



Változócsillagok

Hipernóvák és megfigyelésük

Bevezetés

Az M74 galaxisban 2002. január 29-én fölfedezett SN 2002ap első spektrumai alapján bizonyossá vált, hogy egy frissen körvonalazódó szupernóva-alosztály eddig legközelebbi képviselőjével állunk szemben. Bizonyos, hogy a következő egy-két évben az objektum megfigyelése nyomán jelentősen kiegészül a szupernóvákról és egyéb kataklizmikus objektumokkal (GRB, röntgen- és rádió-szupernóvák) való lehetséges kapcsolatukról kialakult képünk. E cikkben azokat a legújabb eredményeket ismeretjük, melyek a szokásos szupernóváknál nagyságrenddel nagyobb energiájú robbanásokkal kapcsolatosak. Először a klasszikus szupernóvák jellemzőit foglaljuk össze, mégpedig a cikkünk fókuszában álló hipernóvák szemszögéből, majd az általános ismereteken túl áttekintjük az eddigi 4, és az éppen aktuális 2 hipernóvával kapcsolatos eredményeket is.

Fontos háttérinformációkat talál az Olvasó az idézett szakirodalomban, melynek nagy része elektronikusán elérhető, a magyar nyelvű ismeretterjesztő irodalom pedig könyvtárakban föllelhető. A cikk alapjául szolgáló előadás teljes ábraanyaga megtalálható a Szegedi Csillagvizsgáló honlapján (<http://www.jate.u-szeged.hu/obs>, „ismeretterjesztés” link, A csillagászat újdonságaiból fejezet). Ugyanitt bőséges és gazdagon illusztrált anyag található a szupernóvákról (ez utóbbi megjelent: Meteor csillagászati évkönyv 2001, 218. o.), amelynek szóhasználatát a szerző is átveszi.

Szupernóvák és még nagyobbak

A szupernóvákat fotometriai és spektroszkópiai megfigyeléseik alapján két fő csoportra és öt nagyobb alcsoportra oszthatjuk. Az Ia, Ib, Ic csoportba spektroszkópiai jellemzők alapján sorolhatók a csillagrobbanások: a spektrumban nem figyelhető meg hidrogén; az a alcsoportban Si, a b alcsoportban He található; a c csoport pedig az összes maradék számára van fönntartva. A II típusban hidrogénvonalak megfigyelhetők, egy lehetséges osztályozás alapja az, hogy bolometrikus fénygörbéjük lineáris vagy „púpos”, platós szerkezetű.

Az események klasszikus leírásában két modell vált általánosan elfogadottá. Az Ib, Ic, II típusok fizikáját magányos, nagy tömegű csillagok fölrobbanásával magyarázzák. A spektroszkópiai különbségek oka az lehet, hogy a robbanás előtti csillag légköre más összetételű: például elvesztette H vagy He légkörét, mert a progenitor óriáscsillag erőteljes csillagszele lefújta azt a csillagról. A „maradék” légkör lerobban, a közben keletkező radioaktív anyagok bomlása pedig emisszióra gerjeszti az anyag

atomjait. A robbanás fényessége így a ledobódó anyag, különösen pedig a néhány napos bomlásidejű izotópok mennyiségétől függ.

Az Ia robbanásokat közismert módon a kritikus tömeget túllépő fehér törpék összeomlásával magyarázhatjuk. A fehér törpékben, ugyanúgy, mint a csillagok magjában, az anyag elfajult állapotban van, állapotegyenletét a (gimnáziumban kémia anyagban szereplő!) Pauli-féle kizárási elv határozza meg: két elektron nem kerülhet azonos kvantumállapotba, ezért az elektronok bizonyos távolságot tartanak egymás közt. E nyomás eltörpül a hőmérsékletből származó termodinamikai nyomás mellett, azonban ennek is van „fölső határa”. Ha valamiért a csillag gravitációja „jobban húzza össze” a csillagot, mint ahogy ellensúlyozza a gáz nyomása, neutroncsillag kialakulásának kíséretében lerobban a csillag felszíne, és az előző mechanizmushoz teljesen hasonlóan fölfénylik a szupernóva.

Tulmutat e cikk keretein, hogy részletezzük, miként haladja meg a gravitáció a nyomás gradiensét („anyagot szétartó erejét”) a csillagban. Az általánosan elterjedt modell szerint az Ia szupernóvák kettős rendszerben jönnek létre: a vörös óriáscsillagról anyagot kap a fehér törpe komponens, majd a határtömeget elérve összeomlik. Bár a megfigyelési oldal ezt a modellt sokrétűen igazolta, elméletileg úgy is kialakulhat Ia szupernóva, ha egy magányos, kritikusan nagytömegű, forró fehér törpe lassan kihűl, s így a határtömeg kismértékű hőmérsékletfüggése miatt már nem maradhat fehér törpe állapotban: magjából kifelé megindul a neutronizáció, s megindul az összeomlás.

Mindezeket a csillagrobbanásokat jól leírják a „klasszikus” modellek: az összes hullámhosszon megfigyelt spektrumok és fényváltozások magyarázhatóak e modellekből. Visszafelé: a megfigyelések alapján kiszámolható olyan csillag, amelynek robbanása az észlelt spektrumot és fényváltozásokat produkálja; az eljárást spektrum-szintézisnek nevezzük. A progenitor és a robbanás jellemzői ilyen úton általában kiszámolhatók.

Ha a modellek ilyen jól leírják a megfigyelések 999 ezrelékét, különösen nagy visszhangot kelt, ha egy új, az eddigi modellek egyikébe sem illeszthető csillagrobbanás figyelhető meg. A tudományos vízetek 1997 óta fodrozzgatja olyan szupernóva-robbanások észlelése, melyek során tízszer több anyag dobódik le a csillagról, s harmincszor nagyobb energia szabadul föl, mint a legenergikusabb Ia robbanások esetében. A ledobódó anyag sebessége nagyságrendileg a fénysebesség tizede. Az ilyen kataklizmikus jelenségeket 1998 óta hipernóváknak nevezzük.

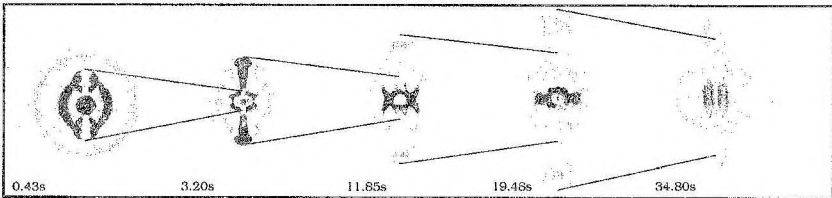
Aszimmetrikus robbanások...

E fejezetben látszólag még mindig kevés szó esik a hipernóvákról, s inkább általában a szupernóvákról beszélünk. Ám a hipernóvák leglényegesebb megfigyelhető paramétereit, a nagy sebességeket és a GRB-kapcsolatokat úgy tudjuk pontosabban megérteni, ha a csillagrobbanásokról alkotott képünket árnyaltabbá tesszük.

A szupernóvák modellezésekor általában föltételezzük, hogy a ledobódó anyag gömbszimmetrikus. Ez általában jó, de mindenképpen durva közelítés, s épp a hipernóva-robbanások fizikája ad arra példát, hogy egy csillag nem csak gömbszimmetrikus módon robbanhat föl. Hogy miért durva, mutatja az alábbi gondolatmenet. Egyrészt a robbanás előtt a csillag maga sem gömbszimmetrikus, hiszen forog (még ha nagyon lassan is) és van mágneses tere. Ugyanakkor a robbanás utáni képződmény sem gömbszimmetrikus, a maradvány – neutroncsillag vagy fekete lyuk –

gyorsan forog, és a neutroncsillagnak még erősebb mágneses tere van. A szupernóva-maradványok is meglehetősen aszimmetrikusak. Miért lenne a robbanás maga gömbszimmetrikus?

Az eddigi jelenségeket elhanyagolva a nagysebességű neutroncsillagok magyarázata még mindig kérdéses marad (ti. nagyon sok neutroncsillagot ismerünk, melyek több száz km/s-os térbeli sebességgel mozognak a Tejútrendszeren belül). Gömbszimmetrikus modellben magyarázhatjuk úgy, hogy Ia szupernóvák fehér törpéje tömegének nagy részét ledobva kiszabadul a gravitációs kötésből, s létrejön a nagysebességű neutroncsillag. Másik lehetőség a magányos csillag gömbszimmetrikus robbanásából származó, kvantumfizikai folyamatokban „lassan gyorsuló” neutroncsillag (neutrínórakéta-elv), amit magyar ismeretterjesztő irodalom is tárgyal (Simon Mitton: A Rák-köd). Ezekkel a kiegészítésekkel láthatóan rogyadozik, de még tartható a gömbszimmetrikus szupernóva-robbanás modellje.



Khokhlov és Höfler számításai egy nagytömegű csillag aszimmetrikus robbanásáról.

Az oldalal az első ábrán 90 ezer km magasságú, az utolsón tízenkétszer ekkora.

A méretarány változásait az ábraközi vonalak jelzik

A robbanás aszimmetriájára megfigyelési eszközökkel közvetlenül rámutathatunk. A spektropolarimetriai eljárásokban a szétröpülő tűzgolyó fényének polarizációját (irányát és nagyságának változását) vizsgálják a hullámhossz függvényében, illetve azt összevetik a spektrummal. A polarizáció léte már önmagában nem gömbszimmetrikus robbanásra utal, a robbanásban részt vevő elemek karakterisztikus hullámhosszának vizsgálatakor pedig a különböző anyagi minőségűből kirajzolódó formák válnak megkülönböztethetővé. A szupernóváknál több esetben, a hipernóváknál minden esetben kimutatható a robbanás erős aszimmetriája. Érdekes, hogy az idő előrehaladtával az aszimmetria foka növekszik. Ez közvetlenül utal arra, hogy nem az egyre jobban széteszülő ledobódó anyagfelhő tér el a gömbszimmetriától, hanem maga a robbanás egyre inkább láthatóbbá váló magja, végeredményben maga a folyamat oka aszimmetrikus.

Ha egy csillagot egy a középpontból kilövellő, egyelőre meg nem határozott eredetű jettel robbantunk föl, a csillagban terjedő lökéshullám „homokóra” alakban veti szét az anyagot, s a lökéshullám öninterferenciája miatt egyenlítői törusz is kialakul. A keletkező forma jellegében a bipoláris planetáris ködökre emlékeztet. E formával modellezhető számos szupernóva, és az SN 1987A maradványa is. Továbbra is kérdéses persze, hogy mi okozza a jet-szerkezetű robbanást, ezt feltételezve viszont helyes morfológiát kapunk. Sőt, újabban több jel utal arra, hogy ha egy hipernóva-robbanást pontosan a jet felől látunk, GRB jelenségként is detektálhatjuk a folyamatot. (A fejezetben tárgyalt modell részleteit, alkalmazásait, eredményeit I. Wang & Wheeler, Sky & Tel. 2002/1.)

...és hipernóvák

A hipernóvák a legnagyobb megfigyelt robbanások közé tartoznak az általunk ismert Világegyetemben. Jelenleg úgy képzeljük, hogy a jelenség nagyon nagy tömegű, H, He légkörüket már elvesztett, magányos csillagok robbanásával jön létre, amely robbanás eredményeként fekete lyuk keletkezik a csillag magjából. A modellek szerint tízszer több anyag és harmincszor nagyobb energia szabadul föl, mint Ia szupernóva esetén (Iwamoto, Nature, 1998). A ledobódó anyag nagyságrendileg tíz naptömeg, ami szintén arra utal, hogy nem fehér törpe, hanem nagytömegű csillag robbanását figyeljük meg. A ledobódás sebessége 20–45 ezer km/s. A modellt megerősíti az is, hogy a robbanásokat mindig heves csillagkeletkezés régióiban figyeljük meg, pontosan ott, ahol a hiperóriás csillagoknak lenniük kell. A robbanás mindig aszimmetrikus, így nyaláboló röntgen- és gamma-kilövellést eredményezhet. Megfelelő körülmények közt társulhat tehát GRB-vel (SN 1998bw), röntgen- (1998bw, 2002ap) és rádiószupernóva-jelenséggel (1998bw, 2002ap). Energiájukban és fénylésükben (az abszolút V fényesség –20 magnitúdó is lehet) nagyságrenddel múlják fölül az Ia szupernóvákat.

A spektrum kezdetben klasszifikálhatatlan, a ledobódás sebességére (karakterisztikusan a fénysebesség tizede) összemossa a normális esetben tisztán látható szupernóva-spektrum szerkezetét. Mivel nem figyelhető meg sem hidrogén, sem szilícium, sem hélium (hiszen egyáltalán semmi sem látszik), így pekuliáris Ic robbanásként kell klasszifikálni az objektumot. A kései spektrum – 1–2 év múlva, miután lelassult a hevesen szétszóródó anyag – a kései Ia maradványokkal mutat rokonságot. Ez tehát a hipernóvák metamorfózisa. S ez egyik oka annak, hogy újabban külön objektumként kezelik a hipernóvákat.

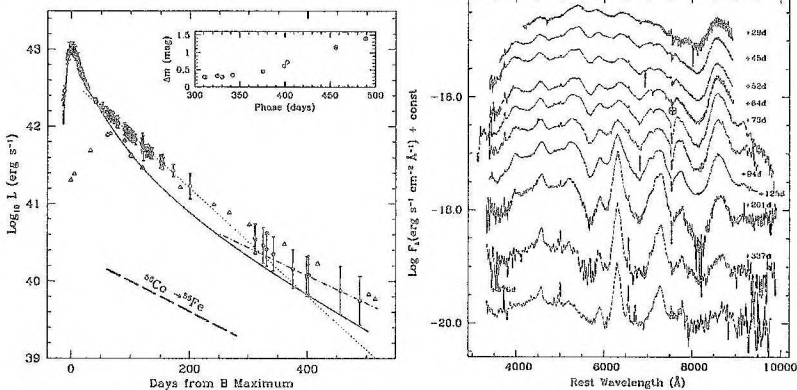
Korábbi hipernóvák

Az első hipernóva-robbanást 1997-ben figyelték meg, s az SN 1997ef jelölést kapta. Az UGC 4107 galaxisban tűnt fel, azonban 16,5 magnitúdós maximális V fényessége ($-19^m,2$ abszolút fényesség) miatt nem kerülhetett a kisebb csillagvizsgálók s az amatőrcsillagászok könnyen megfigyelhető objektumainak listájára. Széleskörű megdöbbenést okozott, hogy az első spektrumok vonalprofiljai annyira ki voltak szélesedve, hogy azt sem lehetett eldönteni, emissziós vagy abszorpciós spektrum keletkezett-e. Az első hét napon a robbanás sebességére 20–30 ezer km/s sebességet számítottak. Később, amint lassult a robbanás, és értelmezhetővé vált a spektrum, spektrofotometriai úton erősen aszimmetrikus táguló felhőt mutattak ki. Mazzali és munkatársai (2000, ApJ 545) spektrumszintézissel modellezték a robbanást: $9,7 M_{\odot}$ ledobódó anyagot és $1,75 \cdot 10^{52}$ erg teljes energiát számítottak a robbanásra. A jelenséget nem figyelték meg GRB formájában, az SN 1998bw után azonban azonosítani vélték a GRB 970514-gyel (Turatto és munkatársai, 2000, ApJ 534).

Azt, hogy az 1997ef nem egy pekuliáris jelenség volt, hanem egy új objektumtípus példánya, egy évvel később, az 1998bw hipernóva után kezdte elfogadni a tudományos közvélemény. Az utóbbi robbanást először GRB formájában azonosították, s az optikai képet a GRB 980425 utánfénylését keresve találták meg. Erős rádióforrás is volt. A korai spektrum hasonlított az 1997ef-éhez, 6 napon át 30 ezer km/s sebességű leáramlás volt megfigyelhető. A kései spektrum gyorsan átalakult Ia típusúvá, a robbanás energiája kétszeresen haladta meg az 1997ef-ét (Patat és munkatársai, 2001, ApJ

555). Kétségkívül a gammakitöréssel fönálló kapcsolata került leginkább az érdeklődés középpontjába. A szupernóvák és gammakitörések közti kapcsolatot vitatók szerint a GRB 980425 inkább az asztrometriai pozíciótól 4 és 6 ívpercre lévő röntgenforrások valamelyike lehetett. Azonban a szupernóva a hibafüggvény közepén helyezkedik el, s így messze ez tűnik a legvalószínűbb gamma-forrásnak. Mint utaltunk rá, az Iwamoto-modell megfelelő irányból szemlélve GRB-t is produkálhat, kérdés, hogy a jövőben milyen hipernóva-GRB kapcsolatokat fogunk föltárni.

Meg kell jegyeznünk, hogy az SN 1999cy szupernóva is GRB-jelenséggel lehetett kapcsolatban. Eddig ez volt a legfényesebb megfigyelt szupernóva-robbanás, azonban sűrű interstelláris felhő közepén következett be, s így fényességét az interstelláris anyaggal való kölcsönhatás erősen befolyásolta. Az SN 1998ey robbanása hasonló módon zajlott le, s így csak a szakirodalom egy része tekinti azt hipernóvának.



Az SN 1998bw fénygörbéje és spektrumának fejlődése. A bolometrikus fénygörvét s a ráillesztett modellt az SN 1987A-val összevetve (háromszögek) jól kiténik a két robbanás közti különbség. A spektrumsorozat 29 nappal a robbanás után indul, és a 376. napon fejeződik be. Az utolsó állapotok vékony emissziós vonalai a szülőgalaxistól származnak. Figyeljük meg a kezdeti spektrum fejlődését kései Ia típusúvá!

Ismét hipernóva: SN 2002ap

A robbanás sebességét tekintve a legnagyobb, egyben a hozzánk legközelebbi hipernóva 2002. január 29-i kitörése (fölfedezése) azonnal jelentékeny tudományos visszhangot keltett. Az eddigi megfigyelések krónikája a következő. Az első spektrumok nagyon lapos, kiszélesedett abszorpciós „gödröket” mutattak, az 1997ef-nél kékebb hipernóvára utalva. A hipernóva az M74 peremén látszik, a spektrum alapján alig szenved galaktikus abszorpciót, interstelláris anyaggal nem hat kölcsön. Jellemző, hogy saját galaxisunk ötször több fényt nyel el az M74 irányából, mint az M74 a hipernóva fényéből. Megfigyelések a robbanás fényét gyakorlatilag „nyers valóságában” látjuk, s ez minden szempontból előnyös. A spektrumban az M74 vöröseltolódásával eltolódott interstelláris vonalakat lehet azonosítani (Na, Ca), tehát az

objektum mindenképpen legalább az M74 távolságában van. Nagyobb vöröseltolódású vonal nem figyelhető meg, tehát bizonyosan nem az M74 háttéréhez tartozik, hanem az M74-ben levő objektumnak kell tekintenünk.

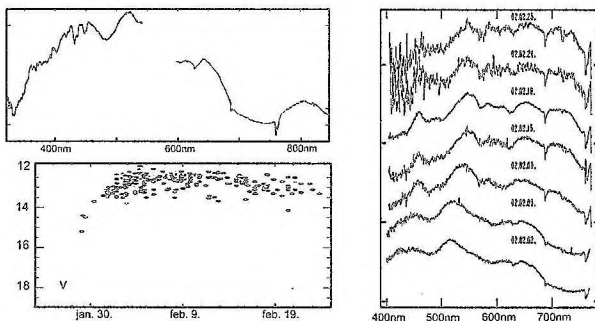
Február 3-án a Call infravörös triplet alapján 45 ezer km/s leáramlási sebességet mértek, ami minden eddigi hipernóvát túlszárnyal. A robbanás rádiófluxusa (8,5 GHz-en) 1 nagyságrenddel kisebb az 1998bw-nél, fényességi hőmérséklete $3 \cdot 10^{10}$ K (!) volt. A progenitort máig nem találták, az első „azonosítások” (21,5 magnitúdós csillag) után a pontosabb asztrometriák kimutatták, hogy a pozíciók tévesek voltak. Egyelőre úgy látszik, nem találtak a robbanás helyén 22,5 magnitúdónál fényesebb csillagot.

Február 1-jén a rádiófluxus alapján relativisztikus effektusok és az inverz Compton-szórás miatt erős röntgen-fluxust jósoltak. Február 6-án sikerült ezt a sugárzást azonosítani, az XMM-Newton 3,5 szórással a háttér fölött röntgenfluxust detektált. Február 22-én, Motohara és munkatársai spektrumán a Hel P Cyg profilja még mindig 16 ezer km/s-os leáramlásra utalt. Ugyanezen a napon Kawabata és munkatársai a Subaru 8,3 méteres távcsövével végeztek spektrofotometriát, és bonyolult, aszimmetrikus szerkezetű robbanást találtak. Február 28-án továbbra is 16 500–23 000 km/s-os leáramlásokról tudósítanak (Danziger és munkatársai).

Válogatás az SN 2002ap eddigi megfigyeléseiből.

A bal felső spektrum február 2-án készült La Palmán, a jobb oldali spektrumsorozat a DDO egy hónapot átfogó méréseit mutatja (Vinkó J.).

A fénygörbén vizuális, szűrőzött és szűrő nélküli CCD-mérések egyaránt szerepelnek, a VSNET adatai alapján



Bár a jelenséget a legkülönbözőbb hullámhosszakon figyelték meg, máig nem sikerült GRB formájában azonosítani. Miután minden GRB-adatbázist már többször átvizsgáltak, nem valószínű, hogy a későbbi azonosításban még reménykedni lehet. További megoldatlan kérdés a progenitor hiánya, mert ha szuperóriás robbanására vezetjük vissza e hipernóvát, úgy 21,5 magnitúdó fényességű progenitort kellene találnunk. A robbanás legnagyobb fényessége is kb. egy magnitúdóval maradt el a legoptimistább várakozásoktól. Azonban a megfigyelt, hipernóva számára is nagy sebesség, s az, hogy legalább egy hónapon keresztül alig csillapodott a kiröpülés sebessége, az előzőekkel egybevetve arra utal, hogy az SN 2002ap egyáltalán nem közönséges hipernóva. Könnyen úgy járhatunk vele, mint – más okokból – az SN 1987A-val: lehetséges, hogy a leglényegesebb asztrofizikai eredmények egy évtized elmúltával derülnek ki.

SZABÓ M. GYULA