

Válaszok Gergely Árpád László opponens kérdéseire

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

1. A téziszfüzet első bekezdésében olvasható, hogy „Sok vasnál nehezebb elem (így pl. a Földön nagy mennyiségben található arany) szinte bizonyosan szupernóva-robbanás során keletkezett.” A 2017. augusztus 17-én észlelt első olyan gravitációs hullám, a GW170817, mely neutroncsillag-összeolvadásból keletkezett, majd az azt kísérő gamma-kitörés és más elektromágneses hullám frekvenciákban történt észlelések egyik folyamánya az volt, hogy ezen elemek (beleértve az arany) keletkezését neutroncsillag-összeolvadásokból (kilonóvaképződésből) származtatják. Kérem, elemezze részletesen a legújabb szakirodalom fényében (mind a szupernóva-szakirodalom, mind a neutroncsillag-kettősök összeolvadását tárgyaló szakirodalom feldolgozásával) a fenti kérdéskört.

A bő három hónappal a dolgozat beadása után felfedezett GW170817 (GRB 170817A, AT2017gfo) jelű kilonóva valóban új megvilágításba helyezte ezt a kérdéskört, habár kétségtelen, hogy az összeolvadó neutroncsillagok már évtizedekkel korábban megjelentek az elméleti szakirodalomban mint a nehéz elemek keletkezéséért felelős r-folyamat lehetséges helyszínei. Mivel 2017 augusztusa előtt ezeket a modelleket nem lehetett konkrét észlelésekkel összevetni, ezért az ezzel a témával foglalkozó kutatói közösség is erősen megosztott volt; sokan a régóta jól ismert szupernóvák szerepét hangsúlyozták és fogadták el elsődlegesnek. A kilonóva felfedezése azért is volt nagy jelentőségű, mert megbizonyosodhattunk róla, hogy a korábbi elméleti modellek valóban többé-kevésbé helyesen írják le az ilyen események lefolyását, ennél fogva a nukleáris folyamatokra vonatkozó jóslatok is megbízhatóbbak a pusztá spekulációnál.

A felfedezés óta eltelt 1 évben csak a GW170817-ről 191 referált cikk jelent meg, így a legújabb szakirodalom részletes feldolgozásából akár egy másik disszertáció is készülhetne. Ezért az alábbiakban az opponens kérését két összefoglaló cikkre (Frebel, Annual Rev. Nuclear and Particle Sci. AA:1-33, 2018 és Horowitz et al. arXiv:1805.04637, 2018) alapozva igyekszem teljesíteni.

A vasnál nehezebb elemek létrejöttére többféle nukleáris reakciót is ismerünk. Ezek közül a jelen téma szempontjából legjelentősebb az asztrofizikai r-folyamatnak is nevezett gyors neutronbefogás ($r = \text{rapid neutron capture}$). A neutronbefogásos folyamatokban egy szabad neutron befogódik egy nehezebb atommagba, ezután a neutron béta-bomlással protonná alakul, így nemcsak a tömegszám nő, hanem a rendszám is. Ha a neutronfluxus kellően nagy ($n_n > 10^{22} \text{ cm}^{-3}$), a befogódó neutronok száma gyorsabban nő, mint a béta-bomlás miatti átalakulások száma. Így a stabilitás völgyétől jóval távolabbi, nagyon neutrongazdag magok is kialakulhatnak, amelyek végül a radioaktív bomlás révén akár igen nagy rendszámú elemekké is átalakulhatnak.

Jelenlegi ismereteink szerint az r-folyamat hatékony lefolyásához szükséges neutronfluxus leginkább két asztrofizikai folyamatban alakulhat ki: kollapszár szupernóvák neutrínó-indukálta kifúvásaiban

(neutrino-driven winds in core-collapse supernovae), illetve a fent már említett összeolvadó neutroncsillagok kidobódott anyagában (kilonovae).

Kollapszár szupernóvákban a vasmag neutronizációja (inverz béta-bomlása) révén a középpontban egy neutroncsillag alakul ki (részletesen lásd pl. a dolgozat 3.1.2. fejezetét). A keletkező nagyszámú neutrínó az extrém körülmények között kölcsönhatásba lép a csillag centrum felé hulló anyagával (annak ellenére, hogy a neutrínó-barion kölcsönhatás hatáskeresztmetszete rendkívül kicsi), és az így elnyelődő energia egy többé-kevésbé gömbszimmetrikus anyagkiáramlást indukál. Ez a neutrínó-indukálta kifúvás már az 50-es évek végén számolt első robbanási modellekben megjelent, és ez vezetett arra a szakirodalomban elterjedt konklúzióra, hogy az ilyen szupernóva-robbanások felelősek a vasnál nehezebb elemek létrejöttéért. A neutrínófizikai és egyéb ismeretek bővülése azonban számos problémát is feltárt a fenti képhez kapcsolódóan. Kiderült például, hogy a neutrínó-indukálta kifúvásokban az anyag csak kevésbé neutrongazdag, ami azt jelenti, hogy az r-folyamat csak az ún. második csúcs ($Z \sim 50 - 60$) alatti atommagokat képes létrehozni, ennél nehezebbeket (így pl. a 79 rendszámú aranyat) már nem, vagy csak igen kis mértékben. Ezeket az eredményeket azonban sokan fenntartásokkal kezelik, mert a neutrínófizika részletei (pl. a neutrínó-oszcillációk), vagy más fizikai hatások (pl. a mágneses tér jelenléte, vagy jet-szerű robbanás) a szimulációk eredményét erősen befolyásolják. Abban mindenestre konszenzus mutatkozik, hogy a kollapszár szupernóvák egyszerre csak relatíve kevés nehéz elemet képesek szintetizálni: a jóslott anyagmennyiségek 2-3 nagyságrenddel kisebbek az összeolvadó neutroncsillagok által produkált mennyiségeknél.

Arra, hogy a szupernóvák önmagukban nem elegendőek a $Z > 60$ tömegszámú elemek megfigyelt gyakoriságának létrehozására, már egy évvel a nevezetes kilonóva felfedezése előtt, 2016-ban erős megfigyelési utalást találtak. Kiderült, hogy a Reticulum-II nevű, pár évvel korábban felfedezett ultrahelvány törpegalaxis néhány csillagának spektrumában extrém erős a bárium ($Z = 56$) és az európium ($Z=62$) gyakorisága a többi elemhez képest. Ezek közül az európium az a jellegzetes elem, aminek kialakulását hagyományosan az r-folyamathoz kötik. A Reticulum-II-ben megfigyelt gyakoriságokat nem lehetett a hagyományos szupernóvamodellekkel megmagyarázni. Ezzel szemben egyetlen összeolvadó neutroncsillagokból származó anyagmennyiség már kielégítő magyarázatot adott a megfigyelésekre. Ez nagyon erős utalást jelentett arra, hogy az összeolvadó neutroncsillagok valóban képesek a modellek által jóslott r-folyamat létrehozására, amelyet aztán a GW170817 felfedezése be is bizonyított.

Két neutroncsillag, vagy egy neutroncsillag-fekete lyuk páros összeolvadásakor az árapályerők, valamint a kontaktus által kidobódó anyagfelhő értelemszerűen nagyon neutrongazdag lesz, ami kedvez az r-folyamat létrejöttének. A szimulációk szerint a kidobódott anyagban akár transzurán elemek is létrejöhetnek, habár a konkrét gyakoriságok nagyon erősen függenek a kettős rendszer paramétereitől (tömegarány stb.), valamint olyan tényezőktől, mint pl. a neutroncsillag anyagának állapotegyenlete. A "kilonova" elnevezés is onnan honosodott meg, hogy a számítások szerint egy tipikus kettős neutroncsillag összeolvadásakor kidobódó anyagfelhőben az r-folyamatot követő radioaktív bomlás annyi energiát termel, ami kb. ezerszerese egy közönséges nóvarobbanásban (ahol egy fehér törpét övező akkréciós korongban történik hidrogénfúzió) felszabaduló energiának.

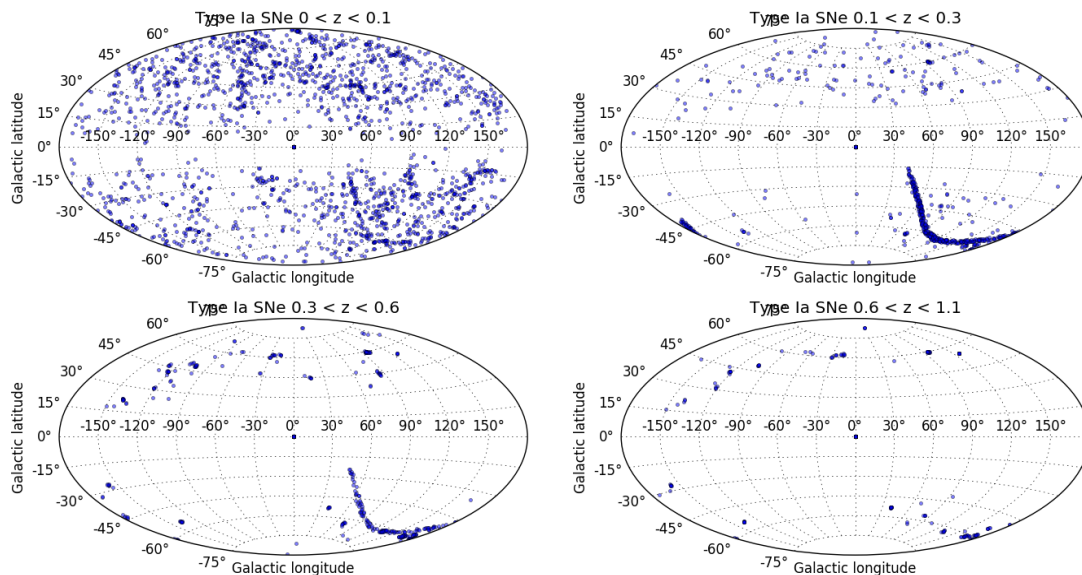
Konkrétan a GW170817 esetében az optikai utófénylés megfigyelése arra utalt, hogy az összeolvadásakor egy kb. 0,01 naptömegnyi, nagyon erősen neutrongazdag anyagfelhő dobódott ki a fénysebesség 30%-át is elérő sebességgel, valamint egy kb. hasonló tömegű, kevésbé neutrongazdag anyagfelhő is távozott feltehetően a kontaktusba kerülő tartományból. Ez a két komponensű anyagfelhő

okozta az optikai/infravörös tartományban megfigyelhető spektrum jellemzőit: a kezdeti, magas hőmérsékletű, erősen kék kontinuum a forró, kevésbé neutrongazdag anyagfelhőből származott, míg a pár nap elteltével az infravörös tartományban megjelenő széles emisszió a nagyon neutrongazdag anyagban a r-folyamat hatására keletkezett nagy rendszámú atomok hatására jött létre. Ezek a megfigyelések látványosan igazolták, hogy az összeolvadó neutroncsillagok valóban a nagyon nagy rendszámú elemek létrejöttéért felelős r-folyamat szinterei, ennél fogva a dolgozatban szereplő kijelentést, miszerint például a Földön megfigyelhető arany szinte bizonyosan szupernóva-robbanásokban keletkezett, mindenképpen felül kell vizsgálni. A szupernóvák a földi arany keletkezésében csupán az egyik, de egyáltalán nem az egyetlen lehetséges mechanizmust képviselik.

2. A második fejezet 2.5 alfejezetének címe „A szupernóvák gyakorisága térben és időben”. Ezzel kapcsolatosan hiányoltam az egyébként alapos szöveges bemutatás mellett az állítások szemléltetését. Kérdésem az, hogy ismert-e olyan ábra, amely a szupernóvák égi eloszlását Aytóff-projekcióban szemlélteti, illetve, amennyiben nem, tudna-e ilyet készíteni az általa használt szoftveres háttérrel (esetleg a vöröseltolódás alapján színezett pontokkal). Mivel igen sok hasonló jellegű térkép létezik (CMB, gamma-kitörések, az Univerzum valamennyi elektromágneses tartományban, magnetárok, nagyenergiás kozmikus részecskék, stb.), a szupernóvákra készült szemléltetés értékes és informatív lenne. Különösen a távolságmérésre használt Ia típusú szupernóvák térképe lenne tanulságos, annak kozmológiai vonatkozásai miatt.

Ilyen térképek a szupernóvákról azért nem gyakoriak, mert információtartalmuk igen limitált. Mivel a szupernóvák 99%-a extragalaxisokban robban fel, ezek eloszlását mutató térkép lényegében a galaxisok jól ismert térbeli eloszlását mutatja, pontosabban annak sajátosan torzított mintavételezését. A torzítás (bias) többféle ok miatt is megjelenik: egyrészt a szupernóvák véletlenszerűsége okozza, másrészt az az észleléstechnikai korlát, hogy a katalogizált szupernóvák túlnyomó többsége ún. célzott kereséssel lett felfedezve. Ilyen célzott keresések vagy eleve kiválasztott galaxisokra irányultak, vagy egy konkrét, általában nem túl nagy égterületre.

Mindezeket jól szemlélteti az alábbi 1. ábra, amit az opponens kérésére az Ia szupernóvák eloszlásáról készítettem (a felhasznált minta a Sternberg Asztrofizikai Intézet publikus szupernóva-katalógusából származott, amely jelenleg 6540 szupernóvát tartalmaz).



1. ábra: Ia szupernóvák eloszlása különböző vöröseltolódásoknál

A térkép a Tejútrendszer fősíkjához rögzített galaktikus koordináta-rendszerben mutatja az ismert Ia szupernóvák pozícióját, négy különböző vöröseltolódás-tartományban. A térkép közepén megjelenő fehér sáv a Tejútrendszer poranyagának extinkciója miatt van, ezekben az irányokban lényegében nem látunk ki a saját galaxisunkból. A megjelenő pontok az ismert galaxisok eloszlásának random mintavételezései, a fentebb említett mellékfeltételekkel. Az például, hogy a bal felső és jobb alsó régióban több pont van, egyszerűen annak köszönhető, hogy az északi féltekén több csillagvizsgáló működik, ezért a szupernóvakereső-programok többsége (egészen a legutóbbi pár évig) főként az északi féltekéről látható objektumokat találta meg. A jobb alsó tartományban megjelenő csík egy jól ismert célzott keresőprogramból, a Sloan Digital Sky Survey ún. 82-es tartományát (SDSS Stripe 82) 3 éven keresztül folyamatosan észlelő programból származik. A teljes égbolt hasonló jellegű monitorozása még a közeljövőben is csak vágyálom, de a 2020 után induló Large Synoptic Survey Telescope (LSST) felmérése, amely a Chiléből látszó égboltot kb. 10 naponként végigészleli majd, jelentős előrelépést hozhat ebben a tekintetben. A felfedezett szupernóvák száma minden bizonnyal legalább 1 nagyságrenddel fog nőni, a jelenlegi évi 1-2 ezerről évi 10-20 ezerre. Ezután majd a fentiniél lényegesen jobb mintavételezésű térképeket lehet majd készíteni.

3.a. A 3.1.3. alfejezetben olvasható: „A szupernóva-képződés során a neutroncsillagról visszapattanó burokból egy kifelé terjedő lökéshullám jön létre.” Ismert-e ennek a lökéshullámnak karakterisztikus sebessége vagy az értékekben nagy a szórás?

A kialakuló lökéshullám sebessége nagyon sok tényezőtől függ, emiatt semmiképpen sem tekinthető univerzálisnak. Matzner & McKee (ApJ 510, 379, 1999) eredményei szerint a lökéshullám sebessége az alábbi módon függ a robbanó objektum és a robbanás paramétereitől:

$$v_{sh} = 0.79 \left(\frac{E_{expl}}{M_{ej}} \right)^{0.5} \left(\frac{M_{ej}}{\rho r^3} \right)^{0.19}$$

ahol E a robbanás energiája, M a ledobott tömeg. De ezen egyszerű analitikus képlet csak közelítőleg adja meg a sebességet, a konkrét szimulációkban ettől többé-kevésbé eltérő értékek is megjelenhetnek. Maga a probléma nagyon összetett, nagyon sok minden függ a szimulációban alkalmazott numerikus technikától (pl. 2D, vagy 3D szimulációról van-e szó) illetve a fizikai részletektől, különösen a felhasznált neutrínófizika komplexitásától. Például Müller et al. (MNRAS 479, 3675, 2018) egy 2,8 naptömegű C/O csillagmag felrobbanásának szimulációjából 20 - 30 000 km/s közötti értékeket kapott a kialakuló lökéshullám sebességére, amely a kifelé terjedés során csökken. Ennek nagyságrendje tehát kb. ugyanannyi, mint amekkora ledobódási sebességeket mérünk a szupernóva-robbanás után közvetlenül, viszont semmiképpen sem tekinthető a vákuumbeli fénysebességhez közelinek. Ennél jóval nagyobb sebességek (~100 000 km/s) pl. jet-indukálta robbanásban jöhetnek létre, legalábbis a ledobódott anyagfelhő kezdeti maximális tágulási sebessége ezeknél ilyen nagyságrendű, azonban az ilyen robbanások szimulációi még a többinél is nagyobb bizonytalanságokkal terheltek.

3.b. Ugyanitt olvasható: „annak feltétele, hogy a lökésfrontból származó fotonok képesek legyenek megelőzni a front mozgását[...]”. Mivel a vákuumbeli fénysebesség határsebesség, ez az állítás csak akkor értelmes, ha a fotonok kisebb, az adott közegre jellemző sebességgel terjednek. Milyen ez a sebesség (mennyi a közeg törésmutatója, ez kizárólag az értekezésben említett diffúzióknak tudható-e be)? Melyik sebességre gondolt: fázissebesség, csoportsebesség? Továbbá: előfordulhat, hogy a front sebessége nagyobb a közegbeli fénysebességnél? Amennyibe igen, az érdekes Cserenkov-sugárzáshoz, illetve feketelyuk-analógiákhoz vezethet. Ismertek-e ilyen jellegű tárgyalások?

A törésmutató, fázis- és csoportsebesség olyan makroszkopikus fogalmak, amelyeket plazmában terjedő sugárzásra általában síkhullámokkal definiálnak. Egy szupernóva-robbanás során létrejövő, erősen dinamikus közegében síkhullámok kialakulása nem valószínű, ezért a sugárzási hidrodinamikai szimulációk általában egy egyszerűsített fotonképpel modellezik a sugárzás terjedését. Eszerint a fotonok, mint részecskék, két egymást követő kölcsönhatás (szóródás) között a közepes szabad úthossznak (l) megfelelő távolságot a vákuumbeli fénysebességgel teszik meg. Nagy sűrűségű közegben, mint a szupernóva-robbanás kezdetén, ez a távolság igen kicsi, mikron nagyságrendű. Egy foton N szóródás után mérhető elmozdulása, klasszikus véletlen bolyongást feltételezve (azaz az egymás után bekövetkező szóródások teljesen véletlenszerű, izotrop szögeloszlásúak), ennek

értelmében $\Delta R = l \cdot \sqrt{N}$ lesz, az ehhez szükséges idő pedig $\Delta t = (Nl)/c$. A kettő összevetéséből

a fotonok terjedésének átlagsebessége $c/\sqrt{N} = c \cdot l / \Delta R$ lesz, ami $N > 1$ esetben a fénysebességnél kisebb. Az, hogy mennyivel kisebb, attól függ, hogy a megtett távolság hányszorosa a közepes szabad úthossznak (homogén közeget feltételezve). Ilyen értelemben a közegben terjedő lökéshullám sebessége (amelyet a hidrodinamikai törvények határoznak meg) akár felül is múlhatja az általa keltett sugárzás átlagsebességét a közegben. Ez azonban nem teljesen analóg a Cserenkov-sugárzás kialakulásáért felelős folyamattal, ugyanis ez utóbbi esetben egy konkrét töltött részecske, pl. egy elektron mozog a közegbeli fénysebességnél gyorsabban, míg a lökéshullám esetén a

folydékrészecskék nem mozognak ilyen gyorsan, pusztán az energia terjed a lökésfront sebességével.

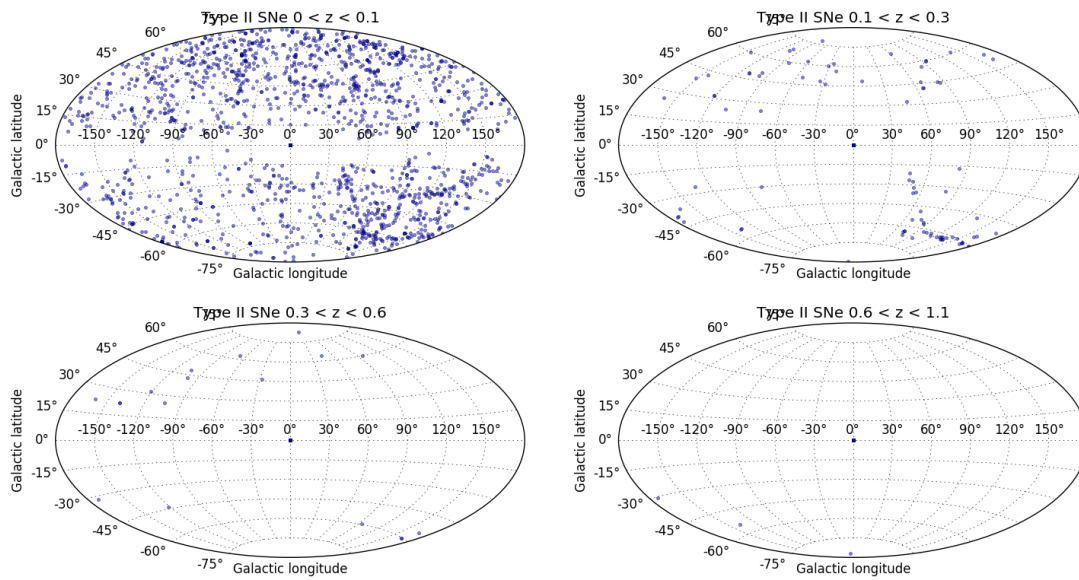
4. A 7.1 alfejezetben a távolságmérést ismerteti szupernóva-adatok alapján, és az alfejezetet azzal a megállapítással zárja, hogy a kollapszár szupernóvák segítségével ugyanolyan pontos távolságbecsléseket lehet tenni, mint az Ia típusú szupernóvával. Kérdésem, hogy előbbiek szintén alkalmasak-e kozmológiai távolságmérésre?

Mivel ez a kérdés Csabai István opponensi kérdései között is szerepelt, idemácsolom a neki írott válaszomat:

"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. "

A fentieket az alábbi, 2. ábrával is szemléltetem, amely a Sternberg-katalógusban szereplő ismert II-es típusú szupernóvák égbolton való eloszlását mutatja az 1. ábrához hasonló vöröseltolódás-tartományokban. Látszik, hogy a $z > 0,1$ fölötti tartományban már nagyon kevés ilyen szupernóvát katalogizáltak, sokkal kevesebbet, mint Ia típusút, annak ellenére, hogy ezek térfogati rátája sokszorosa az Ia szupernóva-rátának, legalábbis a lokális Univerzumban (lásd 2.5. fejezet). Ennek oka egyértelműen a kollapszár szupernóvák fentebb taglalt alacsonyabb abszolút fényessége.

dc_1213_16



2. ábra: II-es típusú szupernóvák eloszlása az égbolton, különböző vöröseltolódásoknál

Piszkéstető, 2018. augusztus 6.

Vinkó József