

A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOK BEMUTATÁSA KÖZÉPISKOLÁSOKNAK – 2. rész

A téma tanításának módszertani megfontolásai

Molnár András – Német Nemzetiségi Gimnázium, Budapest
Raffai Péter – ELTE TTK Fizikai Intézet

A gravitációs hullámok általános relativitáselméleti alapjainak megértése még az egyetemisták számára is komoly kihívást jelent, ezért a téma középiskolai bemutatása során rendkívül körültekintőnek kell lenni. A fizika tanítása során gyakran használunk modelleket és egyszerűsített eseteket. Például a munka tanításánál is az állandó nagyságú és irányú, az elmozdulással párhuzamos erő munkáját szoktuk először vizsgálni. Az általános relativitáselmélet és a gravitációs hullámok témakörében már a legegyszerűbb példák is igen bonyolultak. A gravitációs hullámok asztrofizikai forrásai például fekete lyukak lehetnek, de még ezek tárgyalása sem könnyű, különösen, ha a hullámok keletkezésének módját nézzük – már az alapfogalmak és a különböző mennyiségek is rendkívül absztraktak.

A magyar fizikaoktatás hagyományosan az alapoktól építkezik [22]. Tartózkodik az indoklás nélküli állításoktól, a fogalmakat kísérletileg vagy más alapfogalmakon keresztül igyekeznek érthetővé tenni, hogy minden mennyiség, törvény mögött legyen egy értelmezés, egy kép is. A gravitációshullám-csillagászat bemutatásához egy online videókurzust készítettünk a <https://webuni.hu> felületen, amelynek címe *Einstein öröksége: csillagászat gravitációs hullámokkal* [23]. A kurzus készítése során igyekeztünk szem előtt tartani a fenti szempontot, hogy egy önmagában is értelmez-

hető, a fizikában akár középiskolai szinten sem jártas érdeklődőnek is hasznos anyagot állítsunk össze. Bár cikkünkben röviden megidézünk a kurzus bizonyos részeit, annak részletes ismertetésétől tartózkodunk. Elemzésünkkel a módszertani megfontolásokat, a modern eszközök nyújtotta lehetőségeket mutatjuk be. A teljes megértéshez ajánljuk a képzés megtekintését, elvégzését. A kurzus során felhasznált és egyéb elérhető, a témához kapcsolódó oktatási anyagokat korábbi cikkünkben vizsgáltuk [24].

A kurzus rövid áttekintése

A kurzus rövid, jellemzően 3–10 perc hosszúságú videókból épül fel. A 34 videót nyolc fejezetbe rendeztük, amelyek mindegyikét egy 10 kérdésből álló teszt zárja, amely segít ellenőrizni a tudás megszerzését (ezek a kurzus teljesítéséhez is szükségesek). A teszteknek fontos szerepe van a tudás hosszútávú elmélyítésében is [25]. A videók online webappokkal, feladatokkal és szöveges dokumentumokkal egészülnek ki.

A csillagászati ismeretterjesztő anyagok gyakran *in medias res* kezdenek, kijelentve hogy egy adott égitest vagy űrbéli esemény létezik, majd leíró jelleggel bemutatásra kerül. A tudományterület általános népszerűségének köszönhetően gyakran ez is komoly sikereket érhet el, széles körhöz eljuthat és ösztönözheti a témában való elmélyülést. Kurzusunkat azonban a fent említett tanulás-módszertani szempontoknak megfelelően építettük fel, hogy a diákoknak/részvevőknek meglegyen a megértés élménye is – amellett, hogy természetesen az asztrofizika önmagában is elvarázsolhatja őket.

A gravitációs hullámok a téridő fodrozódásai. Általában így kezdődik az összes gravitációs hullámokat ismertető anyag. Ez jól hangzik, minden szóhoz tudunk társítani többé-kevésbé hétköznapi jelentést. Azonban, ha ez össze is áll a fejünkben egy képpé, jó eséllyel egy megfoghatatlan, a fizikai tartalomhoz nem túl közel álló jelenség jelenik meg előttünk. Ezért az *első két* fejezetben a téridő, a gravitáció és a „fodrozódás” fizikai jelentését mutatjuk be. A *harmadik* fejezetben a hullámok bemutatása után már kellően megalapozottan beszélhetünk arról, hogy mi is ez a téridő-fodrozódás. Mivel jelenleg csak azokat a gravitációs hullámokat tudjuk észlelni, amelyeket az Univerzum kataklizmatikus eseményei keltenek, a később-



Molnár András harmadéves doktorandusz az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Programjában. 2016 óta a Német Nemzetiségi Gimnázium fizikatanára. A LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration nemzetközi kutatói együttműködés tagja, amely a gravitációs hullámok 2015-ben történt első közvetlen észlelését is jegyzi. Kutatási témája a gravitációshullám-asztrofizika tanítása középiskolában, valamint a fizika népszerűsítésének lehetőségei.



Raffai Péter asztrofizikus az ELTE Fizikai Intézetének adjunktusa. 2007 óta a LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration tagja. Kutatásaiban gravitációshullám-források modellezésével, adatfeldolgozó módszerek fejlesztésével és gravitációshullám-detektorok adatainak kiértékelésével foglalkozik. Szakmai érdeklődésébe a gravitációs hullámok asztrofizikai és kozmológiai alkalmazásai, valamint a többszörös csillagászat tartozik.



11. ábra. A térképek torzítása.

biek megértéséhez szükséges szót ejteni a neutroncsillagokról, a fekete lyukakról és a szupernóvákról is. Ezen a ponton a tanuló elsajátította az összes szükséges fogalmat. Itt kezdődhet a technikai részletek és az asztrofizikai vonatkozások részletes ismertetése. A *negyedik* fejezet a gravitációs hullámok interferometrikus észleléséről, a különböző földi zajokról és ezek kiszűréséről szól. Az *ötödik* fejezet a jelek keresése és észlelése köré épül, ahol szó esik az eddigi megfigyelési időszakokról és a két legnagyobb jelentőségű észlelésről is. A *hatodik* fejezet – a jelfeldolgozás kapcsán – betekintést nyújt a terület kutatóinak munkájába. A *hetedik* fejezetben a gravitációs hullámok csillagászati jelentősége kerül bemutatásra. Végül tágabb kontextusban, részben a jövőbe nézve kerül áttekintésre a kutatási terület egésze a *nyolcadik* fejezetben.

A kurzus 2021 nyara óta érhető el. Azóta már több, mint kétszázan regisztráltak rá. Többségében középiskolások hallgatják, de általános iskolások, egyetemisták és felnőttek is vannak közöttük. Az eddigi visszajelzések alapján érthetőnek és hasznosnak tartották a videókat. A kurzus elvégzők között előzetes és utólagos kérdőívvel mérjük az oktatási anyag hatékonyságát, ezek kiértékelés jelenleg is zajlik.

Általános relativitáselmélet

Mit jelent a téridő görbülete?

A háromdimenziós tér görbületét közvetlenül nem tudjuk érzékelni, ezért egy egyszerűsített esetet használunk a szemlélet kialakítására. A módszer hasonló, mint a koordinátagometria oktatásának folyamata. Először a kétdimenziós Descartes-féle koordináta-rendszerben találkoznak a diákok már ismert fogalmakkal: pont, egyenes, vektor, egyenlet, egyenlet-rendszer. Miután megtanulták ezek interpretációját a koordinátagometriában, tovább lehet lépni három dimenzióra, ahol már csak az ismert metódust és fogalomrendszert kell használni, tartalmi újdonságról nincs nyomasztó szó.

Esetünkben a kézzelfogható fogalom a kétdimenziós sík görbülete. Fontos, hogy erre itt ne úgy tekintsünk, mint a térlátáshoz szokott emberek. A görbe felületeket látjuk a térben, nem úgy, mint a tér görbületét, amit ennek ellenére végül meg szeretnénk érteni. Tehát szigorúan a síkban megjelenítve kell felfedeznünk a sík görbületére utaló nyomokat. Erre úgy is gondolhatunk, hogy egy térbeli alakzatot síkba képezünk le, amit vizsgálva próbálunk következtetni az eredeti tulajdonságokra.

Az első példa ehhez a térképkészítés. Bár a földgömb síkbeli lerajzolása triviálisnak tűnhet, hiszen rengeteg térképet lát az ember, ha kicsit belemélyedünk, komoly problémák adódnak vele. Ha megpróbáljuk összeilleszteni például Európa országainak azonos méretarányú térképeit, hamar észrevehetjük, hogy valami nem stimmel (11. ábra). Ez abból adódik, hogy a térképkockák valójában gömbhéjszeletek, amelyeket, ha megpróbálunk „kilapítani”, óhatatlanul torzulnak. Matematikailag nem lehet torzítás nélkül leképezni a gömböt a síkba.

Az analógia innen könnyen megérthető: készítsünk térbeli holografikus atlaszt mondjuk a galaxisunkról. Fedjük le az egész galaxist kis térképkockákkal. Ha ezek a térképkockák nem illeszkednek össze, elcsúsznak a csillagok, bolygók, akkor az a tér görbületét jelzi.

A görbület tetten érhető egy geometriai módszerrel is. Remélhetőleg minden diák számára jó fogódzkodási pont a tétel, miszerint a háromszögek belső szögösszege mindig 180 fok. Ez azonban csak a síkbeli háromszögekre igaz! Rajzoljunk egy kiterített, leeresztett lufira háromszöget. Ha felfújuk a lufit, azt tapasztaljuk, hogy a görbült síkon a belső szögösszeg már több, mint 180 fok. Az is könnyen kimérhető, hogy minél nagyobb a görbület, illetve minél nagyobb a háromszög, annál nagyobb lesz az eltérés a 180 foktól. Ez szintén egy olyan példa, ami nem támaszkodik a diákok absztrakciós készségére, sőt akár maguk is ki tudják próbálni.

A térbeli kiterjesztés ismét könnyen megtehető egy gondolat kísérletben: rajzoljunk egy nagy háromszöget az űrben (például küldjünk ki három űrszondát, amelyekből fénynyalábokat bocsátunk ki egymás felé). Mérjük meg a fénynyalábok által meghatározott háromszög belső szögeit. Ha ez eltér a 180 foktól, az arra utal, hogy a köztük lévő tér görbülettel rendelkezik.

Paradigmaváltás a gravitáció magyarázatában

Paradigmaváltás a gravitáció magyarázatában

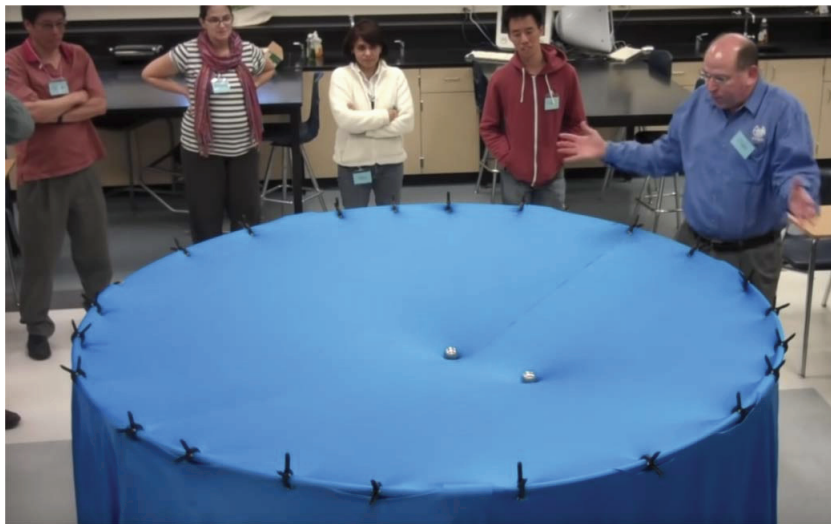
A Newton-féle gravitációs törvény ismertetése után a tanulók megismerkedhetnek az elképzelés problémáival. Bár a Neptunusz felfedezésével [26] megdöntetlennek tűnő alátámasztást nyert a newtoni kép, a technológia fejlődésével gyűlni kezdtek a megoldat-

lan problémák. Ennek ellenére a hétköznapi életben jól megvagyunk a gravitáció erőként történő értelmezésével, sőt érzékszerveink nagyon is mélyen elhitetik velünk ezt. Emiatt az általános relativitáselmélet bemutatásához kitalált modellek bemutatása mellett fontos hangsúlyozni a szemléletváltás szükségességét. A fizikai tanulmányok által is erősített prekonceptió leépítése ilyenfajta motiváció híján a diákok számára önkényesnek, szükségtelennek és ennek következtében hiteltelennek tűnne. A leginkább kézzelfogható példa a Newton-féle gravitációs fel fogás hiányosságára a Merkúr pályájának évi 43 szögmásodperces precessziója. Ennek magyarázatára sokféle elmélet született, de nem sikerült meggyőzően összeegyeztetni a gravitációs erővel. *Albert Einstein* általános relativitáselmélete azonban jól indokolta a kis eltérést. Ha a gravitáció nem erő, hanem a téridő görbülete, rengeteg jelenség új megvilágításba kerül. Ráadásul úgy, hogy természetesen az eddig jól ismert jelenségek működése sem sérül.

Az elmélet szerint – többek között – a tömeggel rendelkező testek meggörbítik maguk körül a téridőt. A testek pedig a görbült téridőnek megfelelően mozognak. Ezt szemlélteti a jól ismert gumilepedőmodell is. Ha két tömeggel rendelkező testet helyezek a lepedőre, akkor azok begörbítik a lepedőt maguk alatt, így egymás felé gurulnak (12. ábra). Ha nem látnám a lepedőt, azt mondhatnám, hogy a két test vonzza egymást. Minél nagyobb tömeg jut egy adott felületre, annál jobban begörbíti a lepedőt, így annál jobban gyorsulnak egymás felé a testek. A newtoni kép szerint a testek tömege határozza meg a vonzóerő nagyságát. Pedig valójában az erő sincs erőről, csupán a téridő geometriája kelti a tömegvonzás illúzióját.

A gumilepedőmodell komoly szépséghibája, hogy bár azt hivatott demonstrálni, hogy a gravitációs jelenségek nem erőhatás révén jönnek létre, maga a modell pont a gravitáció miatt működik. A súlyok pont a gravitáció miatt hajlítják meg a lepedőt. Persze ez csak egy modell, de mégis zavaró, hogy a gravitációs erő segítségével mutatjuk be azt, hogy valójában nem is létezik ez az erő. Éppen ezért érdemes ennél jobb, kevésbé félrevezető analógiákat keresni, amelyek sokkal jobban rávilágítanak az általános relativitáselmélet szemléletváltására.

Az egyik ilyen a repülőutak vizsgálata [28, 29]. Ha megnézzük a tér-



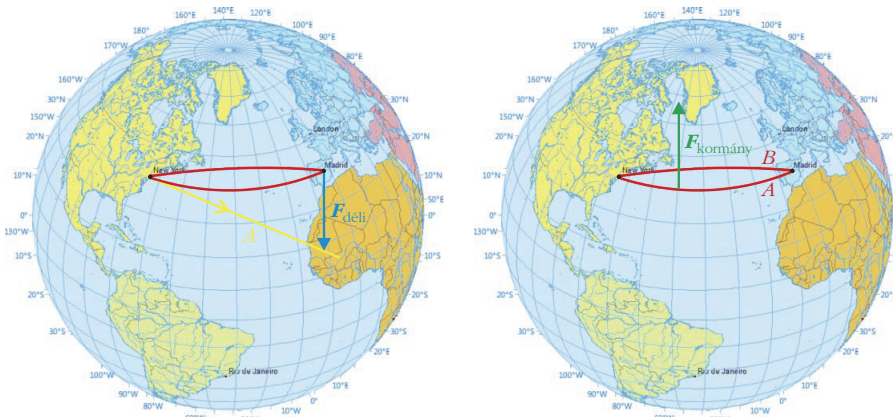
12. ábra. A gumilepedő-modell [27].

képen, milyen útvonalon megy például a Tahiti-Párizis járat, meglepődve tapasztalhatjuk, hogy Közép-Amerika helyett Kanadát érinti (13. ábra). Azonban, ha a földgömböt nézzük, egyből érthetővé válik, miért az a legrövidebb útvonal. A téridőnél is hasonló a helyzet: szemléletünk gyakran félrevezető lehet, mivel nem látjuk a görbületeket. Azt hihetjük, hogy (gravitációs erő híján) teljesen indokolatlanul kering a Föld ellipszispályán a Nap körül, pedig csak a görbült térben halad a lehető legrövidebb útvonalon, azaz geodetikus pályán.

Gondoljunk bele, hogy a repülő példában hogyan születhetne meg a gravitációval analóg erőfogalom. Ezzel a gondolatmenettel megérthetjük, miként lehetséges az, hogy bár lehet találni egy jó leíró magyarázatot (modellt) egy jelenségre, de ha a valódi hátterét szeretnénk értelmezni, akkor el kell vetni az eddigi szemléletet, bármennyire is sikeres vagy kényelmes volt az.

13. ábra. Repülőjárat hosszúnak tűnő útvonala [30].

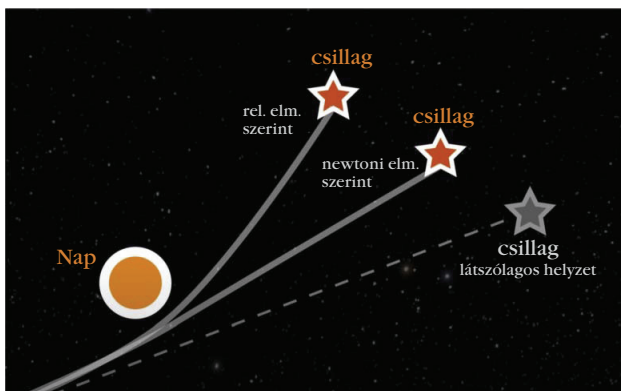




14. ábra. Déli erő vagy görbület?

Amennyiben nem tudunk a Föld görbületéről, a sík térképre nézve joggal feltételezhetjük, hogy egy szélességi kör mentén haladva érünk el a legrövidebb, egyenes útvonalon mondjuk New Yorkból a vele azonos szélességi körön fekvő Madridba (14. ábra). Térben nézve azonban, ha egyenesen elindulunk egy szélességi kör érintőjén, akkor a Föld felszíne mentén történő erő kifejtés nélkül pályánk egy főkört fog követni, tehát Afrikában kötünk ki. Kétdimenziós látással azt mondhatjuk, hogy létezik egy *déli erő*, ami minden kelet–nyugat irányban haladó testet eltérít. Ha szeretném tartani az egyenes vonalú mozgást, ellen kell kormányozni a repülővel. Tehát kell egy erő, amivel kioltom a déli erőt ahhoz, hogy a rám ható erők eredője nulla legyen. Valójában persze nincs déli erő, csupán a szélességi kör mentén történő körmozgáshoz szükséges egy erő, ami biztosítja a Föld tengelye (nem középpontja!) felé mutató centripetális gyorsulást. A valódi legrövidebb úton történő mozgáshoz viszont nem szükséges külön erőt kifejteni a géppel. És ugyanez a helyzet a gravitációval is: úgy tűnik, hogy a gravitáció görbevonalú pályára kényszeríti az égitesteket, és nekünk is folyamatosan erőt kell kifejtenünk a gravitációval szemben már ahhoz is, hogy egy helyben álljunk. Ez azonban nem így van: az égitestek az általunk nem látott, görbült téridőbeli geodetikuss pályákon haladnak. Nekünk pedig azért kell erőt kifejtenünk az ácsorgáshoz, mert a Földön a zuhanás lenne a természetes mozgás, és ennek tartunk ellen.

15. ábra. A Nap gravitációs lencsézése [31].



Az általános relativitáselmélet elfogadtatásához érdemes bemutatni a történelmi perdöntő kísérleti bizonyítékot is. Ez a gravitációs lencsézés megfigyelése volt. A fény a görbült téridőben halad, így az általános relativitáselmélet szerint a gravitáció hatásának meg kell jelennie a fénycsillagok útjában is. Bár a newtoni modellben is lehet értelmezni a jelenséget, az eltérülés mértékére ott más eredményt kapunk (15. ábra). Így adott volt a lehető-

ség: ha megfigyeljük egy fénycsillag eltérülését a gravitációs lencsézés hatására, abból megállapítható, melyik elmélet számítja a helyes. 1919-ben egy napfogyatkozást kihasználva *Arthur Eddington* és csapata megfigyelték a Nap lencséző hatását egy mögötte található csillagon. Az eredmények egyértelműen Einsteinnek adtak igazat. Ezzel a diákok meggyőződhetnek a kurzus elméleti és a tudományos modellek tesztelésének módszereivel is ismerkedhetnek.

Csillagászat gravitációs hullámokkal

Fogalomépítés és csillagászati vonatkozások

A gravitációs hullám-csillagászat a fizika szerteágazó területeit érinti. Emiatt figyelmet kell fordítani a különböző fogalmak megfelelő bevezetésére. Mivel a kurzus minden középiskolásnak, illetve laikusnak készült, nem építettünk a központi tananyagra. Ezzel együtt törekedtünk arra, hogy az előképzettséggel rendelkezőknek se legyenek fölösleges előadások. A különböző témakörök összefogása lehetőséget adott egy rendszerszemléletű, a fizika területeit összekapcsoló attitűd erősítésére, amely a fizikát emelt szinten tanulók számára fontos kompetencia.

Az alaposítás során a vonatkozó csillagászati fogalmakkal ismerkedhetnek meg a tanulók. A gravitációs hullám-kutatás tárgyát jelenleg a fekete lyukak és a neutroncsillagok alkotják, mivel egyelőre csak tőlük származó jeleket sikerült észlelni [32]. Éppen ezért külön videó szól a két objektumról. Mivel a gravitációs hullámok szempontjából nem szükséges ezek részletes megismerése, ezért az általános tájékozódáshoz megfelelőnek találtuk egy-egy már elérhető ismeretterjesztő videó használatát [33, 34]. Természetesen más asztrofizikai jelenségek is produkálnak gravitációs hullámokat, a későbbiekben egy külön leckében ezeket is bemutatjuk.

Az általános relativitáselmélet alapfogalmai és néhány csillagászati forrás megismerése után már csak a hullámok fogalmát és tulajdonságait kell megérteni ahhoz, hogy beszélhessünk a gravitációs hullámokról. A hullámok bemutatása a középiskolai anyaghoz hasonlóan történik, annyi kiegészítéssel, hogy az

egy-egy tulajdonságokat a gravitációs hullámok kapcsán is bemutatjuk. Itt a gravitációs hullámok modellezésére is van lehetőség. A gumilepedős eszközön egy fúró és egy egyszerűen összerakható fej használatával egy stroboszkóp segítségével, vagy lassított felvételen olyan hullámokat figyelhetünk meg, amelyek az egymás körül keringő fekete lyukak által keltett gravitációs hullámokhoz hasonlóan néznek ki (16. ábra). A jelenséget akár mérhetővé is lehet tenni.

A gravitációs hullámok forrásainak bemutatása kiemelt jelentőségű része a kurzusnak, mivel a feldolgozott téma középpontjába a gravitációshullám-csillagászatot helyeztük. A kutatási területől reméljük számos eldöntetlen kérdés megválaszolását és ismeretlen jelenségek, mechanizmusok megértését. Ahhoz, hogy ezekről mélységében szó eshessen, bemutatjuk, hogy mit tudunk jelenleg és a közeljövőben vizsgálni a detektorokkal.

Kurzusunkban a források csoportosítását a *LIGO Scientific Collaboration* (LSC) sztenderdjét [36] követve végeztük. Ez azt jelenti, hogy elsősorban nem asztrofizikai szempontból, hanem a detektálás módjának megfelelően különítjük el a különböző jel- és forrástípusokat. Ez egyrészt kézenfekvő, mivel alapvetően nem is szokás más módon kategorizálni őket. Másrészt a kurzus szempontjából is előnyös, hiszen nem az asztrofizika irányából közelítjük meg őket, mintegy megemlítve a különböző forrásoknál a kibocsátott gravitációs hullám jellegét. A későbbiekben részletesen foglalkozunk a különböző megfigyelési módszerekkel. Itt soroljuk fel, hogy milyen jeleket lehet ezekkel észlelni, tehát a detektálás módja határozza meg a jeltípusok tárgyalását. Ezen túl azért is előnyös ez a megközelítés, mert könnyen megérthető. Azt, hogy egy gravitációs hullámot milyen eszközzel tudunk megfigyelni, alapvetően a hullám frekvenciája és annak időbeli változása határozza meg (17. ábra). Ez egy elég egyszerű konstrukció, jól lehet hasonlítani például egy hang időbeli változásához is, ezért könnyen megérthető.

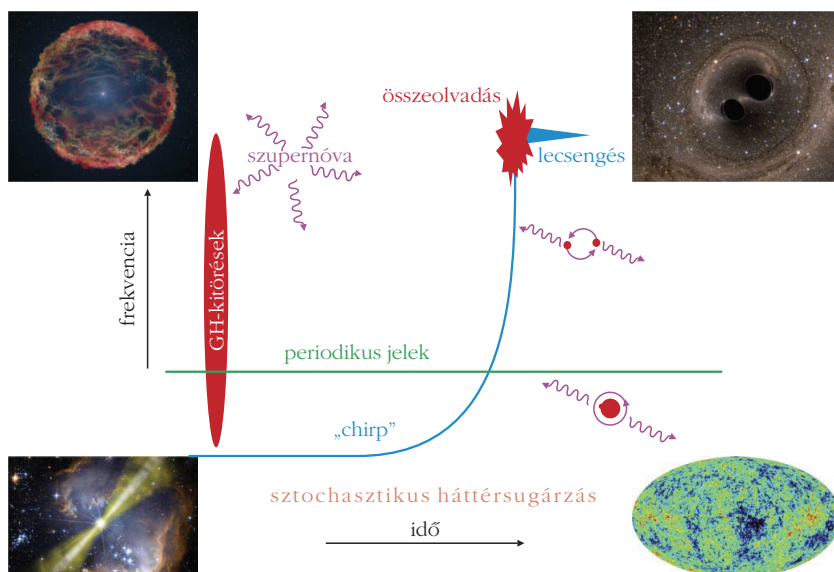
A gravitációs hullámok hanghullámokként történő bemutatása nagyon jó eszköz, viszont óvatosan kell bánni vele. A módszer lényege annyi, hogy egy gravitációs hullám frekvenciájának és amplitúdójának időbeli lefolyását vesszük (azaz a szimulált vagy mért adatokat), és hangszórón azt hallható hangként lejátszuk (18. ábra). A lehetőség azért is adott, mert a jelenlegi gravi-

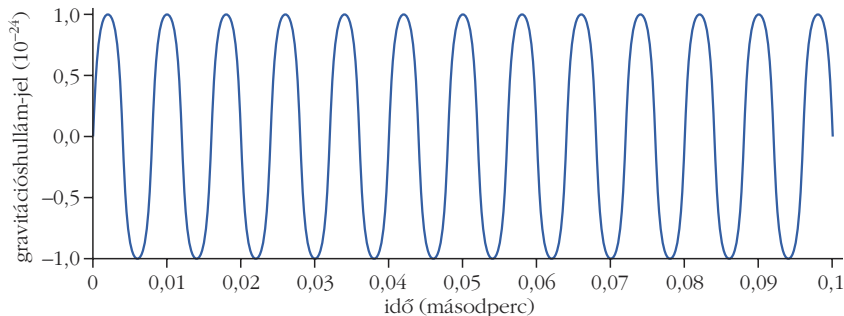


16. ábra. Gravitációs hullámok szemléltetése gumilepedővel és görgős fúrófejjel [35].

tációshullám-detektorok érzékenysége a 30–3000 Hz tartományt fedi le, ami pont hallástartományunk kellemesnek mondható részébe esik. Természetesen a frekvencia transzformációjával más tartományokat is le lehetne játszani, de ez mindenesetre szerencsés egybeesés. A hasonlat abból a szempontból is helytálló, hogy a forrás pozíciójának meghatározása is a hallásunkhoz hasonlóan történik: több detektoros észlelésnél az határozza meg a lokalizációt, hogy mekkora időkülönbséggel ér oda a jel a különböző helyekre – hasonlóan, mint a két fülünk esetén. Az obszervatórium fülként való azonosítása azt is jól mutatja, hogy a gravitációs hullámok észlelésével nem csak egy modernebb eszközzel pásztázzuk az űrt, hanem egy teljesen új érzékszervünk született, ami alapjaiban újfajta észleléseket tesz számunkra lehetővé. Ugyanakkor nagyon vigyázni kell, hogy a hasonlattal ne alakítsunk ki téves képet. A kurzus során is sokszor hangsúlyozzuk, hogy bár az ismeretterjesztés során a gravitációshullám-detektorokat gyakran a fülünknek hívjuk, nem hanghullámok észleléséről van szó. Különösen ellentmondásos lehet ez

17. ábra. Gravitációs hullámok jeltípusainak szemléltetése a frekvencia–idő diagramon.





18. ábra. Egy periodikus gravitációs hullám hullámformája. Ha átírjuk az ordinátatengely feliratát, akár egy hanghullám is lehetne [37].

a kép, ha a tanuló tisztában van azzal, hogy az űrben nem terjednek a hanghullámok, itt pedig mégis mint-ha valami ilyesmiről lenne szó.

Technológiai eszközök és módszerek középiskolai fogalomtárral

A gravitációs hullámok detektálási módszere hálás téma, mivel az LSC régóta nagy hangsúlyt fektet tevékenységének bemutatására, így rengeteg oktató és ismeretterjesztő anyag látott már napvilágot [24]. Az interferométerek működésének, a zajforrások típusainak és a zajszűrés módszereinek ismertetése interaktív módon, a cikk első részében bemutatott alkalmazások segítségével történik. A zajforrások oktatási szempontból sok lehetőséget biztosítanak, hiszen itt tényleg mindenféle jelenséggel lehet találkozni: hőtágulás, hőmozgás, mechanikai rezgések, rezonancia, vákuum, lézer, elektromos mező, gravitációs, de még kvantum jelenségek is fellépnek (19. ábra). Még felsorolni is sok, részletes megismerésük egy külön tananyagot is kitenne. Ettől mi a kurzus során tartózkodtunk, hogy ne veszítsük el a fókusz a kitűzött célról. Ennek ellenére nem csak egy rövid tényszerű közlést adunk, hanem a *Space-Time Quest* [38] játék segítségével rálátást kaphatnak a résztvevők arra, hogy miként jelennek meg a különböző zajok és milyen módszerekkel lehet ezeket csökkenteni.

A kutatók munkájának szempontjából kiemelt jelentősége van a jelfeldolgozásnak. A teleszkópos csillagászati megfigyelésekkel szemben – részben a nagy zajnak köszönhetően – itt már az sem triviális, hogy egyáltalán észleltünk-e jelet. Ezt személyesen is megtapasztalhatják a tanulók a *Black Hole Hunter* [40] játék kipróbálásával. A gravitációs hullám-kutatás több évtizedes történetének nagy részében arra irányultak az erőfeszítések, hogy építeni lehessen egy elég pontos berendezést, illetve rendelkezésre álljon egy megfelelő módszer, amivel sikerül

megvalósítani az észlelést. A kutatás viszont valójában csak innen kezdődik. Akkor lehet új tudományos felfedezéseket tenni, ha ezeket a jeleket értelmezni is tudjuk, információhoz jutunk belőlük.

A forrás tulajdonságainak és égi pozíciójának számszerű meghatározása kifejezetten bonyolult, de egyszerűsítésekkel viszonylag pontos képet lehet alkotni a teljes folyamatról. Előbbihez például egy rendkívül egyszerű és szemléletes eszköz a

Waveform Fitter [41] webapplikáció. A forrástávolság és az össztömeg változtatásával érzékelhetővé tehető, hogyan lehet a hullámforma alapján becslést adni a forrás paramétereire. Ezzel szemben, ha matematikai formulával értelmezzük a jelenséget, akkor egy bespiroló kettős esetén a frekvencia és az amplitúdó változása a következő függvényekkel adható meg:

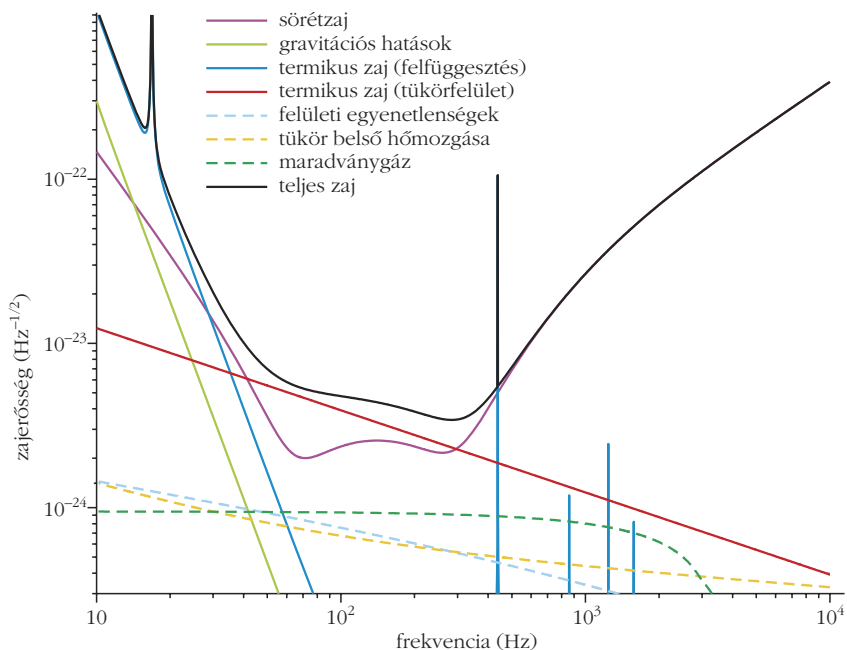
$$f(t) = \frac{5^{3/8}}{8\pi} \left(\frac{c}{GM} \right)^{5/8} \frac{1}{(t_0 - t)^{3/8}},$$

$$A(t) = \frac{1}{r} \left(\frac{5 G^5 M^5}{c^{11}} \right)^{1/4} \frac{1}{(t_0 - t)^{1/4}}.$$

Ahol f a frekvencia, t az idő, c a fénysebesség, G a gravitációs állandó, t_0 az észlelés időpontja, A az amplitúdó, r a távolság, M pedig az úgynevezett *Chirp-tömeg*:

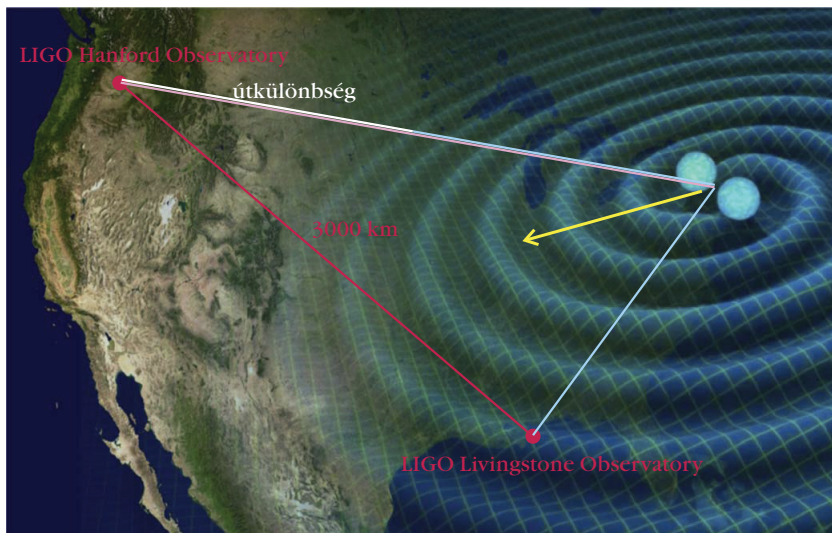
$$M = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}.$$

19. ábra. A legfontosabb zajok jellemző frekvenciái és erősségei [39].



A kurzus során röviden értelmezzük ezeket az összefüggéseket, a webappal ezt a megértést segítjük és vizualizáljuk.

A forrás irányának meghatározása során több módszerről is beszélhetünk: a beérkezés szöge megállapítható abból, hogy mekkora időkülönbséggel érkezik be a jel a két detektorhoz (20. ábra). A polarizáció segítségével szűkíthetjük a területet, ehhez azonban különböző irányultságú detektorokra van szükség. Végül a detektorok vakfoltjai is a segítségünkre lehetnek. Utóbbi kettő elméleti háttere bonyolult, de az alap gondolat megérthető, illetve ismét jó lehetőség máshonnan ismert fogalmak új kontextusban történő bemutatására.



20. ábra. A forrás irányának meghatározása az útkülönbségből. A pontos pozíció megtalálásához legalább három detektor szükséges.

Rendszerező összefoglalás helyett: ismerkedés a jövő csillagászatával

A kurzus a gravitációshullám-csillagászat jövőjének tárgyalásával zárul. Ez logikai szempontból is kézenfekvő, de szerkezetileg is jó záróelem. Itt áttekintjük az eddigi eredményeket, illetve rávilágítunk, hogyan érhetők el a várt felfedezések. A jövőbeli detektorok kapcsán felelevenítjük működési elvüket, az észlelhető forrástípusokat, a paraméterek és jelek közötti kapcsolatot és a zajszűrést is. Lényegében minden fontos momentumot átismétlünk anélkül, hogy ez egy sima, unalmas összefoglalásba fulladna. Ezen túl fontosnak tartottuk a téma „nyílt lezárását”. Célunk az volt, hogy a kurzus elvégzésével a résztvevők teljes képet kapjanak a kutatási területről, de lássák a jövőben rejlő rengeteg kérdést és tudományos potenciált, ami a további tájékozódást és a téma nyomon követését is inspirálja.

Záró gondolatok

A fizikatanítás egyik deklarált célja a társadalom és a tudományos világ közti kapcsolat megteremtése. Az alapfogalmak és módszerek ismertetése mellett ennek fontos része a legújabb eredmények bemutatása, szükség esetén a laikusok számára is érthető interpretálása. Annak ellenére, hogy a gravitációshullám-kutatás a modern csillagászat egyik legnagyobb jelentőséggel bíró területe, nemzetközi viszonylatban sem találni olyan oktatási anyagot, amely az érdeklődők számára átfogó képet adna a témakörrel. Az általunk készített kurzus ezt az űrt hivatott betölteni. A jövőben az angol nyelvű videók átdolgozását is tervezzük, hogy bárki számára elérhetőek legyenek. Mivel a gravitációs hullámok kutatása még csak most fog igazán felpörögni, az egyre jelentősebb felfedezések tanítására is fel kell készülnünk.

Irodalom

22. Juhász András, Tasnádi Péter, Jenei Péter, Illy Judit, Wiener Csilla, Főzy István: *A fizika tanítása a középiskolában*. http://fiztan.phd.elte.hu/letolt/fizika_tanitasa_1.pdf (2022. 01. 10.)
23. A kurzus oldala: <https://webuni.hu/kepzes/einstein-es-a-gravitacios-hullamok> (2022. 05. 03.)
24. Molnár András, Raffai Péter: A gravitációs hullámok bemutatása középiskolásoknak 1. rész – Nemzetközi példák. *Fizikai Szemle* 72 (2022) 285–291.
25. H. L. Roediger III, J. D. Karpicke: Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science* 17 (2006) 249–255.
26. Csaba György Gábor: *Tetővázó csillagászok, nemzetközi botrány és egy múltból jött észlelés – 175 éve fedezték fel a Neptunuszt*. (2021) https://mta.hu/tudomany_hirei/tetovazo-csillagaszok-nemzetkozi-botran-y-es-egy-multbol-jott-eszleles-175-eve-fedeztek-fel-a-neptunuszt-111601 (2022. 05. 09.)
27. Dan Burns: *Gravity Visualized*. <https://youtu.be/MTY1Kje0yLg>
28. Roy R. Gould: Why does a ball fall?: A new visualization for Einstein's model of gravity. *American Journal of Physics* 84 (2016) 396.
29. Krzysztof Rebilas: Comment on „Why does a ball fall?: A new visualization for Einstein's model of gravity”. *American Journal of Physics* 85 (2017) 66.
30. World's longest domestic flight: https://en.wikipedia.org/wiki/World%27s_longest_domestic_flight
31. Derek Muller: *Why Gravity is NOT a Force*. <https://youtu.be/XRr1kaXKBsU>
32. LVC Collaboration: <http://ligo.elte.hu/detections/GWTC-3.php>
33. Kurzgesagt: *Neutron Stars – The Most Extreme Things that are not Black Holes*. <https://youtu.be/udFxFKZRYQt4> (2022.04.08.)
34. Kurzgesagt: *Black Holes Explained – From Birth to Death*. <https://youtu.be/e-P5IFTqB98> (2022. 04. 08.)
35. Steve Mould: *Gravitational Waves Work Like This Drill on Spandex*. <https://youtu.be/dw7U3BYMs4U>
36. LIGO Scientific Collaboration (LSC): <http://ligo.elte.hu/science/GW-Sources.php> (2022. 05. 03.)
37. LSC: <http://ligo.elte.hu/science/GW-Continuous.php>
38. Laserlabs: <https://www.laserlabs.org/spacetimequest.php> (2022. 05. 04.)
39. The Virgo collaboration, Virgo Technical documentation system, VIR-0128A-12 <https://tds.virgo-gw.eu/ql/?c=8940> (2022. 11. 01.)
40. Cardiff Gravity Research Group: <https://blackholehunter.org> (2022. 05. 04.)
41. Cardiff Gravity Research Group: <http://data.cardiffgravity.org/waveform-fitter/> (2022. 05. 04.)