

totta el jellegzetes, fanyar, mégis huncut mosolyával visszakérdezi: „és uraságod hogy van?” Többé már ezt a kérdést sem teszi fel.

Nagyon hiányzik és nagyon fog hiányozni. Emlékét megőrizzzük.

Nagy Dénes Lajos

Jéki László a Fizikai Szemlében

Magszerkezet vizsgálata neutronokkal 23 (1973) 62.
Heisenberg és az atombomba 45 (1995) 72.
Norvégia 200 koronás bankjegye. 46 (1996) 368.
Nagy F. András: A Berzsenyi Gimnáziumtól a Vénusz bolygóig – Michiganben. 47 (1997) 295.
Szilárd-tábla a Dupont Plazában, Washingtonban. 48 (1998) 57.
Közeledik a Cassini. 48 (1998) 395.
Kiss Dezső 70. 49 (1999) 4.
Fizika a színpadon. 49 (1999) 270.
Kiss Dezső, 1929–2001. (Szegő Károllyal) 51 (2001) 219.

Fizika a színpadon II–III–IV. 51 (2001) 250, 282, 363.
Fizika a színpadon V. 52 (2002) 62.
Megjegyzések a Teller-nekrológhoz. 53 (2003) 375.
Neumann János és a nukleáris fegyverek. 53 (2003) 423.
NASA-elismerés magyar kutatóknak. 54 (2004) 430.
Fizika és a mindennapi élet. 55 (2005) 35.
Magyar részvétel a Rosetta–Philae űrmisszióban. 55 (2005) 224.
Megállapodás az ITER felépítéséről. 55 (2005) 296.
Mindig izgatott a „miért?” kérdése – beszélgetés Pál Lénárd akadémikussal. 55 (2005) 395.
Simonyi-nap a KFKI-ban. 55 (2005) 450.

KÖNYVISMERTETÉSEI

Lanouette William: Szilárd Leó – zseni árnyékban. 48 (1998) 64
Vargha Magda (ed.): The Konkoly Observatory chronicle. 49 (1999) 461.
Almár Iván: A SETI szépsége – kutatás földön kívüli civilizációk után. 50 (2000) 36.
The future of the Universe and the future of our civilization. 50 (2000) 347.
Barlai Katalin, Bognár-Kutzián Ida (szerk.): „Unwritten messages” from the Carpathian Basin. 53 (2003) 446.

FEKETELYUK-SUGÁRZÁS

Jéki László

Milyen a fekete lyuk belseje? Valóban teljesen fekete? Mi lesz az elnyelt információval, ki tud szabadulni, és ha igen, hogyan? Valóban létezik a Hawking-sugárzás? Ezekre a kérdésekre évtizedek óta keresik a választ a fizikusok. Az utóbbi hónapokban több, egymástól alaposan eltérő választ adtak a kutatók. A problémásereg tehát továbbra is nyitott.

A fekete lyukak eredeti felfogása szerint a tér egyes tartományaiban az anyag végtelen kicsi és sűrű pontba zuhan össze. Az elmélet szerint itt olyan erős a gravitációs tér, hogy semmi, még fény sem léphet ki innen, ezért a fekete lyuk elnevezés. A fekete lyuk abszolút fekete voltát később többen kétségbe vonták. A kvantummechanika szerint a folyamatok megfordíthatók, tehát a fekete lyuknak tárolnia kell a beléje zuhant tárgyakra vonatkozó információt, és ez onnan valamilyen módon kinyerhető kell legyen.

A Hawking-sugárzás

Stephen Hawking 2004-ben ismertetett számításai szerint abszolút értelemben vett fekete lyuk nem létezik, csak olyan térrész, ahonnan nagyon hosszú idő elteltével szabadulhatnak ki dolgok. A fekete lyukba zuhanó tárgy tehát nem semmisül meg teljesen, a fekete lyuk megváltozik a tárgy elnyelése során. Nyilvánvalóan nem könnyű az információt visszanyerni, de az létezik valahol a fekete lyukban. Egyáltalán hogyan jöhet ki információ? Erre Hawking korábbi nagy felfedezése adja meg a választ: a fekete lyuk lassan elpárolog, mert részecskék lépnek ki a gravitá-

ciós szakadék széléről, ez a Hawking-sugárzás. A fekete lyuk kis maggá zsugorodik, ekkor felerősödik a sugárzás, és ez viheti magával az elveszettnek vélt információt.

A róla elnevezett sugárzás létezését 1975-ben vetette fel Hawking. A kvantumfizika szerint az üres tér, a vákuum sem üres, állandóan születnek, majd megszűnnek benne összecsatolt részecskepárok. A részecskepár egyik tagja anyag, a másik antianyag, pillanatnyi létezés után szétsugároznak, eltűnnek. Hawking szerint, ha egy ilyen részecskepár a fekete lyuk eseményhorizontja, a fekete lyuk határa közelében keletkezik, akkor előfordulhat, hogy az egyik az együttes eltűnés előtt belezuhan a fekete lyukba, a másik pedig az eseményhorizonton kívül marad. Ezt a megfigyelő úgy észleli, mintha a fekete lyuk sugározna. A fekete testbe zuhant részecske negatív energiájú, tehát a fekete test veszít a tömegéből, fokozatosan elpárolog, végül egy robbanással teljesen megszűnik. Megfigyelhető sugárzás és megszűnés csak a nagyon kis, mikro fekete lyukaknál várható. A gyenge Hawking-sugárzás nem mutatható ki közvetlenül a mikro-hullámú háttérsugárzás mellett, létezését mindeddig nem sikerült kísérletileg igazolni.

Milyen egy fekete lyuk belseje?

Szuperhúrok rezegnek benne?

A lyukba természetesen nem látunk bele, de modelszámításokat végezhetünk. *Jun Nishimura* és munkatársai a szuperhúrelméletet vetették be fekete lyukak leírására. A *Physical Review* hasábjain nemrég közölt eredményeik megerősítik Stephen Hawking elméletét a fekete lyukak sugárzásáról.

A *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottsága egy eddig még nem publikált írásával búcsúzik volt szerkesztőtársától.

Hawking elméletének megjelenése után több fizikus feltételezte, hogy a fekete lyuknak van valamilyen belső szerkezete. Számításokkal nem tudták feltárni ezt a belső szerkezetet, mert a fekete lyuk középpontja felé olyan nagy a téridő görbülete, hogy a relativitáselmélet egyenletei már nem alkalmazhatók változatlanul a kvantumhatások fellépése miatt. A természet alapvető kölcsönhatásainak egységes leírására kidolgozott szuperhúrelmélet kínál megoldást.

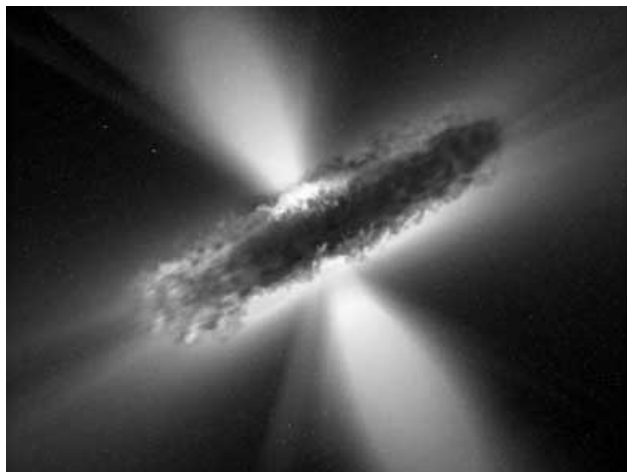
A négy alapvető kölcsönhatás közül háromnak (elektromágneses, gyenge és erős) van már egységes elmélete, ez a standard modell. Ez az elmélet sem teljes még, vannak nyitott kérdések és kísérleti igazolásra váró feltételezések. A negyedik kölcsönhatás a gravitáció, ennek a másik háromhoz való csatolását viszont nem sikerült eddig megoldani. A standard modell és az általános relativitáselmélet egyesítésére dolgozták ki a húrelmélet különböző változatait, majd a szuperhúrelméleteket. Ezekben a részecskéket húrok rezgésállapotaiként jelenítik meg, és sok, például 11 térdimenzió létevel számolnak.

Nishimura és csoportja megoldotta az egyes elemi húrok frekvenciafüggő rezgéseinek leírását. A fekete lyukat rezgő húrokkal teli térként kezelték. A szuper-számítógépen végzett modellszámítások eredménye jó egyezést mutat Hawking elméletével, az energia hőmérsékletfüggése mindkét modellben hatványfüggvénnyel írható le. A szuperhúrelmélet a jövőben fontos szerepet játszhat a fekete lyukak párolgásának vagy a korai Világegyetem állapotainak leírásában is.

A tér-idő nem folytonos?

Abhay Ashtekar és munkatársai (Pennsylvania állam egyeteme) a *Physical Review Letters* 2008. május 20-i számában közölt tanulmányukban más úton indultak el. A fekete lyuk közepén a sűrűség végtelen nagygyá válik, ezért itt a törvények matematikailag kezelhetetlenné válnak. Ez a szingularitásnak nevezett pont lehetetlenné teszi, hogy a rendszer mai állapotából visszakövetkeztessünk múltbeli történetére, a szingularitáson kívül ezt mindenütt megtehetjük a

Röntgen- és gammatartományban sugárzó fekete lyuk (forrás: ESA / V. Beckmann)



kvantummechanika szerint. A szingularitásba került információ végleg elveszik számunkra, mivel a szingularitás akkor is megmarad, ha a fekete lyuk többi része elpárologott.

Einstein általános relativitáselmélete szerint a tér-idő folytonos, Ashtekar szerint viszont nem, kisebb elemekből épül fel. „Einstein tér-ideje olyan, mint egy papírlap, de a papírlap atomokból épül fel” – fogalmazza meg elméletét szemléletesen Ashtekar. Messziről nézve a papírlap és a tér-idő folytonosnak látszik, közelről viszont kiderül, hogy egyedi egységekből áll össze. (Amikor tanulmány még meg sem jelent, csak előzetes összefoglaló ismertetéseket tettek közzé róla, a kritikusok máris feltették a kérdést: mi van a tér-időt alkotó elemek között?) A tér-idő nem folytonos voltából kiindulva kiszámították, milyen lehet a fekete lyuk középpontja. Számításait nem négy, hanem csak két dimenzióban végezték el. A szingularitás eltűnt, és helyében egy olyan tartományt mutattak a számítások, amelyben igen erősek a kvantumingadozások. A fekete lyuknak ebben a részében a tér-idő viselkedése megjósolhatatlan, az okság hagyományos elve nem érvényesül.

Ha a fekete lyuk olyan, ahogy Ashtekar leírta, akkor az információ nem veszik el, a kvantummechanika az eseményhorizonton belül is működik. Az persze egyelőre nem világos, hogy a kétdimenziós számítások mennyire érvényesek a valójában négydimenziós világban.

Kísérletek a Hawking-sugárzás földi szimulálására

Hanghullámok Bose–Einstein-kondenzátumban?

Iacopo Carusotto (Trentói egyetem, Olaszország) a fekete lyukak szimulálására a Bose–Einstein-kondenzátumot (BEC) gondolja alkalmasnak. *Bose* és *Einstein* már több évtizeddel ezelőtt megjósolta, de csak 1995-ben sikerült létrehozni ezt a különleges állapotot. A nagyon erősen lehűtött, alig mozgó atomokat mágneses csapdába ejtik, az abszolút nulla fokot a fok milliórdod részére megközelítve az anyag új halmazállapotba kerül. Az atomok egyetlen kvantumállapotba kerülnek, úgy viselkednek, mint egyetlen részecske, magasabb hőmérsékleten ez lehetetlen. Az olasz kutatók modelljükben hanghullámok terjedését számolták BEC-ben, azok csapdába estek egy eseményhorizontszerű felület mögött, majd részecskeszerűen és összecsatoltan viselkedő fononpárok (vibrációenergia-csomagok) keletkeztek, a pár egyik tagja túljutott, a másik viszont nem az eseményhorizont-jellegű felületen. A modellszámítások természetesen nem tekinthetők a Hawking-sugárzás közvetlen bizonyítékának, a jelenséget valódi BEC-ben kellene kimutatni.

Fekete helyett fehér lyuk?

A fekete lyuk egy tölcésrszerű gödör a téridőben, az eseményhorizonton túlhaladt fény vagy részecskék számára nincs visszatérés. A fehér lyuk egy hegy a téridőben, amely olyan meredek, hogy semmi sem

képes felérni a csúcásra. A fehér lyuk eseményhorizontja ott van, ameddig a csúcstól meg lehet közelíteni. A fehér lyukak nem stabilak, nem léteznek a természetben.

Az eseményhorizontot folyó-hasonlással is lehet szemléltetni. A folyóban halak úsznak felfelé, maximális sebességgel. Ahogy haladnak felfelé, a folyó egyre gyorsabban folyik szembe, egy ponton sebessége megegyezik a halakéval. Ez lesz a fehér lyuk eseményhorizontja, a halak ennél a pontnál nem tudnak tovább jutni. *T. G. Philbin* és munkatársai (St. Andrews Egyetem, Skócia) mikrostrukturált optikai kábelben lézermimpulzusokkal valósították meg a fehér lyuk eseményhorizontját, eredményüket a *Science* közölte 2008 márciusában. A kábelen elindított infravörös impulzus olyan intenzív volt, hogy megváltoztatta a fény

haladási sebességét a kábelben. Az utána küldött második, kissé hosszabb hullámhosszú impulzus az elsőnél gyorsabban haladt előre, majd azt utolérve lelassult, egy ponton pontosan megegyezett a két impulzus sebessége. Ezen az eseményhorizontnak megfelelő ponton a második impulzus rövidebb hullámhosszúvá nyomódott össze és az első impulzusnál lassabban haladt tovább, vagyis nem tudott feljutni a „hegy csúcására”.

A kísérletezők következő célja a Hawking-sugárzás kimutatása. A fehér lyuk analogonnak is sugározni kell. A kábelben gyorsan változó sebességgel haladó fény részecskéket szabadít ki a vákuumból. Ezek gyenge, de a számítások szerint észlelhető ultraibolya sugárzást adnak. Ennek kimutatására, a Hawking-sugárzás észlelésére készülnek.

A FIZIKA TANÍTÁSA

KULCSOK A FIZIKÁHOZ

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézete (MTA MFA) idén immár második alkalommal szervezi meg az *MFA Nyári Iskola* nevű tudományos kutatótáborát érdeklődő középiskolás fiatalok számára (Csillebérc, 2009. június 22–26., honlap: <http://alag3.mfa.kfki.hu/mfa/nyariiskola>). Célunk, hogy a gyerekek minél korábban belekóstolhassanak a fizika és más természettudományok finomságaiba, hogy még az előtt próbára tehessék tehetségüket és képességeiket, hogy átesnének a sok-sok évnyi egyetemi tanulmányukon. Hogy a nálunk szerzett élményeiket irányítóként használhassák tudásuk, ismereteik gyarapításához. Hogy a saját bőrükön érzékeljék mi mindent és miért érdemes majd alaposabban is megtanulniuk. Hogy esetleg idővel maguk is tudományos kutatói pályára lépjenek. Mert aki már tudja hová akar eljutni, annak szinte bármelyik szél jó lesz, hogy céljához közeledni tudjon.

A tavalyi iskoláról utólag elismerő visszajelzéseket kaptunk mindenkitől (diákoktól, szülőktől, tanároktól és kutatóktól), aki csak kapcsolatba került velem. De hogy hogyan jutottunk el a megszervezéséig, az legalábbis nálam elég régre nyúlik vissza. (Akit ez nem érdekel, nyugodtan ugorjon az utolsó oldalra.) Évtizedeket kell visszamennünk, amikor még más szerepben voltam. Ugyanis életkorunk előrehaladtával egy nagy permutáló hatás folyton újabb és újabb pozíciókba helyez minket, olyanokba, amelyeket kívülről, másik oldalról korábban már láttunk. Például először kisbabák vagyunk, s csak fokozatosan ismerjük meg édesanyánkat, szüleinket, nagyszüleinket, nem sokat gondolva arra, hogy egyszer még a helyükbe kerülhetünk. (Hiába is „fenyegetőznek” velem.) Később először

Daróczi Csaba Sándor
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

diákok, majd évek múlva esetleg tanárok leszünk. Nincs ez másként a katonaságban (közlegénytől a tábornokig), vagy a különféle hivatalok és cégek ranglétráinál sem. Velem érettségi környékén fordult elő, hogy ráeszméltem a jelenségre, íme a története:

Az érettségire az elsőik között érkeztem, de a véletlen a legutolsó helyre juttatott, így szinte egy egész nap maradt arra, hogy elüssem valahol. A bicskei gimnázium előtti szép parkban találtam magam, ahol sétálgatva, hol meg egy padon ülve leginkább a madarakat füleltem. Egyszer csak feltűnt egy talán 2–3 éves apróságokból álló csoport, vagy húsz nagyon takarosan felöltözött fiúcska és lányka. Hirtelen körülállták a padom, és kitartóan fürkészni kezdtek. Próbáltam velük beszélgetni, de még nagyon fukarul mérték a szót, főleg egy idegennel szemben, ugye. Ekkor tűnt

Ismerkedés a nagyfelbontású transzmissziós elektronmikroszkóppal.

