

# EGYRE TÖBBET TUDUNK A GYORS RÁDIÓKITÖRÉSEKRŐL

Könyves-Tóth Réka, Krezinger Máté  
CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

## Tranziensek a rádióégbolton

Elődeink már évezredekkel ezelőtt felfigyeltek arra, hogy a csillagos égbolt folyamatosan változik: a letűnt korok csillagászai hirtelen felfényesedő, majd az örök sötétség honába halványuló új égi objektumokat fedeztek fel, amelyek közül sok esemény egyszeri és

---

A szerzők köszönetüket fejezik ki a cikkírás lehetőségéért és a szöveg szakmai, illetve nyelvhelyességi lektorálásáért *Frey Sándornak* és *Szabados Lászlónak*.

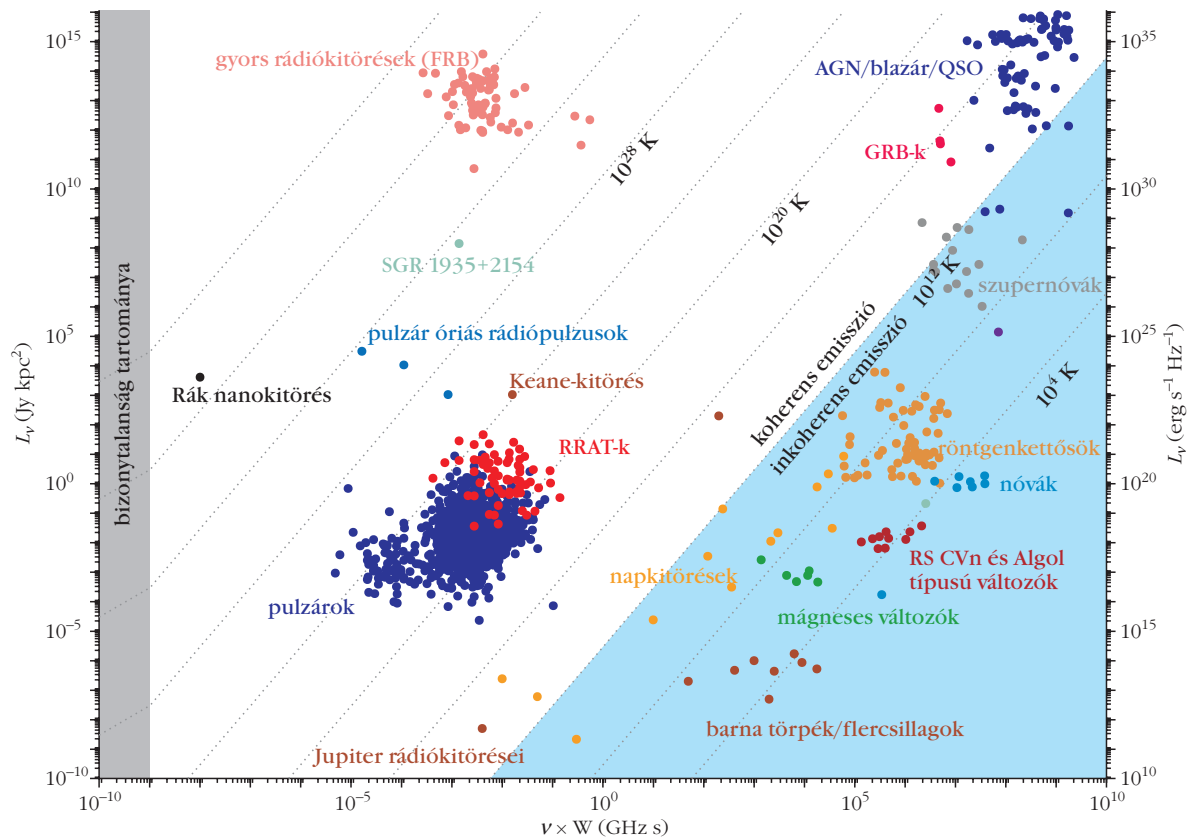


*Könyves-Tóth Réka* 2020-ban végezte el a csillagász mesterszakot az ELTE TTK-n, majd az SZTE TTK Fizika Doktori Iskolájának asztrofizika szakirányán 2022-ben megszerezte a doktori fokozatot Vinkó József témavezetésével. Jelenleg a Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet fiatal kutatója, kutatási témája a szupernóva-robbanások asztrofizikája.

megismételhetetlen volt, míg mások szabályos vagy éppen szabálytalan időközönként ismétlődni látszóttak. A napjainkig tartó technológiai fejlődésnek köszönhetően az ember immár nemcsak szabad szemmel, hanem távcsövek segítségével is megfigyelheti az égboltot. Emellett földfelszíni és űrteleszkópok, távcsőhálózatok és interferométerek segítik a szabad szemmel láthatatlan (gamma-, röntgen-, ultrabolya-, infravörös és rádió-) tartományokban sugárzó objektumok, jelenségek megfigyelését. Ezek közül is kü-



*Krezinger Máté* 2020-ban végezte el a csillagász MSc-t az ELTE TTK-n, majd 2020-tól az ELTE Fizika Doktori Iskolájának doktorandusz hallgatója Frey Sándor témavezetésével. Doktori témája a nagy vörösel-tolódású rádiókvazárok vizsgálata.



1. ábra. Tranziens objektumok fázistere (www.nature.com).

lönlegesen érdekesek a rádiótartományban felbukkanó tranziens események, amelyek közé tartozik a jelen cikk tárgyát képező gyors rádiókitörés (fast radio burst, FRB) jelensége is.

Mit is jelent a „tranziens” kifejezés? Bár e fogalomnak napjainkig nincs pontos definíciója, a közmegegyezés szerint ide tartoznak azok az események, amelyek során egy eddig ismeretlen objektum hirtelen feltűnik az égbolton, felfényesedik, egy adott időszakon át láthatóvá válik, végül pedig elhalványul. Tranziensnek számítanak például a másodperc törtsze alatt lezajló gamma-kitörések (gamma-ray burst, GRB), továbbá a hónapokig vagy akár évekig látható nóvakitörések és a bizonyos csillagok halálakor bekövetkező monumentális robbanások, a szupernóvák, illetve az aktív galaxismagok (active galactic nuclei, AGN) rádiótartományban megfigyelhető kitörései is. Az 1. ábrán az optikai és más hullámhosszbeli tranziensek között megjelennek a rádiótranziensek is. Az ábra vízszintes tengelye a frekvencia és a tranziens időtartamának szorzatát jeleníti meg, míg a függőleges tengelyen a frekvenciaegységre jutó sugárzási teljesítmény (luminozitás) látszik.

A feltüntetett rádiótranziensek közül kiemelendők az ábra bal alsó sarkában látható pulzárók. Ezek olyan erősen mágnesezett, gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyek forgástengelye és mágneses tengelye különböző irányú. A mágneses tengely mentén kis térszögben megfigyelhető egy kifelé terjedő relativisztikus nyaláb (jet), amelyet a fénysebességhez közeli sebességgel mozgó elektromos töltések hoznak létre.

Emiatt a pulzárók erős rádió-, gamma-, illetve röntgensugárzást bocsátanak ki, amely akkor észlelhető, amikor a jet a látóirányba esik: ekkor a pulzárt felvillanni látjuk. Ez időben ismétlődő jelenség, amelynek periódusa a milliszekundumostól egészen a néhány másodperces időskáláig terjed. A pulzárók éppen ezért alkalmasak az atomórákhoz hasonlóan pontos időmérésre is. A pulzárók rádiótartományban történő vizsgálatakor azonban 2006-ban felfedeztek egy olyan „különleges” neutroncsillagot is, amely nem minden periódusban bocsát ki pulzusokat. Később az ehhez hasonló objektumokat forgó rádiótranziensnek (Rotating Radio Transient RRAT) [1] nevezték el, amelyek külön tranziensosztályként jelennek meg az 1. ábrán a pulzárók fölött. A forgó rádiótranziensek vizsgálata önmagában is számos érdekes eredményhez vezetett, sőt mintegy melléktermékeként magával hozta egy mindmáig rejtélyes objektumtípus felfedezését, amely a gyors rádiókitörés nevet viseli, és az 1. ábra bal oldala tetején jelenik meg, ezzel szemléltetve, hogy luminozitása meghaladja a legtöbb ismert rádiótranziensét.

De vajon mik is azok az FRB-k, és hogyan fedezték fel őket? Milyen szülőobjektumtól származhatnak? Vannak-e különböző csoportjaik? A galaxisunkból vagy távolabbi galaxisokból eredeztethetők? Azokon belül hol fordulnak elő? Milyen fizikai folyamatok okozzák? Hogyan tudunk segítségükkel hozzájárulni az Univerzum fizikájának mélyebb megértéséhez? Ezen kérdések közül még nem mindre tudunk egyér-

telmű választ adni a birtokunkban lévő adatok és információk alapján: az FRB-k számos tulajdonságát napjainkig homály fedi. Éppen ezért kutatásuk a 21. századi csillagászat egyik legdinamikusabban fejlődő területe, és szinte hetente jelennek meg új, jelentős eredményekről beszámoló szakcikkek a témában. Az alábbiakban Petroff és munkatársai (2019, 2022) [2, 3] összefoglaló cikkei alapján igyekszünk bemutatni a tudomány FRB-kkel kapcsolatos jelenlegi álláspontját.

## Az FRB-k felfedezésének története

Az első gyors rádiótranzienst csaknem két évtizeddel ezelőtt detektálták. Ekkor az a globális probléma jellemezte a rádiócsillagászok mindennapi életét, hogy egyre nehezebbé vált megszerezni az anyagi forrásokat a nagy rádiótávcsövek működtetésére: még a legnagyobb gyűjtőfelületű teleszkópnak számító, ám mára meghibásodása miatt a használatból kivont, 305 méteres átmérőjű Arecibo-távcső (Puerto Rico) is pénzügyi gondokkal küszködött. A később az FRB-k felfedezőjeként is ismert, 64 méteres átmérőjű ausztráliai Parkes-teleszkóp (lásd a címlapot) számára egy új észlelési technika kifejlesztése és alkalmazása jelentette a csőd elől való menekülést. Ezen új technika megvalósítása egy több vevőből álló rendszer kiépítésével kezdődött, amelynek köszönhetően a távcső látómezeje sokszorosára növekedett, ilyen módon lehetőséget biztosítva arra, hogy újabb pulzárokat fedezzenek fel vele. Ez a projekt lendítette vissza a Parkes-rádiótávcsövet a tudomány élvonalába: új algoritmusokkal és észlelési technikákkal egyre több és egyre halványabb pulzárokat sikerült azonosítani.

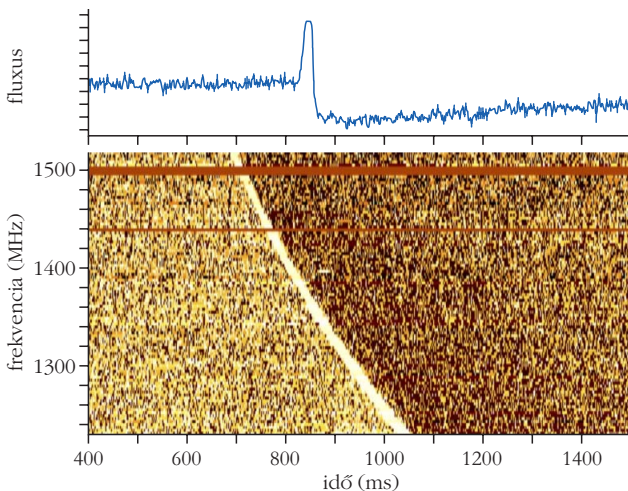
Emellett nemcsak periodikus, hanem egyedi jelek érzékelésére is alkalmassá vált a műszer, ami 2006-ban a gyorsan forgó rádiótranziensek felfedezéséhez vezetett. A jelenleg elfogadott álláspontok szerint az RRAT-k által kibocsátott, rövid ideig tartó felfényesedés forrása egy neutroncsillag mágneses terének sugárzása. Az onnan kiinduló jel később áthalad a galaxisok között található ritka, ionizált anyagon, és en-

nek következtében frekvenciától függő időkést szenved, amely jelenséget diszperzióknak nevezünk. A megfigyelés és azonosítás egyik legfőbb nehézsége az, hogy nem ismerjük a diszperzió mértékének (dispersion measure,  $DM$ ) pontos értékét, ugyanis a hirtelen felfényesedés egy adott frekvenciatartományban észlelve a frekvenciától függően „elkenődik” (vagyis az impulzus eltérő időpontokban érkezik a vevőbe). Ahhoz viszont, hogy korrigálni tudjuk a jelet erre, és ilyen módon tisztán kimutassuk az RRAT jelenlétét, pontosan meg kell ismernünk a diszperzió mértékét rengeteg lehetséges érték végigpróbálásával. A Tejútrendszerben már nagyon sok pulzárt ismerünk, így galaxisunk  $DM$ -eloszlása jó közelítéssel becsülhető. A diszperzió mértéke egyenesen arányos a látóirányba eső szabad elektronok sűrűségével és a megfigyelt objektum távolságával:

$$DM = \int_0^D n_e(l) dl.$$

Itt  $n_e$  az elektronok számsűrűsége,  $l$  egy skálahosszúság és  $D$  a rádióforrás távolsága. Az RRAT-k felfedezését követően rendszerezetten újraelemezték a több év alatt felhalmozódott adatokat, további hasonló objektumok felfedezésének reményében. Ezen kutatás során sikerült azonosítani egy szokatlanul erős, mindössze néhány ezred másodpercig tartó jelet (2. ábra). Ez később a felfedezője után a Lorimer-kitörés nevet kapta. Különösen meglepő volt, hogy az ehhez számolt  $DM = 375 \text{ pc/cm}^3$ -es érték jócskán meghaladta az adott látóirányban a Tejútrendszerbeli várható értéket. A kutatók első gondolata ekkor az volt, hogy a jelet biztosan valamilyen műszereffektus okozhatta, mint ahogy ez sok más korábbi esetben is megtörtént. Ez a különleges jel azonban nem jelentkezett a Parkes-távcső minden vevőjében, ezzel kizárva a földi zavaró interferencia lehetőségét. Észszerű magyarázatnak tűnt ekkor az az elmélet, miszerint a jel nem a Tejútrendszerből, hanem egy extragalaxisból származik, és így a diszperzió mértékének kimagasló értéke az objektum szülőgalaxisának, valamint a galaxisközi tér ionizált anyagának számlájára írható. A jel távolságának meghatározása után felvetődött, hogy egy pulzár esetében előfordul „óriáspulzust”, vagy esetleg egy távoli RRAT-t sikerült detektálni, ám ekkor bizonyos idő eltelte után ismét jeleket kellett volna észlelnünk abból az irányból. Ez azonban azóta sem következett be, így a kutatók azt a végső következtetést vonták le, hogy egy új jelenséggel állnak szemben, amelyet ma gyors rádiókitörés néven ismerünk.

2. ábra. Az FRB 010724 néven is ismert Lorimer-kitörés [2].



## Tapogatózás a sötétben – honnan erednek az FRB-k?

A gyors rádiókitörések eredetének feltárásához hosszú és rögös út vezetett, sőt a kitörés fizikai mechanizmusát illetően még napjainkban is egyre újabb kérdések vetődnek fel. Az első FRB detektálásakor,

ahogy azt már korábban említettük, felmerült e jelek extragalaktikus eredetének gondolata, tehát az, hogy nem a Tejútrendszerből, hanem távolabbi galaxisokból származnak. Ennek egyértelmű bizonyítása azonban 2013-ig váratott magára. A jel forrása pontos égi helyzetének meghatározása során a legnagyobb probléma a Parkes-távcső korlátozott, 15 ívperces szögfelbontása volt, ezen belül a gyors rádiókitörés helyzete ismeretlen maradt. A kutatókat megrémisztette az a felfedezés is, hogy az obszervatóriumban működő mikrohullámú sütők is képesek az első FRB-éhez hasonló jeleket produkálni [4], noha szerencsére azok a jelek bizonyítottan földi eredetűek, mivel – az első FRB jeleivel ellentétben – megjelennek a Parkes-távcső összes vevőjében. A 2013-as év négy új FRB felfedezését hozta, illetve egy olyan becslést, amely szerint az égbolton naponta akár több ezer gyors rádiókitörés is várható. Ez további optimizmusra adott okot.

Egészen 2014-ig kizárólag a Parkes-teleszkóppal sikerült gyors rádiókitörést azonosítani, hiszen ez a távcső biztosított lehetőséget a legnagyobb égterület végigpásztázására. Később azonban mind az arecibói, mind más rádiótávcsövek is sikeresen rögzítettek FRB-eket. Eredetüket illetően is számos elképzelés látott napvilágot: a legtöbben egyetértettek abban, hogy a jel kozmikus eredetű, a detektálás időtartamából pedig arra következtettek, hogy a forrás nagy valószínűséggel egy gyorsan forgó, mágnesezett neutroncsillag vagy akár egy fekete lyuk. A becslések szerint – távoli csillagelődöt feltételezve – a kitörés során felszabaduló energia értéke nagyságrendekkel meghaladhatja a pulzárak által kibocsátott energiát, ami arra utal, hogy az FRB-k szülőobjektuma különleges.

Korábban létezett olyan elképzelés is, miszerint az FRB-k szülőobjektuma egy, a galaxisunkban lévő fősorozati csillag, amely kitöréseket produkál. Ezzel a feltételezéssel nemcsak az energiaprobléma oldódna meg, hanem a *DM*-többletet is meg lehetne magyarázni a csillagkorona jelenlétével. Mivel a gyors rádiókitörések felfedezése után még néhány évig nem ismertünk ismétlődő FRB-eket, a fizikai mechanizmus tekintetében felvetődött a kataklizmikus eredet is. Eszerint a szülőcsillag egy, a határtömegét megközelítő, gyorsan forgó, mágnesez neutroncsillag (magnetár), amely mágnesez fékeződésen megy keresztül, végül pedig fekete lyukká omlik össze. Mások szerint az FRB-k akár aktív galaxismagokból is eredhetnek, mégpedig olyan módon, hogy az általuk kibocsátott relativisztikus jet kölcsönhat a körülötte lévő csillagközi anyaggal. A szülőobjektum és a fizikai mechanizmus mélyebb megismerését az FRB-k pontos helymeghatározása tette lehetővé.

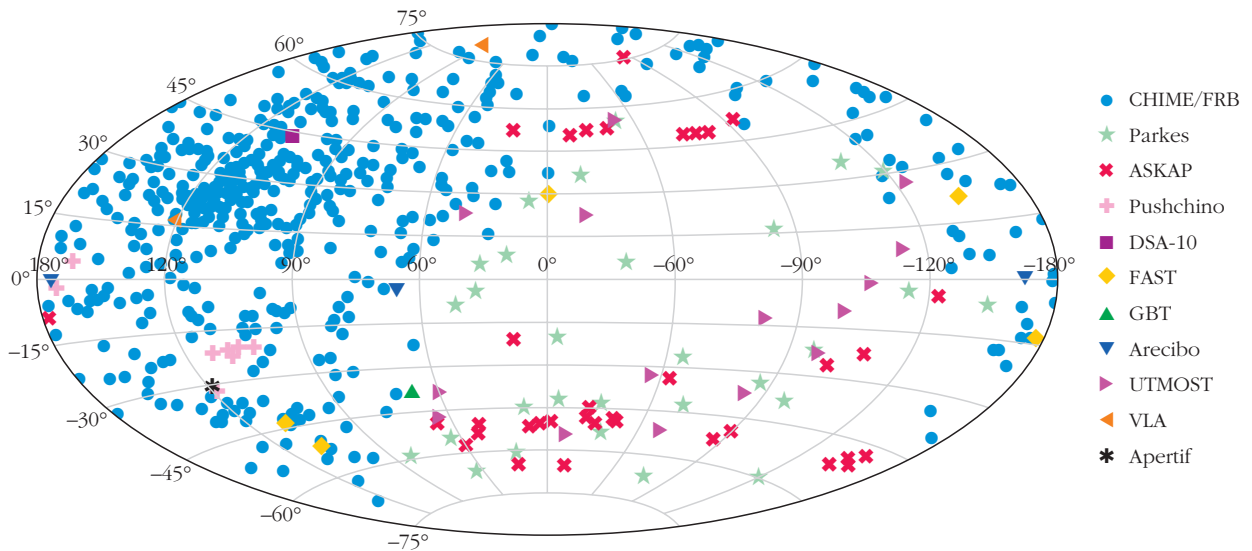
Mielőtt azonban rátérünk a legújabb eredményekre, megjegyezzük, hogy az FRB-k helyének pontos ismerete új távlatokat nyithat a kozmológiai kutatások terén is, hiszen segítségükkel feltérképezhetővé válhat a galaxisok közötti tér barionos anyagának eloszlása. A gyors rádiókitörések által kibocsátott jel diszperziójának mértéke ugyanis összefügg a látóirányba eső szabad elektronok oszlopsűrűségével. Bár Uni-

verzumnak a sötét anyag, illetve a sötét energia mellett csak nagyjából a 4,6%-át teszi ki a barionos anyag, még ennek eloszlása és eredete sem ismert pontosan. Az újabb FRB-k felfedezése, szülőgalaxisuk azonosítása és azok pontos helymeghatározása tehát új kozmológiai áttörésekhez vezethet a jövőben, és magyarázatot adhat a hiányzó barionos anyag problémájára [2].

Az eddig leírtak alapján tehát az FRB-k egyszeri és megismételhetetlen eseménynek tűnhetnek. Ebben a hitben élt a tudományos közösség is, egészen addig, amíg 2016-ban fel nem fedezték az első ismétlődő FRB-t [5]. Az FRB121102 (a szokványos jelölésben a számok az első kitörés dátumára utalnak) ismétlődő természete lehetővé tette, hogy több interferométeres hálózat, az amerikai Very Large Array (VLA), illetve az Európai VLBI Hálózat (EVN) is folyamatosan figyelemmel kísérje az adott égterületet egy új kitörésre – amelyet végül mindkét említett hálózattal rögzítettek – azonban csak hosszú hónapok várakozása után került sor. Ezáltal egyrészt sikerült kizárni azt a gyanút, miszerint az FRB-k csupán egy műszereffektus következményei, hiszen két rádióteleszkóp-hálózat számos műszerével is egyidejűleg sikerült megfigyelni. A nagy felbontást és pozíciós pontosságot nyújtó vizsgálatok során sikerült azonosítani az FRB gazdag galaxisát, illetve a galaxis spektrumvonalainak vöröseltolódásából kiszámolni annak távolságát. Később azt is megállapították, hogy az FRB121102 egy fém-szegény törpegalaxisból származik, s annak is a szélén, egy intenzív csillagkeletkezéssel jellemezhető területen történt. Ez a felfedezés felvetette azt a kérdést, hogy vajon a szintén ilyen környezetben előforduló szuperfényes szupernóvák (superluminous supernova, SLSN) vagy a hosszú gammakitörések (long gamma-ray burst, LGRB) és az FRB-k között lehetséges-e bármiféle kapcsolat. Mindezek az érdekes elméletek azonban mindaddig pusztán spekulatív jellegűek maradtak, amíg nem állt rendelkezésünkre egy több száz FRB-ből álló minta.

## Az ismert FRB-k számának rohamos növekedése – lehetőség az újabb áttörésekre

A gyors rádiókitörések rejtélyei olyannyira felkeltették a kutatók érdeklődését, hogy az utóbbi években számos program indult az FRB-k keresésére. Ilyen keresőprogramokat indított például az Ausztráliában található Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP) és UTMOST interferométer, a Hollandiában működő Low-Frequency Array (LOFAR), a kanadai Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME), illetve az EVN is. Ezek segítségével napjainkra több száz FRB-t sikerült azonosítani. Az utóbbi 2-3 év rohamos fejlődését remekül szemlélteti, hogy míg 2019-ben a CHIME/FRB-katalógus mindössze körülbelül 60 objektumot számlált, amelyek közül



3. ábra. A 2022 januárjáig felfedezett FRB-k eloszlása az égbolton [3].

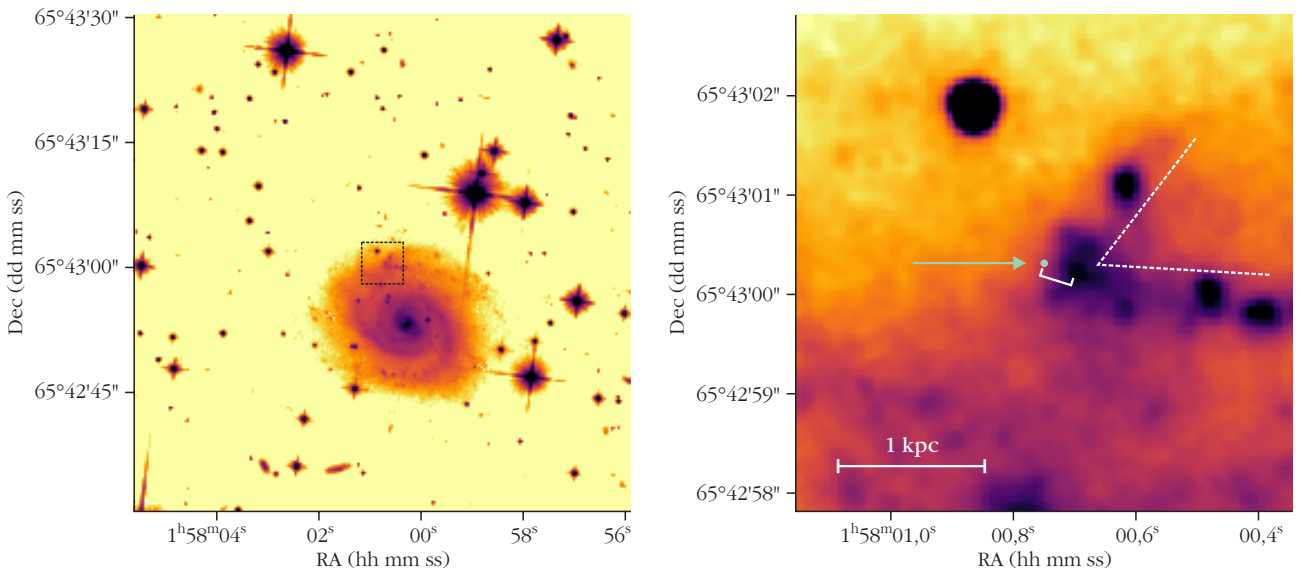
kettőt osztályoztak ismétlődő FRB-nek, 2022-re ez a szám átlépte a 600-at, s az ismétlődő FRB-k csoportja is több tucatnyi objektummal bővült, közöttük volt olyan, amelynek aktivitásában periodicitást fedeztek fel. A 3. ábra a 2022 januárjáig felfedezett FRB-k eloszlását mutatja az égbolton.

Szintén áttörést jelentett, hogy míg 2019-ben csak egy FRB-hez tudtak gazdagalaxist társítani, napjainkban már 19 galaxist tartalmaz ez a minta. Közöttük van a Tejútrendszerünkhöz közeli is (M81), és éppen ezért részletesebben vizsgálható, mint a távolabbi galaxisok. Ezt a fejlődést jórészt az ASKAP interferométer új észlelési technikája és nagy látómezeje tette lehetővé, míg a galaxisok vizsgálatában és azok pontos hely- és távolságmeghatározásában jelentős szerepet vállalt az EVN. A pozíció meghatározásában hasznos segítséget nyújtottak a Hubble-űrtávcső (Hubble Space Telescope, HST) képei is (4. ábra). Amellett,

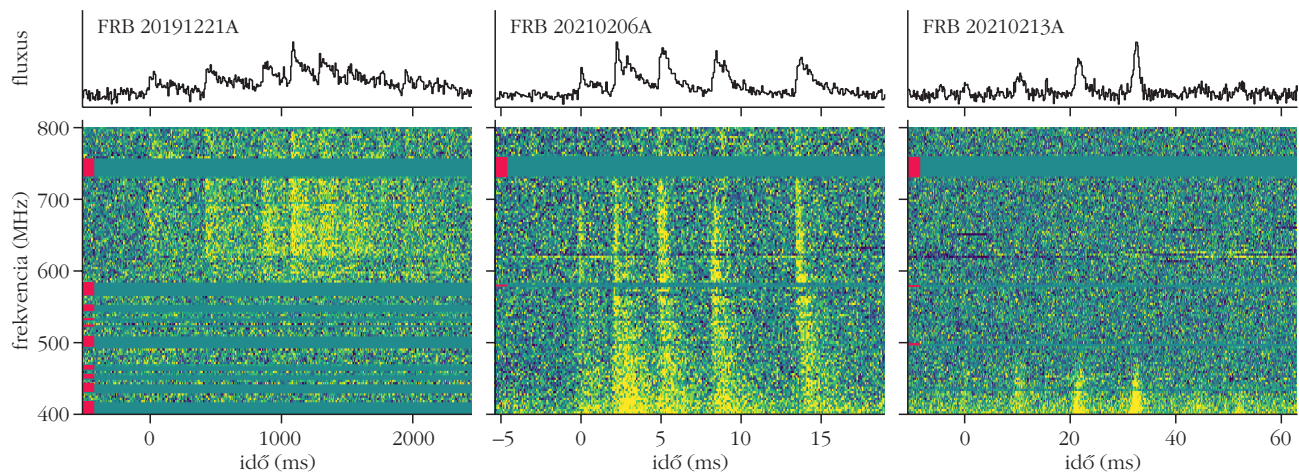
hogy immár részletes vizsgálatnak vethetjük alá a különböző FRB-gazdagalaxisokat, saját galaxisunkban is sikerült azonosítani egy gyors rádiókitöréshez hasonló pulzusokat produkáló magnetárt, és ilyen módon bizonyítékot találni az FRB-k és a magnetárok közötti kapcsolatra. Az egyre bővülő FRB-minta alapján továbbá a  $DM$  és a vörösetolódás kapcsolatát leíró Macquart-reláció is megerősíthető.

A gyors rádiókitörések iránti érdeklődés hatására napjainkra több mint 600 objektum adatai szerepelnek a CHIME katalógusban. Ez az elemszám már elég nagy ahhoz, hogy statisztikai vizsgálatnak vethessük alá az eddig megismert objektumokat, és ilyen módon elgondolkodjunk az FRB-k alcsoportokra osztásán. Jelenlegi ismereteink alapján kézenfekvőnek tűnik két altípus, az ismétlődő és a klasszikus (csupán egyszeri tranzienst mutató) FRB-k elkülönítése. E két csoport tagjai ugyanis több megfigyelési jellemzőjük-

4. ábra. A Hubble-űrtávcsővel készített képek az FRB 20180916B gazdagalaxisáról. Bal oldalt a galaxissal együtt látszik annak közvetlen környezete is, míg a jobb oldali kép ránagyít az FRB pozíciójára [6].







5. ábra. A CHIME/FRB által észlelt periodikus, illetve kváziperiodikus kitörések [7].

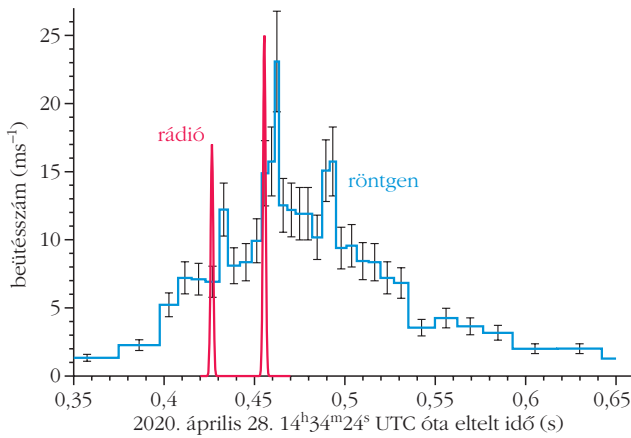
ben, például színeképükben, vagy a kitörés morfológiája alapján is különböznek egymástól. Fontos megjegyezni azonban, hogy az eddig ismert FRB-k csupán 4%-át sorolták az ismétlődő csoportba, és azok nagy részét is mindössze kétszer sikerült detektálni. Az ismétlődő FRB-k közül két alkalommal fedeztek fel periódust az ismétlődésben, ami szintén egy új csoport létezésének lehetőségét sejteti. Megfigyelt jellemzőik alapján tehát az említett két al típus tagjai különböznek egymástól, ám hogy ezt a különbséget a szülőobjektumok eltérő mivolta, vagy azonos típusú csillagelődők kisugárzási folyamatainak sokfélesége okozza, napjainkig vitatott. A minta elemszámának további növekedése a közeljövőben utat engedhet – többek között – e kérdés megválaszolására is, illetve a két említett alcsoport létezésének minden kétséget kizáró bizonyítására.

Minél több FRB-t ismerünk meg, annál nagyobb az esélye, hogy egyedi, érdekes objektumokra is bukkanjunk közöttük. Ennek ékes példája a több energián is megfigyelhető FRB 20191221A jelölésű ismétlődő FRB. Ez mindmáig az egyetlen olyan objektum, amely szigorú periodicitást mutat az egyes alkítörései között. A periodicitás oka jelenleg ismeretlen, ám nagy valószínűséggel ez az FRB különleges eset, amelyet talán a többitől eltérő fizikai mechanizmus hoz létre. Ezen a különleges eseten kívül időbeli változékonyságot figyeltek meg az FRB 20121102A, az FRB 20180916B és az FRB 20201124A objektumokban is. Ezeknél a változás üteme nem periodikus, ám megfigyelhető, hogy az alkítörések nagyjából egyforma erősségűek, s néhány milliszekundum telik el közöttük (5. ábra).

Az utóbbi néhány évben jelentős előrelépés történt a gyors rádiókitörések származásával kapcsolatban is. Már korábban is bizonyosságot nyert az FRB-k extragalaktikus eredete, s ezt megerősítette az a tapasztalat, miszerint több tucatnyi gyors rádiókitörés pontos pozíciója megegyezik valamelyik galaxis koordinátaival, így nagy valószínűséggel az esemény abban a galaxisban történt. Bár az eddig ismert gazdagalaxisok rendkívül sokfélék, az ismétlődő FRB-k esetén

megfigyeltek egy olyan trendet, miszerint az esetek nagy részében erős csillagkeletkezést mutató galaxisokban fordulnak elő. Akadt azonban ellenpélda is, amikor a gyors rádiókitörést egy galaxis csillagkeletkezési régiójától távol azonosították. Ez a következő kérdést vetette fel: lehetséges, hogy az ismétlődő FRB-k kék óriáscsillagokból származnak, amelyekből a szülőkörnyezetüktől viszonylag távol alakult ki szupernóva, és annak maradványaként neutroncsillag? Ennek megválaszolása a jövőbeli kutatások egyik feltett célja. Megfigyelhető továbbá, hogy a klasszikus értelemben vett, tehát az ismétlődés nélküli FRB-k általában csillagkeletkezést nem vagy csak enyhén mutató galaxisok szélénél fordulnak elő. Ez a tapasztalat ahhoz az elmülethez vezetett, amely szerint az FRB-k szülőobjektumának vélt magnetár különféle módon jöhetett létre, többek között magöszseomlásos szupernóva-robbanás, kettőscsillag összeolvadása vagy esetleg anyaggyűjtés által okozott magkollapszus formájában.

Bár a legtöbb ismert FRB távoli galaxisban történt, a 2020-as év magával hozta azt az igen szerencsés fordulatot, hogy közvetlen környezetünkben, a Tejútrendszerben is megfigyelhessünk egyet, és ilyen módon közelebről is megismerhessük ezeket a rejtélyes objektumokat. 2020. április 28-án ugyanis a CHIME és a Survey for Transient Astronomical Radio Emission 2 (STARE2) egyidejűleg észlelte az SGR 1935+2154 névvel illetett galaktikus magnetár kiemelkedően fényes, néhány milliszekundumig tartó kitörését. Ezen FRB 200428-nak is nevezett esemény luminozitása csupán egy 30-as szorzóval bizonyult kisebbnek, mint az egyik legközelebbi extragalaktikus FRB, a tőlünk nagyjából 150 Mpc távolságban található FRB 20180916B luminozitása. Egy másik, térben nagyon közeli eseménynél, az M81 galaxisban nemrégiben felfedezett FRB-nél viszont nagyobb luminozitással bírt ez a különleges, tejútrendszerbeli kitörés. A megfigyelt, kiemelkedően fényes rádiókitörés után az SGR 1935+2154 további hat kisebb kitörést produkált, amelyek közül a leggyengébb 7 nagyságrenddel volt kisebb az április 28-án megfigyelt értékénél.



6. ábra. Az SGR 1935+2154 röntgenkitöréseinek detektálása. Jól látható, hogy az 1. és 2. röntgenscúcs – néhány ms időkülönbséggel – összhangban van a rádiótartományban végzett mérésekkel [8].

Szintén jelentős felfedezésnek bizonyult, amikor a CHIME műszerrel detektáltak egy olyan ismétlődő FRB-t, amelynek esetében a diszperzió mértéke jóval kisebb volt a többi extragalaktikus FRB-hez képest. A pontos helymeghatározás szerint ez az FRB 20200120E-nek nevezett esemény az M81 galaxis egyik gömbhalmazában történt, nagyjából 3,6 Mpc távolságban. Ez a meglepő észrevétel, miszerint az FRB 20200120E egy idős csillagokat tartalmazó gömbhalmazban történt, kizárja azt az elképzelést, hogy a szülőobjektum egy fiatal, nagy tömegű csillag volt. Ehelyett inkább egy kettőscsillag összeolvadása vagy tömegbefogás által okozott magkollapszusos szupernóva eredményeként létrejött neutroncsillag, esetleg egy extrém milliszekundumos pulzár, vagy éppenséggel egy tömeget befogó fekete lyuk lehetett a gyors rádiókitörés kiváltója.

Nem sokkal később egy másik ismétlődő FRB-t összefüggésbe hoztak egy kompakt törpegalaxissal, amiből arra lehetett következtetni, hogy az ismétlődő gyors rádiókitörések olyan környezetben is előfordulhatnak, amelyekben jellemző az erős csillagkeletkezés. Mindezek alapján kijelenthetjük, hogy az FRB-k természetének tisztázásáig még hosszú út áll előttünk. Egy lehetséges észlelési stratégiát szolgáltat az az elgondolás, hogy ha olyan törpegalaxisokat követünk figyelemmel, amelyekben korábban már előfordult szuperfényes szupernóva vagy hosszú GRB, akkor ott jó eséllyel megjelennek az ezekhez potenciálisan kapcsolódó FRB-k is.

Szintén érdekes lehet az FRB-k időbeli fejlődésének, változásának vizsgálata a megfigyelt aktivitás, a mért színkép, a diszperzió mértéke vagy egyéb fizikai jellemzők alapján. A kitörések közötti időből például következtethetünk a szülőobjektum tömegére, és adott esetben bebizonyíthatjuk, hogy az FRB-t egy neutroncsillag produkálta. Már megfigyelték a  $DM$  értékének változását is egy ismétlődő FRB, az FRB 20121102A esetében, ami valószínűleg a kitörés közvetlen környezetében bekövetkezett változások számlájára írható, ám mivel ezen rádiókitörés meghatározott helye nem elég pontos, a végső következtetés még egy ideig várat magára.

Az időbeli fejlődés figyelemmel követése mellett szintén mélyebb betekintést enged az FRB-k természetébe, ha nem csak a rádió, hanem más hullámhosszakon is megvizsgáljuk őket. Az erre irányuló próbálkozások azonban a legközelebbi extragalaktikus FRB esetén is – sajnos – sikertelen detektálással zárultak az optikai, a gamma-, illetve a röntgentartományban. Az utolsó reményt a legközelebbi ismert FRB vizsgálata jelentette. A tejútrendszerbeli SGR 1935+2154 amelynek esetében érdekes jelenségre bukkantak (6. ábra): röntgenhullámhosszakon detektáltak az objektum pozíciójából egy 0,6 másodpercig tartó felfényesedést, amelyen belül 3 újabb, keskeny, nagyjából 3 ms időtartamú kitörési csúcs emelkedett ki, egymástól körülbelül 29 ms időközönként. A három csúcs közül kettő összhangban van a rádiótartományban is detektált kitörésekkel, ám azokhoz képest nagyjából 6,5 ms késést mutat. Ezen utófénylés megfigyelése további reményekkel kecsegtet a későbbi FRB-vizsgálatok terén, így a remények szerint a jövőben távolabbi FRB-k esetén is megfigyelhetünk az SGR 1935+2154 által produkálthoz hasonló röntgenkitöréseket.

## Jelenlegi elképzeléseink az FRB-k természetével kapcsolatban

### A sugárzási folyamat

Vajon pontosan mi és honnan bocsátja ki az FRB-k esetén megfigyelt sugárzást? Bár ezt a kérdést napjainkig nem tudjuk pontosan megválaszolni, számos elképzelés látott napvilágot a sugárzási folyamattal kapcsolatban. A legtöbb modell szülőobjektumként egy neutroncsillagot vagy magnetárt feltételez. A hipotézisek közötti különbség a kisugárzás helyében rejlik: bizonyos elméletek szerint a gyors rádiókitörés a neutroncsillag felszínén, a mágneses erővonalak átkötődése (rekonnekció) miatt jön létre, mások szerint esetleg a felszínhez közel, a görbült mágneses erővonalak mentén haladó töltött részecskék sugárzása által alakul ki. Vannak olyan modellek is, amelyek szerint az FRB-t szinkrotron mézersugárzás kelti a központi objektumtól  $> 10^5$  km-es távolságban, amikor a magnetárból kibocsátott fler kölcsönhatásba lép a csillag körüli anyaggal.

Az FRB-k mért jellemzői alapján nehéz megállapítani, hogy a felsoroltak közül melyik folyamat zajlik le ténylegesen, hiszen a legtöbb esetben a felsorolt modellek mindegyike megfelelő illeszkedést ad a mért jellemzőkre. Az FRB-k mikrostruktúrájának megfigyelése alapján mégis inkább azokat a modelleket tartják valószínűbbnek, amelyek esetén az FRB a neutroncsillag közelében történik, hiszen a megfigyelt, 10 ms-os nagyságrendű gyors változásokat aligha produkálhatja a távolabbi anyaggal történő kölcsönhatás. Ahhoz azonban, hogy további megszorításokat tegyünk a sugárzási mechanizmusra, szükség lesz egy-egy objektum több évtizedig történő monitorozására.

## A szülőobjektum

A tudományos közösség szintén nem jutott megállapodásra az FRB-k szülőobjektumával kapcsolatban. Egyes elképzelések szerint a gyors rádiókitörés forrása egy magányos neutroncsillag, mások szerint kompakt objektumok (fehér törpék, neutroncsillagok vagy fekete lyukak) összeolvadása hozza létre, ám származhatnak akár aktív galaxismagokból vagy ultrafényes röntgenforrásokból is. A legerősebb érveket az ismétlődő FRB-k vizsgálata hozta meg, hiszen segítségével kizárhatóvá vált a kataklizmikus eredet. Ekkor felvetődött az az érdekes kérdés is, hogy vajon az összes FRB visszatér-e majd egyszer, hiszen lehetséges az is, hogy később, akár évtizedekkel az első kitörése után minden FRB megismétlődik.

Az eddig ismert ismétlődő kitörések vizsgálatából alsó becslés tehető a szülőcsillag teljes energiájára is, hiszen ezen energiának kell táplálnia a mért impulzusokat, és lehetséges módon még további kitöréseket is, amelyek nem feltétlenül mutatnak a Föld irányába. Erre a legpontosabb megközelítést az FRB 20121102A vizsgálata jelentette, amelynek esetében a teljes energiát  $10^{47}$ – $10^{49}$  erg közöttire becsülték, ami összhangban van egy magnetár összehangjával. Ezen kívül – mint hogy már ismert néhány olyan FRB, amelyet tudunk gazdagalaxisokhoz társítani – a későbbiekben érdemes lehet ebből a szempontból is megvizsgálni a szülőcsillagot. A legfrissebb tanulmányok például kimutatták, hogy az FRB-k előfordulási helye nincs összhangban a hosszú GRB-kével, sőt sok esetben még a szuperfényes szupernóvákéval sem. Ugyanakkor valószínűleg nagy tömegű csillagok fejlődése végén bekövetkező magkollapszusos szupernóva-robbanás során kialakult forgó, mágneses neutroncsillagok keltik, amelyek pedig szuperfényes szupernóva-robbanások során is létrejöhetnek. Ezt a látszólagos paradoxont talán feloldhatja az elkövetkező évek FRB-kre irányuló kutatása, amelyek során még több gyors rádiókitöréshez kapcsolunk gazdagalaxisokat.

## A rendszer

Az első periodikus esemény, az FRB 20180916B felfedezése után napvilágot látott egy olyan elmélet, amely szerint az FRB-k kettős csillagrendszerekben fordulnak elő. Bár a korábbi, kataklizmikus kitörést feltételező hipotézisekben is szerepeltek összeolvadó, kompakt kettősök, napjainkra a stabil kettős rendszerek modellje még nagyobb népszerűségnek örvend. Ezen belül is vannak, akik a kettős rendszer tagjai közötti kölcsönhatást a gyors rádiókitörés alapfeltételének tekintik, míg mások szerint az aktivitási szintben fellépő változást a rendszer tagjai között jelen lévő plazmában történő elnyelődés okozza. Vannak olyan modellek is, amelyek feltételezik, hogy az FRB-emisszió éves-évtizedes időskálán meggyengül, végül teljesen elenyésszik, amikor a kettős rendszer tagjai egy bizonyos határnál közelebb kerülnek

egymáshoz. Ez a modell szintén feltételezi egy fényes vörös nóva (luminous red nova, LRN) kialakulását az FRB-aktivitás elhalása utáni években, az LRN ugyanis egy nagy tömegű csillagokból álló kettős rendszer tagjainak összeolvadásakor jön létre. Az FRB-k hosszú távú monitorozása a későbbiekben utat nyithat a kettős rendszer természetének mélyebb megismerésére, illetve az ismétlődő FRB-k pontos helymeghatározása a Földhöz legközelebbi objektumok esetén segíthet a feltételezett társcsillag látható fényben történő kimutatásában.

## A populációk

A több száz FRB ismerete lehetőséget nyújt arra, hogy különböző csoportokba sorolhassuk őket a vöröseltolódás szerinti eloszlásuk, a gazdagalaxisuk, a szülőobjektumuk, az előfordulási környezetük, illetve az ismétlődés vagy annak hiánya alapján. Mindezekhez azonban nagyon fontos lenne az események pontos hely- és távolságmeghatározása, amelyekre vonatkozó adatok, bár jelenleg megtalálhatók a CHIME katalógusában, sok helyen mégis túl nagy hibahatárral vagy pontatlanul. Azonban mindaddig, amíg nem rendelkezőnk elég nagy mintával a populáció vizsgálatához, a megoldást a különféle elméleti populációmodellek jelentik. Ezek segítségével talán választ kaphatunk ahhoz hasonló kérdésekre, hogy vajon az FRB-k nyomjelzői lehetnek-e az Univerzum korai csillagkeletkezésének, és hogy az ismétlődő FRB-k vajon külön populációt alkotnak-e, illetve van-e egy olyan időszak az Univerzum életében, amikortól gyakoribbá vagy esetleg ritkábbá váltak térben és időben egyaránt.

## Mit tudunk meg a legközelebbi FRB-k és a magnetárok vizsgálata során?

A galaxisunkban felvillant SGR 1935+2154 – amellet, hogy igazolta az FRB-k és az extragalaxisokban is mérhető módon nagy energiakibocsátásra képes magnetárok kapcsolatára vonatkozó elméleteket – új kaput nyitott a szülőobjektum, illetve a kitörés fizikai mechanizmusának megismerésében. A legközelebbi FRB-ről készített mérések ugyanis azt sugallják, hogy az FRB-k több kitörést is produkálhatnak az első, legnagyobb kitörést követő napokban, illetve hetekben, amelyeket bizonyos időeltolódással kísérhetnek röntgen- vagy más hullámhossztartományban megfigyelhető flerek is. Ha ezt az utófénylést sikerülne több objektum esetén is detektálni, a magnetárok és az FRB-k kapcsolata még erősebb bizonyítékot nyerhetne. Azonban – még ha sikerülne is ezt a kapcsolatot további mérésekkel alátámasztani – még mindig hosszú út állna előttünk a magnetárok és az FRB-k fizikájának összhangba hozása kapcsán. Szintén áttörést érhet el a témában a működését napjainkban kezdő James Webb-űrtávcső, amelynek segítségével talán rábukkanhatunk bizonyos FRB-k fényes társ-csillagaira is.



## Mit hoz a jövő?

Az eddigiekben is tapasztalhattuk, hogy minél több kérdést válaszolunk meg a gyors rádiókitörésekkel kapcsolatban, annál több újabb megoldandó probléma vetődik fel. Éppen ezért a tudományos közösség a jövőben is kiemelt figyelmet fog szentelni vizsgálatuknak, és talán mélyebb rálátásunk nyílik rajtuk keresztül a minket körülvevő Világegyetemben lezajló fizikai folyamatokra.

Az elkövetkező években az alábbi kérdések vizsgálatát tervezik a kutatók. Vajon mi a legkisebb és legnagyobb időbeli struktúra az FRB-k kitöréseiben? Hogyan változnak a polarimetriai tulajdonságok a frekvencia függvényében, és ezt a változást külső vagy belső okok vezérlik-e? Van-e összefüggés az FRB-populációk és a csillagkeletkezési ráta között? Az összes ismétlődő FRB periodikus? Ha igen, akkor a különböző ismétlődési tulajdonságok eltérő kettőscsillag-konfigurációkhoz tartoznak-e? Az FRB-k előfordulása összhangban van-e az adott galaxisban található magnetárok eloszlásával? Más galaktikus magnetárok is produkálnak-e FRB-khez hasonló aktivitást az SGR 1935+2154-en kívül?

Mindezek mellett az FRB-k az asztrofizika más területein is hasznosnak bizonyulhatnak: választ adhatnak többek között a galaxisközi térben található barionos anyag mennyiségének és eloszlásának kérdésére, segítségükkel pontosíthatjuk a Hubble-állandót és a sötét energia állapotegyenletét, illetve mélyebben megismerhetjük a korai Univerzum újraionizációs korszakának történetét.

A jelenlegi és a jövőbeli nagy égboltfelméréseknek köszönhetően az elkövetkezendő 5-10 évben az ismert FRB-k száma a jelenlegi körülbelül 600-ról akár több tízezerre is nőhet, és ilyen módon – ha feltételezzük, hogy a szülőobjektum magnetár – több extra-

galaktikus neutroncsillagot ismerhetünk meg a közeljövőben, mint amennyit a saját galaxisunkban eddig megfigyeltünk! Ez új távlatokat nyit a populációk tanulmányozásával, a lokális környezet statisztikai vizsgálatával és a galaxisközi anyag összetételének feltérképezésével kapcsolatban. Lehetőségünk lesz arra is, hogy több hullámhosszon, hosszabb ideig, jobb időfelbontással, nagyobb távolságig követhessük őket figyelemmel. Hosszú távú vizsgálatokkal jobban megismerhetjük a szülőobjektum természetét, a periodicitás eredetét, illetve a neutroncsillagok aktivitását. Egyre több gazdagalaxist is azonosíthatunk, amelyek segítségével megállapíthatjuk, hogy vannak-e olyan környezetek, ahol az FRB-k gyakrabban, illetve ritkábban vagy esetleg egyáltalán nem fordulnak elő.

A gyors rádiókitörések tehát különleges és mindmáig rejtélyes objektumok, így a mélyebb megismerésükre irányuló törekvések újabb tudományos áttörésekhez vezethetnek nemcsak a magnetárok fizikája vagy a rádiócsillagászat kapcsán, hanem a kozmológiában és az asztrofizika más területein is.

## Irodalom

1. McLaughlin, M. A., Lyne, A. G., Lorimer, D. R., et al., *Nature* 439 (2006) 817.
2. Petroff, E., Hessels, J. W. T., Lorimer, D. R., *Astronomy and Astrophysics Reviews* 27 (2019) 4.
3. Petroff, E., Hessels, J. W. T., Lorimer, D. R., *Astronomy and Astrophysics Reviews* 30 (2022) 2.
4. Petroff, E., Keane, E. F., Barr, E. D., et al., *MNRAS* 451 (2015), 3933.
5. Spitler, L. G., Scholz, P., Hessels, J. W. T., et al., *Nature* 531 (2016) 202.
6. Tendulkar, S. P., Gil de Paz, A., Kirichenko, A. Y., et al., *ApJL* 908 (2021) L12.
7. The CHIME/FRB Collaboration, Andersen, B. C., Bandura, K., et al., (2021) arXiv:2107.08463
8. Mereghetti, S., Savchenko, V., Ferrigno, C., et al., *ApJL* 898 (2020) L29.

**NEM KELL HŐSNEK LENNED!**  
**MARADJ TOVÁBBRA IS**  
**A FIZIKA BARÁTJÁVAL!**  
**SZÁMÍTUNK RÁD!**  
társaságod írtedre  
EGYENLŐSÉGEKÁVAL  
a jövőtől  
Loránd Fizikai Társulatot!  
Adószámunk: 19815644-2-43

**LEGUTÓBB 928 000 FORINTTAL TÁMOGATTÁK A TÁRSULAT MUNKÁJÁT, KÖSZÖNJÜK!**

