

2020. Nobel-díjak 2.

FEKETE LYUKAK KUTATÓI KAPTÁK A FIZIKAI NOBEL-DÍJAT 2020-BAN

RESEARCHERS OF BLACK HOLES RECEIVED THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS IN 2020

Kovács József

a fizikai tudomány kandidátusa, tudományos főmunkatárs, Eötvös Loránd Tudományegyetem
Gothard Asztrofizikai Observatórium, Szombathely
jkovacs@gothard.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

2020-ban az Univerzum legezotikusabb objektumaival, a fekete lyukakkal kapcsolatos kutatásokat díjazták fizikai Nobel-díjjal. Az elismerést fele arányban elnyerő *Roger Penrose* (University of Oxford, Egyesült Királyság) munkásságának legfontosabb eredménye annak kimutatása, hogy az általános relativitáselmélet egyenleteiből természetes módon következik a fekete lyukak létezésének szükségessége. A díjjal egynegyed-egynegyed arányban jutalmazott *Reinhard Genzel* (Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik) és *Andrea Ghez* (University of California, Los Angeles) pedig a galaxisunk középpontját elfoglaló szupernagy tömegű fekete lyuk felfedezéséhez vezető munkájukkal érdemelték ki az elismerést. A cikkben a Nobel-díj Bizottság hivatalos anyaga alapján röviden bemutatjuk az eredmények hátterét.

ABSTRACT

The Nobel Prize in Physics 2020 focused on black holes which are among the most enigmatic objects in the Universe. The Prize was divided, one half awarded to Roger Penrose ‘for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity’, the other half jointly to Reinhard Genzel and Andrea Ghez ‘for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy’. This article provides a short presentation of the background behind the results based on the official material by the Nobel Prize Committee.

Kulcsszavak: fekete lyukak, általános relativitáselmélet, Tejútrendszer

Keywords: black holes, general relativity, Milky Way galaxy

A 21. század első két évtizede sok szempontból a csillagászat történetének egyik legizgalmasabb szakasza. Ezt jelzi az is, hogy a fizikai Nobel-díjat az elmúlt tíz évben négy alkalommal is csillagászati eredményekért ítélték oda. Ráadásul Andrea Ghez személyében ismét nő részesült az elismerésben, a díj történetében negyedik alkalommal. Roger Penrose pályafutása nemcsak eredményekben, de elismerésekben is gazdag. 1988-ban elnyerte a fizikai Wolf-díjat, 1994-ben pedig II. Erzsébet királynő lovaggá ütötte, így Nobel-díja egyáltalán nem meglepetés. Ahogyan valójában nem az a másik két díjazott esetében sem, akik a Nobel-díj előtt 2012-ben a rangos Crafoord-díjat érdemelték ki kutatásaikkal.

RÖVID FEKETELYUK-TÖRTÉNELEM AZ 1960-AS ÉVEK KÖZEPÉIG

A fényt is csapdába ejtő objektumok létezésének lehetősége már a 18. század végén felmerült *Pierre-Simon Laplace* francia matematikus, illetve *John Michell* angol lelkész és természetfilozófus munkáiban. Ők azt vizsgálták, elképzelhető-e olyan objektum, amelynek felszínén a szökési sebesség nagyobb, mint a fény sebessége. Michell kiszámolta, hogy a Napéval megegyező sűrűségű, ám annál ötszázszor nagyobb sugarú csillag gravitációs terében már a fény is csapdába esne. Laplace hasonló, matematikailag részletesen kifejtett elgondolásában a Földével megegyező, azaz a Napénál kb. négyszer nagyobb sűrűségű csillagot vizsgált, és azt kapta, hogy a csapdázáshoz méretének a Napét 250-szeresen kell meghaladnia. Számításait természetesen teljes egészében a newtoni mechanika keretei között végezték, az objektum méretét azon feltételből meghatározva, hogy felszínén egy próbarészecske teljes energiája (a mozgási és a gravitációs potenciális energia összege) nulla legyen. Michell és Laplace objektumait ma szupernagy tömegű fekete lyukaknak hívjuk.

A következő jelentős lépés *Albert Einstein* általános relativitáselméletének 1915. novemberi megjelenése után történt, és *Karl Schwarzschild* német csillagász nevéhez fűződik, aki halála előtt néhány hónappal az Einstein-féle téregyenletek megoldásával egy gömbszimmetrikus, nem forgó tömeg körüli téridő szerkezetét írta le (1916). A Schwarzschild-téridőben a metrikát jellemző ívelemnégyzetet megadó kifejezésnek két kritikus pontja is van, ahol egyes tagok vagy nullák, vagy divergensek lesznek. Egyik az $r = 0$, a másik pedig az $r = R_S = 2GM/c^2$ helyen, ahol G a newtoni gravitációs állandó, M az objektum tömege, c a fény sebessége vákuumban, R_S pedig az ún. *Schwarzschild-sugár*. Az elsőről később bizonyították, hogy az valódi *szingularitás*, ahol a görbület végtelen nagygyá válik, míg a második – ahogyan *Georges Lemaître* abbé 1933-ban kimutatta – csak a koordináta-rendszer választásából adódik, azaz egy *helyi* megfigyelő az $r = 0$ esettel ellentétben az R_S sugárnál nem tapasztalna semmi különösét. Az R_S -nek *globális* jelentősége van: a Laplace és Michell által meghatározott sugárral

egyébként nem véletlenül megegyező kifejezés által kijelölt felület az *esemény-horizont*. Ha valami ezen belülré kerül, az a külvilág számára végleg elveszik, mint azt például 1939-ben *Robert Oppenheimer* és tanítványa, *Hartland Snyder* is helyesen felismerte egy gömbszimmetrikus anyagfelhő összeomlásának (kollapszusának) vizsgálatakor. A gömbszimmetria feltételezése erős megkötésnek tűnt, így a második világháborút követően sokan gondolkoztak azon, hogy ha a kollapszus nem ilyen, akkor az hogyan vezethet egyáltalán a szingularitás kialakulásához. Nem is beszélve a kvantummechanikai effektusokról, amelyekről a hatvanas évek elején például *John Wheeler* amerikai fizikus úgy gondolta, hogy megakadályozhatják a teljes összeomlást, ezzel pedig a szingularitás kialakulását.

ELSŐ ÉSZLELÉSI EREDMÉNYEK: A KVAZÁROK FELFEDEZÉSE

Az 1960-as évek elején az addig elméleti síkon zajló fejlődést észlelési téren is előrelépés követte. Ez a kvazárok felfedezése volt. Az égboltnézetek során először kompakt rádióforrásokként detektált objektumok optikai megfelelőit megtalálva különös dolgok kezdtek körvonalazódni. Az áttörést egy holland csillagász, *Maarten Schmidt* (1963) érte el, aki a 3C 273 jelű kvazárt extragalaktikus forrásként azonosította, amelynek távolsága spektrumvonalainak vöröseltolódásából nagyjából 2,5 milliárd fényév. A távolság és a fényesség alapján azonban a pontos forrás energiakibocsátása elképesztően nagy, az egész Tejútrendszerét ezerszeresen meghaladónak adódott. Az első felfedezést gyorsan követte a többi, így azt is megállapították, hogy a kozmológiai távolságokban elhelyezkedő objektumok fényessége gyors, akár napos vagy néhány órás időskálájú véletlenszerű változásokat mutat, ami szintén kis kiterjedésű, ám nagyon nagy energiájú forrásokra utalt. A csillagászok felismerték, hogy a kvazárok valójában a galaxisok középpontjában elhelyezkedő objektumok, ún. aktív galaxismagok, amelyek energiakibocsátása több nagyságrenddel haladja meg teljes gazdagalaxisukét. Először azt gondolták róluk, hogy több millió naptömegű csillagok lehetnek, de hamar világossá vált, hogy ekkora csillagok nem létezhetnek, így más magyarázat után kellett nézni.

PENROSE: ÚJ MATEMATIKAI MÓDSZEREK A FEKETE LYUKAK VIZSGALATÁBAN

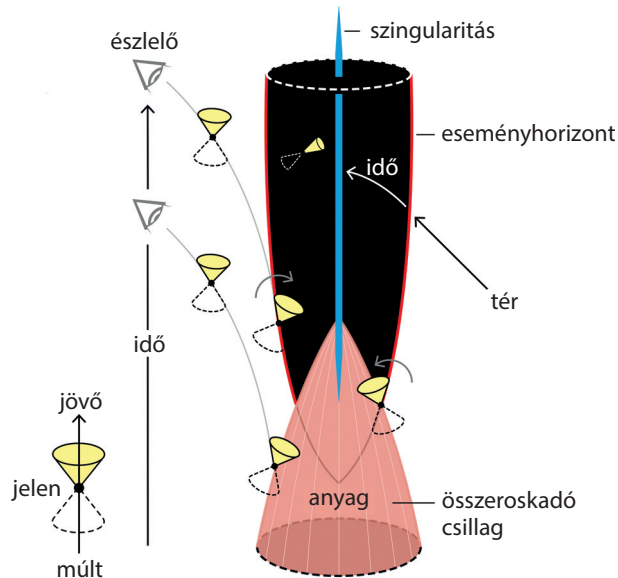
Schmidt felfedezése arra készítette Wheelert, hogy újra vizsgálni kezdje a gravitációs kollapszus fizikáját, és a kérdéstről Roger Penrose véleményét is kikérte, aki 1964-ben kezdett el gondolkodni a problémán, mégpedig a *Roy Kerr* által 1963-ban talált, forgó rendszerekre vonatkozó megoldás ismeretében, amely to-

vábbra sem zárta ki azt a lehetőséget, hogy az aszimmetriák megakadályozhatják a szingularitások létrejöttét. Penrose tehát a gömbszimmetria feltételezése nélkül, mindössze pozitív energiasűrűséget megkövetelve kezdte el tanulmányozni a kollapszus kérdéskörét. Ehhez új matematikai módszereket kellett kidolgoznia, kihasználva a topológia nyújtotta lehetőségeket. A Penrose (1965) által bevezetett egyik legfontosabb újítás a *csapdázott felület* fogalma. Ez olyan zárt kétdimenziós felület a négydimenziós téridőben, amelyre merőlegesen érkező fénysugarak jövőbeni trajektóriái összetartanak. Gömbszimmetrikus esetben minden, R_S -nél kisebb sugarú gömbfelület csapdázott. A Schwarzschild-téridőben

az eseményhorizontot sugárirányban befelé átlépve a tér és az idő szerepet cserél, és a gömbi koordinátákban a középpont felé mutató „befelé” az idő lesz. Az eseményhorizont mögül nem lehet kijutni, mivel az időben visszafelé történő haladást feltételezne. A csapdázott felület még drámaibb következménye, hogy az idő múlása elkerülhetetlenül sodorja a megfigyelőt a sugárirányú középpont, a szingularitás felé. Csapdázott felületek forgó fekete lyukak esetében a szimmetriaviszonyoktól függetlenül is fellépnek. Miután felismerte az új fogalomban rejlő lehetőségeket, Penrose 1965-ben hozzálátott annak bizonyításához, hogy ha a csapdázott felület egyszer létrejött, pozitív energiasűrűség mellett az általános relativitáselmélet keretei között a kollapszus és a szingularitás kialakulása nem kerülhető el. Kidolgozott egy módszert arra is, hogy a fekete lyukak körüli téridőtartományt megjelenítse. Az ún. konformális leképezéseken alapuló Penrose-diagramok a görbült téridő tanulmányozásának nélkülözhetetlen eszközei (1. ábra). Később Penrose és *Stephen Hawking* (1970) azt is kimutatták, hogy észszerű feltételezések mellett az ősrobbanásmodellben sem kerülhető el egy múltbeli szingularitás léte. Penrose felfedezésének köszönhetően új korszak kezdődött a fizikában és a csillagászatban. Michell és Laplace különös sötét objektumai valójában a gravitációról alkotott modern elképzelésünk mélyén gyökereznek. Az egzotikus gravitációs anomáliákra *Robert Dicke* amerikai fizikus használta először a *fekete lyuk* elnevezést egy 1960-as princetoni előadás során, elterjedésében, népszerűvé válásában pedig Wheeler szerzett elévülhetetlen érdemeket.



Roger Penrose
Cirone-Musi, Festival della Scienza, 2011
(licenc: CC BY-SA 2.0)



1. ábra. A gravitációs összeomlást és a szingularitás elkerülhetetlen kialakulását magyarázó téridődiagram Penrose 1965-ös, a Nobel-díj odaítélését megalapozó cikkének ábrája alapján.

A fénykúpok a fénysugár útját mutatják a múltból a jövőbe. A kollapszus és a fekete lyuk kialakulása során az eseményhorizontot keresztező fénykúpok befelé, a szingularitás irányába fordulnak. Egy külső megfigyelő valójában azonban soha nem fogja észlelni azt, hogy a fénysugarak elérik az eseményhorizontot, számára ez csak aszimptotikusan történik meg
(© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

ELMÉLET ÉS MEGFIGYELÉS: A FEKETE LYUKAK RÉSZLETES MODELLJE

A 3C 273 extragalaktikus természetének felismerése után a kvazárok magyarázatára kezdett elfogadottá válni a szupernagy tömegű fekete lyukakba tömegbefogási (akkréciós) korongokon keresztül behulló anyag sugárzása. Ez tulajdonképpen kiterjesztése a csillagtömegű fekete lyukakba hasonló módon beáramló anyag röntgen- és rádiósugárzásának magyarázatára kifejlesztett, szintén Nobel-díjjal elismert modellnek (*Riccardo Giacconi, 2002*). Az energiakibocsátás mértékének magyarázatához hatalmas tömegű vonzócentrumokat kellett feltételezni, a 3C 273 esetében egymilliárd naptömeget. A részletes elméleti leírást *Donald Lynden-Bell* (1969) kezdte kidolgozni, felvetve azt is, hogy ilyen objektumok talán minden galaxis centrumában megtalálhatók. Ha így van, akkor a Tejútrendszer sem lehet kivétel, így két évvel később Lynden-Bell és *Martin Rees* (1971) már arról értekeztek, hogyan lehetne kimutatni ezt a kompakt objektumot. A fekete lyuk középpontjától $3R_S$ távolságban húzódó legbelső stabil körpályán belülre

kerülő anyag elkerülhetetlenül a fekete lyukra fog hullani, miközben nyugalmi tömege akár a felének megfelelő energiát sugároz ki, így az elképzelés a kvazárok óriási energiakibocsátásának plauzibilis magyarázatává vált.

1969-ben Penrose arra is rájött, hogy a forgó (Kerr-féle) fekete lyukakból más módon is lehet energiát kinyerni. A forgó objektumok magukkal ragadják a téridőt, ez a Lense–Thirring-effektus. A Föld esetében a jelenség elhanyagolható, a forgó fekete lyukak közelében azonban drámaivá válhat. Az eseményhorizont közelében húzódó *ergoszféra* nevű felületen belül a hatásnak semmi nem tud ellenállni. Ha a fekete lyuk például az óramutató járásával megegyező irányban forog, ugyanebben az irányban fog mozogni vele együtt az ergoszférán belüli megfigyelő is. Penrose gondolat kísérletében az ergoszférán belülré juttatott, és ott két részre szakadó lövedék egyik darabja az eseményhorizont mögé kerül, míg a másik, elhagyva az ergoszférát, megszökik a fekete lyuktól. Kimutatta, hogy az elszökő darab energiája nagyobb lehet, mint az eredeti lövedéké, a többletet pedig a forgó fekete lyuktól kapja (Penrose–Floyd, 1971). Hawking nyomán már tudták, hogy egy fekete lyuk eseményhorizontjának területe nem csökkenhet, ezért egy Schwarzschild-féle fekete lyuknál a tömeg sem, mert a kettő arányos egymással. Egy Kerr-féle fekete lyuknál a helyzet bonyolultabb, itt a tömeg akkor is csökkenhet, ha a felület nő, lehetővé téve így a Penrose által felvázolt folyamatot. 1977-ben *Roger Blanford* és *Roman Znajek* annak az elméletét is kidolgozták, hogy mágneses tér jelenlétében a forgó fekete lyukak hogyan tudnak gigantikus dinamóként energiát termelni, és a mágneses térrel nagyon gyors anyagkilövelléseket fenntartani.

SZUPERNAGY TÖMEGŰ FEKETE LYUKAK VAGY SŰRŰ CSILLAGHALMAZOK?

Az 1990-es évek elején a távcsövek szögfelbontása még nem tette lehetővé, hogy a Tejútrendszer középpontjában feltételezett szupernagy tömegű fekete lyuk Schwarzschild-sugarának megfelelő térbeli távolságot feloldjunk (a helyzet még ma is ez), nem is beszélve más galaxisok hasonló, bár adott esetben sokkal nagyobb tömegű objektumairól. (Utóbbi esetben már történt változás, lásd az M87 elliptikus galaxis középpontjáról az EHT-antennarendszerrel végzett nagy bázisvonalú rádió-interferometriai – VLBI – mérések alapján 2017-ben alkotott és 2019-ben nyilvánosságra hozott képet – lásd Dálya, 2020.) A körülötte keringő csillagok pályáinak vizsgálata azonban segíthet a gravitációs vonzócentrum tömegének meghatározásában. Ennek ismeretében aztán fel lehet tenni a kérdést, hogy egyetlen kompakt forrásról, esetleg csillagok vagy neutroncsillagok, fehér törpék, kis tömegű fekete lyukak nagyon sűrű halmazáról van-e szó. A fekete lyukak tömegükből és a $3R_S$ sugáron belüli térfogatból klasszikus módon meghatározott *ekvivalens sűrűsége* a tömeg négyzetével fordítottan arányos. Egy négymil-

lió naptömegű fekete lyukra ez a víz sűrűségének csak negyvenszerese. Azonban a csillaghalmazok méretskálájára váltva ez már Avogadro-számnyi naptömeget jelent köbparszekenként, ami 18 nagyságrenddel nagyobb, mint a Tejútrendszer legsűrűbb, csillagokból álló stabil objektumai, a gömbhalmazok sűrűsége. A szupernagy tömegű fekete lyukak létezésének bizonyítását szolgáló általános észlelési stratégia tehát a galaxisok legbelső régióiban fennálló tömegsűrűség meghatározását, majd ennek az ismert csillaghalmazok sűrűségével történő összevetését célozta. 1990-es felbocsátása, majd a főtükör hibájának orvoslása után a Hubble-űrtávcső az aktív galaxismagok vizsgálatának is hatékony eszköze lett, többek között az M87 centrumát is tanulmányozták vele, és már akkor megállapították, hogy egy 18 parszek méretű térrészen belül néhány milliárd naptömeg összpontosul. 1994-ben azonban még nem tudták teljes bizonyossággal kizárni azt, hogy az észlelt gravitációs potenciál egy nagy sűrűségű, ám halvány csillaghalmaztól származik. Az erre vonatkozó első egyértelmű bizonyítékot szintén VLBI-mérések szolgáltatták, amelyek szerint az NGC 4258 jelű galaxisban egy közel 40 millió naptömegű központi objektum található, a centrumában a tömegsűrűség pedig néhány milliárd naptömeg köbparszekenként (1 parszek: 3,26 fényév), így nagy sűrűségű csillaghalmazról szó sem lehet.

A TEJÚTRENSZER CENTRUMA

A Tejútrendszer centrumának néhány parszekes környezete csillagokkal zsúfolt, forró gázzal kitöltött térrész. A Galaxis középpontját a Sagittarius A* (Sgr A*) jelű kompakt rádióforrás definiálja, amelynek távolsága kb. 27 ezer fényév. Ha ez valójában egy szupernagy tömegű fekete lyuk, akkor a közelében keringő csillagok tipikus pályája olyan lesz, mint a bolygóké a Naprendszerben, azaz a sebesség a vonzócentrumtól mért távolság négyzetgyökével fordítottan arányos. Ilyen Kepler-pályák azonban nem alakulhatnak ki, ha a központi tömeget térben kiterjedt sűrű csillaghalmaz testesíti meg, ilyenkor ugyanis a körülötte keringő objektumok sebessége a csillaghalmaz sűrűségprofiljától függően a távolsággal nő, vagy állandó.

A Reinhard Genzel, illetve Andrea Ghez által vezetett két kutatócsoport közel három évtizede követi a Tejútrendszer középpontja körül keringő csillagok mozgását, Genzel és munkatársai az Európai Déli Obszervatórium (ESO) chilei óriástávcsöveivel, míg Ghez és kollégái a hawaii Keck-teleszkópokkal (Eckart–Genzel, 1996, 1997; Genzel et al., 2003, 2010; Ghez et al., 1998, 2003, 2008; Gillesen et al., 2009a,b). A galaktikus centrumot sajnos sűrű porfelhők fedik el előlünk, amelyek az optikai tartományban akkora elnyelést okoznak, hogy a Föld felé egymilliárd fotonból csak egy jut át rajtuk, másként megfogalmazva az objektumok fényességét 22-23 magnitúdóval csökkentik. Ezért a két kutatócsoport



Andrea Ghez
(Public domain NSF, Courtesy of the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation via Wikimedia)



Reinhard Genzel
(CC BY-SA 3.0 Wiki)

vizsgálatait a közeli infravörös tartományban, a 2,2 mikrométer körüli keskeny sávban végezte. Ilyen hullámhosszakon a fotonok szabad úthossza jóval nagyobb, így itt az intenzitáscsökkenés csak egy nagyságrend, fényességben három nagytudónál kevesebb.

Van azonban egy másik probléma is. Egyedi csillagok megkülönböztetéséhez a zsúfolt galaktikus centrumban kivételesen jó térbeli felbontás szükséges. A K sávban egy 10 méteres távcső elméleti felbontóképessége 0,05 ívmásodperc, ami kb. 2,5 fénynap távolságnak felel meg a Tejútrendszer centrumában. A földi légkörben fellépő turbulenciák azonban a másodpercnél rövidebb időskálán torzítják a légkör határán még párhuzamos hullámfrontokat, egy korongba szétkenve így a csillagok képét, ezért az elméleti felbontóképesség nem érhető el, még a legjobb észlelőhelyeken is ennek nagyjából tízszerese a legkisebb érték. A feladat tehát az volt, hogy a légkör torzító hatását a lehető legkisebbre csökkentsék. A két csoport által erre a célra kifejlesztett technikai megoldások alapvető szerepet játszottak a sikerben.

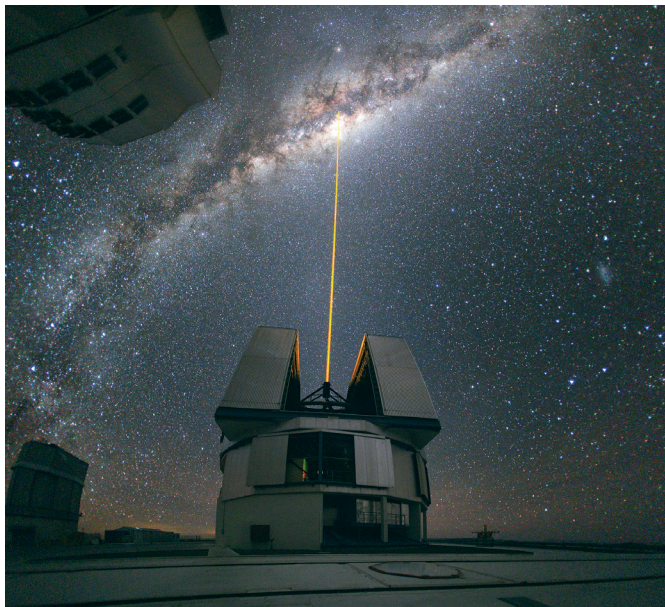
Genzel és csoportja a kilencvenes évek elején az első mérésekhez az ESO nem sokkal korábban üzembe állított 3,5 méteres Új Technológiájú Távcsövet (NTT) és annak SHARP-műszerét használta. A légkör hatásának csökkentésére egy új eljárást (*speckle imaging*, *feltinterferometria*) dolgoztak ki, amelynek lényege,

hogy egy rendkívül érzékeny detektorral nagyon rövid, mindössze néhány tizedmásodperces felvételeket készítenek, majd ezeket megfelelően eltolva összeadják. Az így kapott végső kép felbontása már nagyon közel van a berendezés elméleti felbontóképességéhez. A képeken kimért csillagpozíciók és az azokból származtatott sebességek alapján már ekkor azt a következtetést vonták le, hogy a sebességprofilok a kepleri pályáknak felelnek meg. Ebben az időszakban hasonló technikával dolgozott Ghez és csapata is a Mauna Kea Observatóriumban működő 10 méteres Keck-teleszkópokkal. Az eljárás viszont a nagyon rövid expozíciós idők miatt csak fényes csillagok esetében alkalmazható. Egy újabb úttörő technológiai fejlesztés azonban ezt a problémát is orvosolta.

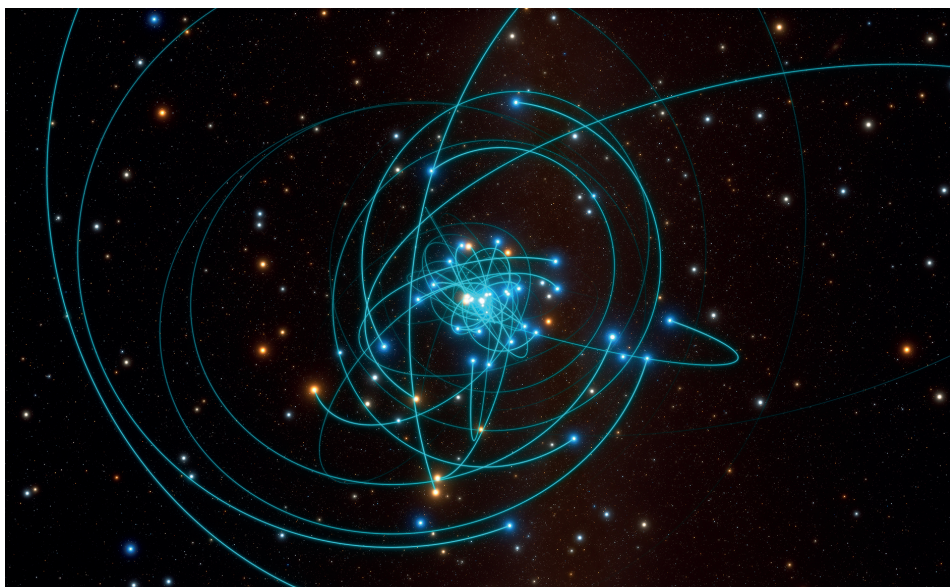
ADAPTÍV OPTIKA: EGYEDI CSILLAGOK PÁLYÁINAK KÖVETÉSE

Az adaptív optika alkalmazásának lehetősége már az 1950-es években felmerült, a megvalósítás technikai feltételei azonban csak a 2000-es évek elejére értek be, és vált a technológia Ghez és munkatársai számára elérhetővé a Keck-teleszkópok, illetve Genzel és csoportja számára az ESO akkoriban új távcsőegyüttese, a négy 8,2 méteres teleszkópból álló Nagyon Nagy Távcső (VLT) és műszerei (például NACO) esetében. Az adaptív optikai rendszerekben egy fényes referenciaobjektum képét folyamatosan, másodpercenként több százszor monitorozzák, és annak aktuális állapota alapján pozitív visszacsatolással egy segédtükrök alakját mindig úgy deformálják, hogy az emiatt fellépő képtorzulás éppen kompenzálja a légkör negatív hatását. Így hosszú expozíciós idők, ezáltal pedig halványabb csillagok is elérhetők, gyakorlatilag az optikai rendszer elméleti felbontóképességével. A technológia további érdekessége, hogy ha a látómezőben nincs kellő fényességű referenciacsillag, akkor azt mesterségesen hozzák létre. A nátrium D vonalára hangolt lézerekkel a légkörben kb. 90 km magasságban nagyobb számban jelen lévő nátriumatomokat gerjesztik, amelyek a gerjesztési energiát kisugározva pontszerű műcsillagot hoznak létre az adott magasságban (2. ábra). A technológia segítségével a csillagok színeképe is pontosabban tanulmányozható, így a vetületi sebességeik mellett látóirányú sebességeik is meghatározhatók.

A galaktikus centrum közvetlen közelében keringő csillagok közül mindkét csoport alaposan tanulmányozta az S2 jelű objektumot, amely közel 16 éves periódussal járja körbe az Sgr A*-ot. A csillag pályája nagyon elnyúlt, excentricitása 0,88, legutóbb 2018 májusában járt legközelebb az Sgr A*-hoz mintegy 17 fényóra (125 csillagászati egység) távolságban. A pálya és az adatok elemzéséből kiderült, hogy a gravitációs vonzócentrum kb. 4 millió naptömegű, és az Sgr A* kompakt rádióforrás pozíciójától 0,002 ívmásodperc szögtávolságnál biztosan nincs messzebb, illetve látható elmozdulása sem detektálható. A VLT interferometrikus üzemmódját (VLTI) is kihasználó, így húszmilliomod ívmásodperc felbontást

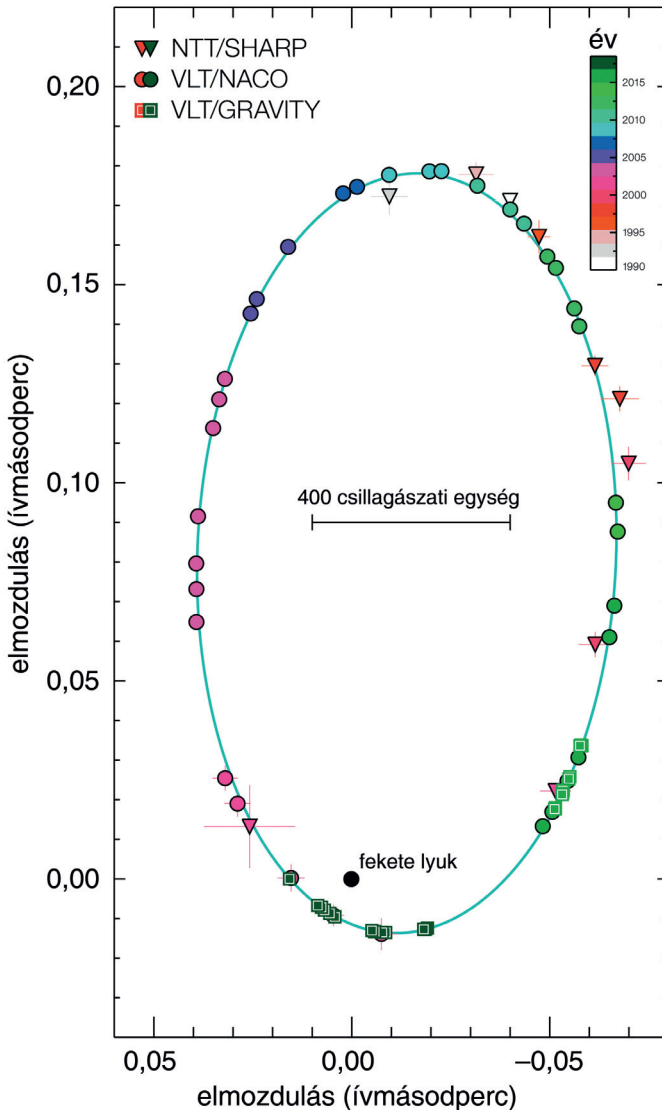


2. ábra. Az ESO VLT távcsőegyesítésének Yepun teleszkópjával a Tejútrendszer centrumát észlelik. A képen jól látszik az adaptív optikai rendszer fontos eleme, a referenciaként szolgáló műcsillagot gerjesztő sárga lézernyaláb (ESO/Y. Beletsky)



3. ábra. A Tejútrendszer centrumában levő szupernagy tömegű fekete lyuk körül keringő csillagok pályáinak megfigyeléseken alapuló szimulációja (ESO/L. Calçada/spaceengine.org)

lehetővé tevő legújabb megfigyelések alapján (GRAVITY-műszer) már az S2 pozíciójában két egymást követő éjszakán bekövetkező változást is ki lehet mérni, de sikerült kimutatni a pálya relativisztikus precesszióját is, mivel a megfigyelésekkel lefedett pályáiv már egy keringésnél hosszabb (3–4. ábra).



4. ábra. Az S2 jelű csillag pályája a Tejútrendszer középpontját uraló szupernagy tömegű fekete lyuk körül 25 évet átfogó észlelési anyag alapján. A csillag keringési periódusa 16 év, legutóbb 2018 májusában járt legközelebb a fekete lyukhoz (ESO/MPE/GRAVITY Collaboration)

Az észlelési eredményekkel legjobban összeegyeztethető modell az, hogy a Tejútrendszer centrumában egy szupernagy tömegű fekete lyuk foglal helyet. Az elképzelést az ugyanezen pozícióban a közeli infravörösben és a röntgentartományban időről időre bekövetkező felvillanások is alátámasztják, amelyek a szupernagy tömegű fekete lyuk körüli tömegbefogási korongban fellépő instabilitások következményei. Szintén VLTI-mérések alapján a felvillanások forrása a fénysebesség mintegy harmadával kering 3–5 R_S távolságban a központi objektum körül, ha azt egy 4 millió naptömegű forgó fekete lyuknak tekintjük, így ezek a megfigyelések is megerősítik azt, hogy a Tejútrendszer központi objektuma egy szupernagy tömegű fekete lyuk. Bár erről még nem sikerült közvetlen képet alkotnunk, mint az M87 centrumát uraló gigászról, de bízhatunk benne, hogy a technika fejlődésével hamarosan saját szupernagy tömegű fekete lyukunk árnyékát is megpillanthatjuk.

IRODALOM

- Dálya, G. (2020): A fekete lyukak megfigyelésének új módszerei. *Magyar Tudomány*, 181, 7, 902–908. DOI: 10.1556/2065.181.2020.7.7, https://mersz.hu/dokumentum/matud202007__10
- Eckart, A. – Genzel, R. (1996): Observations of Stellar Proper Motions near the Galactic Centre. *Nature*, 383, 6599, 415–417. DOI: 10.1038/383415a0, <https://www.nature.com/articles/383415a0>
- Eckart, A. – Genzel, R. (1997): Stellar Proper Motions in the Central 0.1 pc of the Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 284, 576–598. DOI: 10.1093/mnras/284.3.576, <https://bit.ly/2UnOwci>
- Genzel, R. – Eisenhauer, F. – Gillessen, S. (2010): The Galactic Center Massive Black Hole and Nuclear Star Cluster. *Reviews of Modern Physics*, 82, 3121–3195. DOI: 10.1103/RevModPhys.82.3121, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1006/1006.0064.pdf>
- Genzel, R. – Schödel, R. – Ott, T. et al. (2003): Near-infrared Flares from Accreting Gas around the Supermassive Black Hole in the Galactic Centre. *Nature*, 425, 6961, 934–937. DOI: 10.1038/nature02065, <https://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0310/0310821.pdf>
- Ghez, A. M. – Duchene, G. – Matthews, K. et al. (2003): The First Measurement of Spectral Lines in a Short-period Star Bound to the Galaxy’s Central Black Hole: A Paradox of Youth. *The Astrophysical Journal*, 586, L127–L131. DOI: 10.1086/374804, <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0302299.pdf>
- Ghez, A. M. – Klein, B. L. – Morris, M. et al. (1998): High Proper-motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 509, 678–686. DOI: 10.1086/306528, <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/306528/fulltext/>
- Ghez, A. M. – Salim, S. – Weinberg, N. N. et al. (2008): Measuring Distance and Properties of the Milky Way’s Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits. *The Astrophysical Journal*, 689, 1044–1062. DOI: 10.1086/592738, <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/592738/pdf>
- Gillessen, S. – Eisenhauer, F. – Trippe, S. et al. (2009a): Monitoring Stellar Orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, 692, 1075–1109. DOI: 10.1088/0004-637X/692/2/1075, <https://arxiv.org/pdf/0810.4674.pdf>
- Gillessen, S. – Eisenhauer, F. – Fritz, T. K. et al. (2009b): The Orbit of the Star S2 around SGR A* from Very Large Telescope and Keck Data. *The Astrophysical Journal*, 707, L114–L117. DOI:

- 10.1088/0004-637X/707/2/L114, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/707/2/L114/pdf>
- Hawking, S. W. – Penrose, R. (1970): The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 314, 529–548. <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.1970.0021>
- Lynden-Bell, D. (1969): Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars. *Nature*, 223, 5207, 690–694. DOI: 10.1038/223690a0
- Lynden-Bell, D. – Rees, M. J. (1971): On Quasars, Dust and the Galactic Centre. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 152, 461. DOI: 10.1093/mnras/152.4.461, <https://bit.ly/38K1Ekk>
- Penrose, R. (1965): Gravitational Collapse and Space-time Singularities. *Physical Review Letters*, 14, 3, 57–59. DOI: 10.1103/PhysRevLett.14.57, <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.14.57>
- Penrose, R. – Floyd, R. M. (1971): Extraction of Rotational Energy from a Black Hole. *Nature Physical Science*, 229, 6, 177–179. DOI: 10.1038/physci229177a0
- Schmidt, M. (1963): 3C 273: A Star-like Object with Large Red-shift. *Nature*, 197, 4872, 1040., DOI: 10.1038/1971040a0, <https://go.nature.com/32FOilm>
- Schwarzschild, K. (1916): Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einstein'schen Theorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Seite 189–196. http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW./1916/1916SPAW.....189S.pdf
- URL1: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>