

## A FEKETE LYUKAK

A fekete lyuk a téridő olyan tartománya, amelyik nem tud a szokásos módon kommunikálni a külső univerzummal. Kívülről részecskék bejuthatnak, de a lyukban olyan erős a gravitációs tér, hogy belülről semmi nem kerül ki. Mivel fény sem jöhet ki, kívülről a lyuk nem látható, egy fekete hézag az űrben. A tartomány határa a fekete lyuk felülete, amit eseményhorizontnak neveznek.

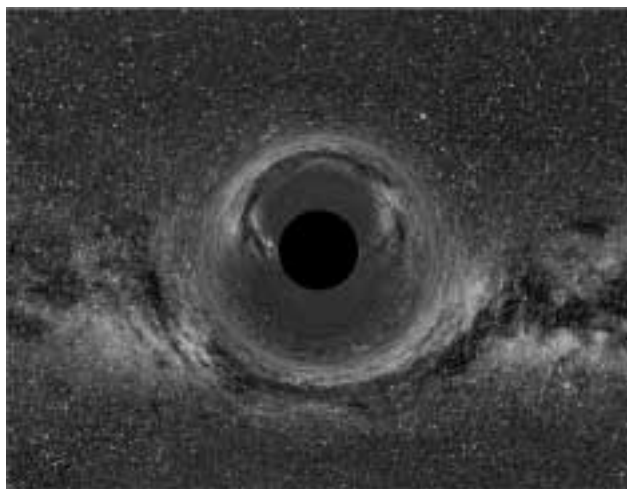
A fekete lyuk problémája a 20. század második felétől kezdve egyre jobban foglalkoztatja a kutatókat. Ennek az az oka, hogy a fekete lyuk vizsgálatához a kvantummechanikai és az általános relativitáselméleti ismereteink egyaránt szükségesek.

A kvantum fogalmát *Max Planck* vezette be a 20. század legelején, 1925-ben pedig *Werner Heisenberg* megalapozta a kvantummechanikát. Közismert *Albert Einstein* mondása, akinek nem tetszett a kvantummechanika: az Isten nem kockázik. A kvantummechanika továbbfejlesztése a kvantumtérelmélet, amely a kvantummechanikát és a speciális relativitáselméletet kapcsolja össze, és szubatomi szintig jó egyezést ad a kísérletekkel. A „legegyszerűbb”, gyakorlati szempontból talán legfontosabb kvantumtérelmélet, a kvantum-elektrodinamika, renormálható, azaz megmondja, kis skálán mi történik. Érvényes az ok-okozat sorrend, azaz egy jó elmélet. Az általános relativitáselmélet is jó elmélet: a speciális relativitáselmélet levezethető belőle, és az ok-okozat sorrend fennáll.

Jelenleg a kettő összekapcsolására jó elmélet még nem létezik, bár egyre komolyabb erőfeszítéseket tesznek erre a kutatók. Problémák például:

1. a kvantum-általános relativitáselmélet nem renormalizálható,
2. a Planck-skálán ( $10^{-33}$ ) nem látható ok-okozat sorrend.

Egy 10 naptömegnyi fekete lyuk, amint 600 km távolságról látszana, a háttérben a Tejútrendszer.



A fekete lyuk fogalma nem új gondolat. Már a 18. század vége felé jelezte az angol *John Michell*, hogy sűrű rendszerből semmi sem jöhet ki. *Laplace* a század végén *Newton* törvénye alapján kiszámolta, hogy ha a fény részecske (ezt a gondolatot támogatta *Newton*), milyen feltételek mellett jöhetne ki sűrű anyagból. A fekete lyukkal kapcsolatos első igazán tudományos elmélet azonban csak a 20. század elejéről származik, amikor *Karl Schwarzschild* az általános relativitáselmélet alapján definiálta a fekete lyuk horizontját, azaz meghatározta azt a sűrű tértartományt, amelyből semmi nem tud kijutni, ha abba belekerült. Ennek egyszerű az oka: a tömeg meggörbíti a teret, és nagyon sűrű anyag körül rendkívül görbe lesz a tér.

A fekete lyuk valós, létező fogalommal akkor vált, amikor 1931-ben *Subrahmanyan Chandrasekhar* meghatározta egy csillag stabilitásának kritikus tömegértékét (számítása szerint ez a Nap tömegének másfélszerese). A kisebb tömegű csillagokat az elektronok taszítása menti meg az összeroskadástól, de nagyobb tömegű csillagok összeroskadnak. Ezután *Arthur Eddington* azonnal megmondta, hogy ha ez igaz, létezik fekete lyuk. Később a neutronok és protonok szerepe, azaz a magfizika módosított ezen az elképzelésen (jóval sűrűbb neutroncsillagok is létezhetnek), de az alapgondolat megmaradt: a nagyon nagy tömegű csillagok összeroskadnak. A fekete lyukakkal az 1960-as évektől kezdtek el igazán foglalkozni, amikor rájöttek, hogy azok tényleg létezhetnek.

A fekete lyukak nagy tudósa a 20. században *Stephen Hawking* volt. Híres felfedezése a Hawking-sugárzás, amely azt bizonyította, hogy az alapdefiníció nem jó, valami mégis kijön a lyukból. Ennek oka a kvantummechanika.

Hawking érvelése szerint az üres tér a kvantummechanika törvényei szerint soha nem teljesen üres, részecske-antirészecske párok keletkezhetnek benne, amelyek azonnal újra megsemmisülnek. Természetesen ez a párkeltés nem olyan, mint amelyet fizikai kísérleteinkben megszoktunk, ahol van elég energia: itt a pár összenergiája zérus, ami azt eredményezi, hogy az antirészecskéknek negatív energiájúaknak kell lenniük, ezért partnerüktől nem távolodhatnak nagyon el. A fekete lyuk környékén azonban a nagy gravitációs energia miatt nagyon nagy lesz a részecskék energiája, és így bekövetkezhet, hogy a pozitív energiájú részecske el tud távolodni a fekete lyuktól, miközben a negatív energiájú partnere beleesik abba. A kilépő részek sugárzását nevezik Hawking-sugárzásnak. A lyukba beleesett részecske a sűrű rendszerben azonnal talál ugyanolyan kvantumszámokkal jellemezhető partnert, mint az eltávozott párja volt, és azzal szétsugárzik. A sugárzás egyik következménye,

hogy a fekete lyuk energiája nagyon kicsit csökken. Egy egykilós, azaz  $10^{-27}$  méter sugarú fekete lyuk anyaga  $10^{-21}$  másodperc alatt teljesen eltűnik. A sugárzás nagyon nagy energiájú gammasugárzás lesz. A nagy lyukak sokkal lassúbb ütemben vesztek el az energiájukat, mint a kisebbek.

Vita volt a kutatók között, hogy ez a sugárzás képes-e információt közölni a rendszerről. Hawking fogadott kollégáival, hogy nem, mert az elvitt információ véletlenszerű, nem jól meghatározott. Három évvel ezelőtt azonban beismerte, hogy nincs igaza, és megadta az elvesztett fogadás tétjét: egy baseball-enciklopédiát.

## A fekete lyuk jellemzői

A fekete lyukat két asztrofizikailag fontos adat jellemzi: a tömege és az impulzuszórája (spinje), azaz a forgása. A gömb alakú, nem forgó fekete lyukat Schwarzschild-féle fekete lyuknak (SFL) nevezik, a forgót Kerr-féle fekete lyuknak (KFL), mert *Roy Kerr* volt az, aki a forgó test körül kialakult teret először leírta, és olyan megoldást talált, mely forgás nélküli esetben a Schwarzschild-féle leírásba megy át. A legtöbb fekete lyuk forog.

Az eseményhorizont SFL esetén gömb alakú és csak a tömegtől függ, KFL esetén forgási ellipszoid, a tömegtől és a spintől is függ. A lyuknak lehet töltése is, de asztrofizikailag az nem fontos.

## A fekete lyukak megfigyelése

Két fő típusa van a fekete lyukaknak:

1. kis fekete lyukak, tömegük kisebb, mint 8–10 naptömeg,

2. szupernagy tömegű fekete lyukak, amelyek a galaxisok közepében vannak, és a tömegük meghaladja a százezer, sőt millió naptömeget.

A kis tömegű fekete lyuk olyan csillag végállapota, amely végigment a csillagfejlődés különböző stádiumain, és a szupernóva-robbanás után még mindig túlságosan nagy tömege maradt, a csillaganyag nyomása nem tudott egyensúlyt tartani a gravitációval. Az ilyen fekete lyukat akkor könnyű megfigyelni, ha kettőscsillaghoz tartozik, és a két csillag egymáshoz közel kering egymás körül. Ilyenkor ugyanis egyrészt a fekete lyuk a partnerétől anyagot vonz magához, és a felszabadult energia kisugárzódik, másrészt megfigyelhető a partner rendkívül gyors keringése láthatatlan társa körül (a Cygnus X-1 körül 5,6 nap alatt kering a kísérője).

Különösen fontos volt 2005-ben a Chandra röntgenobszervatórium észlelése, ugyanis a mágneses effektusok fontosságát sikerült igazolniuk. Egy fekete



A Cygnus X-1 fekete lyuk

lyuk nagy gravitációs terével anyagot vonz magához, ami által anyaggyűrű alakul ki körülötte. Azonban ez a forgó gáz nem tud gravitációsan bezuhanni a csillagra, először valamilyen módon el kell veszítenie impulzuszóráját. A Chandra-megfigyelések igazolták azt a korábban már gyanított feltevést, hogy az anyag beáramlásánál a mágneses térnek van jelentős szerepe. A mágneses turbulencia súrlódást okoz a korongon belül, és az eközben keletkezett szél elviszi az impulzuszóráját.

Mai ismeretünk és hitünk szerint a legtöbb galaxisban van szupernagy tömegű fekete lyuk. Ezek valószínűleg a galaxisok közepén vannak. Ha két galaxis összeolvad, a két fekete lyuk előbb-utóbb egy nagygyá egyesül.

A szupernagy tömegű fekete lyukak megfigyelése több módon lehetséges. Az egyik legfontosabb módszer itt is az, hogy a fekete lyuk közelébe kerülő mozgó objektum érzi a nagy gravitációs potenciált, és gyorsan kering körülötte. 2005-ben brit és ausztrál tudósok először figyeltek meg gázfelhőket, amelyek teljesen körbekeríttek egy fekete lyukat. A gáz sebességéből meghatározták a fekete lyuk tömegét (legalább 300 000 naptömeg). A keringés ideje 27 óra volt (a Jupiter 12 év alatt kerüli meg a Napot).

Fontos észlelési lehetőség a relativisztikus spektroszkópiai módszerek alkalmazása. Megfigyelték, hogy egy távoli laboratórium színképében a szupernagy tömegű fekete lyuk nagy gravitációs tere miatt a vas atommag spektrumvonalai például jelentősen eltolódnak (6,4 keV-vel).

A kutatók célja jelenleg gravitációs hullámok mérése (erre készül a LISA megfigyelő állomás) és az általános relativitáselmélet tesztelése. Ha két szupernagy tömegű fekete lyuk egyesül, akkor olyan erős gravitációs sugárzásnak kell keletkeznie, hogy a gravitációs hullámok már mérhetőek lehetnek.

*Németh Judit*

ELTE, Elméleti Fizikai Tanszék

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:

