

Szegedi Tudományegyetem
TTIK Kísérleti Fizikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

**KOMPAKT CSILLAGOKKAL KAPCSOLATOS
ÚJONNAN FELFEDEZETT JELENSÉGEK**

Készítette: Sukolová Dóra
fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly
egyetemi tanár

Szeged 2018

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Bevezető	3
1. Neutroncsillagok, pulzárok	4
1.1. A pulzárok felfedezése.....	4
1.2. Pulzárok típusai.....	5
1.3. Milliszekundumos pulzárok (MSP).....	5
1.4. Magnetárok	5
1.5. Pulzárok gyakorlati haszna	8
1.6. Neutroncsillagok ütközése, tömegrés (Bécsy, Dálya és Raffai 2017).....	10
2. Fehér törpék.....	12
2.1. Ia típusú szupernóvarobbanások	13
2.2. Maximálistömeg-probléma (Chatterjee, és mtsai. 2017).....	14
2.3. Fehér törpe pulzár	15
3. GRB.....	17
4. FRB (Paragi 2017)	20
4.1. A lassú rádiókitörésektől a gyorsakig	20
4.2. Rádiótávcsöves megfigyelések	20
4.3. Eredetük tárgyalása.....	21
4.4. Lokalizáció.....	22
4.5. Az ismétlődő FRB 121102	22
4.6. Eddigi modellek	23
5. TDE	24
6. Álszupernóvák.....	26
7. Gravitációs hullámok (Dálya és Bécsy 2017).....	28
Összefoglaló	32
Köszönetnyilvánítás	33
Irodalomjegyzék.....	34
NYILATKOZAT.....	39

Bevezető

A XX. század vége felé egyre több csillagászati újdonsággal találkozhatott a tudomány embere, de ezek megfigyelése eleinte nagy kihívásokat jelentett. Mivel sokszor nagyon rövid ideig tartó tranzienst jelenségekről van szó, fontos, hogy különböző kutatóállomások, obszervatóriumok kapcsolatban álljanak egymással, és az ilyen gyorsan lezajló események történésekor riaszthassanak más csoportokat. Ez lehetővé teszi, hogy minél több információt nyerjünk az elemzésből.

A kutatási műszerek fejlesztése az utóbbi évtizedekben rengeteg új csillagászati jelenség megismerését tette lehetővé, s emellett az űrkutatás sokszor más tudományok hasznos találmányait ihlette meg, így a csillagászat több módon is gazdagította fejlődő világunkat.

Azt a célt tűztem ki, hogy dolgozatomban a rendelkezésre álló (főleg angol) irodalom alapján összefoglalót készítek a nemrégiben felfedezett kompakt objektumokról és velük kapcsolatos jelenségekről, naprakész információkkal. A kompakt objektumok kicsi, tömör, nagy tömegű égitestek, amelyeken belül (és közelében) extrém fizikai körülmények uralkodnak. A technikai fejlődésnek köszönhetően megszületett a többcsatornás csillagászat (multi-messenger astronomy), amikor különféle égitesteket, jelenségeket egyszerre vizsgálhatunk a gravitációs és az elektromágneses hullámok tartományán (Kiss 2017).

1. Neutroncsillagok, pulzárak

A neutroncsillagok elegendően nagy tömegű ($8 M_{\odot}$ feletti) csillag halálakor, egy szupernóvarobbanást követően maradnak vissza, miután leáll bennük az utolsó energianyereséges fúziós folyamat is – az elemek egy ilyen csillagban egészen vasig keletkezhetnek. Sűrű, kompakt objektumok ezek, átmérőjük mindössze 20 km körül mozog, felszíni hőmérsékletük többszázezer kelvin, luminozitásuk kicsi, mágneses terük nagyon erős is lehet. A nagy sűrűség, hőmérséklet és nyomás hatására az elektronok minél többen „beleprézelődnek” a protonokba (neutronizáció), míg a haldokló csillag gravitációsan össze nem roppan, s egy szupernóva-robbanás kíséretében egy tömören neutronokból álló objektum jön létre, vagy egy fekete lyuk. A csillag sugarának csökkenése mellett perdülete megmarad, így forgása felgyorsul akár az eredeti szögsebesség milliószerosára, az intenzív forgása során pedig rádióimpulzusokat bocsát ki – ilyen egy pulzár (Barna és mtsai. 2016).

1.1. A pulzárak felfedezése

Már 1934-ben feltételezte Walter Baade és Fritz Zwicky, hogy a szupernóvarobbanást elszenvedő csillagoknak visszamarad egy tömör magja, ill. ők a kozmikus sugárzás erős forrásai (Zwicky és Baade 1934). Szupernóvából sokat észleltek, de ami a neutroncsillagokat illeti, az első eredményes észlelésre csak jóval később került sor. Jocelyn Bell Burnell, Antony Hewish professzor diákja 1967. november 28-án azonosította be (modern neve szerint) a PSR B1919+21 jelzésű objektumot, mint az ezeket megelőzően véletlenül észlelt, első periodikus (1,33 ms) rádiófelvillanások forrását. Ez egy gyorsan forgó erős mágneses mezőjű neutroncsillag, azaz pulzár (Deffree 2017). Franco Pacini '67 után felvázolta az első, pulzárakra jellemző magnetoszféra-modellt, majd '69-ben Ostriker és Gunn arról írt, hogy ez a forgó mágnes részecskegyorsítóként működik (Pacini 1992). A pulzár-jelenséget Thomas Gold kapcsolta össze a neutroncsillagokkal '68-ban. A cikk ezzel magyarázatot adott a Rák-köd luminozitására is, így szupernóva-buborékokban kezdték őket keresni. Egy 20 000 éves szupernóva-maradványban megtaláltak egy 89 ms periódusú pulzárt, majd a Rák-köd sajátjára is ráleltek, amely periódusa 33 ms (Gold 1969). Általánosan, periódusuk milliszekundumostól másodpercesig terjedhet.

1.2. Pulzárok típusai

A pulzárok több fő csoportra oszthatók fel sajátosságaik alapján. Nagy részük klasszikus pulzár, amely a rádiójelek kibocsátásához szükséges energiát a forgás lassulásából eredő energiavesztéséből nyeri. A nem túl gyorsan forgó egyedek akár évmilliók alatt közönséges neutroncsillagéhoz hasonló forgási sebességekre lassulnak az erős mágneses tér fékező hatása miatt, ezért az ilyen (múltbeli) pulzárok java már régen nem bocsát ki intenzív nyalábokat, hiszen az univerzum időskálájához képest ez nem túl hosszú idő. Anyagi akkréciós folyamatok által fűtött pulzároknál (röntgenpulzárok) a gravitációs potenciális energia a forrás. Megkülönböztethetünk egy gammasugárzó altípust is, ami a pulzárok ~5%-át teszi ki, amelyek világító nyalábjai az általános, rádió- vagy röntgenhullámokat sugárzó pulzárokéval ellentétben inkább nagyenergiájú gammafotonok árama. Különös jellegzetességekkel bírnak a milliszekundumos pulzárok és magnetárok is (Pulsar - Wikipedia 2018).

1.3. Milliszekundumos pulzárok (MSP)

Az MSP-k 1-10 ms közötti periódussal rendelkeznek. Rádióhullámok mellett röntgen és gamma tartományon sugároznak erősen, energiájukat pedig tömegbefogás táplálja, ezért kettős rendszer tagjaként felpörgetve kialakulhatnak klasszikus pulzárokból. Gyors forgásuk ellenére előfordul, hogy 3-4 nagyságrenddel is kisebb a mágneses mezőjük, mint az átlagos pulzároknak, és ennek is köszönhető hosszú élettartamuk. Akár több milliárd évbe is beletelhet, míg „kiöregednek”, és egyszerű neutroncsillaggá lassulnak. Sok található belőlük gömbhalmazokban, ahol a sűrű elhelyezkedés miatt nagyobb valószínűséggel lehet társ (akár befogott) csillaga, kettejük között anyagáramlással. Az akkréciós folyamat indokolhatja a mágneses tér gyengülését is (Bhattacharya és van den Heuvel 1991). Az ilyen, gömbhalmazokban található MSP-knek is van már saját katalógusuk (Freire 2011-2018):

<http://www2.naic.edu/~pfreire/GCpsr.html>

1.4. Magnetárok

A magnetárok nevüket 1992-ben kapták (Duncan & Thompson). Az elnevezés olyan pulzárokat jelöl, amelyek igazán erős mágneses térrel rendelkeznek. Az átmérő csökkenésével nem csak a csillag forgása gyorsul, de mivel elméletben a mágneses fluxus az áramló plazmában állandó, így a zsugorodás során a mágneses térerősség is milliószorosára növekedhet, mágneses mező jelenlétében pedig saját részecskegyorsítója lép működésbe, felgyorsítva a szabadon mozgó protonokat és elektronokat. Ez egy kis térszögű nyaláb

formájában lövell ki a két ellentétes mágneses pólusból. Elektromágneses sugárzásuk jelentős, főleg gamma- és röntgentartományban (Barna és mtsai. 2016).

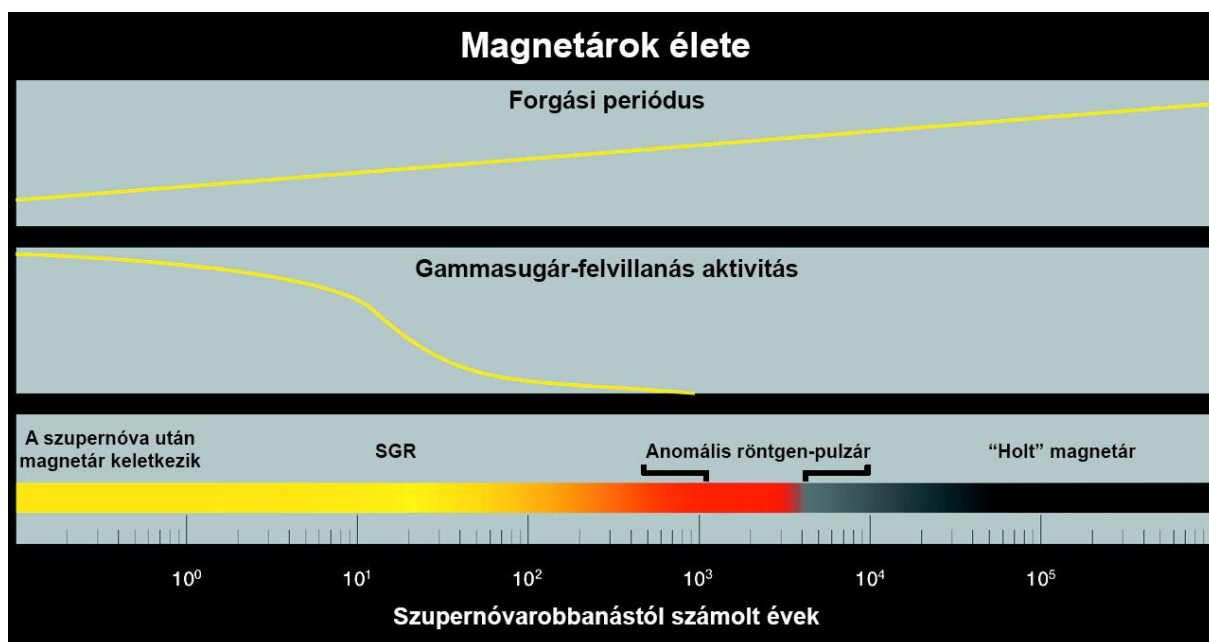
Az érdekesség kedvéért először hasonlítsuk össze különböző források mágneses tereit egy táblázatban (Duncan 1998)!

A MÁGNESES TÉR FORRÁSA	Mágneses térerősség [Gauss]
Föld az északi póluson mérve	0,6
Átlagos hűtőmágnes	100
Intenzív napfoltok a Nap felületén látható sötét, mágneses területein	4000
Mágnesesrezonancia-képalkotás (MRI) Leggyakoribbak az 1,5T és 3T gépek, de léteznek még 9,4T (horizontális) és 11,7T (vertikális) térerősséggel működő berendezések is. (Nord 2017) (1 Tesla = 10^4 Gauss)	$5 \cdot 10^3$ - $11,7 \cdot 10^4$
Laboratóriumban mesterségesen, elektromágnesekkel előállított legerősebb fenntartható mágneses tér	$4,5 \cdot 10^5$
Legerősebb, 4-8μs-ig fenntartott, mesterséges mágneses tér	10^7
Neutronsillagtól különböző csillagászati objektumok legerősebb detektált mágneses tere erősen mágneses, kompakt fehér törpékben (előfordulásuk ritka)	10^8
Rádiópulzárak a neutronsillagok egyik leggyakoribb formájának tipikus felületi és poláris mágneses tere	10^{12} - 10^{13}
Magnetárok Lágygamma-ismétlők és anomalikus röntgenpulzárak felületi és poláris terei. A belső, elméletben toroid geometriával rendelkező terek akár 10^{16} értéket is felvehetnek.	10^{14} - 10^{15}

1. táblázat: Különböző források mágneses térerősségei (Duncan 1998)

Egy elmélet szerint kialakulásuk a gravitációs összeroppanással egyidőben speciális dinamóhatás mellett lehetséges. Kezdetben nagyon gyors, 1 ms forgási periódusuk van, ami nagyon gyorsan lelassul a mágneses fékeződés során. Az ebből adódó energia extra löketet ad a szupernóva-robbanásnak (Duncan és Thompson 1992).

Észlelésük kihívás, mert az átlagos pulzároknál gyorsabban gyengül a rádiósugárzásuk, főként a kemény röntgen / lágy gamma tartományon sugároznak (Duncan és Thompson 1992), ezen keresztül van rá bizonyíték, hogy az SGR-ek (Soft Gamma Repeater – lágy gamma ismétlő) fiatal magnetárok. Bár csak keveset ismerünk belőlük, feltételezhetően jóval több létezik, mert többségüket csak a nagyenergiájú kitöréseik során fedezték fel (Esposito, Rea és Israel 2018). A neutroncsillagban tárolt, flerekben feltörő mágneses energia származhat a mágnesesség által feszültség alatt tartott repedésekből és a csillag magnetoszférájának hirtelen újrapcsolódásaiból (Duncan és Thompson 1992, Thompson és Duncan 1995, 1996). Ezek a kitörések akár ezerszeres fluxusnövekedésben nyilvánulnak meg, melyek hónapok-évek alatt halványodnak el (Rea és mtsai. 2010, Coti Zelati és mtsai. 2018).

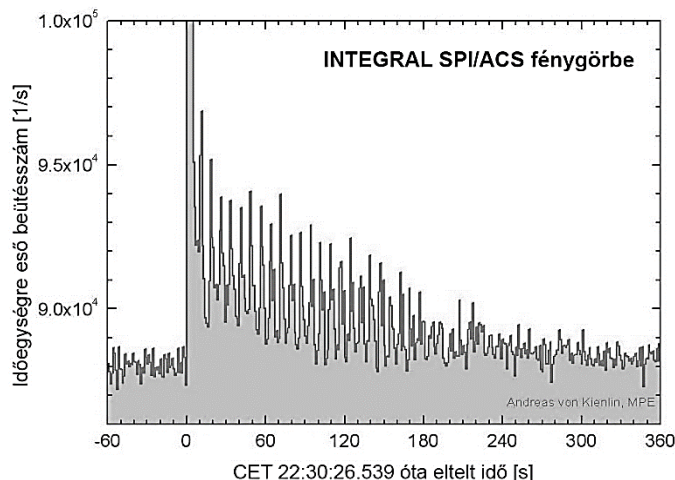


1. ábra: A magnetárok életciklusa folyamán bekövetkező változások (Kouveliotou, Magnetars 1999)

A magnetárok egy másik típusa az AXP (Anomalous X-Ray Pulsar – anomális röntgenpulzár). Ezek 6 másodperces (lassú) forgási periódusuk ellenére mégis lágyröntgen-tartományon pulzálnak. Energiaforrásuk sokáig rejtély volt. Ezek vélhetően óriáscsillagok végállapotai, nem pedig egy fehér törpe akkréció által indukált kollapszusa során jöttek létre (van Paradijs, Taam és van den Heuvel 1995). Lehetségesnek tartották, hogy a szupernóvarobbanást követően fennmaradó anyag visszahullik a neutroncsillagra, és ennek felhevülése során bocsát ki röntgen-jeleket, de a mai elfogadott modell szerint a röntgen-pulzációt a mágneses tér folyamatos csökkenése okozza. Az SGR-kkel ellentétben az AXP-k kevésbé aktívak (lehetséges kitörésekkel), és sebesen lassul a forgásuk a mágneses fékezés miatt. Ahogy a fenti 1. ábra mutatja, a modellek szerint az újszülött magnetárok SGR-ekké,

majd abból AXP-kké fejlődnek, míg párezer év alatt el nem vesztik jellegzetes „fényüket” (Anomalous X-ray Pulsar | COSMOS 2018).

Már más kompakt objektumok esetében is ismert jelenség volt a QPO (Quasi-periodic oscillation – kvázi-periodikus oszcilláció). A röntgen-tartomány egyes frekvenciáin pislákoló jel észlelhető. Feltételezhetően a magnetárok (SGR-ek) óriásflereiben nyilvánul meg a jelenség, amely oka a tömör, extrém nyomás alatt álló objektum szeizmikus rezgései



2. ábra: Az SGR 1806-20 2004.12.27-én észlelt fénygörbéje (Kienlin 2014)

(csillagrezgések). Az intenzív flerek egy első, rövid, erős, 1 másodpercnél rövidebb ideig tartó felvillanásból és azt követő csillapodó amplitúdójú néhány száz másodpercig észlelhető jelismétlődésekből állnak. Ahogy a mágneses térben globálisan nagy változások állnak be, a stresszrepedések rengéseket generálhatnak, amelyek akár az egész égitesten szétterjednek (Watts és Strohmayer 2007). Az SGR 1806-20 objektum 2 óriásflérének 1998.08.25.-ei megfigyelései 84 Hz-en erős QPO-t mutattak, ill. 28, 54, 155 Hz-en gyengébb mellékeket (Israel és mtsai. 2005). Ugyan ezen objektum 2004.12.27.-ei megfigyelései 18 és 30 Hz-en gyenge, ill. 92 Hz-en erős QPO elemeket mutattak ki (Strohmayer és Watts 2005).

A magnetárokat a McGill Pulsar Group kutatócsoport katalogizálta (Olausen és Kaspi 2014). A katalógus elérhető a következő URL cím alatt:

<http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>

Az utolsó frissítés óta viszont már 30-ra nőtt az ismert magnetárok száma, de a katalógus jelenleg 29 magnetárt foglal magában, ebből 11 megerősített + 4 jelölt SGR, illetve 12 igazolt és 2 jelölt AXP.

1.5. Pulzárok gyakorlati haszna

1974-ben Hulse és Taylor fedezett fel először olyan neutroncsillag-kettőst, amely egyike pulzár. A kettős keringési periódusa kb. 7 óra 45 perc, ez évente 76,5 μ s-mal csökken a pályasugár lerövidüléséből adódóan. Így sikerült kimutatni az Einstein által jóslott relativisztikus effektusokat – az energiaveszteség gravitációs hullámok formájában távozik, és

ez közvetett bizonyítékként szolgált a gravitációs hullámok létezésére. Az objektumot mai napig figyelik, s eddig nem cáfolta a felállított elméletet (Weisberg, Nice és Taylor 2010). A Hulse-Taylor kettős névadói számára ez a gyakorlati felfedezés Nobel-díjat is eredményezett.

A pulzárak segítségével képet kaphatunk a csillagközi anyag minőségéről és mennyiségéről. A pulzárimpulzusok diszperziót szenvednek el a meleg ionizált intersztelláris gázon áthaladva. Az elektromágneses hullámok az ionizált médiumban kölcsönhatásba lépnek a szabad elektronokkal, a jelek csoportsebességei pedig a hullámhossz növekedésével csökkennek, tehát pl. a rádióhullámok később érnek a detektorba, mint a rövidebb hullámhosszú komponensek. A jel beérkezési ideje tehát a szabadelektron-oszlopsűrűség (anyagoszlop) függvénye, amin keresztül halad. Amit detektálunk, az eredeti jel „kiszélesedett” változata (Ferriere 2001). A diszperzió mértékét két frekvencia különbségéből és a hozzájuk tartozó beérkezési idők különbségéből számítják ki. Ha a forrás nem túl távoli, akkor a parallaxis alapján megadható a távolsága. Az elektronsűrűséget ilyen információk alapján az egyszerű $n_e = DM/D = [\text{elektron}/\text{cm}^3]$ képletből lehet megkapni, ahol DM a diszperzió mértéke, D pedig az objektum távolsága parszekben (Pulsar Dispersion Measure | CAS CMS 2018).

Mivel a milliszekundumos pulzárak lassan változtatják periódusukat, használhatjuk alternatív időmérő eszközökként. Az első pulzárórát 2011-ben Gdanskban állítottak fel. Egy 4x4-es mátrixban elhelyezett 16 antennás (interferometriás), 1,2 m rádiósávban mérő rádióteleszkópból áll, ami 6 kijelölt pulzárt figyel meg, a jeleket pedig digitálisan feldolgozzák (Owczynnik, Szychliński és Pazderski 2011). A felállítás idejében ez az óra számított az akkori legpontosabbnak ($\sim 10^{-18}$ s), az atomóráknál ($\sim 10^{-16}$ s - 2015) több nagyságrenddel jobbak voltak (polskieradio.pl 2011). Segítségével szerették volna pontosítani őket, de ma már tudjuk, hogy általánosan pontosságuk nem ennyire jó – belső (szabálytalan felvillanások/fluktuációk) és külső környezeti tényezők különböző mértékben (10^{-15} s - 10^{-20} s) befolyásolhatják. Mindez 10 évnyi MSP mérés alapján 10^{-14} s-nyi hibát eredményezett, ez további 50-100 év alatt várhatóan 10^{-18} s-ra csökkenthető (Ilyasov és mtsai. 2006).

A számomra legizgalmasabb alkalmazásuk a pozíciómérés modernizált módja, ami a jövő „GPS-e” lehetne. Bolygó- és csillagközi utazásaink során hasznunkra válhatna egy olyan rendszer, amely távoli rádióforrások jelei alapján a tájékozódik. Így nem szükséges teleszemetelni további haszontalan „műholdakkal” az univerzumot, ha már vannak erre alkalmas természetadta jeladók is. Az elektromágneses jeleken alapuló tájékozódást már sok szakember felvetette, a relativisztikus tájékozódás alapjait felvázolták. Szükség van egy vevőre,

ami képes megszámolni a legalább négy ismert periódusú és pozíciójú pulzárból érkező jeleket. Megfigyelik az egymást követő jelek közti időeltéréseket. A lokalizáció precizitása a szerkezet óráinak pontosságától és mennyiségétől függ (több atomóra ajánlott), ill. a megfigyelt jelforrások számától. A klasszikus világban a három tér komponens + idő (Minkowski téridő) miatt kell legalább négy referenciapont. Az extra megfigyelési pontok annyiban tehetnék pontosabbá az eredményt, hogy kiegyensúlyozhatnák a váratlan fluktuációk okozta egyenetlenségeket, eredetüktől függetlenül (sztochasztikus tényezők, fedések...) (Tartaglia, Ruggiero és Capolongo 2011).

1.6. Neutroncsillagok ütközése, tömegrés (Bécsy, Dálya és Raffai 2017)

Nagyon gyakoriak a kettős- és többes csillagrendszerek. Különösen jelentősek a kompakt kettősökkel kapcsolatos kutatások, a rajtuk végzett mérés izgalmas kihívás. A nem egyke rendszerek vizsgálata sokrétű, hiszen több fajta objektumból tevődhetnek össze, ennek függvényében viselkedésük és az észlelt jelek eltérhetnek. Az egymás körül keringő objektumok egyre közelebb kerülnek egymáshoz és bespiráloznak. Eközben energiájuk csökken, ez a veszteség pedig elektromágneses (pl. rádió) és gravitációs hullámok formájában terjed szét. Elméletben egy tengely menti gammasugárzó-nyaláb is kilövell az esemény bekövetkezésekor.

Ilyen esemény gravitációs hullámait sikerült először 2017. augusztus 17-én kimérni. A bespirálozás folyamán az amplitúdója és frekvenciája egyre csak növekszik (egyre nő a gravitációs hullámok formájában távozó energiavesztés). Ezt a jelet 100 másodpercig észlelték. A becsült távolságunk a kettőstől 32-48 Mpc (~130 millió fényév), az objektumok tömegét 1,1-1,6 M_{\odot} közé becsülték.

Két neutroncsillag ütközésének eredménye lehet fekete lyuk, egy stabil, új neutroncsillag, vagy egy neutroncsillag, ami egy idő múlva végül szintén fekete lyukká omlik össze. A végeredmény kérdéses, a keletkezett égitest kb. 3 M_{\odot} , ami mindenképpen különlegesnek számít, ugyanis új neutroncsillag kimenetel esetében ez az egyik legnagyobb tömegű, amit közülük ismerünk, ha pedig fekete lyuk keletkezett, az a legkisebb ismert tömegű lenne. 2 és 5 M_{\odot} között egy úgynevezett tömegrés létezik, úgy tűnik, mintha ebben tartományban nem léteznének neutroncsillagok vagy fekete lyukak.

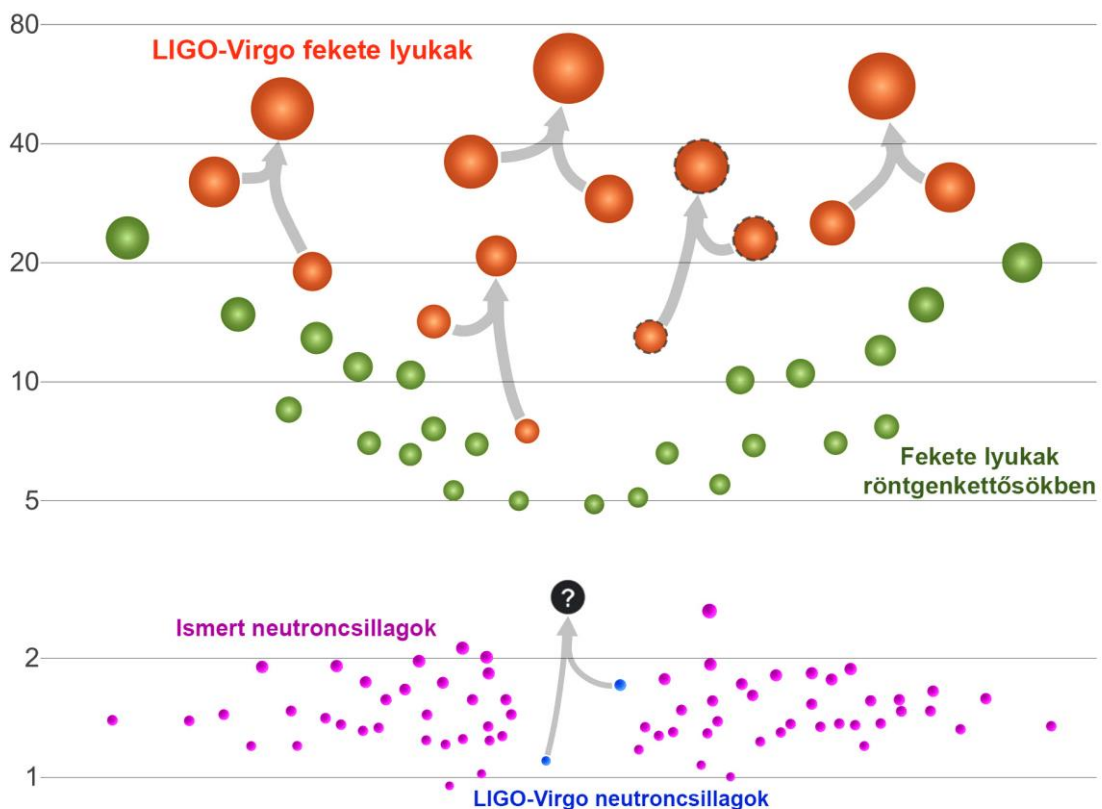
Az események forrását nehéz precízen meghatározni, ha nincs elég detektorunk. Önmagában a LIGO 190 négyzetfokos területet határol be, a Virgo detektorral való

együttműködéssel pedig ez 31 négyzetfokra szűkíthető le. További detektorokkal sokkal nagyobb pontosságot érhetnénk el, és könnyen meg tudnánk figyelni más energiatartományok jeleit is.

Az utófénylést a leszűkített területen egyszerűbb megtalálni, ha az ott található galaxisokat vizsgáljuk meg, erre fejlesztették ki az ELTÉ-n a GLADE galaxiskatalógust, amely már 3 milliónál is több galaxist tartalmaz. Az ott látható galaxisokat így megvizsgálhatták különböző hullámhossz-tartományokon. Ezzel a módszerrel több csillagászcsoport is rálelt a forrásra. Az NGC 4993 galaxis mellett jelent meg egy új objektum, a jel forrása.

Objektumok tömegei a csillagtemetőben

naptömegben



3. ábra: Objektumok tömegei a csillagtemetőben (LIGO-Virgo/Frank és Elavsky/Northwestern University 2017)

A gravitációs hullámok további tárgyalása a 7. fejezetben történik.

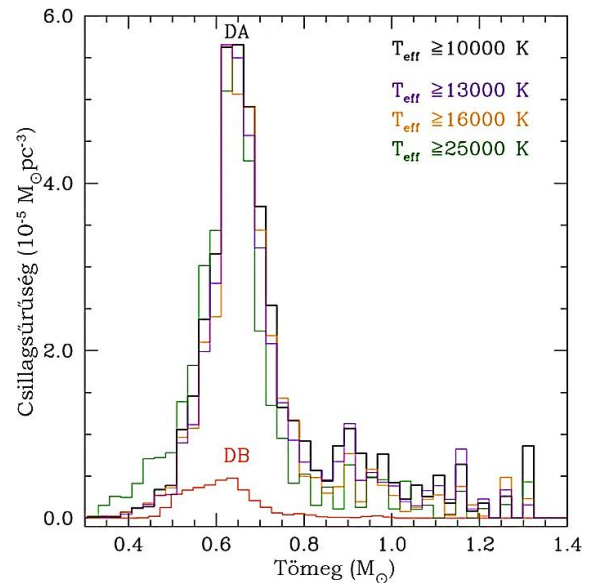
2. Fehér törpék

A fehér törpék földmérethez hasonlóak, de lényegesebben sűrűbbek. Ezek a kompakt objektumok a legfeljebb $8,5-10,6 M_{\odot}$ kezdeti tömegű csillagok végállapotai (a csillagok 95-97%-a ezen tömegtartományon született, és a maximális jelzett kezdeti tömegű akár már szupernóvaként is felrobbanhat). A fehér törpék minimális tömege $0,3-0,45 M_{\odot}$ közé esik, az ennél kisebb tömegnek megfelelő végállapotú csillagnak még nem lett volna ideje addig eljutni. Tömegük átlagosan $0,6 M_{\odot}$, ami egészen a Chandrasekhar-határig terjedhet

($1,44 M_{\odot}$), olykor afölé is. Bennük már nem megy végbe fúzió, folyamatosan, de lassan hűlnek (10 milliárd év alatt $100\,000\text{ K}$ -ről $5\,000\text{ K}$ -re). Olykor meglepően nagy mágneses télerősségük lehet (erről később). Változatos sebességgel forognak, leggyakrabban 1 órától 18 napig terjed a periódusuk, de vannak extrém gyorsan forgók is, akár pár perces periódussal (AE Aquarii – 33 s, AR Scorpii – 117 s) (Kepler, Romero és mtsai. 2017).

A $0,2-0,41 M_{\odot}$ közötti fehér törpék leggyakrabban kettős és kettős degenerált rendszerekben találhatók meg ($0,3 M_{\odot}$ alatt csakis kizárólag az utóbbiban), és a kettősök kölcsönhatásának eredményei. Az egyedülálló alacsony tömegű fehér törpék öreg, fémekben gazdag csillagok maradványai lehetnek, amikor tömegvesztés miatt a He-flash előtt evolúciós ugrás következik be (Kepler, Romero és mtsai. 2017).

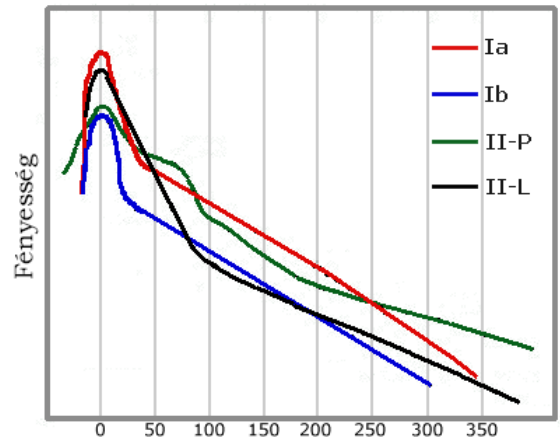
A fehér törpékből végül fekete törpe lesz, egy kihűlt objektum, ami már nem sugároz. Mivel ezt az állapotot tovább tartana elérni, mint amennyi időnek az univerzumot vélik, nem meglepő, hogy még nem fedeztünk fel egyet sem.



4. ábra: A fehér törpék tömeg szerinti eloszlása (Kepler, Koester és mtsai. 2016)

2.1. Ia típusú szupernóvarobbanások

Egy csillagban a vascsoportig keletkezhetnek elemek, a tőle nagyobb protonszámúak létrejöttéhez már energia befektetése szükséges. Ezt az energiát szolgáltathatja egy szupernóvarobbanás, mely során nagy tömegszámú atomok keletkeznek. Egy átlagos galaxisban 100 évente egy szupernóva megjelenése várható.



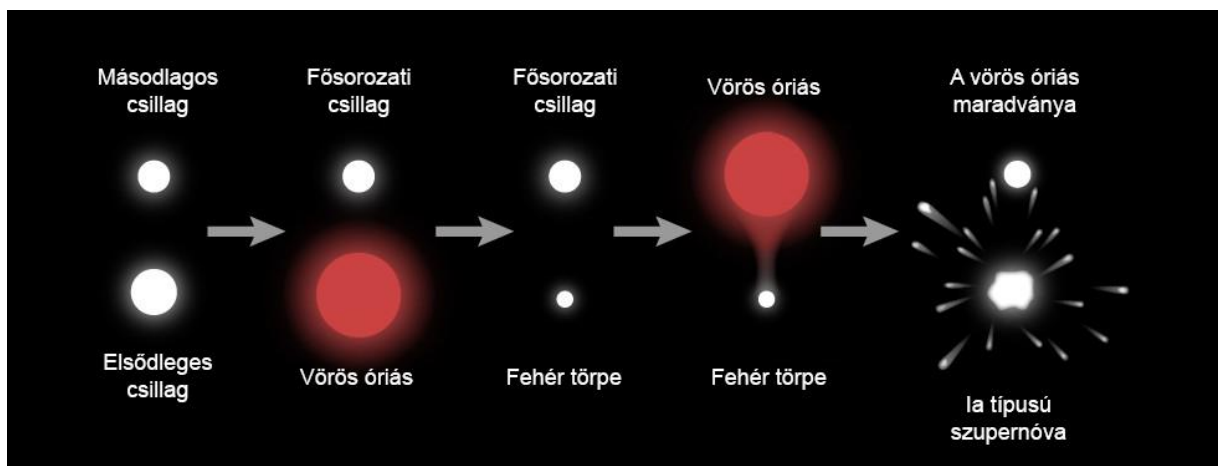
A maximális fényességtől eltelt napok száma

5. ábra: Különböző típusú szupernóvák fénygörbéi (Busekool 2018)

Általános esetben olyan kettős rendszerből jön létre, ahol az egyik csillag egy fehér törpe, a

másik például egy vörös óriás. Ha a két objektum elegendően közel kerül egymáshoz, akkor a fehér törpe anyagot szív el a társcsillagtól. A tömeg begyűjtése során a kompakt csillag héján újra beindul a hidrogén-hélium fúzió, luminozitása jelentősen megnő, ami főleg röntgenterományban észlelhető. A fehér törpe eközben hízni kezd, s miután elérte a kritikus tömeget (Chandrasekhar-határ: $\sim 1,4 M_{\odot}$), felrobban.

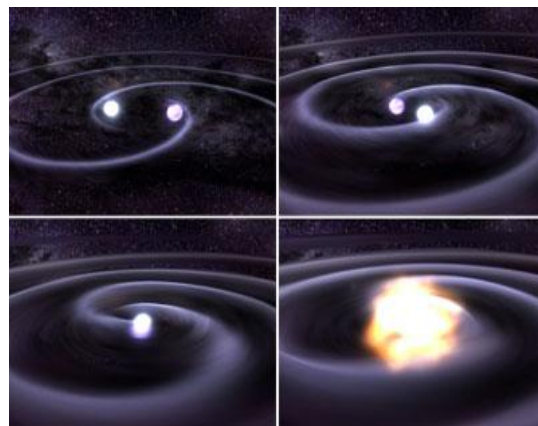
Mivel abszolút fényességük közel hasonló, ezért könnyen meg lehet határozni a távolságukat.



6. ábra: Folyamat az Ia típusú szupernóváig (Lumen Learning 2018)

Léteznek azonban Chandrasekhar-határ alatti és fölötti Ia típusú szupernóva-robbanások is. A progenitor tömegére a bolometrikus fényességből lehet következtetni. (McWilliam és mtsai. 2017).

Egy másik lehetséges módja az Ia típusú szupernóva-robbanásoknak, mikor két fehér törpe kering egymás körül. A pályasugár a bespirálózás során lassan lecsökken, végül összeütköznek. Ha az össztömegük eléri a Chandrasekhar-tömeghatárt, akkor szupernóvarobbanás történik, de ha az összeolvadó fehértörpe-kettős tömege nem éri el a Chandrasekhar-határt, akkor akár új csillag is keletkezhet belőlük, amely magjában újból beindulhat a hélium fúziója (Kovács 2011).



7. ábra: Ia szupernóva kettős degenerált rendszerből (Strohmayer és Berry 2014)

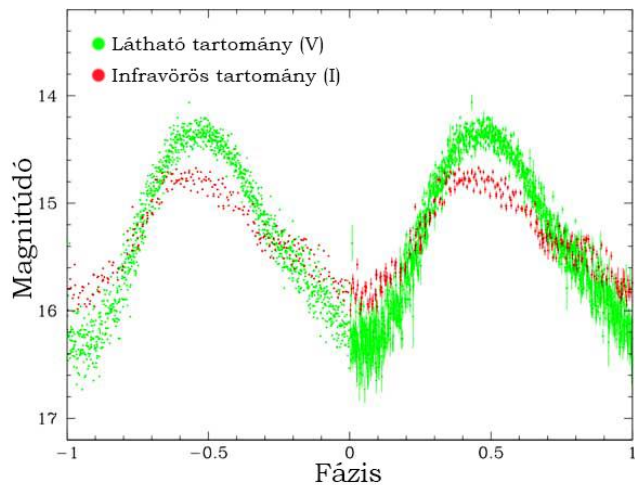
2.2. Maximálistömeg-probléma (Chatterjee és mtsai. 2017)

Általánosan az Ia szupernóvarobbanás akkor következik be, mikor a társcsillagból táplálkozó fehér törpe eléri az $1,44 M_{\odot}$ Chandrasekhar-határt, azonban az esemény bekövetkezhet a határérték alatt és fölött is. A szuperfényes szupernóvarobbanások akár $2 M_{\odot}$ körül is bekövetkezhetnek. Erre az egyik lehetőség a kettős degenerált rendszerek, vagy a Chandrasekhar-tömeghatár környezeti okokból való kitolódása. Ez akkor lehetséges, ha a fehér törpe gyorsan forog vagy extrém nagy a mágneses tere, s ilyenkor toroid alaktorzulást szenved (mely gravitációs hullámok bizonyos hullámhossz-tartományain mérhető lehetne), de más dolgok is befolyásolják a maximális tömeget – például az elektronok és ionok elektrosztatikus kölcsönhatása csökkenti, és a relativisztikus hatások szintén csökkentik az adott csillag tömeghatárát.

Legjelentősebben a mágneses tér befolyásolja a tömeghatárt, nagyobb térerősség jelenlétében nagyobb lesz a maximális megengedett tömeg, ill. a mágneses tér lassítja az objektum forgását. A csillagok felszíni mágneses térerőssége mérhető Zeeman-spektroszkópiával, ahol a spektrumvonalak felhasadását vizsgálják, polarimetriával, ahol az elektromágneses hullámok (fény, rádió) polarizációs síkjának elfordulási szögét mérik, és ciklotron-spektroszkópiával. Több száz fehér törpe rendelkezik $1 \text{ MG} - 1 \text{ GG}$ közötti felületi térerősséggel (és akár 10^{13} G belsővel), a csillagok spektrumait vizsgálva 822 fehér törpénél láttak 2 MG -nél nagyobb mágneses térerősségről árulkodó Zeeman-vonalhasadást, egészen 700 MG -ig, de a 30 MG fölöttieket már nehéz megállapítani, ugyanis a hidrogén-sorozat alelemei túlságosan keverten láthatók. Jelentős Zeeman-felhasadás a fehér törpék kb. 4%-ánál figyelhető meg (Kepler, Romero és mtsai. 2017).

2.3. Fehér törpe pulzár

Az AR Scorpiit eredetileg egy Delta Scuti (DS) típusú változócsillagnak gondolták, de 2016-ban rájöttek, hogy a periódusa valójában egy kettős keringési ideje. Ehhez az eredményhez a változók megfigyelésével foglalkozó Franz-Josef Hamsch és amatőr csillagász csoportja mérései vezettek. A felvett, 2 magnitúdós változásokat mutató fénygörbe eltért a várt nagy amplitúdójú DS változókétól, ezért új magyarázatra volt szükség. Ez



8. ábra: Az AR Scorpii 2 különböző szűrőben felvett fénygörbéje (Hamsch 2016)

felkeltette a csillagászok figyelmét, s végül sikerült a VLT-vel (Very Large Telescope – ESO, Paranal, Chile) felvenni az AR Sco spektrumát és nagy sebességű fotometriát végezni a William Herschel Teleszkóppal (Hamsch 2016).

Kiderült, az AR Scorpii egy tőlünk 116 ± 16 parszek távolságban található kettős rendszer, amely egyik csillaga egy M5 típusú $0,28-0,45 M_{\odot}$ tömegű vörös törpe, a másik pedig egy földméretű $0,81-1,29 M_{\odot}$ tömegű fehér törpe. A közeli kettős keringési periódusa 3,56 óra, a fehér törpe 1,95 perc alatt fordul meg tengelye körül, a rendszer pedig 1,97 perces periódussal pulzál rádió-, infravörös, optikai és ultraibolya tartományon. Ezzel ez az első (egyetlen) felfedezett fehér törpe pulzár.

Kétféle magyarázatot vetettek fel – a jel oka akkréciós eredetű, vagy a kompakt csillag forgásának lassulásának velejárója. Az utóbbi fehér törpe esetén fenntartható, de neutroncsillagként már nem. Az akkréciós folyamatok sok neutroncsillag energiaforrásai lehetnek, és egy fehér törpe esetében is szolgáltathatnak energiát. Ez esetben csak részben, mert nem látták az ahhoz szükséges bezuhanó anyagmennyiségnek megfelelő emissziós vonalakat, csupán az M típusú csillag jellemzőit, így ez feltételezhetően nem a pulzáció fő oka. Ennek ellenére egy $0,002-0,015 M_{\odot}$ közötti akkréciós korong valószínűleg mégiscsak létezik, s indokolhatja, hogyan pörgött fel a fehér törpe gyors forgásúvá.

Az AR Sco széles sávú spektrális energiaeloszlása relativisztikus elektronoktól származó szinkrotronsugárzásról árulkodik, ami nagy részének a hideg vörös törpe a látszólagos forrása (akkréció hiányában). Két fennmaradó lehetőség így egy kollimált gyors részecske kifolyás, vagy a fehér törpe és vörös óriás magnetoszférájának közvetlen interakciója (Marsh és mtsai. 2016). Az előbbire nem találtak bizonyítékot, így a második a valószínűbb (Marcote, Marsh és mtsai. 2017). Az objektum mágneses tere is egészen erős (~500 MG), amely oka a dipól-sugárzás és magnetohidrodinamikai kölcsönhatások (Buckley és mtsai. 2017).

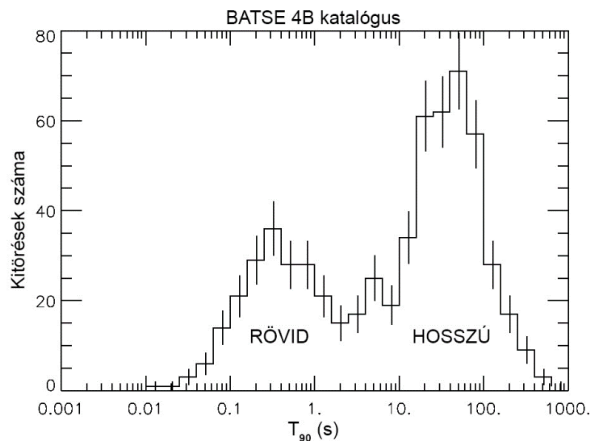
3. GRB

Az nemzetközi atomcsendegyezmény létrejötte után ellenőrzésképpen az USA elindította a Vela projectet, amely keretében fellőttek különféle gammasugárzást mérő műholdakat, név szerint a Vela Uniformot föld- és vízalatti megfigyelésekre, a 6 műholdas rendszerű Vela Hotelt földön kívüli eredetű gammavillanások vizsgálatára, ill. a Vela Sierra / Advanced Vela-t földi atmoszférikus és űrbéli észlelés céljából. Az eredeti terv szerint az atom- és hidrogénbomba-robbanásokat szerették volna észlelni, de nagy meglepetésükre valami újat találtak (Horváth 2011). A 16 ilyen, észlelési irányukból ítélve bizonyosan nem földi vagy naprendszerbeli eredetű észlelést bemutatták Klebesadel, Strong és Olsen kutatóknak. Ezeket az elemezni szükséges eseményeket 1969. júliusa és 1972. júliusa között észlelték. A részecskék energiája 0,2-1,5 MeV közé esett, időtartamuk 0,1-30 másodperces volt, a mért fluxussűrűség $10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2}$ közé esett. Keresték a GRB-khez tartozó forrást, és nóvákra/szupernóvákra gondoltak, de nem találtak az észlelés időpontjához és helyéhez közeli ilyen eseményeket (Klebesadel, Strong és Olson 1973).

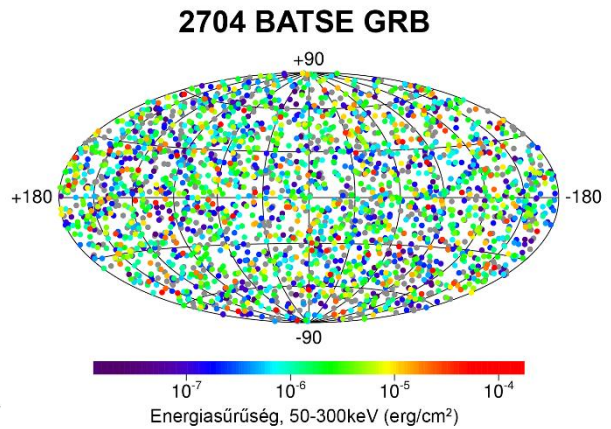
Azóta több programot indítottak az űrbéli gammasugárzás vizsgálatára, mely jelentősen javított a megfigyelések minőségén. A pontosabb helymeghatározáshoz két Földtől távoli műszerre is szükség volt, hogy a különböző detektorok által detektált jel jelentős késést szenvedjen el, a három detektor pedig már elég az égi pozíciójának meghatározásához. A küldetésekről egy átfogó lista megtalálható a NASA egyik aloldalán:

https://imagine.gsfc.nasa.gov/features/satellites/gamma_missions.html

A CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory) BATSE (Burst and Transient Source Experiment) detektora 1991.04.19. és 1992.03.05. között 260 gammakitörést észlelt. Ebből a sorozatból készült el az első BATSE-katalógus. Az elemzés azt mutatta, hogy időtartamuk alapján a GRB-k csoportosíthatók (Fishman és mtsai. 1994), az eloszlás alapján 2 másodpercnél rövidebb és 2 másodpercnél hosszabb időtartamú osztályokba. A rövid kitörések (< 2s) jellegzetesen keményebb, a hosszúak (> 2s) inkább lágyabb tartományban sugároznak (Kouveliotou, Meegan és mtsai. 1993).

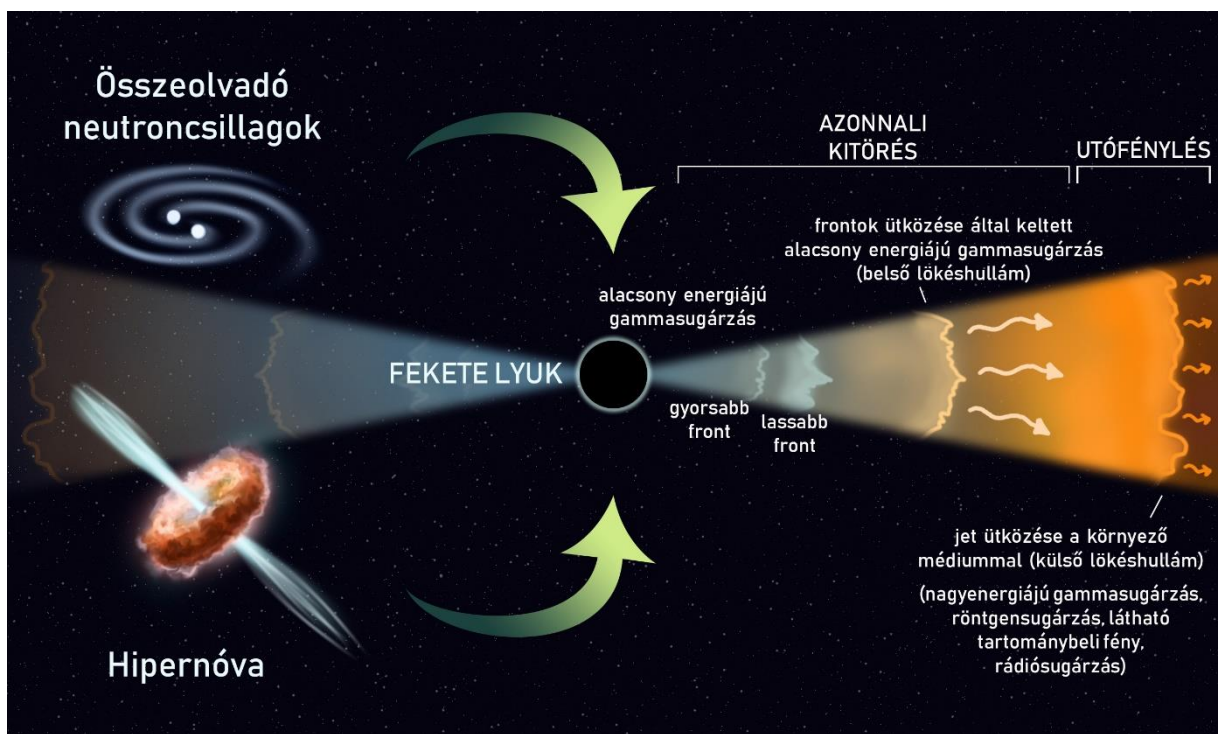


9. ábra: A BATSE 4B katalógus GRB-inek időtartama. A T_{90} azt az időtartamot jelöli, amennyi idő alatt a kítörés teljes (észlelt) energiájának 5 és 95% közötti részét észlelték. A T_{90} fénygörbét 4 csatorna mérési adatai szolgáltatták. <https://gammaray.nsstc.nasa.gov/batse/grb/duration>

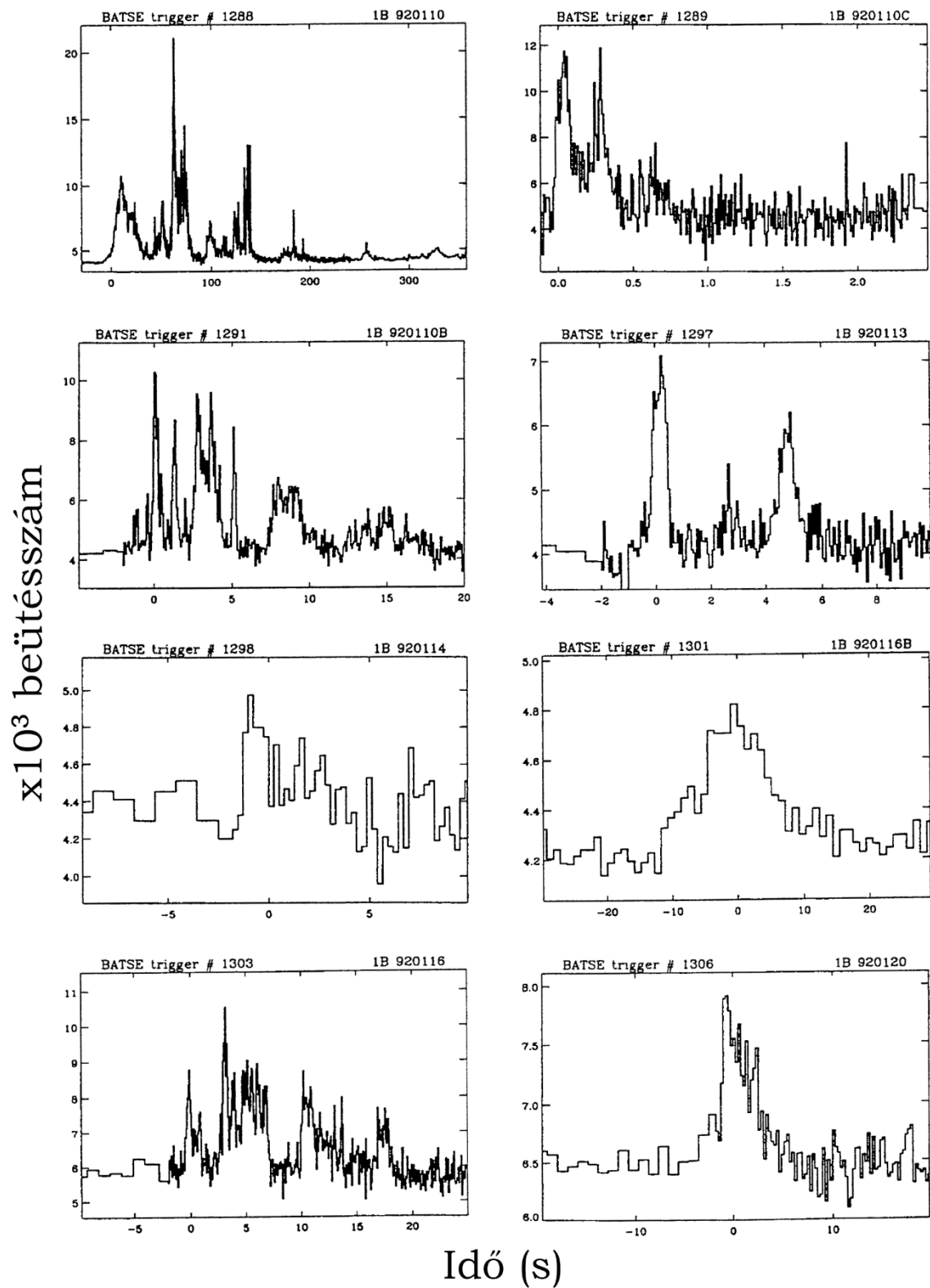


10. ábra: A 2704 BATSE GRB-k eloszlása galaktikus koordináta-rendszerben az energiasűrűség feltüntetésével <https://gammaray.nsstc.nasa.gov/batse/grb/skymap/>

Az SGR-ek is gammakitörések, esetükben a forrás magnetárokból származik, a GRB-k eredete viszont nem teljesen tisztázott. Egy feltevés szerint nagy tömegű csillagok ($>40 M_{\odot}$) halálakor, aszimmetrikus szupernóvarobbanás bekövetkezésekor bocsátódik ki hosszú, lágy GRB jel a jeten (nyalábon) keresztül (MacFadyen, Woosley és Heger 2001). A rövid, kemény gamma jelek pedig nem összeomló óriáscsillagok eredménye, hanem összeolvadó neutroncsillag-pár vagy neutroncsillag-feketelyuk pár keltheti (Nakar 2007).



11. ábra: A GRB-k keletkezése
 Illusztrációs segédlet: (NASA's Goddard Space Flight Center 2015, LAGO 2018)



12. ábra: Példák GRB jelekre az első BATSE-katalógusból
(Fishman és mtsai. 1994)

4. FRB (Paragi 2017)

4.1. A lassú rádiókitörésektől a gyorsakig

A VLBI (Very Long Baseline Interferometry – hosszú bázisvonalú interferometria) technológia szabad utat adott rövid idejű, kis látószögű (akár ezred ívmásodperces) tranzienst jelenségek vizsgálatának (Frey 1997). A flercsillagok jellemzően néhány perces jelet bocsátanak ki, a mikrokvazárok több naposakat, az AGN-ek pedig akár éveken keresztül (AGN – Active Galactic Nuclei – aktív galaxismagok) detektálhatóak. Ezen jelenségek tipikusan pár GHz frekvencián a legintenzívebbek és inkoherens szinkrotron sugárzással jellemezhetők – az elektronok fénysebességhez közeli értékre gyorsulnak és interferálnak a mágneses térrel.

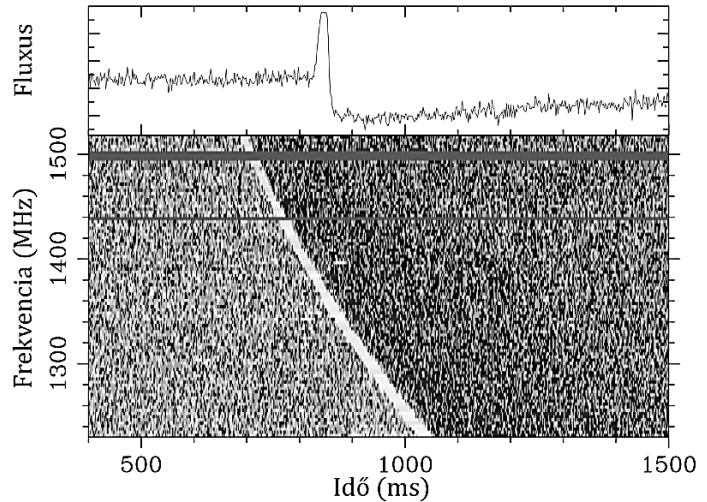
2006-ban felfedeztek egy RRAT (Rotating Radio Transient), azaz forgási rádiótranzienst jelenségnek vélt csillagászati eseményt, amely olyan neutroncsillagokat foglal magában, amik nem minden periódusban bocsátanak ki pulzusokat, viszont az ismétlődő jelek periodikus függvényre illeszthetők.

A Tejút diszperziójából adódóan különböző irányokra eltérő korrekciós tényezőkkel kell számolni. Ennek oka az intersztelláris (csillagközi) anyag, de extragalaktikus események esetén az intergalaktikus anyag is jelentős lehet, hiszen a más galaxisokban végbemenő folyamatok által kibocsátott jelek az idegen galaxis szennyezése által is hullámhossz függvényében gyengülést, időeltolódást szenvednek. Ez a jelenség az FRB-k (Fast Radio Burst) felfedezésénél igen fontos szerepet játszott. Egy erős, másodperc tört részéig tartó rádiójelet figyeltek meg, amely Lorimer-kitörés nevet kapta (FRB 010724), hozzá irányához képest váratlanul nagy diszperziós érték tartozott (Dispersion Measure = 375 pc/cm^3) (Lorimer és mtsai. 2007). A probléma legegyszerűbb megoldásaként extragalaktikus eseményként bővítette az egzotikus csillagászati jelenségek listáját, ám ehhez további bizonyítékokra volt szükség. Feltételezték, lehetne RRAT, pulzár is, de a jel nem ismétlődött meg.

4.2. Rádiótávcsöves megfigyelések

Több hasonló jellegű megfigyelést követően katalógust készítettek az FRB-kből, ami azóta is bővül (Petroff és mtsai. 2016) (<http://frbcat.org>). A listában a következő rádióteleszkópokkal detektált FRB-k szerepelnek: Parkes (25), UTMOST (5), ASKAP (1), Arecibo (1), GBT(1), az első jelet 2001.01.25-én, az utolsót 2018.03.11-én találták. Érdeemes még megemlíteni a Kanadában épülő CHIME-t, a holland LOFAR-t, az APERTIF-et és az EVN-t, amelyek a jövőben segíthetnek az észlelésben.

A 64 m átmérőjű Parkes távcső szolgáltatta a legtöbb adatot. Ezen távcső észlelte a Lorimer-kitörést 2001.07.24-én (UTC 19:50:01.63), amely feldolgozása a mellékelt ábrán látható. A fényes görbe a diszperzió eredménye.



13. ábra: A Lorimer-kitörés (Lorimer és mtsai, 2007)

A 305 m-es Arecibo teleszkópot felújították, több vevőből álló rendszerrel megnövelve a látómezejét. A főként pulzárak (gyorsan forgó neutroncsillagok) detektálására alkalmas rendszer ezek periodikus jeleit fogja be. Ez az erős jeleknél nem jelent különösebb problémát, halvány jelenségeknél viszont már Fourier-analízis szükséges, hogy a periodikus jeleket kiszűrjék a zajból. 2012-ben detektálta az FRB 121102-t, amelyet még a későbbiekben külön tárgyalunk (Spitler és mtsai. 2014).

4.3. Eredetük tárgyalása

Eleinte nem találták meg az FRB-k forrását, ugyanis 15 ívperces látómezőben származási helyük ismeretlen volt. A berendezések technikai fejlődése és a 2013-ban négy újabb FRB felfedezés publikációját követően jelentősen javultak a kilátások, hogy ez valóban egy asztronómiai újdonság, nem pedig műszerhiba.

Bizonyossá vált az is, hogy $z=0,3-1,3$ közti vöröseltolódásukból adódóan eredetük valóban Tejúton kívüli. A diszperzió származhat forráshoz közeli ritka sűrűségű plazma jelenlétéből és intergalaktikus oka is lehet, az utóbbi feltérképezésében különösen hasznosnak bizonyulhat FRB-ből sokat megfigyelni. Kiterjedésükről a milliszekundumos időtartam alapján kaptak képet, amely fiatal, ~ 10 km sugarú neutroncsillagra, vagy hasonló Schwarzschild-sugarú feketelyukra utal, amelyek mély gravitációs-kútfalet átlépve nagyenergiájú nyalábokat formájában sugároznak. FRB-khez hasonló jelenségek a SGR-ek (Soft Gamma Repeater), annyi különbséggel, hogy az SGR csupán termális jelenségnek látszik, amely feketetest módjára sugároz röntgen- és gammasugarakat. (Katz 2016).

4.4. Lokalizáció

Az első sikeres lokációs kísérlet az FRB 150418-hez fűződik (2015.04.18-ai észlelés), aminek rádiójelét a Parkes-teleszkóp négyes vevőjével érzékelték az ég 15 ívperces látószöge alatt, majd a riasztás után több teleszkóppal is ellenőrizték különböző elektromágneses tartományokon (Swift műhold, ATCA rádióinterferométer, Subaru optikai teleszkóp). (Keane 2016). Az FRB a Subaru-teleszkóp mérései alapján egy $z=0,492$ vöröseltolódású elliptikus galaxishoz tartozik. A galaxissal való összefüggés hitelességét megkérdőjelezi, hogy ezt egy FRB-től jelentős mértékkel intenzívebb rádiótartományos utófénylés követte, ahol ilyen jellemzőjű AGN aktivitás várható, amit a VLBI igazolt is. (Katz 2016)

Utófénylés azonosítására a VLBA-t (Very Long Base Array – nagyon hosszú bázisvonalú hálózat) próbálták meg használni, de sajnos eredménytelenül. A kutatáshoz csatlakozott az EVN (European VLBI Network) több nagy átmérőjű teleszkóppal. Évekbe telt, míg sikerült egy erős jelet detektálni egy neutroncsillag irányából (RRAT J1819-1458). Ennek pozícióját távoli rádiókvazárok alapjául vett koordináta-rendszerrel határozták meg (Frey 1997). Különböző teleszkópok észleléseit korrelálták, majd az adatsort kalibrálták.

4.5. Az ismétlődő FRB 121102

Az előző bejegyzésben említett interferometriás mérés alapján és egy új jelenség segítségével létrehoztak egy módszert valódi gyors tranziensek pozícionálására. Ez nem volt más, mint az ismétlődő jeleket mutató FRB 121102, amelyet az Arecibo rádióteleszkóp detektált (Spitler és mtsai. 2014). A méréseket a VLA és EVN hálózatokkal végezték. A kitörések között hónapok teltek el, ez idő alatt a pozíciót pontosítani tudták. A mérések sorozata megerősítette az FRB-k különleges létét, ill. további bizonyítékot adott extragalaktikus eredetükre.

Az FRB forrása egy 100 mas-nyi (milliarcsecond – milliívmásodperc) égi területen helyezkedik el, ahol egy állandó jellegű, 180 μJy spektrális fluxussűrűségű (Jansky – $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$) rádióforrás észlelhető, hozzá 25 magnitúdós optikai fényjelenség tartozik (Chatterjee és mtsai. 2017). Ez erős összefüggést sugall, hiszen néhány ezred ívmásodpercen belül egyeznek a periodikus kitörések az említett állandó rádióforrással. A rádióforrás vetülete körülbelül 0,7 parszek (5 GHz-n 0,2 mas szög alatt látható), fényesség-hőmérséklete $5 \cdot 10^7 \text{ K}$. Feltételezik, hogy kis luminozitású AGN, vagy egy

szupernóva-maradványt gerjesztő fiatal neutroncsillag állhat ilyen jelek mögött (Marcote, Paragi és mtsai. 2017).

A spektrum emissziós vonalai alapján egy fémszegény csillagontó törpegalaxisról van szó, amely abszolút fényessége 25,1 mag, vöröseltolódása $z = 0,19$, luminozitás-távolsága 972 Mpc. A gazdagalaxis szögméret alapján 4 kpc átmérőjű, tömege $4\text{-}7 \cdot 10^7 M_{\odot}$ -re becsülhető, csillagképződési rátája $0,4 M_{\odot}/\text{év}$, főleg a galaxis peremén (Tendulkar és mtsai. 2017).

Összehasonlítva a kétes FRB 150418 objektummal, az FRB 121102 esetében a gazdagalaxis törpe típusából eredően az AGN kizárható, mert törpegalaxisunk össztömege csak néhány százmillió naptömeg, mely közepén nem várható szupernagy tömegű feketelyuk. Szupernóvákat sem észleltek az irányából.

4.6. Eddigi modellek

Az FRB 121102 ismétlődő jelének magyarázata képpen elképzelhetőnek tartották, hogy neutroncsillagba ütköző aszteroidák által keltődik. Ismétlődő jellege adódhat aszteroida-övön keresztüli többszörös áthaladásból, amennyiben kettős csillagrendszerrel beszélünk. A következő két jelet 2017 februárjára és decemberére várták (Bagchi 2017). Sajnos a két jelet végül nem észlelték.

Más magyarázatot adott egy másik kutatócsoport, miután a detektált kitörések jeleit összehasonlították a földrengések jellemzésére használatos Gutenberg-Richter törvényekkel. A várakozási idők eloszlása Gaussos, ami pulzárak csillagregéseire utalhat. Hasonló jellegzetességgel bírnak az SGR-ek, a magnetárok felületi tevékenységei, a strangeon-csillagok „szilárdulási” feszültségei, valamint lassabban forgó pulzárak oszcilláció okozta mágneses jelenségei (Wang és mtsai. 2017).

Egy másik modell lehetne neutroncsillagok $\sim 10^{20}$ kg tömegű primordiális feketelyukakkal való ütközése. Ez kedvező, ami milliszekundumos időtartamot és a $\sim 10^{43}$ erg/s luminozitást, és feltételezett gyakoriságát (több, mint 100 esemény/nap, de akár másodpercenként is előfordulhat a megfigyelhető univerzumban) illeti, ill. ismétlődő jellege megfelel a teóriának. Ennél a modellenél nem szükséges nagy mágneses terek jelenléte (Abramowicz és Bejger 2017).

5. TDE

A TDE-k (Tidal Disruption Event – árapály-szétesési esemény) egy olyan csillagászati jelenség, amely során egy SMBH-hoz közeli (Supermassive Black Hole – szupermasszív fekete lyuk) csillagot szétszaggatnak az árapályerők, mely eredménye egy izzó anyagnyúlvány és kifújás. A fekete lyukakhoz (és kvazárokhoz) szorosan kapcsolódik az Eddington-féle luminozításhatár kifejezés, ami a csillag maximális fényességére vonatkozó érték. Ekkor a kifelé ható sugárnyomás és a gravitációs erő egyensúlyban van. Ezt az értéket túllépve a külső rétegekből sugárzás által hajtott csillagszél jön létre. A jelenség szorosan kapcsolódik a fekete lyukakhoz és a kvazárokhoz. A fekete lyukaknál ez a határérték abban nyilvánul meg, hogy nem tudja az összes behulló anyagot befogadni, s ezt elérve kidobja az akkréciós korongból az anyagot (mellékelt ábrán a „felhős” szétszóródás). A TDE-k osztályozhatóságát/változatosságát feltételezhetően az Eddington-határ fölötti akkréciós és a TDE-k korongjaival kapcsolatos emissziós folyamatok adják – egy részük NUV/optikai tartományon sugároznak, míg mások röntgentartományon (Dai és mtsai. 2018).



14. ábra: TDE szimuláció
(Guillochon, Manukian és
Ramirez-Ruiz 2014)

2009. január 21-én figyeltek meg ilyen optikai tranzienszt, mely a Dougie becenevet kapta. A McDonald obszervatórium ROTSE IIIb teleszkópja optikai méréseket végzett, míg a Swift teleszkóp UV- és röntgentartományon mérte a változásokat. A fénygörbe magassága 10 napig nőtt, majd meredek csökkenésbe kezdett az azt követő 60 nap során. Az észlelés helyén egy halvány gazdagalaxist fedeztek fel, amely vöröseltolódása $z = 0,19$. Ez alapján 3 gigafényév luminozítás-távolságban található. A -22,5 magnitúdós számolt abszolút fényesség miatt eleinte feltételezték, hogy az észlelt esemény mögött egy szuperluminózus szupernóva (SLSN) állhat, de a $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ bomlást jellemző fénygörbétől eltért, és nem érzékelték a hozzá tartozó várt röntgen-jelenségeket, ill. a gazdagalaxis gyenge csillagformációja is ez ellen vallott, mert az SLSN-k inkább fémszegény, csillagontó galaxisokra jellemzőek. A várt spektrális tulajdonságok hiányában (400-900nm-es tartományon) is cáfolták az adatok a feltevést. A megfigyelés elején a jelenség egy forró, kék ($T \approx 16000 \text{ K}$) objektumnak mutatkozott, ami lehűlt, ezalatt pedig nem viselkedett egyedülálló fekete test módjára. A legösszegebbnek az tűnt,

hogy egy napszerű csillag árapály-szétcsézéséről van szó, és ezt az előzetesen felvázolt modellek fotometriai és spektrális eredményei támasztották alá (Vinkó és mtsai. 2015).

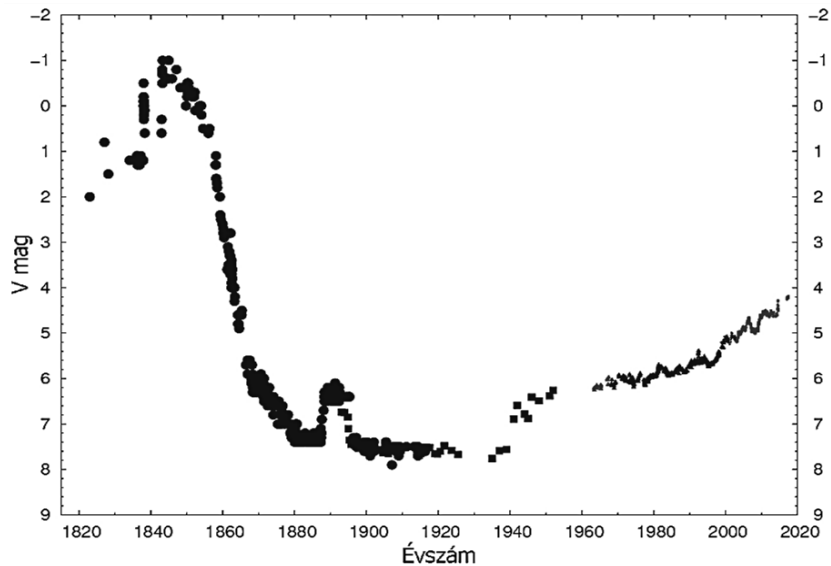
A TDE-k az AGN-ekhez is elég hasonlóak lehetnek, de vannak köztük jelentős különbségek. A felfényesedést és annak lecsengését összevetve rájöttek, hogy bár a felfényesedés hasonló nagyságú az AGN-ek és röntgen-TDE-k esetében, de a TDE-k fényességének lecsengése koherensebben zajlik (power-law index az idő függvényében, ahol az előbbi a newtoni viselkedéstől való eltérés mértékét jelöli). Mindkét objektum esetében a spektrális keménység idő és fényesség függvénye. Míg a röntgen-TDE-kenél alig vehető észre variancia a keménység arányát tekintve, s inkább egészen lágyröntgen-tartományon sugároznak, addig az AGN-ek emissziója már változatosabb, környezeti tényezőktől függően lehet kemény vagy lágy (Auchetti, Ramirez-Ruiz és Guillochon 2018).

A TDE-k katalógusa a következő címen érhető el: <https://tde.space/>

6. Álszupernóvák

Léteznek úgynevezett szupernóva-imposztorok, melyek igazából nem szupernóvák, hanem végük felé tartó nagytömegű csillagok, melyek hatalmas anyagmennyiségeket dobnak le magukról. Ilyen LBV-re (luminous blue variables – fényes kék változók) jó példa a tőlünk 7500 fényévre található Éta

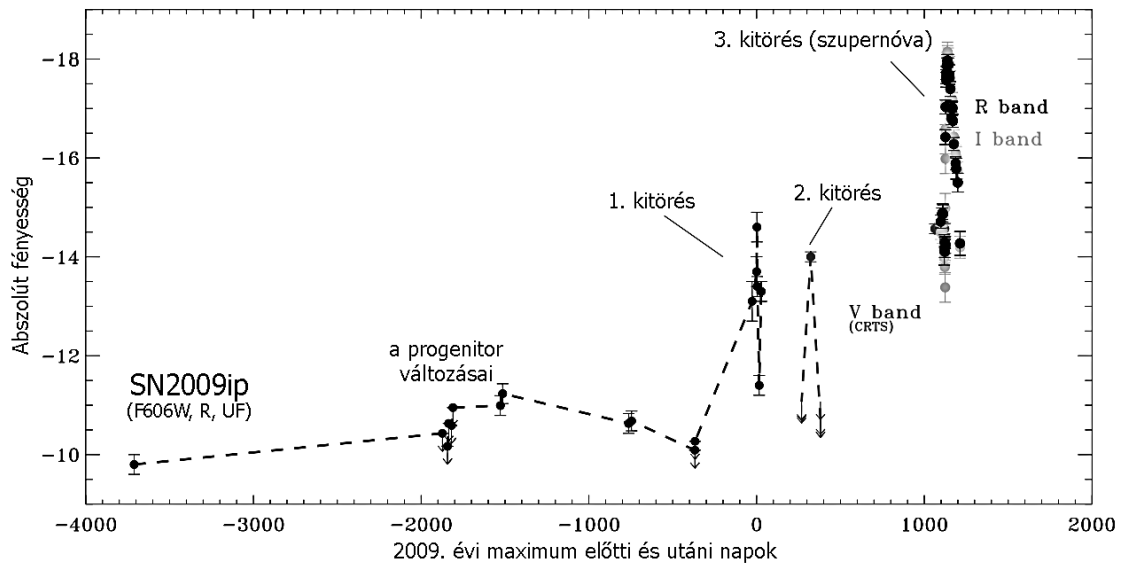
Carinae kettős (vagy többes) rendszer, mely a XIX. század óta időnként felfényesedik. A rendszer fő csillagának eredeti tömegét $150\text{-}250 M_{\odot}$ közé becsülik, amiből legalább $30 M_{\odot}$ -tól a kitörések során már megszabadult (Eta Carinae - Wikipedia 2018). 1845. évben történt



15. ábra: Az Eta Carinae fénygörbéje (Fernández-Lajús 2009-2017)

a legintenzívebb felfényesedés, -1 magnitúdójával az egyik legfényesebb pöttyé vált az égen. Ezt átlagosan 0,1 mag/év halványodás követte, míg a szabad szem elől újra el nem tűnt. A XX. század folyamán csak kisebb kitörések történtek (Smith és Frew 2010). Legutoljára 2014-ben figyeltünk meg egy újabb intenzitás-növekedést, 4,5 mag-os fényességével szabad szemmel is láthatóvá vált. (Humphreys és mtsai. 2014)

2009-ben fedezték fel az SN 2009ip-t, amely gazdagalaxisa az NGC 7259. A felfényesedés szintén egy LBV-re emlékeztetett. Rájöttek, hogy egy $50\text{-}80 M_{\odot}$ -ú változócsillag fényességváltozásait figyelhetjük meg. 2010-ben és 2012-ben újabb felfényesedési csúcsok jelentek meg a mért fénygörbén, az utóbbi már a -18 magnitúdós abszolút fényességű halálát mutatta – a csillag összeomlott (Mauerhan és mtsai. 2013).

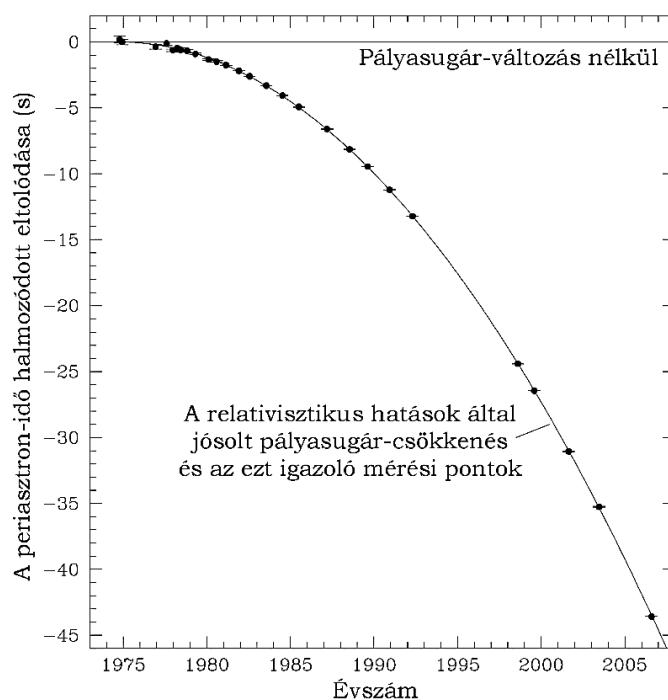


16. ábra: Az SN2009ip abszolút fényességének változásai (Mauerhan és mtsai. 2013)

7. Gravitációs hullámok (Dálya és Bécsy 2017)

A gravitációs hullámok létét Albert Einstein jósolta meg, 1905-ben publikálta a speciális relativitáselméletet, 1915-ben pedig annak általánosítását (általános relativitáselmélet). Az elmélet szerint a fénynek van egy határsebessége, illetve a tömeggel rendelkező testek meggörbítik a téridőt, ez pedig hatással van a részecskék mozgásának pályájára. A mozgó tömeg gravitációs hullámokat kelt, amelyek transzverzálisak és a tér periodikus megnyúlását-összehúzóását okozzák.

A gravitációs hullámok keltésében különösen nagy szerepe van a kompakt kettősöknek, amelyek állhatnak fehér törpékből, neutroncsillagokból és fekete lyukakból. Az első közvetett igazolást az 1.5. fejezetben már tárgyalt Hulse-Taylor-pulzárkettős szolgáltatta, amely keringési periódusa évente $76,5 \mu\text{s}$ -mal csökken. A pályasugár csökkenését a relativisztikus hatásokból adódó, gravitációs hullámok formájában kisugárzott energiaveszteség okozza. Az ilyen szoros kettősök bespiráloznak, és végül összeütköznek.



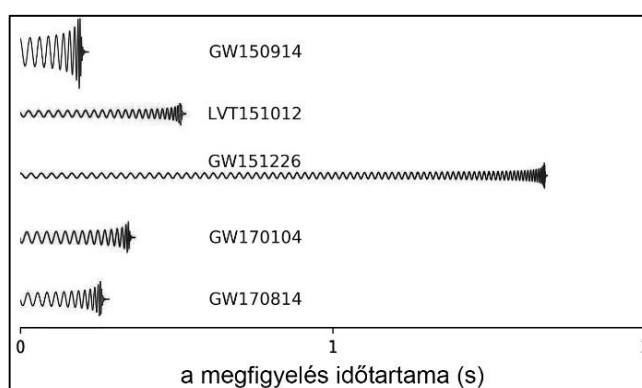
17. ábra: A Hulse-Taylor-pulzárkettős energiaveszteségből adódó pályasugár-változások (Weisberg, Nice és Taylor 2010)

További forrásként szolgálhatnak még kilonóva (neutroncsillag-kettős vagy neutroncsillag-feketelyuk páros összeolvadása) és hipernóva (szuperluminózus szupernóva – nagy tömegű óriáscsillag magösszeomlása) robbanások, magnetárok csillagrendései, illetve a sztochasztikus gravitációshullám-háttér is, amely nem megfigyelhető jelek összeadódása, egymásra rakódása, és az ősrobbanás után keltett gravitációs hullámok háttérzaja lehetnek.

A 2000-es években megépült a LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), hogy a gravitációs hullámokat közvetlenül is ki tudjuk mutatni. Az első verziója nem volt elég érzékeny, ezért átépítették (Advanced LIGO). A felújítás eredményeül az érzékenység az eredeti négyszeresére nőtt. A berendezés gyakorlatilag egy óriási Michelson-interferométer Fabry-Perot karokkal. A két egymásra merőleges kar 4 km hosszú és tükrökben végződik, egy nyalábosztó választja ketté a fénysugarat. A speciális Fabry-Perot karokban a

lézer fénye még 280x jár oda-vissza, mielőtt a két nyaláb újra egyesül. Ez lehetővé teszi, hogy a tér megrövidülése/hosszabbodása egy proton mérete ezredének pontosságával kimutatható legyen (Caltech 2018). A LIGO-nak egy-egy detektora található Hanfordban (Washington) és Livingstonban (Louisiana), illetve a Virgónak egy detektora van Olaszországban, 3 km hosszú karokkal. A várt jeleket előre kiszámolt hullámformák alapján keresték. Ennek legegyszerűbb formája olyan feketelyuk-kettősé volt, ahol egy fekete lyuk tömege legalább $2 M_{\odot}$, de együttesen legfeljebb $100 M_{\odot}$. A jelek alakjai egymásra hasonlítanak, de hosszuk, amplitúdójuk, lecsengésük eltérő lehet, mindez az objektumok tömegétől és perdületétől függ. Két detektor közt késés várható, ugyanis a gravitációs hullámok fénysebességgel terjednek.

A tesztmérések 2015 szeptemberében kezdődtek el. Az első közvetlen felfedezésre 2015. szeptember 14-én került sor, a jel a GW150914 elnevezést kapta. Egy gyengébb jelet (LVT151012) is észleltek, de 23% az esélye, hogy műszerzaj okozhatta, ami miatt nem kapta meg a GW jelölést. A második elfogadott jelet (GW151226) december 26-án észlelték.

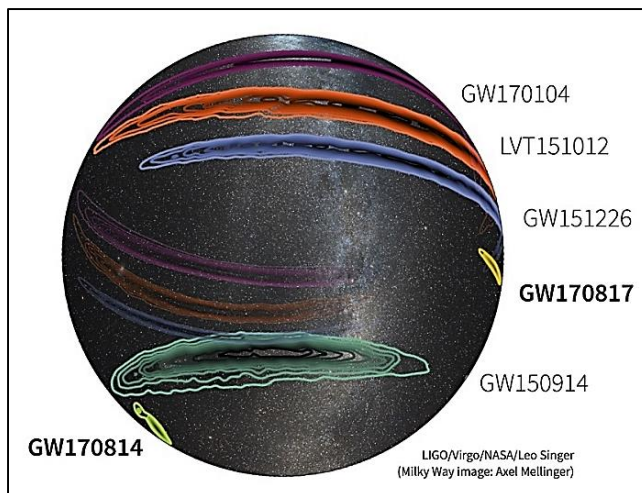


18. ábra: Az eddig észlelt hullámformák (LIGO/University of Oregon/Ben Farr 2017)

A következő tesztsorozat során észlelték még a GW170104 és GW170608, majd a GW170814 jelet, amely az első LIGO és Virgo által is észlelt esemény volt – ez azért számított különlegesnek, mert három detektorral már jobban le tudták szűkíteni a forrás égi helyét. Az eddig felsoroltak mind feketelyuk-kettősök jellemzőit mutatták. Három nappal később a LIGO befogta a GW170817 gravitációs hullámot is, a Virgo detektorán viszont ez nem látszódott, ami azt jelenti, pont a vakfoltjának irányából jöhetett a jel, ezzel jelentősen behatárolva egy konkrétabb égterületet. Ez a jel 100 másodperces volt, neutroncsillagok-összeolvadásának utolsó pillanatait mutatta (1.6. fejezet). A jel észlelését 1,7 másodperccel később egy 2 másodperc időtartamú GRB is kísérte, néhány órával később pedig a forrásgalaxisnál egy optikai tranziens jelenség is megfigyelhetővé vált. (Gerosa és mtsai. 2017).

A LIGO sok csillagászati intézménnyel működik együtt. Ez biztosítja, hogy gravitációshullám-észlelést követően egyből vizsgálhatók legyenek az elektromágneses spektrum különböző tartományai, és fordítva – ha különös égi eseményt észlelnek, keresést lehet futtatni, érzékelték-e hozzájuk kapcsolódó gravitációs hullámokat.

A jel forrása egyetlen detektorral érzékelve csak pontatlanul határozható be. Az észlelési terület az égen egy gyűrűformára képezhető le. Több detektor észlelése során a gyűrűk metszetet alkotnak, ezzel pontosítva a jel pozícióját, s ezért van szükségünk több megfigyelési helyre.



A különböző karhosszúságú interferométerek a gravitációs hullámok

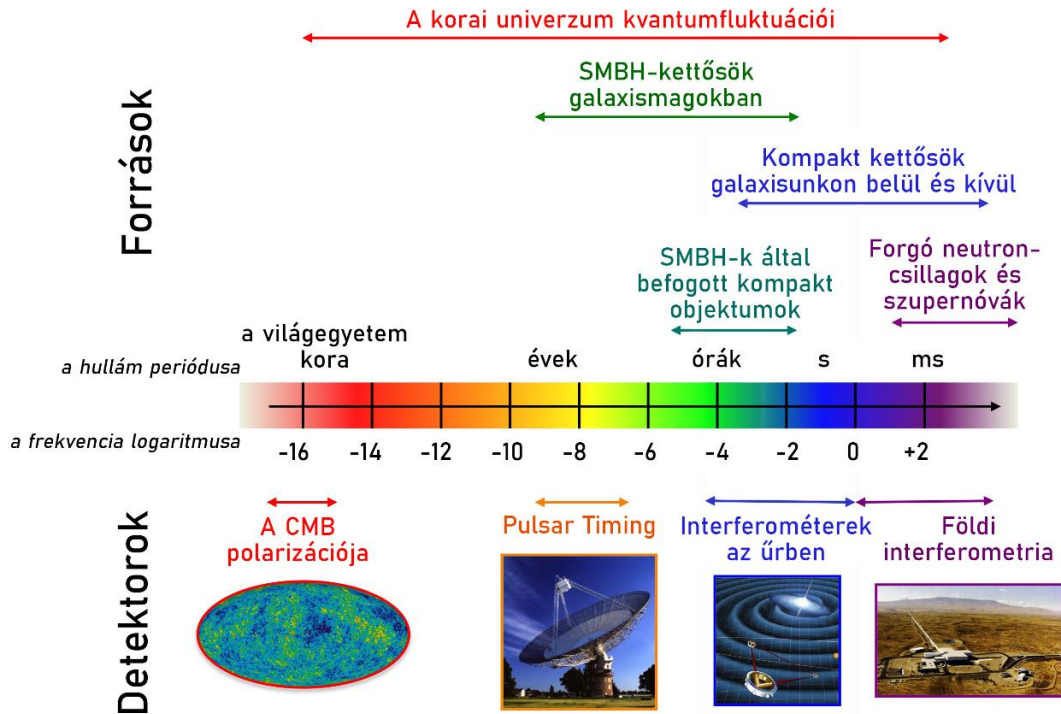
19. ábra: Az észlelt gravitációs hullámok forrásainak bizonytalansága (<https://www.ligo.org/detections/GW170817.php>)

más-más forrásainak mérését teszik lehetővé, ugyanis eltérő természetű csillagászati események különböző gravitációshullámhossz-tartományon sugároznak jeleket. A földi detektoraink (LIGO, Virgo, tervezett: KAGRA (Japán), LIGO India, Einstein Telescope) összeolvadó kettősök jeleit érzékelik. A közeljövőben leginkább a kompakt kettősök által keltett gravitációs hullámok észlelése várható.

Az űrbe, Földet követő pályára 2034-es befejezéssel tervezik a LISA (Laser Interferometer Space Antenna) elnevezésű óriás-interferométert. Ezt a műszert 2,5 millió kilométeres karhosszúságú egyenlő oldalú háromszög alakjába elrendezett három műhold alkotná. Alkalmas lenne néhány órás keringési periódusú kettősök, kettős szupermasszív-fekete lyukak (SMBH-k) keringésének vizsgálatára, illetve olyan események megfigyelésére, amely során SMBH-k objektumokat fognak be és nyelnek el, ezzel gravitációs hullámokat keltve. Szintén galaxismagok kettős SMBH-it lehet megfigyelni a PTA (Pulsar Timing Arrays) nevű rendszerrel. Működése azon alapul, hogy a térben a gravitációs hullámok hatására hosszváltozások következnek be, így a pulzárak és az azokat megfigyelő rádiótávcsövek közötti távolság is kis mértékben változik, amiből adódóan a milliszekundumos pulzárak periódusidejében pici eltérés érzékelhető. A PTA-t érdemes a SKA (Square Kilometer Array) rádióteleszkóppal együtt alkalmazni (SKA 2018). Hasonló módszer lehet például a Gaia műhold elmozdulását meghatározni (Williams 2018).

A sztochasztikus gravitációs hullámokat kutató project az AliCPT (Ali CMB Polarization Telescope) nevet kapta, s a CMB-re emlékeztető (Cosmic Microwave Background – kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás), ahhoz hasonló jellegzetességgel bíró primordiális gravitációs hullámokat szeretnék vele vizsgálni (Li és mtsai. 2017).

A gravitációs hullámok spektruma



20. ábra: A gravitációs hullámok különböző tartományain észlelhető jelek forrásai és az ezeket mérő technológia / műszerek (NASA Goddard Space Flight Center 2012)

A gravitációs hullámok jó új módszerként szolgálhatnak a Hubble-állandó mérésére is (Bécsy, Dálya és Raffai 2017). A jelenleg ismert értékek meghatározásának egyik módja a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás tulajdonságainak vizsgálata, ami alapján a Hubble-állandó mértéke $H_0 = 67,8 \pm 0,9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Planck Collaboration 2016). A második módszert az általánosan eléggé egyforma abszolút fényességűnek vett Ia típusú szupernóvák és Cefeida változócsillagok megfigyelése adta $H_0 = 73,24 \pm 1,74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ értékkel (Riess és mtsai. 2016). Az összeolvadó neutroncsillagok által kibocsátott gravitációs hullámok újabb adattal pontosíthatnák az eddigi méréseket. (Ha ismerjük a jel gazdagalaxisát, a galaxison végzett mérésekkel meghatározható a távolság és a távolodási sebesség.)

Összefoglaló

A dolgozatomban igyekeztem a csillagászat legújabban felfedezett objektumait és jelenségeit viszonylag könnyen emészthetően, a legmodernebb álláspontok szerint tárgyalni. A pontokban említett jelenségeket folyamatosan tanulmányozzák, különféle kutatások folynak természetük megismerésének érdekében. Némelyikük annyira rejtélyes, hogy csak kósza elméletek szolgálnak megértésükhöz, s elképzelhető, hogy egyik napról a másikra nagyot változtathat modelljükön egy-egy észlelés.

A különböző jelenségeken keresztül észlelhető kompakt objektumok megfigyelése nagy kihívást jelent, mert általában nagyon rövid ideig tartó felfényesedésekről van szó különböző hullámhossz-tartományokban. Ezek vizsgálatához szükségünk van irány- és fluxusérzékeny berendezésekre felszíni és űrbéli távcsövekben egyaránt. Nagyon fontos, hogy minden felhasználható műszer együttműködjön egymással, és a bekövetkező események észlelésekor gyorsan tudjanak kommunikálni, reagálni, a távcsövek égi pozíciót váltani. Régóta vizsgálódunk már az elektromágneses tartomány különböző hullámhosszain, de a modern, jól működő többcsatornás (multi-messenger) csillagászat új lehetőségei, mint például a gravitációs hullámok, nagyenergiás neutrínók észlelése és a kozmikus sugárzás vizsgálata jelentős információnövekedést fog hozni a jövőben.

Reményeink szerint az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (és az SZTE, mint partner) által elnyert GINOP-2.3.2-15-2016-00033 kódú „Tranziens Asztrofizikai Objektumok” pályázat keretében Dr. Vinkó József vezetésével a magyar kutatóknak sikerül érdemi hozzájárulást tenni a tranziens jelenségekkel és kompakt objektumokkal kapcsolatban.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak, hogy türelmesen segítette munkámat, és az ismeretek feldolgozása során jobbnál jobb tanácsokkal halmozott el. Felhasználtam a GINOP – „Tranziens Asztrofizikai Objektumok” pályázat keretében készült hatalmas, rendszerezett, dolgozatomhoz kapcsolódó szakirodalmi gyűjteményt.

Hálával tartozom szüleimnek a rengeteg támogatásért, amit tanulmányaim alatt tőlük kaptam, és köszönöm 🐣 Öcsinek 🐣 a sok vidám pillanatot, amivel a rövid otthon töltött idők során megajándékozott. Köszönöm a kedves hallgatótársaknak, hogy mindig, minden témában segítőkészek voltak. Sokat jelentett számomra legjobb barátaim támogatása, akik rendelkezésre álltak, ha szükségem volt rájuk, és köszönöm a szép szavakat azoknak, akik kíváncsian várták, majd szeretettel olvasták tudományos és szórakoztató irodalmi alkotásaimat egyaránt, ezzel hatalmas motivációs löketet adva. ☺

Irodalomjegyzék

- Abramowicz, Marek A., és Michał Bejger. „Fast radio bursts explained.” *arXiv:1704.05931 [astro-ph.HE]*, 2017.
- Auchetl, Katie, Enrico Ramirez-Ruiz, és James Guillochon. „Comparison of the X-ray emission from Tidal Disruption Events with those of Active Galactic Nuclei.” *The Astrophysical Journal* 852, 1. szám (01/2018).
- Bagchi, Manjari. „A Unified Model for Repeating and Non-repeating Fast Radio Bursts.” *Astrophysical Journal Letters*, 2017: ApJL 838 L16.
- Barna Barnabás, Nagy Andrea, Ordasi András, Szalai Tamás, és Vinkó József. „Földönkívüli üzenetektől a gravitációs hullámokig.” *Meteor csillagászati évkönyv 2017*, 2016: 248-261.
- Bécsy Bence, Dálya Gergely, és Raffai Péter. „Összeütköző neutroncsillagok.” *Meteor*, 12/2017: 4-7.
- Bhattacharya, D., és E. P. J. van den Heuvel. „Formation and evolution of binary and millisecond radio pulsars.” *Physics Reports* 203, 1-2. szám (1991): 1-124.
- Buckley, D. A. H., P. J. Meintjes, S. B. Potter, T. R. Marsh, és B. T. Gänsicke. „Polarimetric evidence of a white dwarf pulsar in the binary system AR Scorpii.” *Nature Astronomy* 1 (01/2017): id. 0029.
- Busekool, Eva. *Deelvraag 1: Wat zijn supernovae en supernovae restanten?* 2018. <http://www.astro.rug.nl/~busekool/deelvraag1.html> (hozzáférés dátuma: 2018.04.15.).
- Caltech. *LIGO's Interferometer*. 2018. <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo> (hozzáférés dátuma: 2018.04.20.).
- Chatterjee, D., A. F. Fantina, N. Chamel, J. Novak, és M. Oertel. „On the maximum mass of magnetized white dwarfs.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 469, 1. szám (07/2017): 95-109.
- Chatterjee, S, és mtsai. „A direct localization of a fast radio burst and its host.” *Nature*, 2017: 541, 58-61.
- Cosmos. *Anomalous X-ray Pulsar | COSMOS*. 2018. <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/A/Anomalous+X-ray+Pulsar> (hozzáférés dátuma: 2018.04.15.).
- Cosmos. *Pulsar Dispersion Measure | CAS CMS*. 2018. <http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/p/Pulsar+Dispersion+Measure>.
- Coti Zelati, F., N. Rea, J. A. Pons, S. Campana, és P. Esposito. „Systematic study of magnetar outbursts.” *MNRAS* 474 (2018): 961-1017.
- Dai, Lixin, Jonathan C. McKinney, Nathaniel Roth, Enrico Ramirez-Ruiz, és M. Coleman Miller. „A unified model for tidal disruption events.” *Astrophysical Journal Letters*, 03 2018.
- Dálya Gergely, és Bécsy Bence. „A gravitációshullám-asztrófizika születése.” *Meteor csillagászati évkönyv 2018*, 2017: 261-276.

- Deffree, Suzanne. *Pulsar is first observed, November 28, 1967*. 2017.11.28. <https://www.edn.com/electronics-blogs/edn-moments/4402048/Pulsar-is-first-observed--November-28--1967>.
- Duncan, R. C. 'MAGNETARS', *SOFT GAMMA REPEATERS*. 1998. 05. <http://solomon.as.utexas.edu/magnetar.html>.
- Duncan, R. C., és Christopher Thompson. „Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts.” *Astrophysical Journal, Part 2 - Letters* 392, 1. szám (1992): L9-L13.
- Esposito, P., N. Rea, és G. L. Israel. „Magnetars: a short review and some sparse considerations.” *arXiv:1803.05716 [astro-ph.HE]*, 2018.
- Eta Carinae - Wikipedia*. 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Eta_Carinae.
- Fernández-Lajús, Eduardo. *Optical monitoring of Eta Carinae*. 2009-2017. <http://etacar.fcaglp.unlp.edu.ar/>.
- Ferriere, Katia M. „The Interstellar Environment of our Galaxy.” *Reviews of Modern Physics* 73 (2001): 1031-1066.
- Fishman, Gerald J., és mtsai. „The first BATSE gamma-ray burst catalog.” *The Astrophysical Journal Supplement Series* 92, 1. szám (05 1994): 229-283.
- Freire, Paulo C. C. *Pulsars in Globular Clusters*. 2011-2018. <http://www2.naic.edu/~pfreire/GCpsr.html>.
- Frey Sándor. „Röntgenforrások és kvazárok: égi háromszögelési pontok.” In *Meteor csillagászati évkönyv 1998*, 178-187. 1997.
- Gerosa, Davide, Salvatore Vitale, Carl-Johan Haster, Katerina Chatziioannou, és Aaron Zimmerman. „Reanalysis of LIGO black-hole coalescences with alternative prior assumptions.” *eprint arXiv:1712.06635*, 12/2017.
- Gold, Thomas. „Rotating Neutron Stars and the Nature of Pulsars.” *Nature* 221 (01/1969): 25-27.
- Guillochon, James, Haik Manukian, és Enrico Ramirez-Ruiz. „PS1-10jh: The Disruption of a Main-sequence Star of Near-solar Composition.” *The Astrophysical Journal* 783, 1. szám (2014): 21.
- Hamsch, Franz-Josef. *Amateurs Help Discover Pulsing White Dwarf*. 2016.08.15. <http://www.skyandtelescope.com/observing/stargazers-corner/amateurs-aid-discovery-pulsing-white-dwarf-ar-scorprii/> (hozzáférés dátuma: 2018.04.13.).
- Horváth István. „Gammakitörések.” *Meteor csillagászati évkönyv 2012*, 2011: 291.
- Humphreys, R. M., J. C. Martin, A. Mehner, K. Ishibashi, és K. Davidson. „Eta Carinae - Caught in Transition to the Photometric Minimum.” *The Astronomer's Telegram* 6368 (08/2014).
- Ilyasov, Yu. P., S. M. Kopeikin, M. V. Sazhin, és V. E. Zharov. *Pulsar as Barycenter Coordinate Clock*. Prague. 2006.08.14-25.
- Israel, G., és mtsai. „The discovery of rapid x-ray oscillations in the tail of the SGR 1806-20 hyperflare.” *The Astrophysical Journal* 628 (2005): L53-L56.

- Katz, J. I. „Fast Radio Bursts: A Brief Review: Some Questions, Fewer Answers.” *Mod. Phys. Lett. A*, 31, 14. szám (2016).
- Keane, E. F. et al. „The host galaxy of a fast radio burst.” *Nature* 530 (2016): 453-456.
- Kepler, S. O., Alejandra Daniela Romero, Ingrid Pelisoli, és Gustavo Ourique. „White Dwarf Stars.” *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 45 (2017): id. 1760023.
- Kepler, S. O., D. Koester, A. D. Romero, G. Ourique, és I. Pelisoli. „White Dwarf Mass Distribution.” *ASP*, 10/2016.
- Kienlin, A. von. *AstroMeV*. 2014. <http://astromev.in2p3.fr/?q=aboutus/gamma-ray-emission-magnetars-and-rotation-powered-pulsars> (hozzáférés dátuma: 2018).
- Kiss László. „GW170817: új csillagászat született.” *Meteor*, 12 2017: 3.
- Klebesadel, Ray W., Ian B. Strong, és Roy A. Olson. „Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin.” *Astrophysical Journal* 182, L85. szám (06/1973).
- Kouveliotou, Chryssa. „Magnetars.” *PNAS* 96, 10. szám (05/1999): 5351-5352.
- Kouveliotou, Chryssa, és mtsai. „Identification of two classes of gamma-ray bursts.” *Astrophysical Journal, Part 2 - Letters* 413, 2. szám (08/1993): L101-L104.
- Kovács József. „Válogatás az asztrofizika új eredményeiből.” *Meteor csillagászati évkönyv 2012*, 2011: 235-246.
- LAGO. *LAGO: Gamma Ray Bursts*. 2018. <http://lagoproject.org/grb.html> (hozzáférés dátuma: 2018. 04. 12.).
- Li, Hong, és mtsai. „Probing Primordial Gravitational Waves: Ali CMB Polarization Telescope.” *eprint arXiv:1710.03047, National Science Review* (2018), 10/2017.
- LIGO/University of Oregon/Ben Farr. „Variety of Gravitational Waves and a Chirp.” 2017.10.13.
- LIGO-Virgo/Frank, és Elavsky/Northwestern University. *BH and NS Mass Chart*. 2017.10.16. <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20171016a>.
- Lorimer, D. R., M. Bailes, M. A. McLaughlin, D. J. Narkevic, F. Crawford, és . „A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin.” *Science* 318, 5851. szám (2007): 777.
- Lumen Learning. *The Evolution of Binary Star Systems | Astronomy*. 2018. <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-evolution-of-binary-star-systems/>.
- Owczynnik, M. G., D. Szychliński, és Samek E. Pazderski. *Gdansk Pulsar Clock*. 2011.10.06. <https://web.archive.org/web/20111213061916/http://www.mhmg.gda.pl/index.php?view=event,339&oddzial=5>.
- MacFadyen, A. I., S. E. Woosley, és A. Heger. „Supernovae, Jets, and Collapsars.” *The Astrophysical Journal* 550, 1. szám (2001): 410.
- Marcote, B., és mtsai. „The Repeating Fast Radio Burst FRB 121102 as Seen on Milliarsecond Angular Scales.” *ApJL*, 2017: 834 L8.

- Marcote, B., T. R. Marsh, E. R. Stanway, Z. Paragi, és J. M. Blanchard. „Towards the origin of the radio emission in AR Scorpii, the first radio-pulsing white dwarf binary.” *Astronomy & Astrophysics* 601 (05/2017): L7 4pp.
- Marsh, T. R., és mtsai. „A radio-pulsing white dwarf binary star.” *Nature* 537, 7620. szám (09/2016): 374-377.
- Mauerhan, Jon C., és mtsai. „The Unprecedented 2012 Outburst of SN 2009ip: A Luminous Blue Variable Becomes a True Supernova.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 430, 3. szám (02/2013): 1801-1810.
- McWilliam, Andrew, Anthony L. Piro, Carles Badenes, és Eduardo Bravo. „Evidence for a Sub-Chandrasekhar Mass Type-Ia Supernova in the Ursa Minor Dwarf Galaxy.” *arXiv:1710.05030, submitted to The Astrophysical Journal.*, 10/2017.
- Nakar, Ehud. „Short-Hard Gamma-Ray Bursts.” *Physics Reports* 442, 1-6. szám (04/2007): 166-236.
- NASA Goddard Space Flight Center. *Gravitational Astrophysics Laboratory - Research*. 2012.01.09. <http://science.gsfc.nasa.gov/663/research/index.html> (hozzáférés dátuma: 2018.04.20.).
- NASA's Goddard Space Flight Center. 2015.04.10.
- Nord, Andrea. *Preclinical MR*. 2017.01.16. https://www.med.lu.se/bioimaging_center/lbic_platforms/preclinical_mr.
- Olausen, S. A., és V. M. Kaspi. „The McGill Magnetar Catalog.” *The Astrophysical Journal Supplement* 212, 1. szám (2014): 22.
- Pacini, Franco. „Some Problems in the Theory of Isolated Pulsars.” *van den Heuvel E.P.J., Rappaport S.A. (eds) X-Ray Binaries and Recycled Pulsars. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences)* (Springer, Dordrecht) 377 (1992).
- Paragi Zsolt. „Gyors rádiótranziensek.” *Meteor csillagászati évkönyv 2018*, 2017: 248-260.
- Petroff, E., és mtsai. „FRBCAT: The Fast Radio Burst Catalogue.” *Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA)* 33 (2016): 7.
- Planck Collaboration. „Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters.” *Astronomy & Astrophysics* 594 (09/2016): 63.
- polskieradio.pl. *This is the so-called pulsar clock, constructed by a group of scientists led by Dr Grzegorz Szychliński from the Historical Museum of the City of Gdańsk*. 2011.11.23. <https://www.polskieradio.pl/5/3/Artykul/485255,Najdokladniejszy-zegar-swiata-powstal-w-Polsce>.
- Pulsar - Wikipedia*. 2018.02.25. <https://en.wikipedia.org/wiki/Pulsar#Categories>.
- Rea, N., és mtsai. „A Low-Magnetic-Field Soft Gamma Repeater.” *Science* 330 (2010): 944.
- Riess, Adam G., és mtsai. „A 2.4% Determination of the Local Value of the Hubble Constant.” *The Astrophysical Journal* 826, 1. szám (07/2016): 31.
- SKA. *Pulsars And Gravitational Waves*. 2018. <https://www.skatelescope.org/gravity-einstein-pulsars/pulsars-gravitational-waves/>.

- Smith, Nathan, és David J. Frew. „A Revised Historical Light Curve of Eta Carinae and the Timing of Close Periastron Encounters.” *arXiv:1010.3719 [astro-ph.SR]*, 2010.
- Spitler, L. G., és mtsai. „Fast Radio Burst Discovered in the Arecibo Pulsar ALFA Survey.” *The Astrophysical Journal* 790, 2. szám (2014): 9.
- Strohmayer, T. E., és A. L. Watts. „Discovery of fast x-ray oscillations during the 1998 giant flare from SGR 1900+14.” *The Astrophysical Journal* 632 (2005): L111-L114.
- Strohmayer, Tod, és Dana Berry. *Type Ia Supernovae*. 2014. https://www.physics.rutgers.edu/analyze/wiki/Ia_supernovae.html.
- Tartaglia, Angelo, Matteo Luca Ruggiero, és Emiliano Capolongo. „A null frame for spacetime positioning by means of pulsating sources.” *Advances in Space Research* 47 (2011): 645-653.
- Tendulkar, S. P., és mtsai. „The Host Galaxy and Redshift of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102.” *ApJL*, 2017: 834 L7.
- Thompson, C., és R. C. Duncan. „The Soft Gamma Repeaters as Very Strongly Magnetized Neutron Stars. II. Quiescent Neutrino, X-Ray, and Alfvén Wave Emission.” *ApJ* 473 (1996): 322-342.
- Thompson, Christopher, és Robert C. Duncan. „The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts.” *MNRAS* 275 (1995): 255-300.
- van Paradijs, J., R. E. Taam, és E. P. J. van den Heuvel. „On the nature of the 'anomalous' 6-s X-ray pulsars.” *Astronomy and Astrophysics* 299 (07/1995): L41.
- Vinkó József és mtsai. „A Luminous, Fast Rising UV-Transient Discovered by ROTSE: a Tidal Disruption Event?” *Astrophysical Journal* 798, 1. szám (01/2015).
- Wang, Weiyang, Rui Luo, Han Yue, Kejia Lee, Xuelei Chen, és Renxin Xu. „FRB 121102: a star quake-induced repeater?” *arXiv:1710.00541 [astro-ph.HE]*, 2017.
- Watts, Anna L., és Tod E. Strohmayer. „Neutron star oscillations and QPOs during magnetar flares.” *Advances in Space Research* 40, 10. szám (2007): 1446-1452.
- Weisberg, Joel M., David J. Nice, és Joseph H. Taylor. „Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16.” *APJ* 722, 1030. szám (2010).
- Williams, Matt. *The Gaia mission could moonlight as a gravitational wave detector*. 2018.01.05. <https://www.universetoday.com/138204/gaia-mission-moonlight-gravitational-wave-detector/>.
- Zwicky, Fritz, és Walter Baade. „Supernovae and Cosmic Rays.” *Physical Review*, 45. szám (1934): 138.

NYILATKOZAT

Alulírott *Sukolová Dóra* Fizika BSc szakos hallgató (ETR azonosító: SUDWAAT.SZE) a *“Kompakt csillagokkal kapcsolatos újonnan felfedezett jelenségek”* című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, év hó nap

.....

hallgató aláírása