

Megemlékezés

STEPHEN HAWKING TUDOMÁNYOS HAGYATÉKA A GRAVITÁCIÓS SZINGULARITÁSOKTÓL A KOZMOLÓGIAI INFORMÁCIÓVESZTÉS PARADOXONÁNAK MEGOLDÁSI JAVASLATÁIG

STEPHEN HAWKING'S SCIENTIFIC LEGACY FROM GRAVITATIONAL SINGULARITIES TO SUGGESTIONS FOR SOLVING THE PARADOX OF COSMOLOGICAL INFORMATION LOSS

Patkós András

az MTA rendes tagja, professor emeritus, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézet
patkos@galaxy.elte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A neves tudós elhunytja alkalmából röviden áttekintjük Stephen Hawking úttörő tudományos munkásságának eredményeit.

ABSTRACT

On the occasion of the renowned scholar's death, we briefly review results of Stephen Hawking's pioneering scientific work.

Kulcsszavak: Stephen Hawking, tudománytörténet, fekete lyuk, kvantumkozmológia, Hawking-sugárzás

Keywords: Stephen Hawking, science history, black hole, quantum cosmology, Hawking radiation

Steven W. Hawking (1942–2018) első tudományos közleményét 1965-ben tette közzé (Hawking, 1965). Korai cikkei az általános relativitáselmélet egyenleteinek szinguláris megoldásaira vonatkozó matematikai szigorúságú vizsgálatok voltak. Munkái kezdettől fogva erős visszhangot váltottak ki. Ez időszak munkái közül legnagyobb hatása a Roger Penrose-zal 1970-ben írott cikkének volt, amely a szingularitások kozmológiai kialakulásának feltételeire általános tételt tartalmazott (Hawking–Penrose, 1970).

Tudományos pályája 1973 után vett fordulatot, amikor felismerte, hogy a kvantumhatások az ősrobbanást követő legkorábbi időszakon túl is meghatározó szerepet játszhatnak, nevezetesen a fekete lyukak környezetében zajló elemi részecskefizikai folyamatok révén. E felismeréshez Jacob Bekenstein doktori disszertációja (1972) vezette, amelynek szerzője Demetrios Christodolou (1970) vizsgálataira támaszkodva javasolta termodinamikai entrópia társítását a fekete lyukakkal (Bekenstein, 1973). Christodolou megállapította, hogy a fekete lyukat határoló eseményhorizont (amelyen belülről nem továbbítható információ a külvilágba) felülete két fekete lyuk összeolvadásával nem csökkenhet az összeolvadó objektumok különálló eseményhorizontjainak felületösszege alá. Ez a tulajdonság hasonló a környezetével energiát nem cserélő rendszerek entrópiájának egyirányú növekedési tendenciájához. Bekenstein a fekete lyuk entrópiájára az eseményhorizontja felületével arányos mennyiséget posztulált. Az arányossági tényezőt a fekete lyuk által elnyelt részecske révén a külvilág szempontjából elveszített információt jellemző Shannon-entrópia közelítő kiszámításával határozta meg. A rendszer általánosított teljes entrópiája a fekete lyukon kívüli világ részecske-eloszlásából származó szokásos járulékok és a fekete lyuk entrópiájának összegéből áll. A fekete lyukat jellemző kisszámú tulajdonság (tömeg, elektromos töltés, perdület) megfeleltethető a szokásos további termikus állapothatározóknak. Hawking kozmológus kollégáival (John Bardeen és Brandon Carter) együttműködésben kidolgozta az e jellemzőkre építhető általánosított termodinamika négy alaptörvényét (Bardeen et al., 1973). A kérdés az volt, hogy pusztán egy érdekes formai analógiáról van-e szó, vagy mód van a fekete lyukak jelenlétét tükröző termodinamika megalapozására a környezetükben zajló fizikai folyamatokkal.

A termodinamikai fejlődés kitüntetett időirányának „összebékítése” a fizika részletes dinamikai elméleteinek az időirány tükrözésére mutatott változatlanúságával Ludwig Boltzmannnak a statisztikus mechanikát megalapozó munkássága óta szüntelenül újrapított kérdés. Hawking életművének legjelentősebb eredménye a fekete lyuk eseményhorizontján átlépő anyagi részecske által okozott entrópiacsökkenés pontos kvantumelméleti kiszámítása volt, amellyel egyszerű egzakt képletet adott a fekete lyuk entrópiatartalmára (Hawking, 1975). Ezt az entrópiát ma szokás *Bekenstein–Hawking-entrópiának* hívni. Ugyanebben a munkájában mutatta ki, hogy a kvantumos folyamatok miatt a fekete lyuk nemcsak elnyel, hanem ki is bocsát részecskéket.¹ Ezek energia szerinti eloszlását a fekete lyuk hőmérséklete egyértelműen meghatározza. A *Hawking-sugárzás* révén a fekete

¹ Bár valamely cikkre történt hivatkozások számát nem a munka tudománytörténeti jelentőségének fokmérőjeként, hanem tudományszociológiai hatásjellemzőként érdemes értékelni, megjegyezzük, hogy csupán erre az egyszerűsítő cikkre 2018. március 17-ig 6991 hivatkozást jelez az *Inspire* nagyenergiás fizikai adatbázis. Összehasonlításképpen: Peter W. Higgs Nobel-díjjal kitüntetett két cikkére ugyanott 4068, illetve 4657 hivatkozást tartanak nyilván.

lyuk végül teljes energiáját képes „elpárologtatni”, ám ez általában igen lassú folyamat. A sugárzás kimutatása a ma létező ismert méretű fekete lyukak esetében reménytelennek tűnik. Az ősrobbanás időszakában keletkezett, a Nap tömegénél jóval kisebb tömegű fekete lyukak viszont már elpárologtak. Hawking a fiatal Univerzum folyamataiban látott esélyt az általa javasolt sugárzás nyomainak megtalálására (Hawking, 1974).

A sugárzás termikus jellege miatt semmiféle információt nem tartalmaz a fekete lyukba hullott anyag szerkezetéről vagy belső állapotáról. Adódik a következtetés, hogy az „elpárolgó” (energiáját kisugárzó) fekete lyuk megszűnésével a behullott anyaghoz kapcsolódó minden információ is eltűnik, annak ellenére, hogy a fellépő részfolyamatok mindegyikére az információ megmaradása fennáll. Ennek a paradox helyzetnek a tisztázása érdekében önmagával és a kutatói közösséggel folytatott vitái végigkísérték Hawking életét.

A kozmológiai információvesztést képviselő álláspontját az évezredfordulóig egyre határozottabban képviselte. Változatos technikai megközelítésekkel jutott el a következő egyszerű fizikai képhez: Olyan téridőtartományok létezése, amelyekről a külső megfigyelőnek csak korlátozott információja lehetséges, arra vezet, hogy a határtartományban párban keltett részecskék egyike mindig visszahullik annak belsejébe, és ezért a külvilágban detektálható párjának egyértelmű kvantummechanikai állapota (az állapot „tisztasága”) megszűnik. Ez a kibocsátott részecske állapotának termikus keverékké alakulási mechanizmusa (Hawking, 1976). A téridő szerkezete által okozott és elkerülhetetlen „tudatlansági elv” (principle of ignorance) rárakódik a kvantummechanikai bizonytalansági elvre.

A kvantummechanikai folyamatok kozmológiai fontosságának felismerése az 1980-as évtizedben elvezette sajátos kvantumkozmológiájának megalkotásához. James D. Hartle-lal közös munkájában annak a feltevésnek a következményeit dolgozta ki, hogy legalábbis a legkorábbi fejlődési időszakban az Univerzum egészének egységes kvantummechanikai hullámfüggvénye volt (Hartle–Hawking, 1983). Kidolgozták ennek „Schrödinger-egyenletét”, amely a különböző makroszkopikus téridő-geometriákhoz vezető fejlődési utak valószínűségei meghatározásának eszköze. Az exponenciálisan felfűvódó (infláló) világegyetem elméletének legelső változatát ez időben fogalmazta meg Alan Guth (1981). Természetesen adódott a kihívás: milyen eséllyel vezet Hawking kvantumkozmológiája inflációs klasszikus téridő-dinamikára? A világegyetem hullámfüggvényének fejlődésére javasolt egyenlet közelítő numerikus megoldásai (Hawking, 1984) alapján érvelt amellett, hogy a lehetséges kimeneti klasszikus geometriák között az inflációs tágulásra vezető „kvantumutak” valószínűsége dominál (Halliwell–Hawking, 1985; Hawking–Turok, 1998). Egyre realisabb közelítésekkel a 2010-es években is folytatta az inflációs korszakhoz vezető kvantumkozmológia fejlesztését.

Az új évezred első évtizedében a gravitációs modellvilágok vizsgálata a húrelmélet oldaláról kapott új irányt kijelölő lökést. Juan Maldacena (1998) megmutatta, hogy magasabb dimenziós világban konstruált feketelyuk-megoldásokban végbemenő folyamatok ekvivalensek speciális kvantumtérelméletek szórási folyamatait jellemző függvényekkel. E megfeleltetést használva Hawking részvételével újabb, az eredeti eredményt reprodukáló levezetést adtak a fekete lyuk entrópiájára (Hawking et al., 2001). A térelméleti megfeleltetésben elvégzett számítás a külvilág részecskéinek a horizont mögötti nem észlelhető részecskéikkel fennálló kvantumösszefonódottságából eredő entrópiával azonosítja a fekete lyuk entrópiáját. Ugyanakkor a kvantumtérelméleti ekvivalens nyelven végzett számítások során semmiféle információvesztéssel járó folyamat nem lép fel. Bár a modell konklúziói nem általánosíthatóak automatikusan a mi világunkra, de erős kételyeket támasztanak az információvesztés bekövetkeztét illetően. Saját kvantumkozmológiai egyenleteinek vizsgálatával végül Hawking is arra jutott, hogy a kifejlett klasszikus téridő-geometriában csak információt őrző folyamatok észlelhetők (Hawking, 2005). Így még élesebbé vált a helyzet paradoxona: ha nem vész el az információ, akkor hol és hogyan őrződik meg a fekete lyuk elpárolgása során? Van-e mód visszanyerésére?

Élete utolsó nagy hatású vizsgálatában munkatársaival arra jutott, hogy a fekete lyuk megoldásokhoz kvantumszinten az eseményhorizonthoz közel tárolt extrém alacsony energiájú („puha”) gravitonok és fotonok sokasága társul (Hawking et al., 2016). Ebben a felületi képződményben őrződik az elnyelt teljes információ, egyfajta hologramot alkotva. Az információ kinyerhetőségére vonatkozó következtetés kimondásához a cikk konklúziója további vizsgálatokat tart szükségesnek...

Stephen Hawking tudományos életpályája a kvantumterek és a gravitáció modern elméletének egészét átfogó alkotókészség ritka példája, amely kiemelkedően stimulálta a tudományterület kutatóközösségét. A fekete lyukak sugárzásának elméletileg vitathatatlan érvényességű tárgyalásával és e sugárzás paradox tulajdonságaiból fakadó kihívások világos megfogalmazásával nevéhez kapcsolható paradigmát hozott létre, amely fizikai személyiségének eltávozása után is megmarad a kutatói érdeklődés fókuszában.

IRODALOM

- Bardeen, J. M. – Carter, B. – Hawking, S. W. (1973): The Four Laws Of Black Hole Mechanics. *Communications in Mathematical Physics*, 31, 161–170. https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.cmp/1103858973
- Bekenstein, J. (1973): Black Holes and Entropy. *Physical Review D*, 7, 2333 DOI: 10.1103/PhysRevD.7.2333, https://www.researchgate.net/publication/258070919_Black_Holes_and_Entropy
- Christodolou, D. (1970): Reversible and Irreversible Transformations in Black Hole Physics. *Physical Review Letters*, 25, 22, 1596–1597. DOI: 10.1103/PhysRevLett.25.1596, <https://www>

- researchgate.net/publication/255840109_Reversible_and_Irreversible_Transformations_in_Black-Hole_Physics
- Guth, A. H. (1981) Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems. *Physical Review D*, 23, 347–356. DOI: 10.1103/PhysRevD.23.347, https://www.researchgate.net/publication/228109568_Inflationary_Universe_A_Possible_Solution_to_the_Horizon_and_Flatness_Problems
- Halliwell, J. J. – Hawking, S. W. (1985): The Origin of Structure in the Universe. *Physical Review D*, 31, 1777–1791. DOI: 10.1103/PhysRevD.31.1777
- Hartle, J. D. – Hawking, S. W. (1983): Wave Function of the Universe. *Physical Review D*, 28, 2960. DOI: 10.1103/PhysRevD.28.2960
- Hawking, S. W. (1965): Occurrence of Singularities in Open Universes. *Physical Review Letters*, 15, 689–690. DOI: 10.1103/PhysRevLett.15.689
- Hawking, S. W. (1974): Black Hole Explosions. *Nature*, 248, 30–31. DOI:10.1038/248030a0
- Hawking, S. W. (1975): Particle Creation by Black Holes. *Communications in Mathematical Physics*, 43, 199–220., Erratum: *ibid.* 1976, 46, 206–206. DOI: 10.1007/BF02345020. https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.cmp/1103899181
- Hawking, S. W. (1976): Breakdown of Predictability In Gravitational Collapse. *Physical Review D*, 14, 2460–2473. DOI: 10.1103/PhysRevD.14.2460
- Hawking, S. W. (1984): The Quantum State of the Universe. *Nuclear Physics*, B239, 257–276., DOI: 10.1016/0550-3213(84)90093-2
- Hawking, S. W. (2005): Information Loss in Black Holes. *Physical Review D*, 72, 084013 DOI: 10.1103/PhysRevD.72.084013, <https://arxiv.org/pdf/hep-th/0507171.pdf>
- Hawking, S. W. – Maldacena, J. M. – Strominger, A. (2001): de Sitter Entropy, Quantum Entanglement and AdS/CFT. *Journal of High Energy Physics*, 0105, 001, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1126-6708/2001/05/001/pdf>
- Hawking, S. W. – Penrose, R. (1970): The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 314, 529–548. DOI: 10.1098/rspa.1970.0021, <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/royprsa/314/1519/529.full.pdf>
- Hawking, S. W. – Perry, M. J. – Strominger, A. (2016): Soft Hair on Black Holes. *Physical Review Letters*, 116, 231301 DOI: 10.1103/PhysRevLett.116, 231–301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.231301, <https://arxiv.org/pdf/1601.00921.pdf>
- Hawking, S. W. – Turok, N. (1998): Open Inflation without False Vacua. *Physics Letters B*, 425, 25–32. DOI: 10.1016/S0370-2693(98)00234-2, <https://arxiv.org/pdf/hep-th/9802030.pdf>
- Maldacena, J. M. (1998): The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2, 231–252. DOI: 10.1023/A:1026654312961, <https://arxiv.org/pdf/hep-th/9711200.pdf>