizikai elismerését. A díj egyik felét *Roger Penrose* brit fizikus (1. ábra) kapta „a felfedezésért, hogy a fekete lyukak kialakulása az általános relativitáselmélet erős bizonyítéka”, míg a díj másik felén *Reinhard Genzel* német asztrofizikus és *Andrea Ghez* amerikai csillagász osztozott, ők „a galaxisunk közepén lévő szupernagy tömegű objektum felfedezéséért” kapták meg az elismerést (2. ábra).

A gravitáció modern elmélete

Albert Einstein általános relativitáselmélete a gravitációt nem erőként kezeli, hanem a tér görbületeként írja le. A testek – tömegük révén – meggörbítik a téridőt, a többi test pedig ebben a görbült téridőben fog mozogni. Ahogy a klasszikus, newtoni mechanikából tudjuk, egy magára hagyott test vagy nyugalomban van, vagy pedig egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Ez igaz a görbült téridőben is, azonban az „egyenes” fogalmát itt újra kell gondolni (3. ábra). Nézzük azt a példát, hogy egy Budapestről Los Ange-



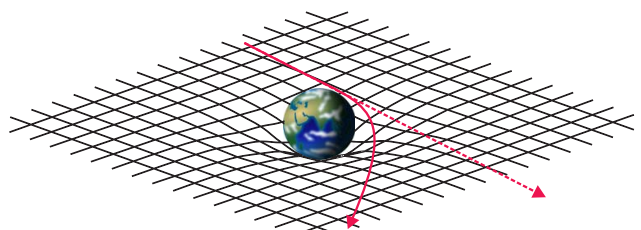
Dálya Gergely az ELTE asztrofizikus doktorandusza. A gravitációs hullámokat elsőként észlelő LIGO kollaboráció tagjaként a gravitációs hullámok forráslokalizációjával és azok kozmológiai alkalmazásaival foglalkozik. Emellett 2014 óta a Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia magyar csapatának felkészítő tanáraként is dolgozik.

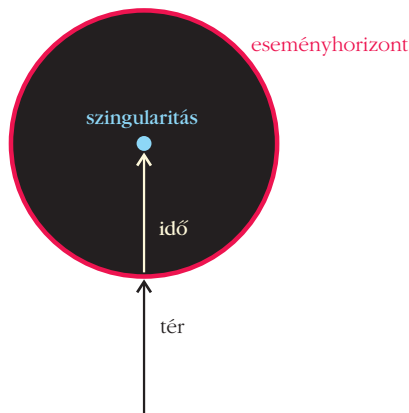


2. ábra. A 2020. évi fizikai Nobel-díj másik felén osztozó Reinhard Genzel az ESO chilei Paranal Obszervatóriumánál (fölül), illetve Andrea Ghez a Hawaii-szigeteken található Keck Obszervatóriumában (alul).

lesbe tartó repülőgép útja során Grönland fölött is el fog haladni, ami egy síktérképre nézve abszurdnak tűnik. A földfelszínen azonban egy ilyen, kívülről görbültnek tűnő pálya lesz a két várost összekötő legrövidebb út, vagyis az „egyenes”. Ebben a leírásban a Hold Föld körüli keringését például úgy képzelhetjük el, hogy a Föld, mint nagyobb tömegű test begörbíti maga körül a gyakran gumilepedőként szemléltetett téridőt, a Hold pedig e görbült téridőben mozog. Az általános relativitáselmélet igazát azóta számos kísérlet és mérés alátámasztotta, nélküle például a GPS-műholdakon alapuló helymeghatározás sem lehetne ilyen pontos.

3. ábra. Bármilyen, tömeggel bíró test meggörbíti a téridőt, a többi test pedig e görbült téridőben mozog (forrás: Wikipedia / Mysid nyomán).





4. ábra. Egy nem forgó, úgynevezett Schwarzschild-féle fekete lyuk szerkezete (forrás: nobelprize.org).

Léteznek-e a fekete lyukak?

Már jóval az általános relativitáselmélet megszületése előtt, a 18. században is felmerült a „fekete csillagok” gondolata, *John Michell* és *Pierre-Simon Laplace* is elgondolkodott rajta, hogy lehetnek akkora tömegű és sűrűségű égitestek, amelyek gravitációs vonzásából még a fény sem képes kiszabadulni. Az általános relativitáselméletet leíró cikk megszületése után néhány héttel pedig a német asztrofizikus, *Karl Schwarzschild* felfedezte a relativitáselmélet egyenleteinek egy olyan megoldását, amely egy fekete lyukat ír le.

A fekete lyukakat leíró egyenletet azonban sokáig csupán matematikai érdekességnek tartották. Az ugyanis, hogy egy fizikai elmélet megengedi valaminek a létezését, még nem jelenti, hogy annak feltétlenül léteznie kell a valóságban is; végül mindig a kísérlet és a megfigyelés dönti el, hogy az elmélet melyik jóslata helyesek. Az általános relativitáselmélet egyenleteinek rengeteg igen abszurd megoldása is van, amelyekről nem feltételezzük, hogy léteznek a valóságban. Így voltak a fizikusok abban a korszakban a fekete lyukak létezésével is. Ezen állásponthoz az is hozzájárult, hogy a Schwarzschild által talált megoldás egy igencsak idealizált eset: olyan térrészt ír le, amelynek közepén a tér görbülete végtelen, de semmilyen anyag nincs benne, és az így leírt fekete lyuk nem is forog. Joggal merülhetett fel, hogy amint anyag hullana egy ilyen testbe, rögtön érvényüket vesztenék az egyenletek, így lehet, hogy egy ilyen fekete lyuk nem maradhatna stabil.

Roger Penrose-t az a kérdés foglalkoztatta az 1960-as években, hogy a fekete lyukak reális körülmények között is létrejöhetnek és fennmaradhatnak-e. Penrose fejlesztette ki azokat a matematikai és fizikai eszközöket, amelyek segítségével lehetővé vált ezen kérdések megválaszolása. Penrose elvetette a korábbi vizsgálatokban használt idealizálásokat, például hogy az összeomló csillag, amiből végül kialakul a fekete lyuk, tökéletesen gömb alakú, vagy azt, hogy a csillag egyáltalán nem forog. Így sikerült bebizonyítania azt, hogy ha az összeomló csillagban bárhol kialakul egy olyan sűrűségű rész, amely legendősen meg-

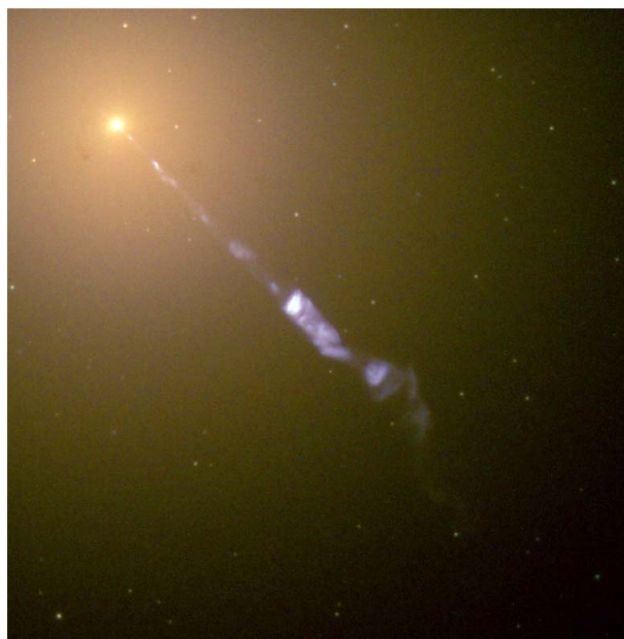
görbíti a téridőt ahhoz, hogy a fény se tudjon onnan kijutni (Penrose ezt nevezte el csapdázott felületnek), akkor ennek egyenes következménye, hogy egy szingularitás, vagyis egy végtelen görbületű térrész jön létre – ezért mindenképpen kialakul a fekete lyuk.

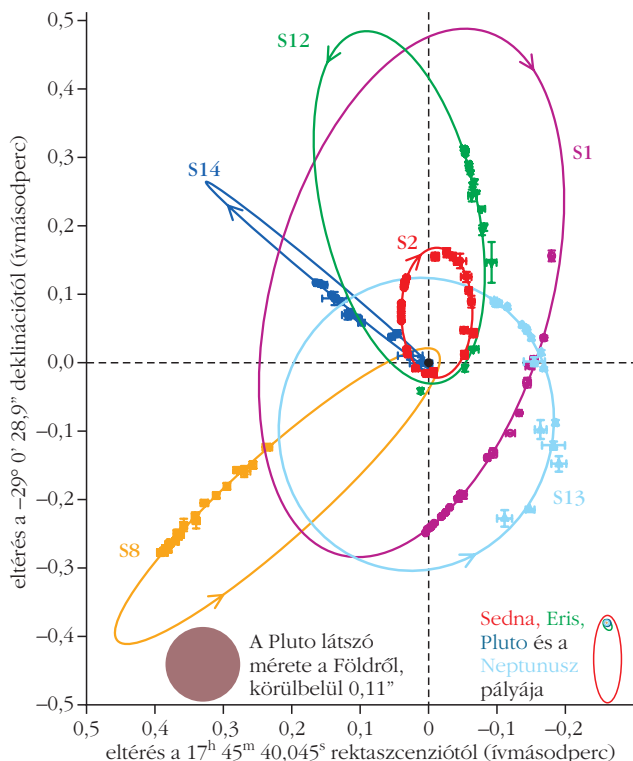
A 4. ábrán egy nem forgó fekete lyuk szerkezetét láthatjuk. A fekete lyuk közepén található a szingularitás, a fekete lyuk határát pedig az eseményhorizont – vagyis az a határ, ahol már akkora a tér görbülete, hogy onnan a fény sem képes kijutni – jelöli ki. Az eseményhorizontra úgy is gondolhatunk, mint ahol a tér és az idő helyet cserél egymással, ilyen módon a szingularitás nem egy pont a térben, hanem egy pillanat az időben – ennek megfelelően biztosan nem tudjuk elkerülni. Érdekes ennek következményein elgondolkodni. A hétköznapi életben két feltétele van annak, hogy valamilyen eseményre emlékezhessünk: egyrészt a múltban kellett megtörténnie, másrészt pedig legfeljebb olyan távol történhetett, hogy a fénynek ideje legyen onnan hozzánk eljutnia. Ha helyet cserél a tér és az idő, akkor ez a két feltétel is módosul: az eseménynek a szingularitástól távolabb kellett történnie, mint ahol most vagyunk, és a mostani időponthoz képest legfeljebb annyi idővel korábban vagy később kell megtörténnie, mint amennyi időnek a fényre szüksége lenne, hogy oda eljusson. Tehát az eseményhorizonton belül bizonyos jövőbeli eseményeket is láthatunk.

Észlelési bizonyítékok

A fekete lyukak valóságos létezésének bizonyításához – és nem csupán egy matematikai absztrakció levezetéséhez – egyet mindenképpen meg kellett figyel-nünk. 1918-ban *Heber Curtis* amerikai csillagász az

5. ábra. Az M87 galaxis magjából induló kilövellés (forrás: J. A. Birretta és mtsai, Hubble, NASA).





6. ábra. Néhány csillag pályája a Tejútrendszer központi fekete lyuka körül, a méreteket kétféle módon is szemléltetjük (forrás: Eisenhauer és mtsai., *ApJ* 628 (2005) 246–259).

M87 galaxist vizsgálva egy érdekes, egyenes vonalat fedezett fel, amely a galaxis középpontjából, annak síkjára merőlegesen indult ki, és attól távolodva egyre halványodott (5. ábra). Ő még nem tudhatta, hogy egy szupernagy tömegű fekete lyukból származó relativisztikus kilövellést lát, amelynek hossza a Tejútrendszer átmérőjének százszorosa is lehet, energiája pedig akár 10 nagyságrenddel is nagyobb lehet az egész Tejútrendszerénél!

1932-ben *Karl Jansky* amerikai fizikus egy olyan erős rádióforrást talált az égen, amelyik még a Napnál is intenzívebben sugárzott. Világos volt számára, hogy egy ilyen erős rádiósugárzás nem származhat hőmérsékleti sugárzásból, hiszen ekkor a látható fény tartományában is túl kellene ragyognia a Napot, tehát a forrás nem lehet csillag. A sugárzás azonban nagyon kis területről érkezett, így nem lehetett szó egy egész galaxis együttes sugárzásáról sem. Ezeket a forrásokat később kvazároknak nevezték el, ami a „csillagszerű rádióforrás” angol rövidítése. 1963-ban sikerült megmérni a Szűz csillagképben lévő 3C 273 nevű kvazár távolságát, amely több mint 2 milliárd fényévként adódott, így ki lehetett zárni, hogy a mi galaxisunkban helyezkednek el a kvazárok.

Mindezeket a jelenségeket az 1970-es években egy közös modell segítségével sikerült megmagyarázni. A modell szerint a források olyan galaxisok, amelyek közepén egy szupernagy tömegű fekete lyuk található, ami egy akkréciós (tömegbefogási) korongból folyamatosan anyagot nyel el. Az akkréciós korongban nagyon felforrósodik az anyag, így intenzív rönt-

gensugárzást bocsát ki. A hatalmas mágneses terek révén bizonyos esetekben a szinkrotronmechanizmus segítségével a fénysebességhez közeli sebességekre gyorsulnak az elektronok, amelyek az akkréciós korong síkjára merőlegesen két kilövellés formájában hagyják el a galaxist, miközben intenzív rádiósugárzást bocsátanak ki.

Azokat a galaxisokat, amelyek magjában ezek a folyamatok játszódnak le, aktív galaxisoknak nevezük. Egyre több aktív galaxist felfedezve világossá vált, hogy számos galaxis közepén fekete lyukat találunk. De vajon igaz ez az olyan nem aktív galaxisokra is, mint a Tejútrendszer? Az 1960-as évekre világossá vált, hogy a Tejútrendszer közepe is kibocsát rádióhullámokat, bár az aktív galaxisokénál kevésbé intenzíven. Egyre fontosabbá vált tehát a Sagittarius A*, vagyis galaxisunk rádióhullámokat sugárzó csillagszerű központi objektumának vizsgálata.

Az 1990-es évekig kellett várni, mire a csillagászati műszerek elég érzékennyé váltak galaxisunk központi régiójának vizsgálatára. Reinhard Genzel és Andrea Ghez egy-egy projektet indított a régió feltérképezésére, amelynek során számos új technológiát és műszert fejlesztettek ki, hogy átláthassanak a Tejútrendszer közepét eltakaró csillagközi porfelhőkön. A kutatócsoportoknak a legnagyobb műszerekre, a chilei VLT (Very Large Telescope) és a hawaii Keck Observatórium 8-10 méteres átmérőjű távcsöveire volt szükségük a felfedezéshez.

A két kutatócsoport műszerei ugyan képet nem voltak képesek alkotni a központi fekete lyukról, de olyan nagy felbontást sikerült elérniük, amekkorával az egyes csillagok mozgását észlelheték a galaxis központi régiójában. Közel 30 csillag mozgását követték nyomon éveken keresztül, hogy pályáikat pontosan megállapíthassák. Az egyik csillag, amelyet S2-nek kereszteltek el, mindössze 16 év alatt kerüli meg a központi objektumot elliptikus pályáján (6. ábra); ezzel szemben a Napnak például 200 millió évre van szüksége egy kör megtételéhez. A csillagok pályáinak méretéből és a keringési periódus értékéből meghatározható a központi objektum tömege. A mérések alapján az objektum tömege a Napénak közel négymilliószorosa, és ez a hatalmas tömeg a Naprendszerénél kisebb térrészben helyezkedik el, így nem lehet más a galaxis közepén, csakis egy fekete lyuk.

Roger Penrose eredményei megmutatták, hogy a fekete lyukak léte az általános relativitáselmélet közvetlen következménye, és rámutatott arra is, hogy milyen különös jelenségek játszódnak le egy fekete lyuk belsejében. A fekete lyukak elméletében azonban továbbra is sok kérdés vár válaszra. Az előrelépésben sokat segíthetnek a megfigyelési eredmények. Például az olyanok, amelyekkel Reinhard Genzel és Andrea Ghez bebizonyították, hogy saját galaxisunk közepén is egy ilyen fekete lyuk rejtőzik. Az utóbbi években ráadásul egyre újabb módszerekkel vagyunk képesek ezeket a különleges objektumokat vizsgálni.