

Válaszok Csabai István opponens kérdéseire

Mindenekelőtt megköszönöm az opponens munkáját, a dolgozat végigolvasását és a részletes bírálatot. A feltett kérdésekre az alábbiakban igyekszem válaszolni.

Először az "Elírások" rovatban írottakra reagálok, semmiképpen sem vitatkozva az opponens észrevételeivel, inkább csak a teljesség kedvéért.

1. Több helyen is, pl. A 30. oldal 3.13 képlet fölött a homológ szó – melynek jelentése a Tudományos és Köznyelvi Szavak Magyar Értelmező Szótára szerint: „Bizonyos lényeges tulajdonságokban hasonló vagy egyforma dolgok jelzője.” - helyett az izotróp vagy homogén szó használata lenne helyes: pl. „homológ módon táguló” helyett „izotróp módon táguló”.

Itt a magyar és az angol terminológia közötti különbség lehet a félreértés oka. Az angol szupernóva-specifikus szaknyelvben a "homologous expansion" (amit magyarul homológ tágulásnak fordítottam) nem az egyforma módon tágulást jelenti, hanem azt, hogy a tágulási sebesség a középponttól mért távolság lineáris függvénye, azaz $v(r) = v_{\text{max}} / R_{\text{max}} * r$. Ez egyébként teljesen analóg a lokális Univerzumban érvényes lineáris Hubble-törvénnyel: $v = H_0 * r$, ahol a H_0 a Hubble-paraméter. A lényeg az, hogy homológ tágulásként kimondottan erre a lineáris összefüggésre utalnak, olyannyira, hogy ennek hiányát "non-homologous expansion"-ként emlegetik. Ez utóbbi például a csillagkörüli anyaggal történő ütközés miatt bekövetkező lassulás következtében léphet fel. Érzésem szerint a homogén (homogeneous), vagy az izotróp (isotropic) jelzők az ilyen tágulás jellemzésére kissé félrevezetőek lennének, mivel az angol terminológiában ezek mást jelentenek.

2. 85. oldal: Az SSP a Single (nem pedig ahogy a disszertációban szerepel Simple) Stellar Population rövidítése.

Ez valóban nem egyértelmű, a szakirodalom is megosztott ebben a tekintetben. Gyors ADS-keresést lefolytatva, a találatok többségében az általam ismert "Simple Stellar Population" kifejezés szerepel, de valóban előfordul a "Single Stellar Population" terminológia is. Teljesen egyetértek amúgy az opponenssel, szerintem is sokkal logikusabb lenne a "Single" jelző használata, de úgy tűnik, a szakirodalomban mégis a "Simple" az elterjedtebb.

3. 103. oldal közepén: t^n modell elírva t_n -nek.

Itt tényleg nincs mentség, ez valóban elírás. Köszönöm a korrekciót!

A "Megjegyzések" rovatban írt észrevétel is teljesen jogos, a szóban forgó mondatok valóban azt sugallják, mintha a gyorsuló tágulás és a sötét energia szinonim fogalmak lennének, holott nem azok. A szupernóvák távolságméréséből (és azóta még sok más független, megerősítő mérésből) valóban "csak" a gyorsuló tágulás következik, a sötét energia léte nem, ez utóbbi csak egy lehetséges modell.

Ezek után következzenek a feltett kérdésekre adott válaszaim.

1. A különböző vöröseltolódásokon esetlegesen eltérő szupernóva alpopulációk előfordulása (pl. különleges szupernóvák gyakorisága, lásd 4.3 ábra) illetve a gazdagalaxisok evolúciójából adódó változó hibák (pl. vörösödés), mennyiben torzíthatják a számolt távolságmodulusokat és azokon keresztül a kozmológiai modellet?

Az opponens által említett szisztematikus hibák létre és azok nagyságára vonatkozó kérdés már a 90-es években, kb. a legelső modern szupernóvaadatokra alapuló kozmológiai cikkek megjelenését követően felvetődött. Az azóta eltelt több mint 20 évben nagyon sokan sokféle aspektusból megvizsgálták ezeket a problémákat. A jelenlegi ismereteknek egy jó összefoglalója található pl. Betoule et al. 2014-ben megjelent publikációjában (A&A 568, A22, 2014). Az alábbiakban én is ezen cikkekre hivatkozva tekintem át a főbb szisztematikus hibaforrásokat.

"Eltérő szupernóva alpopulációk" -- ezek azért jelentenek problémát, mert az abszolút fényességük nagyon eltérhet a kozmológiai vizsgálatokhoz használt "normál Ia" szupernóvák abszolút fényesség-eloszlásától. Emellett a tapasztalat szerint a spektrumuk a maximum körüli fázisban kisebb-nagyobb eltéréseket mutat a "normál Ia" SN-k spektrumától, valamint fénygörbéjük nem, vagy csak korlátozottan követi a Phillips-relációt. Mivel a "normál Ia" altípus lényegesen gyakoribb, mint az összes többi "Ia-szerű" altípus együttevve, a fenti problémák leghatékonyabb kezelése az, hogy ezeket a kilógó pontokat egyszerűen kidobják a mintából, így a kozmológiai modelleket ezek nem (vagy csak elhanyagolható mértékben) befolyásolják.

"Különleges extragalaktikus vörösödés / extinkció" -- még a gyorsuló tágulás legelső kimutatásakor felmerült annak lehetősége, hogy a távoli SN-k halványaságát nemcsak a távolság, hanem egy különleges tulajdonságú extragalaktikus por (ún. gray dust) is okozhatja, amely nem követi a Tejútrendszerben tapasztalt extinkció-vörösödés törvényt. Ezt teljesen megcáfolni az azóta eltelt több mint 20 évben sem sikerült teljesen, annyit azonban sikerült megbízható módon kimutatni (főleg a más elven működő kozmológiai mérések és a SN-mérések összehasonlításával), hogy ha van is ilyenfajta poranyag, annak hatása minimális és az egyéb random/szisztematikus hibák mellett elhanyagolható.

Természetesen a gazdagalaxisokban lévő "normál" (a tejútrendszerbelihez hasonló) poranyag hatása a Phillips-relációt követő SN-k színeire korrigálható, és ezt a korrekciót a modern fénygörbeillesztő módszerek figyelembe is veszik. Itt a legnagyobb problémát magának a tejútrendszerbeli vörösödésnek a korlátozott ismerete jelenti (lásd pl. Schlafly & Finkbeiner, ApJ 737, 103, 2011). Emiatt a kozmológiai mintákban általában alacsony súllyal veszik figyelembe az ilyen "vörösödött" Ia szupernóvákat.

"A csillagkörnyezet hatása" -- szintén nagyon régóta vizsgált kérdés a gazdagalaxisok egyéb fizikai tulajdonságainak hatása az Ia SN-k abszolút fényességére. A teljesség igénye nélkül, felvetődött a fémtartalom, a csillagkeltési ráta, a galaxistípus, az össztömeg és még számos más fizikai paraméter lehetséges hatása a SN megfigyelt fényességére illetve színére. A részletes vizsgálatok egy kivétellel egyik paraméterről sem tudták kimutatni, hogy szignifikáns módon korrelálna az Ia SN-k mérhető paramétereivel. Az egyetlen kivétel a gazdagalaxis teljes csillagtömegétől való függés, amely szerint a 10^{10} naptömegnél nagyobb csillagtömegű galaxisokban az Ia SN-k maximális abszolút fényessége kb. 0,06 - 0,08 magnitúdóval fényesebb, mint az ennél kisebb tömegű galaxisokban feltűnő SN-k maximális fényessége. Ez az összefüggés "mass-step correction" néven ismert, és az általam is

alkalmazott SALT-2.4 módszer kalibrációja már tartalmazza.

2. A 7.2 táblázatban a 2002ap jóval, a 2005cs szupernóva esetén pedig valamivel nagyobb az eltérés az eredeti és az újabb (valamint a NED-ből vett) távolságbecslések között. Mi ennek a magyarázata?

Mindkét esetben a több, jobb minőségű adat kombinációja miatt csökkent a távolságmérés szisztematikus hibája. Egyértelműen az újabb távolságok a pontosabbak, és ezt jól tükrözi az is, hogy jóval közelebb vannak a NED-ben szereplő független távolságbecslések átlagához.

Az ezeknél használt távolságmérési módszer, a Táguló Fotoszféra Módszer szisztematikus hibáiról részletesen írtam pl. a Vinkó et al. A&A 427, 453 (2004) cikkben. A 2002ap esetében korábban a legnagyobb szisztematikus hibaforrás a robbanási időpont pontatlan ismerete volt. Az újabb, javított távolságmérésnél ezt sikerült pontosítanom azon mellékfeltétel alkalmazásával, hogy a 2013ej (amely ugyanezen galaxisban robbant fel) távolságának ugyanannyinak kell lennie. Az így kapott robbanási időpont több, mint két nappal korábbinak bizonyult, mint a 2004-es cikkben elfogadott érték, és ennek köszönhető a nagyobb távolság.

A 2005cs-nél hasonló volt a helyzet, azzal súlyosbítva, hogy a korábbi cikkünkben többféle független távolságmérési módszer eredményeinek átlagát fogadtuk el végeredményként. A standard gyertya módszert viszont, amint azt a 6.2 fejezetben is megemlítettem, azóta többször módosították, újrakalibrálták. Ennek használata korábban szisztematikusan kisebb távolságokat adott, és főleg ennek köszönhető az, hogy a 2005cs-re korábban kisebb távolságot mértünk. A kombinált adatsorok alkalmazása ennél a szupernóvánál is jelentős javulást eredményezett.

3. A 7.1 alfejezet konklúziója szerint „... a közeli kollapszár SN-k mérései kb. hasonló nagyságú szórást mutatnak, mint az Ia típusú SN-k.” Milyen mértékben terjeszthető ki ez nagyobb távolságokra, illetve alkalmazható-e kozmológiai vizsgálatokhoz?

A nagyobb távolságokra történő kiterjesztésnek és a kozmológiában való felhasználásnak legfőbb akadályát a kollapszár szupernóvák átlagosan jóval alacsonyabb abszolút fényessége jelenti. Amint azt a dolgozat 2. fejezetében a 2.8. ábrán is bemutatom, a kollapszár SN-k maximális fényessége -17 -- -18 magnitúdó közötti (típustól kissé függően), ami jó másfél-két magnitúdóval alatta marad az Ia SN-k -19,3 magnitúdós átlagos csúcsfényességének. Ez komoly korlátot jelent az alkalmazhatóságra, hiszen a bemutatott módszerek mindegyike spektroszkópiai méréseket is igényel. $z = 0,4$ vöröseltolódásnál egy II-P típusú SN maximumban kb. 24 magnitúdó látszó fényességű lenne, amiről már nagyon nehéz spektrumot felvenni a jelenleg elérhető műszerparkkal. Egy Ia SN ugyanennél a távolságnál kb. 21,8 magnitúdós lenne, ami akár a földfelszínről is könnyedén fotometrálnak nagyobb távcsövekkel, és ezek távolságméréséhez nincs szükség spektroszkópiára. Ezért a kozmológiai vizsgálatokhoz jelen ismereteink szerint az Ia SN-k sokkal alkalmasabbak.

4. A 92. oldalon ír az MLCSk2 módszerben fellépő fénygörbe-paraméter és távolságmodulus degenerációjáról, ami jelentősen korlátozza ez utóbbi használhatóságát a kozmológiai vizsgálatokban. Lehetségesek-e olyan, pl. többszín vagy spektrális mérések, amelyek kiküszöbölik a problémát?

A legújabb eredmények szerint igen! A közeli infravörös (J, H, K) tartományban az Ia SN-k sokkal kisebb diszperziót mutatnak abszolút fényességükben, mint az optikai- vagy az UV-tartományban. Úgy is mondhatjuk, hogy az Ia SN-k sokkal inkább standard gyertyáknak tekinthetők a közeli-infravörösben, mint más tartományokban (lásd pl. Stanishev et al. A&A 615, A45, 2018). Ugyan a közeli-infravörösben készült mérések nagyobb teljesítőképességű műszereket igényelnek, mint az optikai tartományban készültek, van remény arra, hogy az ilyen adatok bővülésével a távolságmérést terhelő szisztematikus hibák is csökkenthetők. Jelenleg a közeli infravörösben készült mérések kalibrációjához az optikai méréseket használják, ennél fogva a lehetséges szisztematikus hibák még nem küszöbölhetők ki teljesen. A másik probléma az, hogy nagyobb vöröseltolódásoknál a közeli-infravörös tartomány a távolabbi infravörösbe tolódik, amelynek mérése kizárólag az űrből lehetséges. A remélhetőleg egyszer tényleg elkészülő és üzembe álló James Webb-űrtávcsővel tervezett mérések ebben a témában is jelentős előrelépést, már-már áttörést jelenthetnek majd.

5. A 103-ik oldalon szereplő t^2 modellnél mi a 2-től eltérő kitevők fizikai magyarázata? Mivel magyarázható az eltérő kitevő a különböző optikai sávokban?

A (3.22) képlet értelmében a t^2 modell szigorú értelemben véve a luminozítás, azaz a bolometrikus fényesség időfüggését írja le. Az egyes optikai sávokban mért időfüggés így ettől eltérő meredekségű lesz, mivel egy Ia SN spektruma nem feketetest, és az egyes tartományokban megjelenő spektrumvonalak különböző időpontokban más-más erősségűek lesznek. Mindazonáltal a teljes hullámhossztartományra kiintegrált fluxus időfüggése a tapasztalat szerint meglepően jól közelíthető parabolával, legalább 7-10 napig a robbanás után.

6. + „zárójeles kérdés”: Nagyon érdekes a Kitekintés fejezetben megemlített HETDEX felmérés. Kíváncsi lennék, hogy a disszertáció írása óta vannak-e előzetes eredmények.

A HETDEX sajnos több éves csúszásban van eredeti tervéhez képest, jelenleg még mindig az összeszerelési fázisnál tart, így nem üzemel teljes kapacitással a műszer. Ennek ellenére a tesztmérések 2016-ban elindultak, és a mi projektünk szempontjából szinte azonnal eredményre is vezettek: a HETDEX spektrumaiból az AT 2017byx tranzienst Ia SN-nak klasszifikáltuk (Vinkó et al. The Astronomer's Telegram No. 10350, 2017). Habár ezt a tranzienst nem mi fedeztük fel, "csak" a klasszifikációt sikerült elvégeznünk, mégis van jelentősége, ugyanis ezzel sikeresen demonstráltuk, hogy a HETDEX spektrumai alkalmasak szupernóvák azonosítására. A sokak által nagy érdeklődéssel várt kozmológiai eredményekre sajnos még várni kell.

Piszkéstető, 2018. augusztus 2.

Vinkó József