

# FIZIKAI NOBEL-DÍJ 2011: SZUPERNOVÁK ÉS A GYORSULVA TÁGULÓ UNIVERZUM

Szalai Tamás  
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

A fizikai Nobel-díjat mintegy 115 éves történelme során több alkalommal osztották ki olyan kutatási eredményekért, amelyek kisebb-nagyobb részben a csillagászathoz kötődnek. Ha szigorúan vesszük, akkor a tavalyi évvel bezárólag „csak” *Hans Bethe* (1967, a magreakciók és a csillagok energiatermelésének leírásáért), *Hannes Alfvén* (1970, a magneto-hidrodinamikában és a plazmafizikában végzett úttörő munkáért), *Sir Martin Ryle* és *Antony Hewish* rádiócsillagászok (1974, előbbi az apertúraszintézis kifejlesztéséért, utóbbi a pulzárrok felfedezéséért), *Arno Penzias* és *Robert Wilson* (1978, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás kimutatásáért), *Subrahmanyan Chandrasekhar* és *William Fowler* (1983, előbbi a csillagfejlődéssel, utóbbi az Univerzum kémiai evolúciójával kapcsolatos vizsgálatokért), *Russell Hulse* és *Joseph Taylor* (1993, a gravitációs hullámok közvetett detektálásáért a PSR 1913+16 jelű pulzár perióduscsökkenésének kimutatása révén), *Raymond Davis*, *Masatoshi Koshiba* és *Riccardo Giacconi* (2002, előbbi kettő a neutrínó-, utóbbi a röntgencsillagászat létrejöttében játszott szerepéért), valamint *John Mather* és *George Smoot* (2006, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás feketest-jellegének és anizotropiájának kimutatásáért) díja tartozik ebbe a körbe. Ugyanakkor megemlíthetnénk a kozmikus részecskesugárzás felfe-

dezéséért és az ezzel kapcsolatos részecskefizikai eredményekért osztott Nobel-díjakat, vagy az általános relativitáselmélet csillagászati megerősítéseit, az 1919-es teljes napfogyatkozás során kimutatott fényelhajlástól kezdve a legújabb, űrszondás mérésekig (bár *Einstein* hivatalosan a fotoelektromos effektus kimutatásáért kapta Nobel-díját, a méltatás jelentős része a relativitáselméletről szólt) [1, 2].

Az utóbbi két-három évtizedben az asztrofizikai és kozmológiai kutatások minden eddiginél eredményesebben folynak, köszönhetően elsősorban a megfigyelési technológiák (CCD-detektorok, űrtávcsövek, adaptív optikás földi nagyítávcövek, interferometrikus rendszerek, spektrográfok) töretlen fejlődésének, valamint az adatfeldolgozáshoz és modellszámításokhoz szükséges informatikai kapacitás folyamatos bővülésének.

Részben emiatt, részben az általános érdeklődést kiváltó téma okán a 2011-es fizikai Nobel-díj egyik felét *Saul Perlmutter* (Lawrence Berkeley National Laboratory / University of California Berkeley), másik felét megosztva *Brian P. Schmidt* (Australian National University) és *Adam G. Riess* (Johns Hopkins University / Space Telescope Science Institute, Baltimore) kapta „az Univerzum gyorsuló tágulásának távoli szupernovák vizsgálata révén történő felfedezéséért” (1. ábra).

## Az Univerzum tágulása

Az Univerzum tágulására vonatkozó vizsgálatok az 1910–1920-as évek fordulóján kezdődtek. Ekkorra az általános relativitáselméletet már szélesebb szakmai körben kezdték alkalmazni, s az Einstein által felírt egyenletek megoldásai – ahogyan arra elsőként *Alekszandr Fridman* rámutatott – egy nem statikus Univerzumra utaltak. Maga Einstein nem fogadta el ezt a nézetet, és bevezette egyenleteibe az általa csak *kozmológiai állandónak* elnevezett  $\Lambda$  paramétert, amelynek révén az állandó méretű Univerzum képe továbbra is fenntartható volt. Az évtized végére azonban *Edwin Hubble* a galaxisok távolsága és távolodási sebességeik között fennálló arányosság kimutatásával bizonyította a Világegyetem tágulását, Einstein pedig kénytelen volt visszakozni a kozmológiai állandó létét illetően (sőt, élete legnagyobb tévedésének nevezte azt). A táguló Univerzum története visszafelé lejátszásának gondolata vezetett el az *ősrobbanás-elmélethez* (Fridman, *Georges Lemaître*, *George Gamow*), amely ugyan egy-két évtizedig csak egy volt a lehetséges alternatívák közül, de a hetvenes évekre – a Gamow, *Ralph Alpher* és *Robert Hermann* által megjósolt mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás kimutatása következtében – általánosan elfogadottá vált.

Bár az ősrobbanás-elmélet, illetve az erre épülő *standard kozmológiai modell* számos megfigyelési tényrt jól magyarázott, már kezdetben felmerült néhány kérdés, amelyeket az említett elmélet keretein belül nem lehetett megfelelő módon kezelni [3–6]. Az ellentmondások feloldását nagyrészt a nyolcvanas évek elején megalkotott *inflációs elmélet* (*Alan Guth*, *Andrej Linde*) tette lehetővé, amely szerint az ősrobbanást követő, körülbelül  $10^{-36}$ – $10^{-33}$  másodperc közötti időintervallumban az Univerzum hirtelen mintegy 50 nagyságrenddel nagyobb méretűre fúvódott fel. Az inflációs kozmológiai modell jelenleg a legjobb elméletrendszer a Világegyetem kialakulásának és megfigyelhető tulajdonságainak leírására, ugyanakkor ezen belül is sok kérdés vár még megválaszolásra [3–6].

Ezek közül az egyik legfontosabb az Univerzum időbeli fejlődésének pontos menete; továbbá – ezzel összefüggésben – az, hogy mi jelenleg a Világegyetem összetevőinek aránya, és ez hogyan változik az idő függvényében. Ennek leírásához célszerű először bevezetni a Világegyetem relatív tágulását jellemző *skálafaktor* fogalmát: segítségével egy együttmozgó koordináta-rendszerben  $\mathbf{x}$  irányban, adott  $t$  időpontban a megfigyelőtől számított  $\mathbf{r}(t)$  távolság  $\mathbf{r}(t) = a(t)\mathbf{x}$  formában adható meg. Ezen távolságban lévő pont tágulás következtében fellépő sebessége pedig

$$v(t) = \dot{\mathbf{r}}(t) = \dot{a}(t)\mathbf{x} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} a(t)\mathbf{x} = H\mathbf{r}(t),$$

ami pedig nem más, mint a Hubble-törvény (itt  $H$  a Hubble-állandót jelzi). Valójában  $H$  csak egy bizonyos távolságskálán tekinthető állandónak, általánosságban véve az  $a$  skálafaktortól, ezen keresztül pedig az időtől függ.



1. ábra. A 2011-es Fizikai Nobel-díj nyertesei: Saul Perlmutter (balra), valamint a díj másik felét megosztva elnyerő Adam G. Riess (középen) és Brian P. Schmidt (jobbra). A felvétel a trió által 2006-ban elnyert Shaw-díj átadó ünnepségén készült (Wikipedia).

Az Univerzum méretváltozásának időbeli leírására a Fridman-féle expanziós egyenlet szolgál; ezt jellemzően a különböző komponensek sűrűségeinek időfüggésével (pontosabban az időben változó skálafaktortól való függéssel) szokás felírni:

$$\frac{H^2(a)}{H_0^2} = \Omega_\Lambda + (1 - \Omega_m - \Omega_r - \Omega_\Lambda) a^{-2} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_r a^{-4},$$

ahol  $H_0$  a Hubble-állandó jelenlegi,  $H(a)$  az  $a$  skálafaktornál vett értéke; az  $\Omega$  paraméter pedig az egyes komponensek ( $\Omega_m$ : anyag,  $\Omega_r$ : sugárzás,  $\Omega_\Lambda$ : kozmológiai állandó) sűrűségeinek az úgynevezett *kritikus sűrűséggel* osztott értékei (a kritikus sűrűség a sík Világegyetem jellemzője; ez a sűrűségérték választja el egymástól az örökké táguló, illetve az egy pontba összehuzható modelleket).

Sokáig két alapelv mentén próbálták összeegyeztetni a modelleket a megfigyelésekkel. A kozmológiai állandó járulékat nullának vették (jóval egyszerűbb modellekhez jutottak ezáltal, ráadásul jó ideig semmi nem is indokolta ennek megváltoztatását); ezenkívül a megfigyelések és az inflációs elmélet alapelvei azt sugallták, hogy az Univerzum görbülete közel nulla, azaz a Világegyetem jó közelítéssel sík ( $\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda \approx 1$ ). Azonban az anyagi (beleértve a barionos és a *sötét anyagot* is) és a sugárzási járulék összege a különböző felmérések alapján messze nem adja ki a kritikus sűrűséget – ez pedig meglehetősen éles ellentmondásnak bizonyult.

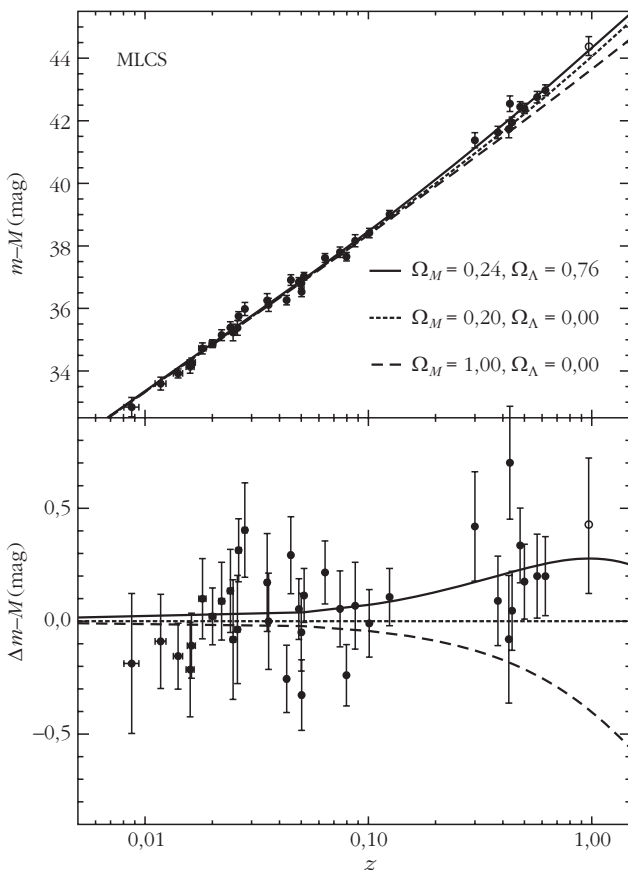
## Szupernóvák és a gyorsuló tágulás

A nyolcvanas-kilencvenes évek fordulóján több program is indult annak érdekében, hogy sikerüljön pontosítani az egyes kozmológiai paraméterek értékeit, feloldva ezzel az említett ellentmondásokat. A Hubble-törvény értelmében a galaxisok távolsága és távolodási sebességeik között egyenes arányosság áll fenn. Ez az arányosság azonban a közeli galaxisok

esetében – azok pekuláris mozgása miatt – általában sérül, így kozmológiai jellegű vizsgálatokra csak a távoli, nagy vöröseltolódású galaxisok alkalmasak. A távolodási sebességek jól mérhetőek a galaxisok színképvonalainak vöröseltolódása alapján, azonban a nagy távolságok mérése jóval összetettebb probléma. Ahhoz ugyanis, hogy a Hubble-törvénytől való esetleges eltéréseket ellenőrizni lehessen, attól függetlenül távolságmérési eljárás(ok)ra van szükség. Ez leginkább olyan objektumok vizsgálatával oldható meg, amelyek közeli és távoli galaxisokban egyaránt megtalálhatóak és azonosíthatóak, abszolút fényességük pedig mindig közel azonos vagy más, mérhető paraméterek függvényében jól kalibrálható.

Ezen kritériumoknak gyakorlatilag csak az Ia típusú szupernóvák felelnek meg [7]. Az általános fizikai kép szerint ezek olyan, kettős rendszerekben lévő fehér törpék termonukleáris robbanásai, amelyek társcsillaguktól folyamatosan anyagot szívnak el, míg végül átlépi a kritikus értéknek tekintett *Chandrasekhar-tömeget* (körülbelül 1,4 naptömeg). Ezeket a kozmikus robbanásokat – az említett, minden fehér törpére érvényesnek tekintett tömeghatár miatt – akkoriban *standard gyertyáknak* tekintették, amelyek a körülményektől függetlenül nagyjából mindig azonos

2. ábra. Közeleli és távolabbi Ia típusú szupernóvák távolságmodulusa a vöröseltolódás függvényében, az MLCS-módszerrel történt kalibrációs eljárás alapján számolva (felső diagram). Jól látszik, hogy a távolabbi objektumok esetében a nem nulla  $\Omega_\Lambda$  értékkel számoló modell illeszkedik legjobban az adatokra. Az alsó diagramon a mért adatoknak a modellektől való eltérései láthatóak [8].



luminozitású fényforrásként jelennek meg, ráadásul extrém nagy fényteljesítményük révén távoli galaxisokban is van esély a detektálásukra.

A *Supernova Cosmology Project* 1988-ban Saul Perlmutter, míg a *High-z Supernova Search Team* 1994-ben Brian Schmidt vezetésével alakult meg; céljuk minél több és minél távolabbi Ia típusú szupernóva detektálása és fénygörbéik felvétele volt (Adam Riess az alapítás után nem sokkal csatlakozott a második csoporthoz, ahol vezető szerepet játszott a kutatásokban). A szakemberek azt várták a felmérésektől, hogy esetleg sikerül kimutatni az Univerzum kismértékű görbületét; emellett abban is reménykedtek, hogy a szupernóvák látszó fényességeinek távolság szerinti eloszlásából következtetni lehet a gravitáció tágulást fékező hatásának mértékére, a *lassulási paraméterre*. Az akkoriban általános nézőpont szerint ugyanis a Világegyetem tágulásának lassulnia kell, hiszen az egyedüli, ismert, kozmológiai skálákon jelentős kölcsönhatás, a gravitáció a tágulással ellentétes hatást fejt ki.

Az Ia típusú szupernóvákkal kapcsolatos távolságmérési módszerekről – ezen belül a szóban forgó két csoport munkásságáról – néhány évvel ezelőtt részletes összefoglaló cikk jelent meg a *Fizikai Szemlében* [7]; itt csak röviden elemezzük a két projekt eredményeit.

Az már a kilencvenes évek közepére kiderült, hogy a „standard gyertya elmélet” eredeti formájában biztosan nem helytálló: az első felmérő programokban vizsgált Ia típusú szupernóvák maximális abszolút fényességei a vártnál jóval nagyobb szórást mutattak. Az évek során sikerült néhány, empirikus jellegű kalibrációs eljárást kidolgozni, amelyek közül a több hullámhosszban (színbén) felvett fénygörbealakokat összehasonlító, úgynevezett MLCS (Multi-Color Light Curve Shape) módszer tűnt a legmegbízhatóbbnak.

Több előzetes részeredmény után mindkét szupernóva-kutató csoport 1998-ban publikálta az első részletes összeállítást a felmérések első körének eredményeiből (Perlmutterék cikkének hivatalos megjelenése átcúsúzott a következő évre) [8, 9]. Riessék 16 távoli és 34 közeli, míg Perlmutterék 42 távoli szupernóva részletes fotometriai és spektroszkópiai vizsgálatára építették analízisüket; a csillagrobbanások azonosítása elsősorban a Cerro Tololo Közép-Amerikai Observatórium (CTIO) 4 méteres távcsövével történt, míg a szupernóvák színképeinek felvételéhez mindkét csoport az akkoriban rendelkezésre álló legjobb berendezéseket (a 10 méteres Keck-távcsövekre, a 6 méteres Multi-Mirror Telescope-ra és az Európai Déli Observatórium 3,6 méteres, chilei távcsövére szerelt spektrográfokat) használta.

A két vizsgálat egymástól abszolút függetlenek volt tekinthető, ugyanakkor mindkét társaság ugyanarra a megdöbbentő következtetésre jutott: a lassulási paraméter értéke negatív, tehát az Univerzum tágulása jelenleg nem lassul, hanem gyorsul! Ehhez a konklúzióhoz a szupernóvák távolságmodulusának (a látszó és abszolút fényességek különbsége) a vöröseltolódás függvényében felvett diagramja, valamint az így kapott pontsor és a különböző kozmológiai modellek összehasonlítása vezetett (2. ábra). A vizsgálatok alapján az

$\Omega_m(t_0)$  és  $\Omega_\Lambda(t_0)$  paraméterek legvalószínűbb értékére – továbbra is feltételezve a közel sík Univerzumot, mivel ennek ellenkezőjére továbbra sem találtak bizonyítékot – 0,3, illetve 0,7 adódott (megjegyezve, hogy ez relatíve kis mintán végzett statisztikán alapult).

A két csillagászcsoport eredményei nagy visszhangot váltottak ki szakmai és egyéb körökben is. Több szakfolyóirat és tudományos szervezet is az évtized – sőt, az évszázad – legnagyobb felfedezései közé sorolta a Világegyetem gyorsuló tágulásának kimutatását (3. ábra). A szaknyelvben gyorsan meghonosodott a *sötét energia* elnevezés, amelyet a gravitációval ellentétesen viselkedő, de teljesen ismeretlen hatásnak adtak. A fejleményeknek köszönhetően újra értelmezhetővé vált a kozmológiai állandó Einstein által megalkotott fogalma is, csak nem a statikus, hanem a gyorsulva táguló Univerzum legfontosabb paramétereként.



3. ábra. „Az év tudományos áttörése” a *Science* folyóirat címlapján (1998. december).

## Kozmológiai állandó és sötét energia – vagy valami más?

Sikerei ellenére több szakember komoly kritikákat fogalmazott meg a szupernóvák fényességeloszlására épülő, új kozmológiai modellel kapcsolatban. Az ellenzők fő érvként azt hozták fel, hogy a távoli szupernóvák vártnál kisebb fényessége más, asztrofizikai jellegű okokkal is magyarázható. Ezek közül a legkomolyabb felvetés az „intergalaktikus szürke por” feltételezése – eszerint a galaxisok közötti térben a beszártól jól nagyobb mennyiségben lehetnek jelen nagyobb (mikrométeres-milliméteres) méretű por szemcsék, s az ezek által okozott hullámhosszfüggetlen extinkció csökkenti a távoli fényforrások észlelt fluxusát.

Az eredeti cikkek eredményei alapján ezt a teóriát nem lehetett elvetni, ráadásul – az észlelt objektumok számának növekedésével – az Ia típusú szupernóva-robbanások jellemzőiről és lehetséges okaikról alkotott kép is kezdett egyre inkább távolodni a „standard gyertya” modelltől, ami tovább fokozta a kalibrációk hitelességével kapcsolatos bizonytalanságokat. Jelenleg az Ia típusú szupernóvák fentebb említett, „klasszikus” kialakulási modellje mellett az egymással összeolvadó, valamint a Chandrasekhar-határnál mégiscsak nagyobb tömeget elérő fehér törpék is szóba jöhetnek szülőobjektumként (nem beszélve arról az eshetőségről, hogy eddig nem ismert folyamatok során akár más típusú égitestek is felrobbanhatnak a fehér törpék termonukleáris megsemmisüléséhez ha-

sonló színképi jellemzőket produkálva – bár erre még egyáltalán nem sikerült bizonyítékot találni).

A két kutatócsoport – másokkal együtt – a 2000-es években is intenzíven folytatta a munkát, hogy sikerüljön még alaposabban feltárni, milyen kozmológiai következtetéseket is lehet levonni az Ia típusú szupernóvák megfigyelhető jellemzőiből. Riess és munkatársai az elmúlt évtized első felében az addigra felfedezett és megvizsgált Ia típusú szupernóvák közül kiválasztották a mintegy 160, legmegbízhatóbban kalibrálhatónak ítélt objektumot, amelyeket újra analizáltak az MLCS-módszer segítségével. Az újabb eredmények arra utaltak, hogy a különböző vöröseltolódású szupernóvák fényességeloszlása a kozmológiai állandó időbeli változását is megmutathatja [10, 11; előbbinek *Budavári Tamás* személyében egy honfitársunk is társszerzője és aktív közreműködője volt]. Eszerint – mivel  $\Omega_\Lambda$  részaránya a második, Fridman-féle expanziós egyenlet alapján a skálafaktor csökkenésével csökken – évmilliárdokat visszamenve az időben a gyorsulás mértéke csökken, sőt eleinte (elegendően kis  $a$  értékeknél) a sugárzási és anyagi sűrűségkomponens volt a domináns, így a tágulás lassuló volt. A bemutatott eredmények, úgy tűnik, kizárják a szürke porral operáló modellt (abban legalábbis hasonló időfejlődés nehezen írható le), ugyanakkor a kalibrációs és egyéb bizonytalanságok miatt maguk a szerzők is óva intettek attól, hogy bárki túlzott következtetéseket vonjon le ezekből.

Riess és kollégái következő nagy projektjük keretében a Hubble-űrtávcsővel végeztek szisztematikus megfigyeléseket, amelynek keretében egyrészt újabb Ia típusú szupernóvákat, másrészt úgynevezett cefeida típusú pulzáló változócsillagokat vizsgáltak – ezek pulzációs periódusa és abszolút fényessége között jól meghatározott korreláció van, ami jó távolságindikátorokká teszi ezen csillagokat a közeli galaxisok esetében. Az újabb munka fő érdeme, hogy sikerült 3% körülire szorítani  $H_0$  hibáját ( $73,8 \pm 2,4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ), ami egyrészt a többi kozmológiai paraméter meghatározásának hibáját is csökkenti, másrészt kizárta a sötétenergia-hipotézis egyik – bár nem túl komolyan vett – alternatíváját, a *kozmosz buborék* elméletét. (Eszert Naprendszerünk egy, a környezeténél jóval kisebb sűrűségű térrészben található, amely a környező Univerzumnál gyorsabban tágul, s ez az effektus okozza a megfigyelt hatásokat. Ez nem keverendő össze a Lokális Buborék fogalmával, amely egy valóban némiképp alacsonyabb részecskesűrűségű térrészt takar a Naprendszer körülbelül 300 fényév átméretű környezetében.)

Mindenesetre, ha csak önmagában tekintenénk az Ia típusú szupernóvákhoz kapcsolatos ismereteinket, nem állíthatnánk kellő magabiztossággal azt, hogy az Univerzum valóban gyorsulva tágul, és hogy összetételének több mint kétharmadát az ismeretlen sötét energia teszi ki. Azonban az elméletet helyesnek ítélni kezében nem is ez a legfőbb fegyver, hanem az, hogy két további, teljesen eltérő és független eredmény is megerősíti ezt a képet: a galaxishalmazok nagy léptékű eloszlásának, illetve a mikrohullámú

kozmosz háttérsugárzás fluktuációs spektrumának jellemzői [5, 6]. Ezek alapján a sötét energia körülbelül 72–73%, míg az anyagi komponens 27–28%-át (amelynek 80–85%-a sötét anyag) teszi ki a Világegyetem energiasűrűségének.

A sötét energia létezése tehát kellően megalapozottnak látszik, azonban mibenlétéről gyakorlatilag semmit nem tudunk. Amit jelenleg állíthatunk, az az, hogy a titokzatos energiakomponens nem bocsát ki észlelhető sugárzást, a tömegvonzással ellentétes, taszító hatást fejt ki (ez ugyanakkor csak kozmológiai távolság- és tömegskálákon érvényesül), és – a jelenlegi vizsgálatok szerint – a galaxishalmazok szintjén is homogénnek tűnik [3]. Korábban a sötét energiát a vákuum energiájával próbálták összefüggésbe hozni, ám az eltérés mintegy 120 nagyságrendnek adódott... Az elmúlt években különböző gravitáció- és térelméleti modelleket írtak fel a gyorsuló tágulás magyarázatára, de teljesen konzisztens képet eddig még nem sikerült összeállítani. Ha valaki megoldja ezt a feladatot, biztos számíthat a következő, sötét energiával kapcsolatos Nobel-díj elnyerésére...

Összefoglalásként tehát megállapíthatjuk, hogy a gyorsuló tágulás és a sötét energia léte – bár sokak számára túlzóan egzotikus elképzelés – jelenleg elég szilárd lábakon áll, ugyanakkor a megválaszolandó

kérdések száma nem kevés. Az Ia típusú szupernóvák szisztematikus vizsgálatának elindítása jelentősen közelebb vitt minket az Univerzum fejlődésének megértéséhez – ez pedig nagymértékben annak a három kutatónak köszönhető, akiket idén – érdemeiknek megfelelően – a Nobel-bizottság elismerésben részesített. A Világegyetem tágulásának és a sötét energia mibenlétének további vizsgálataihoz pedig a jövőben is nagy segítséget nyújthatnak a szupernóvák.

## Irodalom

1. Kővári Zsolt, Hotya Hajni: Nobel-díjat érő eredmények a csillagászatban. *Feltárul a Világegyetem – Természet Világa különszám* (2009) 43.
2. Kiss László: Fizika a csillagászatban – csillagászat a fizikában. *Meteor* (2005/7–8) 12.
3. Németh Judit: Mi az a sötét energia? *Fizikai Szemle* 54 (2004) 1.
4. Patkós András: Mi jöhet Einstein után? *Természet Világa* (2005/5) 194.
5. Patkós András: Kozmológia: Az Univerzum történetének tudománya. *Magyar Tudomány* (2004/6) 741.
6. Frei Zsolt, Patkós András: *Inflációs kozmológia*. Typotex, Budapest, 2005.
7. Vinkó József: Távolságmérés szupernóvákkal: tények és talányok. *Fizikai Szemle* 56/7 (2006) 221.
8. A. G. Riess és mtsai, *Astronomical Journal* 116 (1998) 1009.
9. S. Perlmutter és mtsai, *Astrophysical Journal* 517 (1999) 565.
10. A. G. Riess és mtsai, *Astrophysical Journal* 560 (2001) 49.
11. A. G. Riess és mtsai, *Astrophysical Journal* 604 (2004) 665.