

VADÁSZAT A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOKRA – 3. RÉSZ

A gravitációs hullámok lehetséges asztrofizikai forrásai

Frei Zsolt
ELTE Atomfizikai Tanszék

Sorozatunk utolsó részében áttekintem azokat a lehetséges asztrofizikai forrásokat, amelyek gravitációs hullám-forrásként szolgálhatnak. Ha ezek fizikája valamelyest tisztázott, akkor érthetjük meg, hogy az adott, várt jelalak észleléséhez milyen detektorok a legcél-szerűbbek, illetve milyen kereső-algoritmuskok szükségesek.

Mielőtt részletezem a fizikai folyamatokat, meg kell jegyezni, hogy az asztrofizikában a gravitációs hullámok észlelése jelentősen új felfogást és mérési technológiát igényel. A 2. táblázatban összefoglaltam a leglényegesebb különbségeket a szokásos elektromágneses hullámok detektálásához képest, amelyek megkülönböztetik e két kölcsönhatást. Mivel a fény (vagy az elektromágneses sugárzás más spektrumtartományai, mint amilyen az infravörös, ultraibolya, rádió- vagy akár a röntgentartományok) a forrás méretéhez képest rövid hullámhosszú, az anyagon nehezen áthatoló információt hordoznak, ott megfelelően irányított távcsövekkel 2D-s intenzitástérképeket (fényképeket) kell készíteni. Ezzel szemben a gravitációs hullámok bármely irányból érkehetnek a detektorba, jelentősen hosszabb a hullámhosszuk stb. Mint láttuk, tömegrezonátorokkal vagy interferométerekkel észlelhetők, és egy egydimenziós idősröböl kell szó szerint kibámozni az információt.

Az előző hónapban nagyságrendi becslést adtunk arra, hogy a nagy tömegű (gyorsuló) objektumok milyen gravitációs hullám-jele várható. Itt konkrétan felsorolom azokat az asztrofizikai jelenségeket, amelyek – legjobb tudásunk szerint – gravitációs hullámokat keltenek. Ezeket két nagy kategóriába szokták sorolni. Az első kategória az *átmeneti* (tranziens) jelek kategóriája. Ebbe tartoznak azok a csillagászati jelenségek, amelyek rövid időn keresztül tartó folyamatban bocsátják ki a várt hullámokat. Ilyenek a kettős neutroncsillagok, kettős fekete lyukak, esetleg fekete lyuk és neutroncsillagok *összeolvadásai*. Ilyen jelet észlelt most, 2015. szeptember 14-én először a LIGO is. Hasonlóan tranziens jelet várunk csillagok összeomlása (szupernóvák) során, de ilyen produkálhat egy perturbált fekete lyuk, egy pörgő neutroncsillag instabilitása vagy egy gamma-felvillanás is. A második

nagy kategóriába a *folyamatosan* kibocsátott jelek tartoznak. Ilyenek lehetnek a pulzárak által kibocsátott periodikus jelek vagy a külön fel nem bontott források *sztochasztikus* járuléka, sőt az ősrobbanásból származó jel is.

Megjegyzendő, hogy a LIGO 2-2, összesen 4 munkacsoportban dolgozva keresi ezeket a jeleket. A tranziens jelek keresésére alakult a *CBC* (compact binary coalescence), azaz összeolvadó kompakt kettősök jelét kereső csoport, illetve a *burst* (egyéb „felvillanásokat”, tranzienseket) kereső csoport. Bár a CBC csoport 2-3 nap után megállapította a 2015. szeptember 14-én észlelt jel forrásául szolgáló kettős rendszer paramétereit (29 és 36 naptömegű fekete lyukak stb.), a jel első felfedezését a burst csoport szolgáltatta, hiszen a teljes észlelt jelalak mindössze 0,2 másodpercig tartott, azaz teljesen „burst”-szerű volt. A folyamatosan kibocsátott jelek keresése is két munkacsoportban folyik, külön a hosszan fennmaradó periodikus jelek keresése (*CW*, azaz continuous wave csoport), illetve külön a *sztochasztikus* háttér keresése.

Természetesen mindkét nagy kategóriában vannak olyan folyamatok, amelyek rövidebb hullámhosszú, a földi detektorokkal is mérhető jelet produkálnak (például az átmeneti jelek esetén kisebb fekete lyukak összeolvadása), és olyanok is, amelyek észleléséhez a nagy hullámhossz miatt úrdetektorokra lesz szükség (a példánál maradva: szupernagy tömegű, galaxisok közepén található fekete lyukak összeolvadása).

Az általános relativitáselmélet jóslata szerint gyorsuló (nyilván nagy) tömegek jele várható. Ezek közül a legismertebb a már többször említett kisméretű, nagy tömegű, egymás felé gyorsan spirálózó és összeolvadó objektumok jele. Az ilyen kompakt kettős rendszerek összeolvadása során időben három szakaszt különböztetünk meg, mindhárom szakasz során várható gravitációs hullám-jel. Az *első* szakasz a *befelé spirálózás*. Ebben a szakaszban a két objek-

2. táblázat

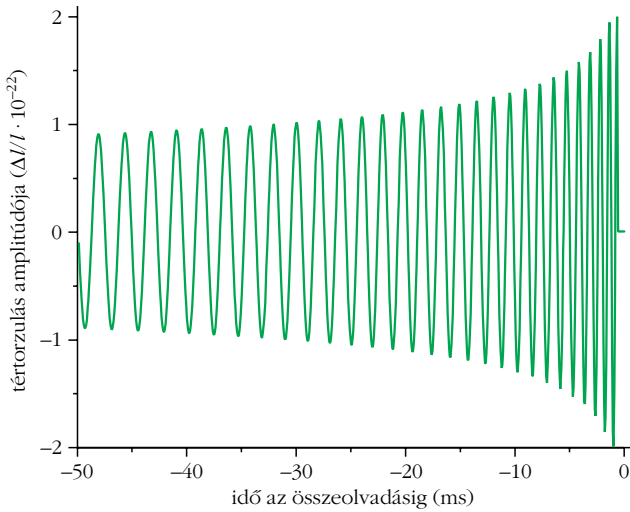
Az elektromágneses és a gravitációs hullámok tulajdonságainak összehasonlítása

elektromágneses hullámok	gravitációs hullámok
kis hullámhossz	nagy hullámhossz
elnyeli, szórja az anyag	nincs árnyékolás
MHz vagy fölötte	kHz vagy alatta
intenzitást kell mérni	amplitúdót kell mérni
kicsi a detektorok látószöge	(szinte) minden irányból jöhet

Az elektromágneses hullámok és a gravitációs hullámok észlelése merőben eltérő technikát követel meg, ugyanis a fent összefoglalt tulajdonságok jelentősen különböznek.



Frei Zsolt fizikus, az MTA doktora, az ELTE Atomfizikai Tanszék tanszékvezető egyetemi tanára, az Akadémia Lendület Asztrofizikai Kutatócsoport vezetője. Asztrofizikát, kozmológiát és képfeldolgozást tanít. Több mint száz nemzetközi publikáció és számos magyar nyelvű ismeretterjesztő cikk szerzője. *Inflációs kozmológia* címmel *Patkós András*sal közösen egyetemi tankönyvet írtak.



9. ábra. Két, egyenlő tömegű ($1,4 M_{\odot}$) neutroncsillag egymás felé spirálózása során, az összeolvadás előtti legutolsó fázisban várható gravitációshullám-jel alakja, a „tankönyvi” eset. A $t = 0$ időpont a legbelső stabil körpályához (ISCO-hoz) tartozik, és ehhez az időponthoz közelítve a jel frekvenciája és amplitúdója is növekszik, a szövegben leírt módon (lásd a (11) és (12) arányosságokat). Az ábra [1]-ből lett adaptálva.

tum már nagyon közel van egymáshoz, és a közös tömegközéppontjuk körüli kepleri pálya folyamatosan és jelentősen szűkül (innen a *spirál* kifejezés), mert folyamatosan gravitációs hullámokat bocsátanak ki, és ezáltal folyamatosan energiát veszítenek. Jelenlegi értelmezésünk szerint az összeolvadás előtti utolsó szakaszban ez a folyamat az, amely a legnagyobb energiavesztést és végső soron az összeolvadást eredményezi (míg például egy korábbi szakaszban, amikor a két objektum távolabb van egymástól, az energiavesztés oka lehet a csillagközi gázban elszenvedett súrlódás vagy úgynevezett dinamikai súrlódás is). A tavaly szeptemberben észlelt jelet keltő fekete lyukak például 0,2 másodperc alatt kerültek 600 km távolságból egymás közvetlen közelébe, azaz 200 km távolságra, amikor horizontjaik már összeértek.

A kompakt kettősök összeolvadásának *második* szakasza maga az összeolvadás. A *harmadik* szakasz az összeolvadt egyetlen fekete lyuk csillapodási fázisa, amikor az esetleges aszimmetrikus és forgó tömegeloszlás még jelet bocsáthat ki. Angol kifejezéssel ezt a szakaszt *ringdown*-nak nevezi a szakirodalom. Ezt is sikerült most megfigyelni, ennek a szakasznak a tanulmányozásából állapítható meg az összeolvadás eredményeként keletkező fekete lyuk tömege (a jelen esetben 62 naptömeg).

Az első szakasz során a kepleri pályák bomlása az úgynevezett *legbelső stabil körpályáig* tart (*innermost stabil circular orbit*, ISCO). Jól ismert, hogy a pályák szűkülése közben a gravitációshullám-jel *f* frekvenciájának időfüggése, az ISCO-tól visszafelé számítva a t időt:

$$f \sim M^{-5/8} t^{-3/8}, \quad (11)$$

miközben az jel amplitúdójának változását a két objektum d távolságának függvényében az

$$A \sim \frac{M^{5/4}}{t^{1/4} d} \quad (12)$$

írja le. A fenti két képletben az M tömeg a két összeolvadó (M_1 és M_2) tömegekből az

$$M = \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}}$$

módon számolható. Ebben az első szakaszban egy tipikus, a földi LIGO obszervatórium által is mérhető jel alakját a 9. ábra mutatja. Nagy meglepéssel töltötte el a kutatáson dolgozó fizikusokat, hogy a most talált feketelyukkettős pontosan ilyen jelet produkált, igaz más paraméterekkel, mint az itteni a „tankönyvi” ábránkon látható (vesd össze az elmúlt havi cikk 4. ábráját a 9. ábrával).

Ha az aLIGO érzékenységgel számolunk (körülbelül 450 Mpc optimális égi irány és pályaorientáció esetén, 200 Mpc ezekre átlagolva, neutroncsillag-kettősökre) akkor az éves észlelési gyakoriság 1–800 lesz. A kettős fekete lyukak esetén (mivel azok tömege nagyobb lehet) az aLIGO észlelési gyakorisága 30–4000 évente. Ezek a ráták nem tartalmazzák a csillagokban legsűrűbb tartományokból, a gömbhalmazokból várható események számát. Újabb becslések arra utalnak, hogy ha a gömbhalmazokat is precízen figyelembe vesszük, akkor a ráták akár egy nagyságrendet is emelkedhetnek. A most történt felfedezés mindenképpen bizakodásra ad okot.

Vizsgálhatjuk a szupernagy tömegű fekete lyukak összeolvadásából származó jeleket is. Ebben az esetben a (11) arányosságból látható, hogy például hat nagyságrenddel nagyobb ($10^6 M_{\odot}$) tömegekkel számolva a várható jelfrekvencia körülbelül négy nagyságrenddel lesz kisebb, és éppen ezeken jelek észleléséhez szükséges feltétlenül a LISA űrdetektor, amelynek maximális érzékenysége – a múlt havi 8. ábrán látható módon – pontosan négy nagyságrenddel alacsonyabb frekvencián van, mint a LIGO esetén. Természetesen (12)-ből látszik, hogy a várható jel amplitúdója jóval nagyobb lesz $10^6 M_{\odot}$ esetén, mint M_{\odot} -nél, ezért a LISA érzékenysége nem kell elérnie a földi LIGO érzékenységet.

A harmadik szakaszban van még olyan, számunkra jól érthető jel, amelynek megtalálásában – az egyébként nagyon zajos detektorjelben – reménykedhetünk. Ez a fekete lyukak csillapodási fázisa, amely nyilván akkor áll elő, amikor az összeolvadásban legalább az egyik részt vevő fekete lyuk, vagy amikor az összeolvadás eredményeképpen – például két neutroncsillagból – fekete lyuk jön létre. Hasonlóan, a szupernóva-robbanásokban is keletkezhet fekete lyuk, és az ott keletkező fekete lyukak esetén is várunk ilyen csillapodási fázist.

A pontos relativitáselméleti számolások eredményeképpen megkapható jelalak jól közelíthető egy

egyszerű, időben exponenciálisan csillapodó szinuszhullámmal:

$$b(t) = b_0 \exp\left(-\frac{\pi f t}{Q}\right) \cos(2\pi f t), \quad (13)$$

ahol természetesen $t \geq 0$ és $Q \approx 2(1-a)^{-9/20}$, itt a a spint jellemző dimenziótlán paraméter ($a = 0$ nem forgó, Schwarzschild-féle fekete lyukak és $a = 1$ maximálisan forgó, Kerr-féle fekete lyukak esetén).

A (13)-ban szereplő két fontosabb mennyiség, a frekvencia és az amplitúdó tömeg- és spinfüggése:

$$f \approx 32 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-1} (1 - 0,63 \cdot (1-a)^{3/10}) \text{ kHz}$$

és

$$b_0 = \frac{6 \cdot 10^{-21}}{Q \sqrt{1 - 0,63 \cdot (1-a)^{3/10}}} \left(\frac{d}{\text{Mpc}}\right)^{-1} \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \left(\frac{\epsilon}{0,01}\right)^{1/2},$$

ahol ϵ a gravitációs hullámok formájában kibocsátott energia és M^2 hányadosa, d pedig a forrás távolsága a detektorunktól mérve.

A fenti képletekből következik, illetve ezekkel teljesen összhangban van, hogy a 2015 szeptemberében észlelt esemény 62 naptömegű fekete lyuka a lecsengés során körülbelül 250 Hz-es jelet keltett. Távolsága is megbecsülhető, körülbelül 400 Mpc, azaz 1,2 milliárd fényév. Ugyancsak a fenti két képlet szám szerű kiértékeléséből látszik, hogy a földi obszervatóriumok érzékenységének maximuma a 10–600 M_\odot tartományba eső fekete lyukak esetén van, és egy tipikus, 10 M_\odot fekete lyuk csillapodásából származó jel erőssége körülbelül $2 \cdot 10^{-21}$, ha a forrás távolsága néhányszor 10 Mpc.

Nagyon lényeges itt megjegyezni, hogy azok a folyamatok, amelyeket eddig ebben a szakaszban áttekintettünk, képezik a gravitációs-hullám-kutatás legfontosabb területét. A jelenleg működő földi detektorok elsősorban a kisebb tömegű kompakt kettősök összeolvadásának első szakaszából származó (a 9. ábrán illusztrált formájú) jeleket keresik a detektorok kimenetén, úgynevezett *matched filtering* eljárással. Ennek lé-

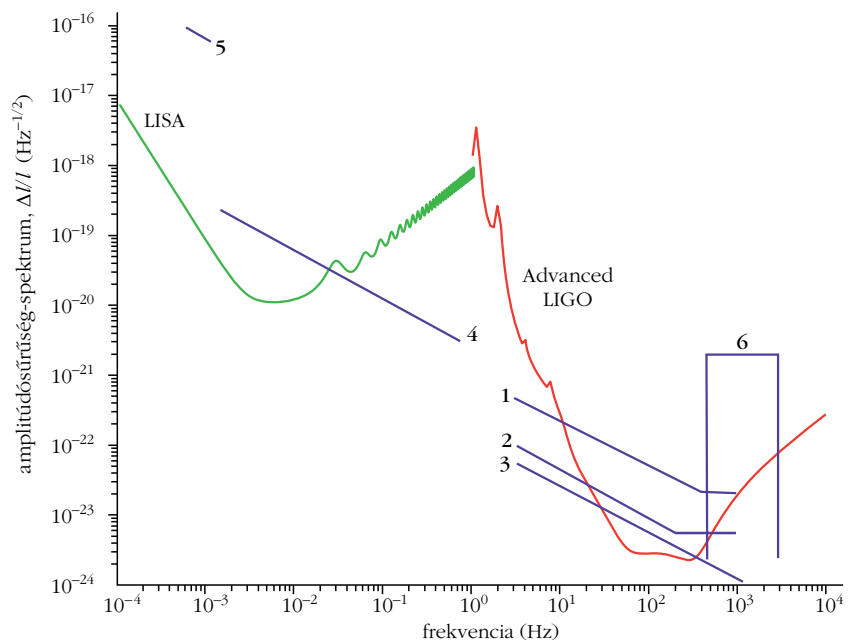
nyege, hogy az ismert jelalakot korreláltatják a detektor jelével. A LIGO jelenleg körülbelül negyedmillió előre kiszámított „template”-et használ ehhez.

Röviden érdemes összefoglalni azonban az egyéb forrásokból származó jeleket, illetve az ezek kimutatására a jövőben tervezett erőfeszítéseket is. A 10. ábrán ismételtelen feltüntettük az aLIGO és a LISA tervezett űrdetektor érzékenységi görbéjét, és lila színnel bejelöltük az ebben a szakaszban tárgyalt források jelet (várható amplitúdóját és frekvenciáját) is. A LISA kisebb frekvenciákon fog dolgozni, és – kisebb érzékenysége ellenére is – várhatóan rendszeresen fog szupernagy tömegű fekete lyukak összeolvadásából vagy ilyenek által kisebb lyukak befogásából származó jeleket észlelni.

Természetesen ezzel nem ért véget azon asztrofizikai jelenségek sora, amelyek gravitációs hullámok forrásaiként szolgálnak. A most következő néhány bekezdésben említést tesztek olyanokról, amelyek a teljesség kedvéért ide kívánkoznak.

Elsőként említendő, hogy a szupernóvák fenti tárgyalásakor csak a kataklizma eredményeképp létrejövő fekete lyuk *lecsengése* során kibocsátott hullá-

10. ábra. Itt – ugyanabban a frekvencia–amplitúdósűrűség-spektrum tartományban, mint a 8. ábrán – felrajzoltuk a nagyobb földi detektorok és a LISA űrdetektor érzékenységi tartományát, és számozva (lila színnel) azokat a frekvencia–amplitúdó értékeket, ahol a különböző asztrofizikai forrásokból származó jelek várhatók. Az 1. egyenes a 10 naptömegű fekete lyukak összeolvadásából származó jelet mutatja, ha azok tőlünk mért távolsága 100 Mpc. A 2. egyenes ugyanilyen tömegű, 200 Mpc távolságú fekete lyuk és neutroncsillag összeolvadásából származó jel. Látható, ha a távolság nő és a tömegek is kisebbek, akkor a jel amplitúdója csökken. A 3. egyenes ugyancsak kompakt objektumok, neutroncsillagpárok összeolvadásából jön, ha azok távolsága 200 Mpc. A 2. és a 3. egyenes tehát abban különbözik egymástól, hogy a 3. egyeneshez tartozó források még kisebb tömegűek, így a jelerősség tovább csökken. Ebben a magasabb frekvenciájú tartományban adhatnak jelet a szupernóvák (a 6. vonal által határolt tartományban valahol). Alacsonyabb frekvencián kapunk jelet szupernagy tömegű fekete lyukak összeolvadásából. A 4. egyenes a $z = 1$ távolságban lévő, $10^6 M_\odot$ méretű fekete lyuk által befogott $10 M_\odot$ méretű fekete lyuk jele, az ennél sokkal erősebb és még alacsonyabb frekvenciánál lévő 5. egyenes pedig $10^6 M_\odot$ méretű feketelyukpárok összeolvadásából származó jel. Az 1–5. vonalak helyét az ábrára [2] alapján rajzoltam fel, a 6. tartomány [3]-ból származik (és megjegyzendő, hogy nem a szövegben később leírt magösszeomlási folyamathoz, hanem a létrejövő fekete lyuk lecsengéséhez tartozó jel erősségét és frekvenciáját jelöli).



mokkal foglalkoztam (mert azok megegyeznek a kompakt objektumok összeolvadása útján létrejövő fekete lyukak lecsengése során keletkező hullámokkal). Természetes azonban, hogy a nagy tömegű csillagok fejlődésének végső szakaszában, amikor a vas-mag összeomlik, az feltételezhetően nem gömbszimmetrikus, a csillag közepe felé gyorsuló anyag is kelt már gravitációs hullámokat. A nagyobb tömegű csillagok a II. típusú szupernóva-robbanás során vagy neutroncsillagot, vagy fekete lyukat hagynak maguk után, ez a fejlődés végállapota. Amikor a vasat tartalmazó magban a degenerált elektrongáz már nem tud ellentartani a külső rétegek rá nehezedő nyomásának, akkor az összeomlik, majd elképzelhető, hogy neutronok degenerált állapotban meg tudják állítani ezt a folyamatot (ekkor jön létre egy neutroncsillag), de az is, hogy ha a csillag kezdeti (főágbeli) tömege kellően nagy (az irodalom 25–40 naptömeget említ), akkor nincs ismert folyamat, amely az összeomlást megállítaná, és a középontba zuhanó anyagból fekete lyuk lesz. Óvatos számítások szerint egy akár kicsit is aszferikus összeomlás során körülbelül 1 naptömegnyi anyag gyorsulhat a fénysebesség negyedére, és ez nyilván hasonló amplitúdójú gravitációs hullámokat kelthet, mint a kompakt fekete lyukak összeolvadása.

A fizikai folyamat modellezése bonyolult, ezért nem feltétlenül ismert az így létrejövő gravitációs hullámok formája. Az irodalom részletesen foglalkozik a lehetőségekkel, általában forgó, tengelyszimmetrikus magok összeomlására egyszerűsítve a problémát. Az ilyen modellezések során több szabad paraméterrel számolnak (ilyenek a mag differenciális rotációjának skálahossza, a forgáshoz rendelt kinetikus energia, vagy az anyagot jellemző adiabatikus index). Mindezek különböző megválasztásával egész görbesereg adható a gravitációs hullám amplitúdójának időbeli lefutására. Itt ezekkel tovább nem foglalkozom, de megemlítem, hogy a görbesereg tanulmányozása során levonható az a következtetés, hogy a csillagmagok összeomlásából várható gravitációshullám-jelek tipikus frekvenciája a 50–3000 Hz tartományba esik, amplitúdója pedig $2 \cdot 10^{-23}$ – $4 \cdot 10^{-20}$ nagyságrendű, ha a távolság 10 kpc. Levonható tehát a következtetés, hogy a földi detektorok képesek lennének ilyen hullámokat érzékelni, ha azok a Tejútrendszerben bekövetkező szupernóváról indulnának. Elfogadott becslések szerint ezek gyakorisága 0,02 évente, azaz nem ettől a fajta forrástól várjuk a legtöbb észlelhető gravitációs hullámot.

A *második* fontos, említést érdemlő forrásfajta a gamma-felvillanások kibocsátásához köthető. Az irodalom megkülönböztet rövid és hosszán tartó felvillanásokat (2 s a határ a kettő között). Az érkező fotonok energiája hatalmas, 1 keV – 100 MeV. Az 1960-as évek végén történt felfedezésük óta már sok ilyen sikerült megfigyelni, ma naponta átlagosan egyet észlelnek. Eloszlásuk az égen izotrop, és sikerült optikai megfelelőket is megfigyelni. Ezek tanulmányozása alapján gondoljuk, hogy legalábbis a hosszú lefutású

felvillanások eredete extragalaktikus (akár $z = 1$ is lehet a távolság, de van közelebbi, 35 Mpc távolságban található forrás is).

Egyes optikai megfelelők megfigyelése arra enged következtetni, hogy a gamma-felvillanások származhatnak szupernóva-robbanásokból (például a GRB030329 optikai megfelelője az Ic típusú szupernóvák spektrumát mutatta). Ebben az esetben (pláne, ha távoli, extragalaktikus eredetű szupernóvákról van szó) a gravitációshullám-jelek megfigyelésének valószínűsége nem nagyobb, mint a fent tárgyalt szupernóvák esetén. Ennek ellenére megemlítenéd, hogy az irodalom olyan elemzéseket is közöl, amelyek szerint a gamma-felvillanásokból származó fotonok erősen irányítottak (egy szűk nyaláb mentén hagyják el a forrást). Ha ez igaz, akkor nyilván sokkal több ilyen felvillanás van, mint amennyit mi észlelünk (amikor a nyaláb éppen a Föld felé irányul). Ezeket viszont gravitációshullám-tartományban nyilván észlelhetnénk, hiszen a gravitációs hullámok nem csak egy szűk irányban lesznek kibocsátva. Mivel a hullámalak nem ismert, ezek megfigyelésére csak a több földi obszervatórium jelének összehasonlítása útján, koincideneciák keresésével van esélyünk.

A *harmadik* fontos terület – amely eddig nem szerepelt ebben a cikkben – a sztochasztikus jelek témaköre. A nagyszámú, távolabbi kompakt kettős rendszerek fel nem bontott jele, a véletlenszerű téridő-fluktuációkból származó hullámok, valamint a korai Univerzum járuléka adja a sztochasztikus háttérrel. Jelenlegi nézőpontunk szerint a kompakt kettősök fel nem bontott jele (mivel távoliak, de a közelebbi kettősök jele jól tanulmányozható) egyszerűen értéktelen zajnak tekinthető. Lényeges lenne viszont észlelni a korai Univerzumból származó információt.

Az asztrofizikában rendkívüli jelentőségű a *Penzias* és *Wilson* által 1965-ben felfedezett kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás. Ennek tanulmányozásával sok információt szerezhettünk a korai Univerzumból, sőt a háttérsugárzás fluktuációinak spektrumából (a WMAP és a Planck-űrszondák mérései alapján) a kozmológiát jellemző paraméterek precíz meghatározására is lehetőségünk nyílt a közelmúltban. Ezek a hullámok az Univerzum 380 000 éves korában csatolódtak le az anyagról, információt tehát erről a korszakról hordoznak.

Ezzel ellentétben a korai Univerzumból származó gravitációshullám-jelek az Univerzum 10^{-25} – 10^{-15} s-os korából származnak, azaz sok nagyságrenddel korábbi időszakba adhatnak bepillantást. A kauzalitást megkövetelve kiszámítható, hogy egy adott detektor által mérhető gravitációs hullám milyen korszakból származik. Nyilvánvaló ugyanis, hogy a korai Univerzumban keletkező gravitációs hullám hullámhossza nem lehet nagyobb a korai Univerzum horizontjánál. Mivel például az aLIGO karjainak hossza ismert, kiszámítható az, hogy mikor volt körülbelül ekkora az Univerzum horizontja (körülbelül $t = 10^{-25}$ s). Hasonlóan, a sokkal hosszabb karokat tartalmazó tervezett LISA későbbi (körülbelül $t = 10^{-15}$ s) korszakból származó hullámokat mérhet.

A sztochasztikus gravitációshullám-háttér mértékét az Univerzum kozmológiai Ω paraméteréhez való hozzájárulásként adjuk meg (ma azt gondoljuk, hogy $\Omega_{\text{total}} = 1$ és $\Omega_m \approx 0,3$, $\Omega_\lambda \approx 0,7$). A gravitációs hullámok $\Omega_g(f)$ hozzájárulása az az energiasűrűség (az Univerzum kritikus sűrűségének mértékében), amely az f frekvenciaoktávban mérhető. Ω_g és a mérhető hullám amplitúdója között egyszerű összefüggés áll fent:

$$b \sim \frac{\sqrt{\Omega_g(f)}}{f}.$$

Ω_g értékét az aLIGO potenciálisan 10^{-10} mértékig tudja majd mérni 2-3 éven belül. Ezen a területen hasonló lesz a LISA érzékenysége is, de például a tervezett *Big Bang Observer*; BBO műhold pontosan arra a célra lesz optimalizálva, hogy Ω_g -t minél érzékenyebben mérhesse.

A korai Univerzumban kétféleképpen keletkezhetnek gravitációs hullámok. Köztudott, hogy az ősröbbanás elméletének mára elfogadott és szükséges kiegészítése az infláció. Ez ad magyarázatot az ősröbbanás által felvetett három problémára: a horizontproblémára, a finomhangolás problémájára és a struktúra eredetére. Ez utóbbit – egyszerűen fogalmazva – úgy magyarázza, hogy az infláció során kvantumfluktuációk nőnek a teret teljesen kitöltő, skálainvariáns, adiabatikus sűrűségfluktuációkká. Az infláció így gravitációs hullámokat is kelthet. Anélkül, hogy itt a részletekbe belemennék, elég legyen annyit megjegyezni, hogy műholdas mérésekből az így keletkező hozzájárulásra $\Omega_g < 10^{14}$ adódik. Ha az infláció nem a jelenleg legelfogadottabb formájában megy végbe (amely szerint az inflációs időszak *visszafűtéssel* végződik), hanem esetleg megvalósul az alternatívaként javasolt *elnyújtott infláció* vagy a *hibrid infláció*, akkor ez az érték akár nagyobb, mérhető is lehet.

A másik mechanizmus, amely az infláció után nem sokkal gravitációs hullámokat kelthet, a megannyi végbemenő fázisátalakulás közül valamelyik. Nem eltitkolva, hogy a részecskefizika mai álláspontja szerint ezek a fázisátalakulások (például az elektroyenge vagy a kvark-hadron) nem elsődrendű fázisátalakulások, elképzelhető például az elmélet olyan szuperszimmetrikus kiterjesztése, ahol az elektroyenge fázisátalakulás elsődrendű. A 11. ábrán ilusztrált módon egy ilyen fázisátalakulás során a dinamika olyan, hogy az akár gravitációs hullámokat is kelthet.

A *negyedik* és egyben utolsó lényeges jelenségkör a periodikus jelet kibocsátó források halmaza. A legjellemzőbb példa egy gyorsan forgó, de nem teljesen tengelyszimmetrikus tömegeloszlású neutroncsillag. Sok olyan folyamat

képzelhető el, amely aszimmetriát okoz a tömegeloszlásban, és ez az aszimmetria valameddig fent is maradhat (bár egy idő után valószínűleg eloszlik). A neutroncsillag anyageloszlásának eltérése a gömb-szimmetrikus helyzettől – az elliptikusság – számszerűsíthető:

$$\varepsilon = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}},$$

és a kibocsátott gravitációs hullám amplitúdója egyenesen arányos ezzel az elliptikussággal:

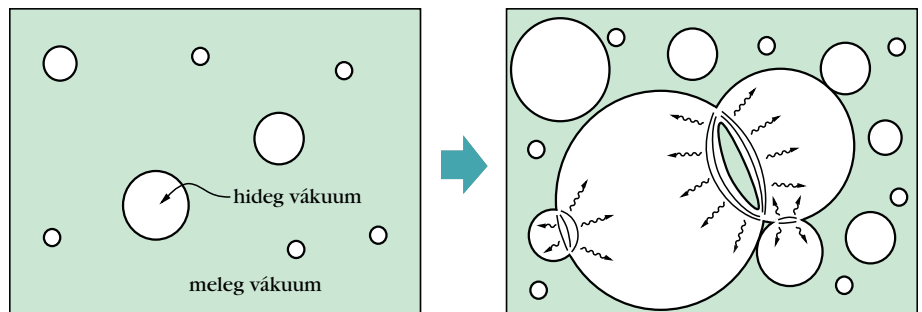
$$b \sim \varepsilon \frac{f_s^2}{d},$$

ahol f_s a neutroncsillag forgási frekvenciájának kétszerese, d pedig a tőlünk mért távolsága. A pulzárok – mint speciális neutroncsillagok – forgási frekvenciája ismert (a legnagyobb érték 600 Hz feletti), és ezért tudjuk, hogy a lehetséges gravitációshullám-frekvenciák a földi obszervatóriumok érzékeny tartományába esnek. Az amplitúdóról csak annyit tudunk mondani, hogy az aLIGO képes lehetne a kimutatásukra, főleg akkor, ha a periodikus jelet sokáig sikerül észlelni, hiszen a jel/zaj arány az észlelési időtartam négyzetgyökével javul.

Nem fejezhetjük be ezt az áttekintés anélkül, hogy megemlítenénk a magyar hozzájárulást a LIGO Tudományos Együttműködéshez, illetve a felfedezéshez.

Miután *Rainer Weiss* és munkatársai 1972-ben javasolták, hogy a Weber-féle tömegrezonátorok helyett inkább lézer-interferométerekkel kellene gravitációs hullámokat keresni, még két évtized telt el, amire az USA kormánya rászánta magát a LIGO finanszírozására. Az amerikai National Science Foundation (NSF) 1992-ben döntött a támogatás mellett. A pénz – ami mára már körülbelül 1 milliárd dollár – a legnagyobb összeg, amit egy projektre az NSF valaha megszavazott. Ezt teljes egészében a „LIGO Laboratory” kapta, amely a hanfordi és livingstoni két telephelyből, illetve a műszereket létrehozó CalTech és MIT intézményekből áll. A mérőhelyek 2000-re készültek el. 2000

11. ábra. Az elektroyenge fázisátmenet elméletének szuperszimmetrikus kiterjesztése megenged olyan paramétereket, amelyek mellett az elektroyenge fázisátalakulás lehet elsődrendű. Egy ilyen esetben a fázisátalakulás dinamikájából következően keletkezhetnek gravitációs hullámok. Az új fázis (ábránkon a hideg vákuum) buborékai relativisztikus sebességgel nőnek, ütköznek egymásnak, forrnak össze, és hozzáak létre a fázisátalakulás végére a hideg vákuummal kitöltött teret. Az ábrát [4]-ből vettem át.





12. ábra. Raffai Péter, az ELTE Fizikai Intézetének adjunktusa a LIGO livingstoni (Louisiana állam, USA) állomásának vezérlőtermében a LIGO méréseit vezeti, felügyeli.

és 2010 között az első („Initial”) LIGO időszakában mindössze az volt a feladat, hogy a technológiát demonstráljuk, és az érzékenységet növeljük. A 2010–2015 alatti sorozatos átépítések után az aLIGO 2015 szeptemberében kezdett mérni. A magyar csoport 2007-ben, az „Initial” LIGO idejében csatlakozott a LIGO Tudományos Együttműködéshez. Ekkor már látni lehetett, hogy az érzékenység a korábban leírt terveknek megfelelően növekszik, és ha akkor még nem is, de a 2010-es évtized közepére várható a gravitációs hullámok tényleges, direkt észlelése.

Ki kell hangsúlyozni, hogy mi nem a LIGO Laboratory, hanem a LIGO Tudományos Együttműködés részesei vagyunk. Ez utóbbi szervezet 1997-ben jött létre azzal a céllal, hogy a LIGO Laboratory által megépített berendezéseket üzemeltesse, az adatokat gyűjtse, az adatokat feldolgozza, és a tudományos közleményeket is megírja. Az ELTE-n az Eötvös Gravity Research Group (EGRG, <http://egrg.elte.hu>) azzal a céllal jött létre, hogy körülbelül 45. csoportként csatlakozzon az akkor már több száz fős és világméretű, jelentős európai hozzájárulással is működő LIGO Tudományos Együttműködéshez. A Szegedi Egyetem kutatói 2009-ben csatlakoztak hozzánk, majd 2014-től már önálló LIGO csoportként dolgoznak az Együttműködésben. A Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársai azóta az olaszországi Cascinában lévő VIRGO detektor munkáját erősítik. A VIRGO 2007-ben adatcsere-egyezményt kötött a LIGO-val, azóta az adatok feldolgozása közösen zajlik, így a VIRGO-n dolgozó csoportok ugyanúgy társszerzői lettek a felfedezésről szóló cikkeknek, mint a LIGO-n dolgozó kollégák, an-

nak ellenére, hogy a VIRGO még átépítés alatt áll, egyelőre nem mér, és remélhetőleg 2016 végén csatlakozik majd az adatgyűjtéshez.

Az EGRG a LIGO Tudományos Együttműködés munkájának minden fázisában részt vesz. Ez kezdődik azzal, hogy méréseket is kell vezetni (lásd a 12. ábrát), adatfeldolgozó algoritmusokat kell írni, azokat futtatni, és a cikkek megírásában is közre kell működni. Az ebben a cikkben bemutatott 4 csoport közül az EGRG a „Burst” csoport munkájában vesz részt, azaz nem ismert alakú tranziens jelek keresésére fejlesztett algoritmust, és két jelenleg használatban lévő keresőszoftverhez is számottevő a hozzájárulása (a 4 csoportnak összesen 18 keresőszoftvere van, amelyek a különböző, várható jelalakok után kutatnak folyamatosan). A szegedi és a wigner kollégák a kompakt kettősök összeolvadását figyelő (CBC) csoportban dolgoznak, és írnak szoftvert is. Az ELTE-n jelenleg a nagyon elnyúlt, excentrikus pályán egymás körül keringő kettős rendszerek által keltett gravitációshullám-jeleket tanulmányozzuk, mert éppen az ELTE-n dolgozó *Kocsis Bence* mutatta ki munkatársaival [5], hogy ezek a kettősök, amelyek jelét jelenleg a LIGO *nem* keresi, legalább annyi jelet szolgáltatnak, mint a körpályán egymás felé spiráló kettősök (egy ilyen jelét látta most az aLIGO műszere). Reméljük, hogy munkánk eredményeképpen nemsokára lesz ilyen keresőszoftver is. Sőt a mi feladatunk most azon galaxiskatalógus létrehozása is, amely alapján a LIGO-val együttműködő obszervatóriumok a LIGO által talált jelek forrásait EM (rádió, optikai, röntgen-, gamma- stb.) tartományokban is szeretnék majd megfigyelni. Nem mellékes, hogy a műszerépítéshez is hozzájárultunk a múltban, igaz csak kismértékben: mi fejlesztettük a környezeti zajok monitorozásában részt vevő infrahang-mikrofonokat. Az angol és a spanyol után a harmadik a *magyar* nyelv, amelyre a LIGO honlapja le lett fordítva. Ennek tanulmányozása minden érdeklődő számára további betekintést enged a Tudományos Együttműködés munkájába: <http://ligo.elte.hu>.

Azzal a reménnyel zárom e sorozatot, hogy érthető, követhető formában, de részletesen sikerült áttekinteni, miért volt fontos és érdemes évtizedeket és sok pénzt szánni erre a kísérletre. Talán az is világossá vált, hogy sokan miért tekintünk bizakodva és várakozásokkal teli a most kezdődő gravitációshullám-asztrofizika korszakára.

Irodalom

1. S. K. Chatterji: *The search for gravitational wave bursts in data from the second LIGO science run*. PhD tézis, MIT, USA, 2005.
2. N. Andersson, K. D. Kokkotas in *The Physics of the Early Universe*. (edited by E. Papantonopoulos) *Lecture Notes in Physics* 653 (2005) 255.
3. M. Pitkin, S. Reid, S. Rowan, J. Hough: *Gravitational Wave Detection by Interferometry (Ground and Space)*. *Living Reviews in Relativity* (2011); <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2011-5/>
4. R. A. Battye, E. P. S. Shellard, ArXiv e-prints, astro-ph/9604059 (1996)
5. R. M. O’Leary, B. Kocsis, A. Loeb, *MNRAS* 395 (2009) 2127.