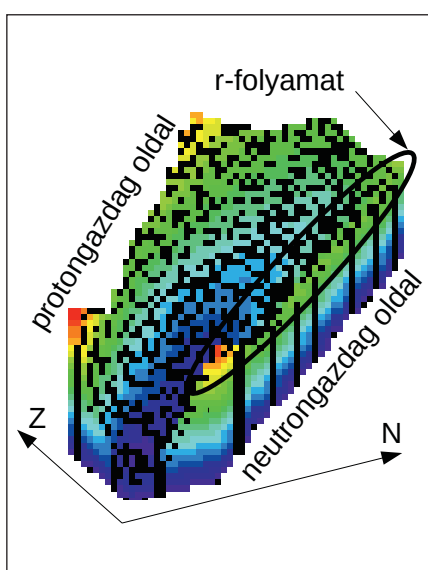


ELEKES ZOLTÁN–FÜLÖP ZSOLT

Szupernóvák: csillagok halála, elemek születése

A kémiai elemek atommagját protonok és neutronok, közös néven nukleonok alkotják. Egy elem rendszámát az atommagban lévő protonok száma határozza meg, mely protonokhoz több-kevesebb neutron csatlakozhat, létrehozva az adott elem izotópjait. Többnyire egy elemnek csak néhány izotópjja stabil, a többi hosszabb-rövidebb élete után elbomlik, a stabilitás felé törekszik. Ezt a jelenséget szemléletesen illusztrálja az **1. ábra**, amelyen a neutron- (N) és protonszám (Z) függvényében mutatjuk be az egyes atommagok egy nukleonra eső átlagos kötési energiáját. A stabil izotópok a völgyben helyezkednek el, az instabil, azaz radioaktív atommagok pedig a domboldalon. Utóbbiak ezért létrejöttük után mindig lefelé, a völgybe igyekeznek. Attól függően, hogy az adott atommag protonjait hozzájuk képest kevesebb vagy több neutronnal egészítjük ki, egy protonban gazdag és egy neutronban gazdag oldalt építhetünk fel. Mindkettő addig terjedhet, amíg a protonok és neutronok aránya annyira felborul, hogy az atommag születésének pillanata egyben élete végét is jelenti. A két oldalon így kialakuló gerinceket nevezzük nukleonelhullatási vonalaknak.

A Világegyetemben található elemek közül az ősrobbanás során csak a legkönnyebbek, azaz a hidrogén és a hélium (illetve kis mennyiségben a lítium és a berillium) jöttek létre. A többi, mintegy tízezer izotóp nagyrészt a csillagok energiatermelése során lejátszódó olyan magreakciókban keletkezett, il-



1. ábra. A stabilitás völgye

letve mind a mai napig keletkeznek, amelyekben két könnyebb atommag egy nehezebbé egyesül. Ha egy csillagnak a tömege meghaladja a Nap tömegének körülbelül tízszeresét, ezen fúziós reakciók legutolsó folyamataként beindul a szilíciumégés is. Ennek során a csillag energiatermelése a ^{28}Si (14 protont és 14 neutronot tartalmazó) atommagon történő ^4He atommagok (más néven alfa-részecske) egymást követő, többszörös befogásával folyik mindaddig, amíg a radioaktív ^{56}Ni létre nem jön, ahol a láncreakció megáll, mert a stabilitási völgy aljának közelébe érünk. Az ^{56}Ni izotóp már nem tud több alfa-részecskét befogni, mert ez energiafelvétellel járna, ezért a stabilitási völgy felé bomlik, ^{56}Fe -t (közönséges vas) termelve. Ez magyarázza a vas viszonylag magas elemgyakoriságát az Univerzumban.

A vason túli elemek tehát valamilyen, a fúziós reakciótól eltérő, más típusú

1. kép. Az SN1987A szupernóva



¹ A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program” című kiemelt projekt keretei között valósult meg.

folyamatban keletkeznek; például létrejöhetnek egy kataklizmaszerű esemény során. Ilyen esemény a szupernóva is, azaz egy nagy tömegű csillag halálakor bekövetkező hatalmas robbanás. Ismereteink szerint ilyen látványos detonáció, melynek fényessége akár egy egész galaxisét is meghaladhatja, alapvetően kétféleképpen játszódhat le:

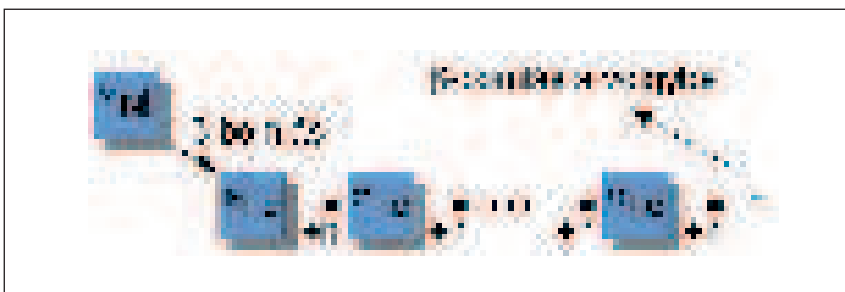
– kettős rendszer egyik tagjaként egy fehér törpe hidrogénben és héliumban dús anyagot szív el a pártjától, mely anyag gravitációs nyomásának egy idő után a fehér törpe képtelen ellenállni, és

séggel a nehéz elemek jelentős része itt keletkezik az úgynevezett asztrofizikai *r-folyamat* révén. Az *r* betű az angol rapid szóból származik, ami gyorsat jelent és a gyors neutronbefogásra utal. A szupernóva magjának összehúzódásakor a hőmérséklet és a sűrűség emelkedésével a vas és a környékén található elemek egy része szétesik a jelenlévő fotonok hatására. Ebben a folyamatban sok szabad neutron és alfa-részecske keletkezik. Másrészt az elektronok protonok által történő befogása is felgyorsul, ami szintén neutronokat és neutrínókat hoz

hullatási vonalakig is juthatunk, ahol az atommagok béta-bomlása mindenképpen megindul. A béta-bomlás segítségével egy lépést tehetünk a stabilitás felé, azonban ezt a nagy neutron-sűrűség megállítja és az *r*-folyamat útját újra a neutronelhullatási vonal felé tereli. Tehát az *r*-folyamat egy olyan ösvényen folyik az egyre magasabb tömegek felé, amely igen közel van neutronelhullatási vonalhoz, ahogyan ezt az *1. ábrán* is jelöltük. Ezért ennek a vonalnak és környezetének a feltérképezése alapvető fontosságú annak érdekében, hogy megfelelően megértsük a szupernóvában történő elemkeletkezést. Érdemes megjegyezni, hogy ma ezt a vonalat kizárólag a nyolc protont tartalmazó, azaz igen alacsony rendszámú oxigénizotópokig ismerjük. Azonban a vázolt viszonylag egyszerű képet árnyalja az, hogy a különleges neutron/proton arányú atommagoknak van néhány, a szokásostól eltérő tulajdonsága, amelyet a továbbiakban részletezünk.

Az atommagok sajátosságait igen nehéz szemléletesen leírni, hiszen érzékszerveink nem képesek betekintést nyújtani parányi világukba, ezért olyan modelleket alkotunk, amelyek a valóság valamilyen leképezését jelentik, hogy a be rendezéseink által mérhető mennyiségek értékét meg tudjuk magyarázni.

Az egyik ilyen modell szerint a nukleonok az atomi elektronokhoz hasonlóan energetikailag meghatározott pályákon mozognak, és ezek a nukleonpályák is héjakba rendeződnek. Ha egy atommagban éppen annyi neutron és/vagy proton van, hogy az egy héjba tartozó minden pálya be van töltve, különlegesen stabil, zárt héjú, „nemesgáz szerkezetű”, más



2. ábra. Gyors neutronbefogás (*r*-folyamat)

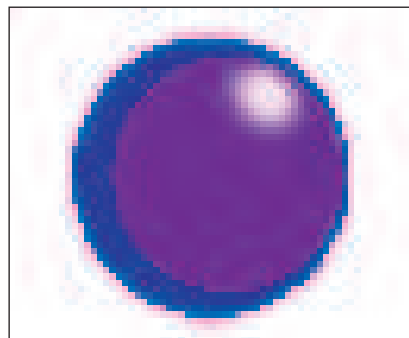
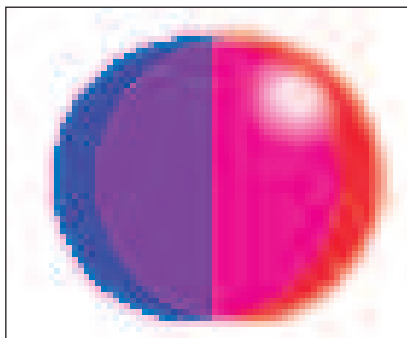
egy szabályozatlan fúziós láncreakcióban, azaz egy termonukleáris robbanásban megsemmisül¹;

– egy a Napnál jóval nagyobb tömegű csillag magja hirtelen összeomlik, e folyamat végén általában csak egy fekete lyuk, vagy neutroncsillag marad vissza. Az összeomlásnak egyik oka lehet például, hogy a mag eléri a Chandrasekhar-határt, azaz a kvantumnyomás, amely abból származik, hogy az elektronok nem lehetnek azonos kvantumállapotban, nem tudja több ellensúlyozni a gravitációs nyomást.

Az utóbbi típusba tartozik a modern kor legismertebb, szabad szemmel is megfigyelt, a Nagy Magellán-felhőben felfényelt szupernóvája. Ez az esemény, melynek során egy kék óriáscsillag magja omlott össze, mintegy 170 000 évvel ezelőtt történt, amikor az emberiség még jócskán a kőkorszakban járt, mégis az SN1987A jelzéssel láttuk el, mert csak 1987-ben ért ide a robbanás fénye. Az **1. képen** a Hubble-űrteleszkóp által, 15 évvel a felfedezés után készített felvételt láthatjuk.

A II. típusú szupernóvák azért is igen érdekesek, mert nagy valószínű-

létre. Ebben az igen neutron-dús (kb. 10^{21} n/cm³) környezetben a vashoz közeli elemek egymás után fogják be a neutronokat, radioaktív, neutrongazdag izotópokat létrehozva, amelyek képtelenek a stabilitási völgy felé megindulni béta-bomlással, mert az több időt igényel, mint a neutronbefogás. Így, ahogyan azt a **2. ábrán** is látjuk, igen messze távolodunk a stabilitástól, az extrém neutron/proton arányú izotópok tartományába. A ⁷⁵Fe, amelyet csak 2013-ban fedez-

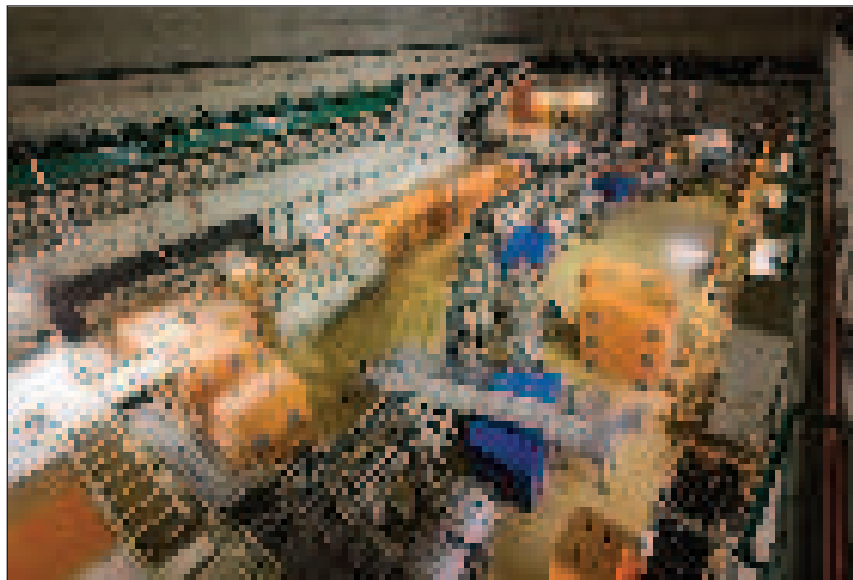


3. ábra. Elektromos, dipólus óriás- és törperezonancia

tek fel, például 49 neutront és csupán 26 protont tartalmaz. Ez a láncreakció annál az izotópnál áll meg, amelyiknél a neutronbefogás és a béta-bomlás egyensúlyba kerül. Így akár a neutronel-

néven mágikus atommagról beszélünk. Amikor a szupernóvában a neutronbefogás által egy ilyen izotóp jön létre, akkor tovább nem haladhatunk a neutronelhullatási vonal felé, mert a mágikus

¹A Kepler-űrtávcső ideai mérései arra engednek következtetni, hogy az idáig kétkedéssel fogadott elmélet, mely szerint szupernóvák létrejöhetnek két fehér törpe összeolvadása során is, igaz lehet.



2. kép. A RIKEN kutatóintézet radioaktívtermék-szeparátora

magot tartalmaz, mágneses térrel szét kell választani őket az eltérő töltésük és tömegük alapján, így röptében el tudjuk különíteni a számunkra érdekes izotópot. Ahhoz, hogy meghatározzuk a neutronok és protonok hozzájárulását a törperezonanciához, az előállított radioaktív ionnyalábot két mérésben egy-egy céltárgyra vezetjük, melyeket úgy választunk meg, hogy érzékenysé-
gük nagyon különböző legyen a neutronokra és a protonokra. A nagy töltésű ólom atommagokon való szóródás elsősorban a töltés (proton) eloszlására, míg a hidrogéneken való szórás főleg a neutronok eloszlására érzékeny. Kutatásainkat a világ vezető radioaktív ionnyalábgyárában, Japánban, a RIKEN kutatóközpontban végezzük, ahol a különleges izotópok választéka a legszélesebb és intenzitásuk a legnagyobb. A **2. képen** a RIKEN kutatóintézet radioaktívtermék-szeparátora látható. Ilyen berendezéseket fognak építeni a közeljövőben Európában a franciaországi GANIL és a németországi GSI kutatóintézetekben, valamint az Egyesült Államokban a Michigani Állami Egyetemen. Így az asztrofizika által motivált egzotikus jelenségek vizsgálata szerte a világon hangsúlyos szerepet kap a közeljövőben.

A szupernóvákra általában mint távoli, egyedi égi jelenségekre gondolunk, azonban már egy, a Földtől körülbelül 200 fényévre bekövetkező csillagrobbanás által kilökött anyag is eljuthat bolygónkra. Nyilván erre csak úgy találhatunk bizonyítékot, ha olyan izotópot keresünk a Földön, amely máshogyan nem keletkezhetett, és nem juthatott ide. Ezért valamilyen neutronban gazdag, radioaktív izotópot kell keresnünk, aminek viszont elég hosszú az élettartama ahhoz, hogy ne bomoljon rövid időn belül a stabilitás felé. Erre ideális jelölt a vas 60-as izotópja, mivel a Naprendszerben csak kis mennyiségben jöhetett létre kozmikus sugárzás hatására, ráadásul a Földön a kozmikus sugárzást az atmoszféra jelentősen leárnnyékolja. Szerencsére az emberi tevékenység következtében sem termelődik ez az izotóp, és a 2,6 millió éves felezési ideje is lehetővé teszi, hogy még ma is észleljük. Valóban, müncheni kutatók a 2000-es évek közepén csendes-óceáni üledékek vizsgálatával bizonyították, hogy emberről valószínűleg hajnalán, úgy 2,8 millió évvel ezelőtt a Föld közelében szupernóvaként végezte életét egy csillag. A robbanásos elemkeletkezés megértése tehát nemcsak önmagában érdekes kérdés, hanem távolabbi területekre is vezethet.

atommag neutronbefogásának ideje összemérhető lesz a béta-bomlásával, így ezek az izotópok várakozási pontokként jelennek meg az r-folyamatban. Sokáig úgy gondoltuk, hogy a mágikus neutron- és protonszámok ugyanott helyezkednek el a neutrongazdag atommagok között, mint ahogyan azt a stabilitás környékén megismertük. Azonban az utóbbi húsz évben bebizonyosodott, hogy a radioaktív izotópoknál ezek a mágikus számok megváltoznak, ami jelentősen módosítja az r-folyamat útját és a kialakuló elemgyakoriságát. Ezt a jelenséget mindaddig csak azoknál a mágikus számoknál (8, 20, 28) sikerült megfigyelni, amelyek az r-folyamat szempontjából nem alapvetően fontosak, hisz ezek a számok alacsony tömegű tartományt fednek le. A nehéz elemek keletkezése szempontjából kritikus 50-es, 82-es és 126-os mágikus számok viselkedésének feltárása a közeljövő egyik leglényegesebb atommagfizikai kutatási területe.

A XX. század második felében már megtanultuk, hogy az atommag tulajdonságainak leírására a fentebb vázolt, úgynevezett héjmodell önmagában nem elegendő, ugyanis a protonok és neutronok képesek kollektív, azaz összehangolt, együttes mozgásra is, ami nagymértékű gerjesztésekhez, óriásrezonanciákhoz vezet. Ilyen kollektív óriásrezgésre láthatunk példát a **3. ábrában** oldalon, ahol az atommagot alkotó neutron- (kék) és protonanyag (piros) egymáshoz képest ellentétes fázisban oszcillál, amit elektromos dipólus óriásrezonanciának nevezünk. Ez a gerjesztés minden atommagban megjelenik, de az erősen neutrontöbbletes atommagok

ebből a szempontból is különlegese-
k, ugyanis a sok neutron az atommag felületén egy vékony, de az atommag méretéhez képest jelentős neutronbőrt alakíthat ki. Sőt arra is találhatunk példát, hogy néhány neutron szinte lecsatolódik az atommag törzséről, és azt glóriaként lengi körül. Az utóbbi évtizedben tanúi lehettünk annak, hogy nemcsak óriásrezonancia, hanem egy alacsony frekvenciás, kisebb energiájú, úgynevezett törperezonancia is megjelenik az ilyen atommagokban. Ezt úgy értelmezhetjük, hogy a neutronbőrt, illetve a neutronglóriát alkotó nukleonok oszcillálnak az atommagtörzssel ellentétes fázisban, melyet a **3. ábra jobb oldalán** szemléltettünk. Ez azért érdekes, mert az r-folyamatban az instabil atommagokkal ütköző neutronok energiája olyan, hogy nagyon könnyen létrehozhatják a törperezonanciát, amivel a neutronbefogás valószínűsége akár tízszeresére is növekedhet. Mivel a szóban forgó instabil atommagok élettartama igen rövid, a másodperc törtrésze, radioaktív ionnyalábok felhasználásával vizsgáljuk ezt az effektust, vagyis azt a nyitott kérdést, hogy a törperezonancia létrehozásában mekkora a neutronok és protonok járuléka.

Radioaktív ionnyalábot úgy hozunk létre, hogy nagyenergiájú (a fénysebesség 30–50 százalékával mozgó), stabil atommagokat lövünk álló atommagokra. Az ütközés során az atommagok széttörnek, és a törmelék továbbrepül. Nagyon kis valószínűséggel olyan fragmentum is előáll, amelyben a protonok és a neutronok aránya extrém. Mivel ez a törmelék számos különböző atom-