

A MINDENSÉG TÖRTÉNETE 99,99999%-ÁNAK LENYŰGÖZŐ REKONSTRUKCIÓJA

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet



James Peebles, a 2019. évi fizikai Nobel-díj egyik felének kitüntetettje, a Princeton Egyetem professzor emeritusa, a kitüntetés alkalmából – 2019. október 8-án, az egyetemen – tartott sajtókonferencián.

Évezredünk első 20 fizikai Nobel-díjából az ötödiket ítélték oda 2019. október 8-án asztrofizikai felfedezésekért. *R. Giacconi* (2002, kozmikus röntgenforrások), *J. C. Mather* és *G. F. Smooth* (2006, kozmikus mikrohullámú sugárzás feketetest-természete és anizotrópiája), *S. Perlmutter*, *B. P. Schmidt* és *A. G. Riess* (2011, az Univerzum gyorsuló tágulása), *K. Thorne*, *B. Barish* és *R. Weiss* (2017, gravitációs hullám) elismerését követően idén „csak” felerészben jutalmazott a Svéd Akadémia égbolton végzett megfigyelésekkel elért felfedezéseket (*M. Mayor* és *D. Queloz* munkáját önálló cikk mutatja be). A 2019. évi fizikai Nobel-díj felét *James Peeblesnek* ítélték.

Peebles „fizikai kozmológiában tett elméleti felfedezéseinek” elismerését éppen munkássága elméleti jellegének hangsúlyozása teszi különlegessé. A Princeton Egyetem professzora az 1960-as évektől mindmáig főszereplője az einsteini gravitációelméletet a megfigyelhető Univerzum egészére alkalmazó modell fejlesztésének és jóslatainak a nagy pontos-



Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektrogyenge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

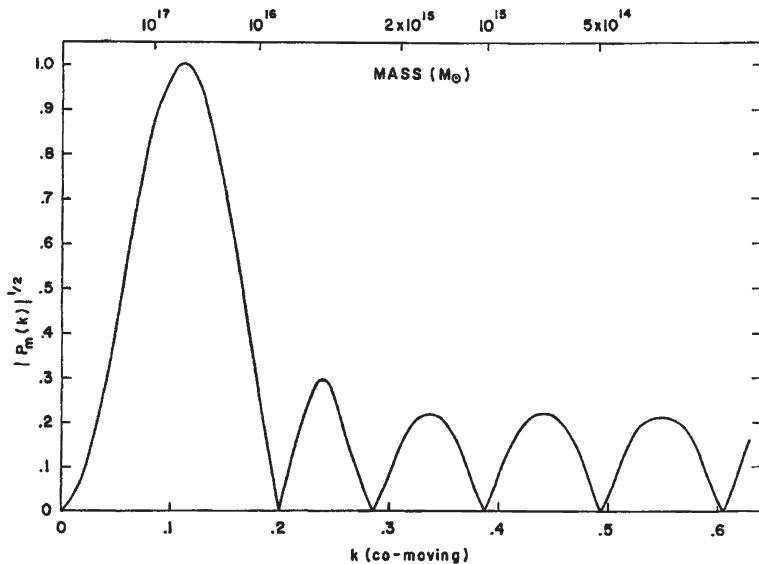
ságú megfigyelésekkel való összevetése kidolgozásának.

Pályáját a Princeton Egyetemen *Robert Dicke* vezetésével kezdte el. Az 1950-es évek végén Dicke és *Wheeler* hirdették meg a kísérleti gravitációfizika kutatási stratégiáját. Ennek egyik első sikere volt az Eötvös-kísérlet megjavított pontosságú megismétlése 1963-ban. Szinte párhuzamosan folytatta Dicke a forró Univerzum termikus sugárzásának kísérleti kimutatására való készülődést többek között *D. T. Wilkinson* részvételével (akinek nevét az általa szervezett, csak halála után végrehajtott WMAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe – misszió örökítette meg), amelynek elméleti számításaihoz kapcsolódott be az 1962-ben PhD-t szerzett fiatal kutató. Közismert *Penzias* és *Wilson* 1965-ös felfedezése értelmezésének anekdotikus története, amelynek Peebles a Bell Laboratory

antennatervező kutatói és a Princeton Egyetem asztrofizikusai között közvetítő szereplője volt. A publikációs adatbázisok számára lényeges száraz tény annyi, hogy a kozmikus mikrohullámú sugárzás felfedezését bejelentő cikk és eredetének elméleti asztrofizikai értelmezését nyújtó Dicke–Peebles–Roll–Wilkinson-írás egymás mellett jelent meg az *Astrophysical Journal* 142. kötetében.

Már ez a cikk hangsúlyozta a sugárzás és a kozmikus anyageloszlás sűrűsége és ingadozásai közötti kapcsolatot. Peebles annak részletes elméletével foglalkozott a következő öt évben. 1970-ben jelent meg *J. T. Yuval* közös munkája, amelyben az Einstein-egyenletek Friedman-féle gömbszimmetrikus megoldásában az anyagsűrűség lokális ingadozásai hatására bekövetkező módosulásnak a háttérsugárzás spektrumára gyakorolt hatását mutatták be. Numerikus számítások bemenő információjaként a sűrűség-ingadozások spektrális sűrűségére az *E. R. Harrison* által ugyanabban az évben javasolt skálafüggetlen tulajdonságot tételezték fel. Ennek a (kicsiny, de lényeges korrekciókkal megjavított) spektráliseloszlásnak ma Harrison–Zeldovics-spektrum a neve. A számítások a kozmikus háttérsugárzás spektrális eloszlására az *1. ábrán* látható (a Nobel-díj szakmai indoklásában idézett) eredményre vezettek, jó negyedszázaddal az előtt, hogy a WMAP annak periodikus szerkezetét meggyőző pontossággal kimutatta.

A Nobel-díj bizottsága ezt az eredményt tekinti Peebles előrelátó, a megfigyelési stratégiák kidolgozására alapvető hatást gyakorló első eredményének. Az



1. ábra. Peebles és Yu jóslata a kozmikus háttérsugárzás spektrális teljesítménye négyzetgyökének függésére az együttmozgó rendszerben mért hullámszámtól. (P. J. E. Peebles, J. T. Yu: Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe. *The Astrophysical Journal* 162 (1970) 815–836.)

eredményekből leszűrhető fizikai kép igen egyszerű: az anyag (ion-elektron plazma) a gravitációs potenciálnak a horizonton belül kialakuló állóhullámszerű ingadozásaiban hoz létre egyensúlyt a termikus foton-gázzal. A megfigyelt relatív spektrális hőmérséklet-ingadozás ($\delta T/T$) és a sűrűség-ingadozásokból származó gravitációs potenciál-ingadozás ($\delta\phi$) kapcsolatát a Sachs–Wolfe-képlet határozza meg:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{\delta\phi}{3c^2}.$$

A Nobel-méltatás nem felel meg az anyagsűrűség akusztikus állóhullámai kialakulásának tárgyalásában *Ya. B. Zeldovics* és *R. A. Sunyaev* úttörő munkájának említéséről.

Mielőtt rátérnék a Peebles Nobel-díját megalapozó második elméleti eredményének bemutatására, rövid pihenőként a 2. ábrára irányítom az Olvasó figyelmét. Az ELTE TTK fizika szakkönyvtárából kértem el az emlékeimben jól megőrzött, kissé szakadozott felületű könyvet, Peebles 1970-ben írt munkáját. A Dicke körüli csoport biztatását megköszönő szerző 1969-ben tartott doktori kurzusának jegyzeteit alakította könyvvé. Ez időben rajtuk és a Szovjetunióban Zeldovics és A. Szaharov hatására létrejött tudományos iskolán kívül nem sokan voltak, akik hittek a kozmológia pontos, kvantitatív jóslatokra képes területé alakulásában. A *Marx György* hagyatékából származó kávéfoltos, agyonhasznált könyv bizonyítja, hogy Magyarországon gyorsan követőkre találtak (lásd még alább!).

A sötét anyaghoz kapcsolódó megfontolásokat ma már nem szükséges alapoktól induló részletes beszámolóval kezdeni. Elég emlékeztetni arra, hogy galaxisok forgási görbéitől indulva a könnyű atommagok szintéziséig számos érv gyűlt össze ahhoz, hogy az 1970–80-as évek fordulójára a sugárzást kibocsátani

képtelen, nem relativisztikus mozgást végző („hideg”) sűrűségkomponenst önálló, ráadásul domináló alkotórészként iktassák be a plazma+sugárzás együttes mozgását meghatározó háttérként. A sugárzó komponens valójában a sötét anyag által meghatározott sűrűségfluktuációk által kialakított potenciálban alakítja ki sugárzási egyensúlyát. Peebles 1982 decemberében publikálta az Univerzum méretű skálán kialakuló hőmérséklet- és sűrűség-ingadozásoknak a domináns sötét anyagkomponensre alapozott elméletét. A sötét anyag átlagsűrűség-értékének az akkori adatokhoz igazított becslését felhasználva jutott a

$$\frac{\delta T}{T} = 5 \cdot 10^{-6}$$

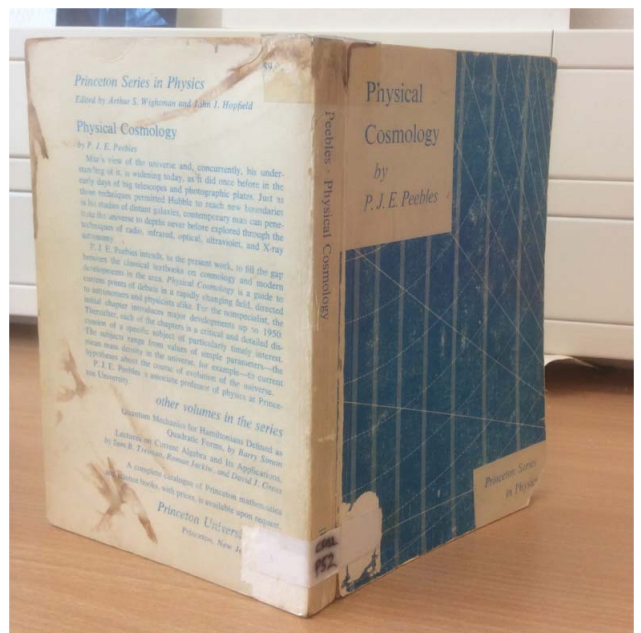
jóslatra. Nagyságrendileg ez a jóslat is bevált a WMAP mérések tükrében.

Újfont megállhatunk rövid szubjektív emlékezésre. A Svéd Akadémia Peeblesnek az úgynevezett hideg sötét anyag feltevézésével végzett számításaihoz a következő mondatot fűzi hozzá: „Más kutatók az 1980-as évtized közepén továbbfejlesztették az elméletet.” A megadott két referencia egyike:

[45] J. R. Bond, A. S. Szalay: The collisionless damping of density fluctuations in an expanding universe. *Astrophys. J.* 274 (1983) 443.

Ha ehhez hozzáteszük *Bond, Szalay* és *Turner* cikkét, amelyet *Formation of galaxies in a gravitino-dominated universe* címmel a *Physical Review Letters* 48. kötetében tették közzé (1982. június), akkor bizvást tekinthetjük Szalay Sándort a sötét anyag kozmológiai hatását részleteiben kidolgozó elmélet egyik

2. ábra. Peebles *Physical Cosmology* könyvének agyonolvasott példánya az ELTE Fizikai Szakkönyvtárából.



társalkotójának. E cikkek motivációja annak felismerése volt, hogy a sötét anyagnak kínálgó (akkor tömegnélkülinek ismert) neutrínók relativisztikus természetük miatt alkalmatlanok a struktúrák kialakulásához vezető sűrűségfluktuációk közegének szerepére. Helyettük kényszerültek egy tömeges, a sugárzás kibocsátásának időszakában már nem relativisztikus mozgású részecskét feltételezni. Szalay amerikai tanulmányútjai előtt szoros kapcsolatot épített ki a Zeldovics-csoporttal. A velük folytatott kutatásokban kialakult tudományos érdeklődése természetes módon vezette a sötét anyag kozmológiai elméletének kidolgozásához.

A kozmikus struktúra kialakulását kutatókat folyamatosan izgatta a (skálainvariáns) őseredeti sűrűség-ingadozások dinamikai háttere. Az 1980-as évtized elején született meg a kozmológiai infláció gondolkodási kerete (*Starobinsky*, 1980; *Guth*, 1981), amely az ősröbannást követő 10^{-32} s rövidségű időtartományban kozmológiai állandóként viselkedő energiasűrűséget alkotó hipotetikus *inflaton* részecske kvantumingadozásaira alapozta a gravitációs potenciálban a háttersugárzás kibocsátása időszakában jelenlévő fluktuációk eredetét. Az exponenciális tágulás során az Univerzum térbeli görbülete kisimult, sík geometria jött létre, egyben az inflációt megvalósító különböző változatok más-más, a Harrison–Zeldovics-spektrumtól kissé eltérő viselkedésű spektrumokra vezettek. (Hangsúlyozni kell, hogy a Nobel-díj odaítélése nem tulajdonítja Peeblesnek és nem is tekinti bizonyítottnak az inflációs szakasz létezését.)

A sík geometria kialakulásának előfeltétele, hogy az Univerzumot kitöltő energiasűrűség az úgynevezett kritikus energiasűrűséggel nagy pontossággal egyezzen. Amennyiben a galaxisok skáláján érvényes teljes (világító és sötét) anyagsűrűséget a kozmológiaival egységesen szeretnénk tárgyalni, akkor meg kell szabadulni kritikus sűrűség és a galaxisok kinematikai vizsgálatából levont anyagsűrűség eltérésétől, mivel az utóbbi nagyjából ötöde a kritikusnak.

E fejlemények hatására kezdett Peebles foglalkozni egy nullától különböző, kis értékű kozmológiai állandó hatásának kérdésével az Univerzum fejlődésének kései (vég)fázisára. Miután a kozmológiai állandó által képviselt energiasűrűség nem hígul, egy kicsiny érték feltételezése nem befolyásolja a galaxisok keletkezésének korai szakaszát, de a táguló Univerzumban híguló közönséges anyagsűrűség és sugárzási energiasűrűség hatására a kései fázisban dominánssá válik. Ez vezet a tágulás gyorsuló jellegéhez. Ugyanakkor a ma sötét energiának nevezett komponens jelen korunkban alkalmas a teljes energiasűrűségnek a kritikusra történő felnövelésére. 1984-ben közzétett elemzéseivel Peebles elsőként újította fel a kozmológiai állandó nem zérus értékének ideáját, öt évvel megelőzve *Steven Weinbergnek* antropikus érvekkel alátámasztott elképzelését. A gyorsuló tágulás megfigyelési bizonyítékával pedig közel másfél évtized múlva lepték meg a csillagász közösséget. Peebles az évtized végén *Bharat Ratra-val* részletes térelméleti modellt is alkotott, amelyben a kozmológiai állandó helyett időben lassan változó térmennyiséget vezettek be, ami reményt ad létezése dinamikai következményeinek jövőbeli feltárására.

A három anyagi összetevő – a sötét anyag, a világító (barionikus) anyag és a kozmológiai állandó –, valamint a sugárzás fotonanyagának összerakásával 1995-ben *Ostriker* és Peebles megfogalmazták a kozmológia úgynevezett összhangzó (concordance) modelljét, amely néhány megfigyelési eredményekhez igazított paraméter beállításával nagy pontossággal képes számot adni a kozmikus háttersugárzás kibocsátásának korától (A.BB. $3 \cdot 10^5$) a galaxisfelmérésekből megismerhető galaxiskeletkezési és -fejlődési korszakon át a gyorsuló tágulással jellemzett mai korig (A.BB. $1,38 \cdot 10^{10}$) tartó kozmológiai fejlődésről (3. ábra). (Az A.BB. jelölést az A.D. rövidítés mintájára vezettem be.) E két szám összehasonlítása magyarázza meg jelen cikk címét és adja meg James Peebles hozzájárulásának jelentőségét: az összhangzó kozmológia számot képes adni a kozmológiai fejlődésről az Univerzum létezési időtartamának 99,99999%-a során.

3. ábra. A kozmológiai történelem menetéből J. Peebles munkássága a 300 000 és néhány milliárd év közötti időszak dinamikájának részletes tárgyalását alapozta meg.

