

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

**Kollapszár szupernóva-robbanások
fényességváltozásának modellezése**

PhD. értekezés tézisei

Nagy Andrea
okleveles fizikus

Témavezető:
Dr. Vinkó József
egyetemi docens

Szeged
2016

Tudományos háttér

A nagy tömegű csillagok kialakulása és evolúciója, illetve az életüket lezáró szupernóva-robbanások lehetséges mechanizmusainak vizsgálata a modern asztrofizika egyik dinamikusan fejlődő területe. Ennek a kiemelt érdeklődésnek az az oka, hogy a nagy tömegű csillagok jelentős szerepet töltenek be a kozmikus nukleoszintézisben, azaz az Univerzum kémiai fejlődésében. Ebből a szempontból jelentőségük leginkább abban áll, hogy az ilyen nagy tömegű objektumok evolúciós végállapotát jelentő szupernóva-robbanások a héliumnál nehezebb elemek feldúsulását eredményezik a Világegyetemben. Közvetett módon ezek az objektumok eredményezik az újonnan keletkező csillagok egyre nagyobb fémtartalmát, valamint ezek a kataklizmusos folyamatok felelősek a kőzetbolygók létrejöttéhez nélkülözhetetlen kémiai elemek (pl.: szilícium, vas) elterjesztéséért is. Emellett az sem elhanyagolható, hogy a ezek a nagy tömegű égitestek, illetve a belőlük kialakuló szupernóva-robbanások jelentős fényteljesítményük révén alkalmasak lehetnek akár kozmológia léptékű távolságmérésére is.

A robbanás tényleges lefolyása a csillag kezdeti tömegétől függően több különböző fizikai mechanizmus révén is bekövetkezhet. Bár éles határokat nem lehet definiálni az egyes objektumok kémiai diverzitása miatt, általánosságban elmondható, hogy ha egy csillag tömege 8 és 100 naptömeg (M_{\odot}) közé esik, akkor élete során a magjában a fúzió egészen a vas-csoportig lezajlik, fejlődése pedig a vasmag összeomlásával (kollapszusával) ér véget. Azonban ha a csillag tömege meghaladja a $\sim 100 M_{\odot}$ -t, akkor már az úgynevezett pár-instabilitási mechanizmus is okozhatja a csillag összeomlását. Ebben az esetben az égitest fejlődése a szén termonukleáris égéséig hasonló módon zajlik, mint bármely más csillag evolúciója, viszont a további evolúciós fázisok már nem következnek be. Ennek az az oka, hogy a csillag magja már az oxigénfúziót megelőzően eléri a dinamikai instabilitás határát, ami az oxigénmag összeomlását eredményezi, és végeredményként az oxigén termonukleáris robbanása a külső rétegek ledobásához vezet.

A csillag kezdeti tömege azonban nem az egyetlen olyan asztrofizikai paraméter, amely jelentősen befolyásolja az égitest evolúcióját, és ezáltal a keletkező szupernóva-robbanás mechanizmusát. Ebben a folyamatban ugyanis fontos szerepe van például a csillag tömegvesztésének, amely közvetett módon számos fizikai mennyiségtől függ (rotáció, mágneses térerősség, fényesség, stb.). Mindemellett elsődlegesen a tömeg az, ami alapvetően meghatározza a tranzienst fotometriai és spektroszkópiai tulajdonságait, amelyek egyébiránt a klasszifikáció alapját is képezik. Vagyis míg a kb. 20 - 25 M_{\odot} -nél kisebb tömegű szülőobjektumok többsége a különböző tömegvesztési mechanizmusok során még nagyrészt megőrzi külső hidrogénburkát (IIP típus), addig az ennél nagyobb tömeggel rendelkező csillagoknál ezek az anyagkiáramlási folyamatok már sokkal intenzívebben zajlanak le, azaz ezek az égitestek még a robbanást megelőzően részben vagy teljes egészében elvesztik külső hidrogénben gazdag rétegüket (IIb, Ib típus). Sőt az is előfordulhat, hogy a tömegvesztés hatására a felrobbanó csillagnak nem csak a hidrogén-, hanem a hélium-burka is hiányzik (Ic típus).

A nagy égboltfelmérő programoknak (pl.: LOSS, PTF) és a dedikált keresőprogramoknak

(ASASSN, Texas Supernova Search) köszönhetően a felfedezett szupernóvák száma évről érve egyre csak nő. Azonban az egyre gyarapodó ismeretek mellett egyre több olyan tranzienst találunk, amelyek nem illeszkednek egyértelműen egyik klasszifikációs osztályba sem. Sőt akadnak olyan objektumok is, amelyek nehezen összeegyeztethetőek a szakirodalomban elfogadott robbanási modellek jóslataival. Ugyanakkor arról sem szabad megfeledkezni, hogy a már ismert típusokkal kapcsolatban is sok a megválaszolatlan kérdés, legyen szó akár a felrobbanó csillag természetéről, akár a robbanás során végbemenő folyamatokról. Ezért a szupernóvák fizikai tulajdonságainak pontosabb megismeréséhez kulcsfontosságú, hogy feltérképezzük a különböző robbanási mechanizmusokat befolyásoló asztrofizikai paramétereket. Ezek meghatározása azonban nem könnyű feladat, mivel megfigyelési szempontból csak ritkán van lehetőség a szupernóva szülőcsillagának közvetlen beazonosítására. Emellett azt is fontos figyelembe venni, hogy a robbanás során kialakuló extrém fizikai viszonyok (extrém hőmérséklet, nyomás, mágneses térerősség, stb.) létrehozása jelenlegi tudásunk szerint földi körülmények között egyáltalán nem lehetséges. Emiatt a robbanás fizikai állapotát csak közvetett módon, a tranziens fényességváltozásának vagy spektrális jellemzőinek elméleti modellezésével tudjuk meghatározni. Itt alapvetően kétféle módon járhatunk el: egyrészt alkothatunk a fundamentális fizikai törvényekből kiindulva olyan, számos közelítést tartalmazó, fél-analitikus leírásmódot, amely könnyen és gyorsan képes a robbanás mérhető tulajdonságainak reprodukálására; másrészt viszont használhatunk sokkal komplikáltabb, és kevesebb előfeltételt tartalmazó, hidrodinamikai szimulációkat is, amelyek futtatása azonban sokkal időigényesebb.

Kutatási módszerek

Doktori kutatásaim fő témája a csillagmagok összeomlásából keletkező, úgynevezett kollapszár szupernóva-robbanások fényességváltozásának modellezése volt. Munkám első fázisában az Arnett (1980,1982) által publikált, majd később Arnett és Fu munkássága nyomán továbbfejlesztett sugárzási diffúziós modell általánosításával és továbbfejlesztésével foglalkoztam, amely végül egy fél-analitikus fénygörbe-illesztő modellt, illetve egy saját fejlesztésű program létrehozásához vezetett. Majd ennek a kódnak a felhasználásával meghatároztam összesen tizenkét IIP, IIb, illetve IIn típusú szupernóva legfontosabb robbanási paramétereit. Ezt követően pedig az így kapott fizikai mennyiségeket összevetettem a szakirodalomban rendelkezésre álló illesztési eredményekkel.

Mivel a gyakorlati felhasználás szempontjából elengedhetetlen a program korlátainak megismerése, ezért a szupernóvák fényességváltozásának illesztésén kívül meghatároztam az egyes modellezési paraméterek fénygörbére gyakorolt hatását úgy, hogy egyesével módosítottam ezeket a fizikai mennyiségeket, míg a többit egy rögzített értéken tartottam. Az illesztési paraméterek hatásának vizsgálatán kívül az egyes fizikai mennyiségek között esetlegesen fennálló kapcsolatok tanulmányozása is elengedhetetlen a modell limitációinak felkutatásához. Munkám során ezeknek a korrelációknak a feltárását a Pearson-féle korrelációs koefficiens

kiszámításával végzetem el, amely alapvetően a paraméterek lineáris korrelációjára érzékeny. Ennél az analízisnél egyrészt úgy jártam el, hogy a saját fejlesztésű programom segítségével mindkét beépített energiatermelési mechanizmushoz (radioaktív bomlás, magnetár) szintetizáltam egy-egy referenciagörbét. Majd ezt követően az egyes paraméterpárok értékeit addig módosítottam, amíg vissza nem kaptam ezt a referencia-fénygörbét. Emellett a paraméterkorrelációk vizsgálatát egy másik módszerrel is elvégeztem, mégpedig úgy, hogy az SNEC (SuperNova Explosion Code) program felhasználásával létrehoztam egy IIP típusú robbanási modellt, majd az így kapott fénygörbét használtam referenciaként az illesztésekhez. A modellezést ebben az esetben is úgy végeztem el, hogy az egyes paraméterpárok értékeit addig módosítottam, amíg vissza nem kaptam a referenciagörbét.

Egyébiránt az SNEC egy olyan nyílt forráskódú, fejlesztés alatt álló, egydimenziós programcsomag (Morozova és mtsai., 2015), amely alkalmas kollapszár szupernóva-robbanások hidrodinamikai fejlődésének nyomon követésére, és a tranziens bolometrikus fénygörbéjének meghatározására is. Azonban arról sem szabad megfeledkezni, hogy az SNEC kód használatánál a robbanást megadó fizikai paraméterek mellett a magösszeomlást megelőző állapot definiálása szintén kritikus a szupernóva fénygörbéjének szintetizálása szempontjából, amelyhez azonban számos fizikai paraméter (hőmérséklet, sűrűség, sebesség, kémiai összetétel, stb.) térbeli eloszlásának leírása szükséges. Ezért a felrobbanó objektum konfigurációjának megadásához a nyílt forráskódú, folyamatos fejlesztés alatt álló MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) programcsomagot használtam fel (Paxton és mtsai, 2011; 2013). A MESA nagy előnye, hogy a protocsillag állapottól kezdve egészen a Fe-mag összeomlásáig lehet vele modelleket létrehozni. Így ennek a két programcsomagnak az együttes felhasználásával lehetőség nyílik arra, hogy a MESA segítségével létrehozott nagy tömegű modelcsillagot az SNEC programmal "felrobbantsuk", majd pedig megvizsgáljuk az így keletkező szupernóva-robbanás időbeli fejlődését.

Új tudományos eredmények

1. A úgynevezett dupla csúcsos fénygörbét mutató IIP, illetve IIB típusú szupernóva-robbanások fizikai tulajdonságainak meghatározásához az Arnett és Fu (1989) által publikált diffúziós-rekombinációs modellt általánosítottam, majd ennek alapján létrehoztam egy szupernóvák fénygörbéjének illesztésére alkalmas fél-analitikus kódot (LC2), amely publikusan elérhető az alábbi linken: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~nagyandi/LC2>. Ennek az analízisnek az eredményeként arra a következtetésre jutottam, hogy a IIB típusú szupernóvák esetén általánosan elfogadott konfiguráció, amely a maradványt két komponensre (egy belső, sűrű magra és egy külső, kis tömegű burokra) osztja, egyaránt alkalmas a IIP típusú tranziensek modellezésére is. Emellett a szupernóva-robbanásra jellemző fizikai mennyiségek meghatározása arra is fényt derített, hogy az LC2 kód által szolgáltatott illesztési paraméterek elfogadható egyezést mutatnak a szakirodalomban

publikusan elérhető eredményekkel. Ebből pedig arra a következtetésre jutottam, hogy az általam fejlesztett egyszerű, fél-analitikus modell alkalmas a kollapszár szupernóva-robbanásokra jellemző fizikai mennyiségek nagyságrendi meghatározására, és ezáltal akár a komplikáltabb hidrodinamikai számítások paramétertartományának szűkítésére is.

(Nagy és mtsai, 2014; Nagy és Vinkó, 2016)

2. Az előző tézispontban bemutatott kétkomponensű modell tesztelésekor részletesen megvizsgáltam azokat a fizikai folyamatokat, amelyek elhanyagolása, vagy közelítése potenciális hibaforrásként jelentkezhet a fénygörbék szintetizálása, és a robbanás jellemzőinek meghatározása során. Ennek a szisztematikus elemzésnek az elvégzése végeredményben ahhoz a felismeréshez vezetett, hogy a modell számos egyszerűsítésének és közelítésének következtében a robbanást leíró mennyiség közül csak négy (a rekombinációs hőmérséklet, a robbanás során keletkezett nikkeltömeg, valamint az exponenciális-, illetve a hatványfüggvény alakú sűrűségprofil kitevője) tekinthető függetlennek. Emellett azt is sikerült megállapítani, hogy a legjelentősebb lineáris korreláció a robbanás során ledobott anyag tömege és a maradvány konstansnak feltételezett opacitása között áll fenn. Emellett a kétkomponensű modell további vizsgálata során az is kiderült, hogy a paraméterek korrelációján kívül a robbanási időpont bizonytalansága, ami a robbanást megelőző detektálás hiányában akár 7-14 nap is lehet, szintén jelentősen befolyásolja az illesztett fénygörbe fizikai paramétereit. Számszerűleg ez azt jelenti, hogy akár csak 7 nap eltérés is 5 - 50% közötti hibával terheli az egyes mennyiségek értékét. Vagyis, amennyiben a robbanási időpont nem határozható meg egyértelműen, akkor az illesztés során kapott paraméterek csak nagyságrendileg tekinthetőek helytállóknak.

(Nagy és mtsai, 2014; Nagy és Vinkó, 2016)

3. Az SNEC hidrodinamikai kód segítségével megvizsgáltam a kétkomponensű modell egyik szignifikáns egyszerűsítését, miszerint a maradvány opacitása térben és időben is konstans, és értéke a Thompson-szórás hatáskeresztmetszetéből származtatható. Ebben az esetben úgy jártam el, hogy az SNEC felhasználásával létrehoztam egy IIP, illetve egy IIb típusú robbanási modellt, majd a hidrodinamikai számítások eredményeként kapott opacitásértékekből mindkét esetben megbecsültem az adott konfigurációra jellemző átlagos opacitást mind a mag, mind a burok komponensre. Az így kapott eredményekből pedig arra a következtetésre jutottam, hogy az SNEC által szolgáltatott átlagos opacitások hibahatáron belül megegyeznek a szakirodalomban használatos értékekkel, azaz a Thompson-szórásból meghatározott opacitások felhasználhatóak a tényleges mérési adatok illesztésénél. Ennek következtében pedig megállapíthatóvá vált, hogy a robbanás során ledobott anyag kémiai összetételének közelítőleges figyelembe vétele egyszerűen elvégezhető, pusztán az egyes komponensek opacitásának helyes megválasztásával.

(Nagy és Vinkó, 2016)

4. Az SN 2013df (I Ib típusú) szupernóva fénygörbéjének modellezése alapján sikerült előre lépést elérnem a szakterület egyik máig megoldatlan, a lecsupaszított burokkal rendelkező (I Ib, Ib, Ic) tranziensek tömegbecslésével kapcsolatos probléma feloldásában. Ezeknél a szupernóvánál alapvetően az okozza a gondot, hogy a fénygörbe korai-, illetve késői fázisának illesztéséből meghatározott tömegek jelentőse eltérését mutatnak, ha a maradvány kémiai összetételének megfelelő opacitásokkal számolunk (Wheeler és mtsai, 2015). Vizsgálataim során kiderült, hogy ennek a tömeg-diszkrepanciának az oka I Ib típusú szupernóvák esetén alapvetően két fizikai folyamat nem megfelelő figyelembe vételének következményeként áll elő. Egyrészt az eredményezi a problémát, hogy a késői fénygörbe illesztésénél gyakran elhanyagolják a kobalt bomlása során keletkező pozitronokat, és csak a gamma-fotonok szerepét veszik figyelembe. Másrészt az okozza a hibát, hogy a I Ib típusú szupernóva-robbanásoknál már nem alkalmazható az a közelítés, hogy a fénygörbe felfényesedési ideje megegyezik az effektív diffúziós időskálával (Arnett, 1982). Ennek az az oka, hogy mivel a I Ib típusú szupernóvák szülőcsillagai nem tekinthetők kompakt objektumnak ($R_0 \gg 10^{11}$ cm), ezért a maradványban lejátszódó rekombinációs folyamatok, amelyek növelik az effektív diffúziós időskálát, már számottevőek lesznek. Ezért az SN 2013df esetén a ledobott anyag tömegének és a robbanás kinetikus energiájának meghatározását a maximum előtti fénygörbe komplett modellezése, nem pedig a pusztán a felfényesedési idő alapján végeztem el. Ezen megfontolások figyelembe vételével az SN 2013df korai- és a késői fénygörbéjének illesztése hibahatáron belül egyező tömegeket szolgáltatott.
(Szalai és mtsai, 2016)

Publikációk

I. A tézisekben felhasznált publikációk

Referált angol nyelvű cikkek:

- Nagy A. P., Vinkó J.: *A two-component model for fitting light curves of core-collapse supernovae*, 2016, A&A, 589, 53
- Szalai T., Vinkó J., Nagy A. P. és mtsai: *The continuing story of SN I Ib 2013df: new optical and IR observations and analysis*, 2016, MNRAS, 460, 1500
- Nagy A. P., Ordasi A., Vinkó J., Wheeler, J. C.: *A semianalytical light curve model and its application to type IIP supernovae*, 2014, A&A, 571, 77

II. A értekezés témájához kötődő publikációk

Referált angol nyelvű cikkek és konferenciakiadványok:

- Kumar, B., Pandey, S. B., Sahu, D. K., ... , **Nagy A.** és mtsai: *Evolution of the Type IIb SN 2011fu*, 2014, IAUS, 296, 336
- Kumar, B., Pandey, S. B., Sahu, D. K., ... , **Nagy A.** és mtsai: *Light curve and spectral evolution of the Type IIb supernova 2011fu*, 2013, MNRAS, 431, 308

Angol nyelvű konferenciaposzterek:

- **Nagy A. P.**, Vinkó J.: *Two-component light curve model of core-collapse supernovae*, "The 9th Harvard-Smithsonian Conference on Theoretical Astrophysics" (Cambridge, USA, 2016.05.16. - 19.)
- Szalai T., Vinkó J., **Nagy A.** és mtsai: *The chemical composition of the ejecta of the rare type IIb supernova 2013df*, "Supernova in the Local Universe: celebrating 10,000 days of Supernova 1987A" - CAASTRO Meeting (Coffs Harbour, Ausztrália, 2014.08.11. - 15.)

Angol/magyar nyelvű konferenciaelőadások:

- **Nagy A.**: *Kollapszár szupernóva-robbanások fénygörbe-modellezése*, "Fiatal csillagász és asztrofizikus kutatók Találkozója (FIKUT VII.)" (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest, 2014. 09. 17. - 19.)
- **Nagy A.**: *A Semi-Analytical Light Curve Model of Core Collapse Supernovae*, "XII. Nuclei in the Cosmos Summer School" (MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen, 2014.07.07 - 11.)

III. Egyéb publikációk

Referált angol nyelvű cikkek:

- Dhungana, G., Kehoe, R., Vinkó J., ... , **Nagy A.** és mtsai: *Extensive Spectroscopy and Photometry of the Type IIP Supernova 2013ej*, 2016, ApJ, 822, 6
- Chatzopoulos, E., Wheeler, J. C., Vinkó J., Horváth Z., **Nagy A.**: *Analytical Light Curve Models of Superluminous Supernovae: χ^2 -minimization of Parameter Fits*, 2013, ApJ 773, 76

Angol nyelvű konferenciaposzterek:

- Vinkó J., Szalai T., Ordasi A., ..., **Nagy A.** és mtsai: *Photometric distances to the Type Ia SNe 2012cg, 2012ht, 2013dy and 2014J*, "Type Ia Supernovae: progenitors, explosions, and cosmology" (Chicago, USA, 2014.09.15. - 19.)