

VADÁSZAT A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOKRA – 1. RÉSZ

Az általános relativitáselmélet kísérleti bizonyítékai

Frei Zsolt
ELTE Atomfizikai Tanszék

2015. szeptember 18. és 2016. január 12. között zajlott az első adatgyűjtési időszak a világ jelenleg legérzékenyebb gravitációs hullám-detektorainál, az Egyesült Államokban működő Advanced Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) nevű rendszer két detektoránál. A LIGO érzékenységét az ezt megelőző két évben jelentősen megnöveltük, és a sajtóban terjedő hírek szerint a szakmai közvélemény azt várja, hogy a gravitációs hullámokat ez az új berendezés előbb-utóbb közvetlenül is észlelni fogja. E hír kapcsán most kezdődő cikksorozatunkban áttekintjük az általános relativitáselmélet eddig talált kísérleti bizonyítékait, majd a LIGO detektorainak működését és végül a harmadik részben a gravitációs hullámok lehetséges asztrofizikai forrásait. A cikk szerzője által vezetett magyar csoport 2007 óta vesz részt a LIGO munkájában, így igyekszünk arra is rávilágítani, hogy mi a magyar hozzájárulás ehhez a nemzetközi nagyprojekthez.

Egyszerűen fogalmazva, *Isaac Newton* fizikai képe szerint a testek egymás közötti vonzása és a testek mozgása egy olyan matematikai absztrakcióval írható le, amely bevezeti a testek között ható gravitációs erőt. Ezt az erőt pontról pontra kiszámolva, a mozgásegyenletekbe beírva, a tömegpontok pályája elég pontosan meghatározható. *Albert Einstein* ezzel szemben egy újfajta matematikai absztrakciót javasolt: a térben elhelyezett tömegek meghatározzák a tér görbületét, és ha ezt a görbületet kiszámítjuk, azután a pályaszámítás már egyszerű: a metri-

kus tenzor által leírt térben a tömegpontok a geodetikus egyenletnek megfelelően, inerciálisan, ha úgy tetszik, szabadon mozognak. Newton leírásában az igazi fizikát a Laplace–Poisson-egyenlet tartalmazza. Ez mondja meg, hogy az adott sűrűségeloszlás milyen gravitációs potenciált hoz létre a térben. Az általános relativitáselméletben egy nagyon hasonló formájú egyenlet, az Einstein-egyenlet játszik központi szerepet. Ez mondja meg, hogy az adott anyageloszlás milyen geometriát indukál, pontosabban fogalmazva összeköti az energia-impulzus tenzort az Einstein-tenzorral.

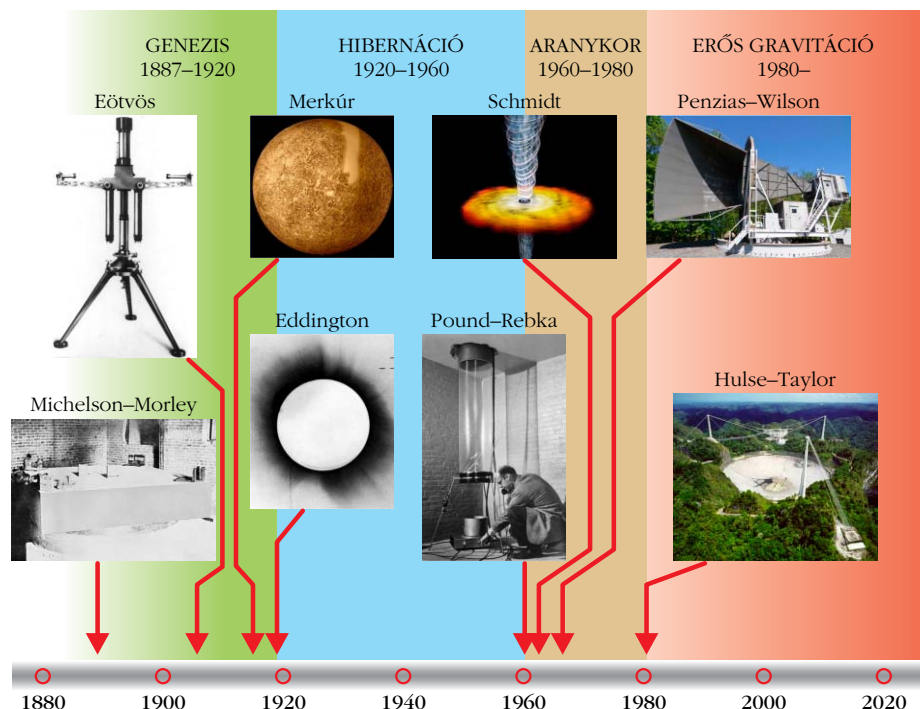
A 20. század elejére, a fejlett csillagászati megfigyelési és laboratóriumi kísérleti technika következtében egyre több evidencia mutatott arra, hogy a newtoni fizikát meg kell haladni. Az általános relativitáselmélet nemcsak magyarázatot adott néhány meglepő kísérleti tényre, de merőben új, az asztrofizika szempontjából meghatározó jelenségeket jósolt meg: fekete lyukakat, gravitációs lencsehatást (a newtonitól eltérő mértékűt), a gravitációs vöröseltolódást, a kvazárok gravitációs sugárzását vagy a gravitációs hullámokat.

1. ábra. A „genezis” időszakában a Michelson–Morley- és az Eötvös-kísérletek, a Merkúr bolygó perihélium-elfordulása és egy napfogyatkozás során a Nap melletti fényelhajlás Eddington nevéhez köthető pontos megfigyelése voltak a legfontosabb kísérleti bizonyítékok. Ezt az időszakot 40 éves „hibernáció” követte, mivel a kísérleti technika csak lassan zárkózott fel az elmélet igen fejlett szintjéhez. Amikor ez megtörtént, az úgynevezett „aranykorban” sikerült többek között kimutatni a gravitációs vöröseltolódást (Pound és Rebka), felfedezni a kvazárokat (Schmidt), a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzást (Penzias és Wilson), illetve egy olyan rádiópulzárt, amely kettős rendszer részeként pontosan annyi energiát veszít időben, mint amennyit gravitációs hullámok formájában ki tud bocsátani (Hulse és Taylor).



Frei Zsolt fizikus, az MTA doktora, az ELTE Atomfizikai Tanszék tanszékvezető egyetemi tanára, az Akadémia Lenyűvellet 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.

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.

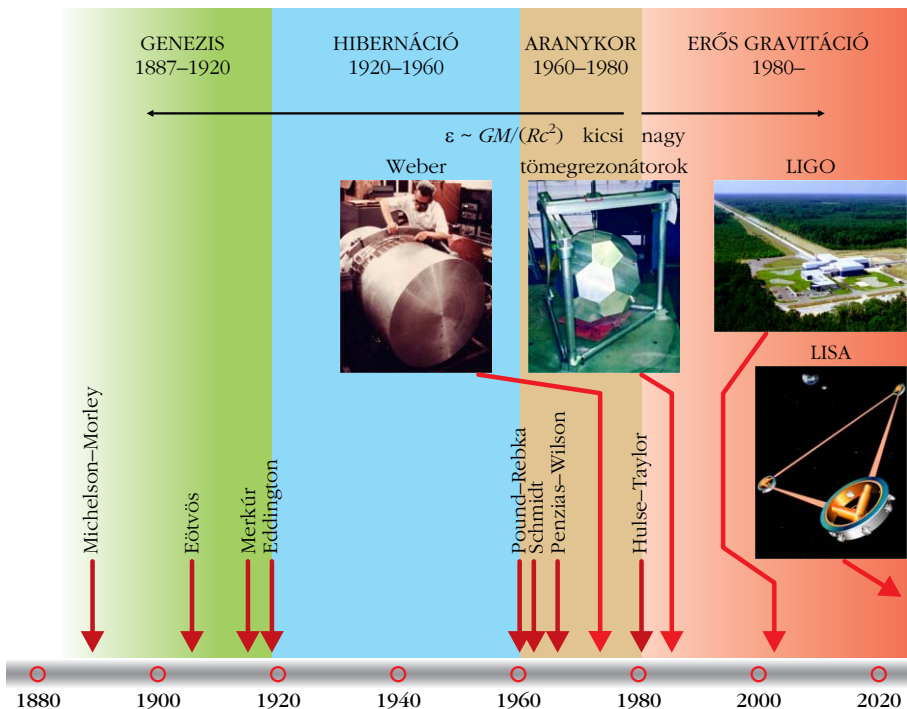


Az elmélet képezi a kozmológia standard elmélete, az ősrobbanás-elmélet alapját is.

A fent említett jelenségek közül számosat már elfogadottnak tekintünk, de például a gravitációs hullámok felfedezése még várat magára. Tekintsük itt át a kísérletileg már igazolt bizonyítékokat, állítsuk azokat időrendi sorrendbe és fizikai rendszerbe, hogy megértsük, milyen valószínűséggel és mikor várható a jövőben egyéb kísérleti bizonyíték. A szakirodalom az elmúlt majdnem egy évszázadot a kísérleti bizonyítékok szempontjából négy elkülöníthető szakaszra osztja: a „genezis” korszakára (1887–1920), a „hibernáció” korára (1920–1960), az „aranykorra” (1960–1980) és az „erős gravitáció” korára, amely 1980 óta napjainkban is tart. Ezt illusztrálандó két tablót is készítettünk (1. és 2. ábra). Az 1. ábrán a genezis és az aranykor néhány kiválasztott fontos mérése van feltüntetve, a 2. ábrán pedig az erős gravitáció korának mérföldkövei láthatók.

Albert Michelson és Edward Morley híres kísérlete 1887-ben arra a megállapításra vezetett, hogy a fény sebessége, függetlenül a mérőeszköz esetleges sebességétől, állandó. A korábbi hiedelemnek megfelelően kellett léteznie valamiféle „éternek”, amelyben a fény terjed. Ha létezett volna ilyen közeg, akkor a közegben állandó lett volna a fény terjedési sebessége. Ehhez az éterhez képest a Föld mozog, és ezért a Földön elhelyezett laboratóriumban ki kellett volna mutatni a fény sebességének irányfüggőségét. Mi-

2. ábra. Az erős gravitáció korában olyan, az általános relativitáselmélet által megjósolt jelenségek nyomát keressük, amelyek esetén a gravitáció erősségére jellemző dimenziótlan $\epsilon = GM/(Rc^2)$ paraméter nagyságrendekkel nagyobb, mint az 1. ábrán felsorolt jelenségek esetén. Bár Joseph Weber gondolata korszakalkotó volt, kísérleti berendezése és mérései nem jártak sikerrel. Korábban tömegrezonátorokkal, ma már inkább lézer-interferométerekkel (például LIGO) keressük a gravitációs hullámok nyomát. Bízva abban, hogy a berendezés zöld utat kap, a LISA (Laser Interferometer Space Antenna) valamilyen formában (eLISA?) egy évtized múlva már az űrből végez majd (ugyan-csak lézer-interferometrikus alapon) megfigyeléseket.



chelson és Morley a rólu elnevezett interferométert használta a kísérlet eszközüül. Minden próbálkozásuk ellenére a jelenség kimutathatatlan maradt. Bár még az 1920-as években is folyt a vita arról, hogy pontosítható-e a kísérlet és valóban kimutathatatlan-e a jelenség, addigra általánosan elfogadottá vált, hogy a speciális relativitáselmélet ad magyarázatot a kísérlet sikertelenségére.

A speciális relativitáselmélet szerint ugyanis a fény sebessége minden inerciarendszerből megfigyelve azonos, függetlenül attól, hogy fény forrása mozog-e valamilyen sebességgel. Michelson és Morley kísérlete, illetve annak negatív eredménye alapvetően hozzájárult a speciális relativitáselmélet megszületéséhez. Bár a speciális elmélet csak inerciarendszerekre igaz, és a gravitációt sem tartalmazza, ennek ellenére szükséges lépcső volt az általános relativitáselmélet 10 évvel később történő megalkotásához. Sőt, mint azt később látni fogjuk, Michelson és Morley eszköze a mai napig meghatározó kísérleti eszköz, és a lézer-interferométeres gravitációs hullám-detektorok ma is az általuk kitalált elvre épülnek.

A speciális relativitáselméletől az általános relativitáselméletig vezető út egy másik fontos állomása volt az ekvivalenciaelv megértése. Ha valamely test gravitációs erőterében egy megfigyelő egyenletesen gyorsuló mozgást végez, akkor ugyanazt a fizikát fogja tapasztalni, mint egy másik megfigyelő, távol a rá gravitációs erőt kifejtő tömegektől. Ezek az inerciarendszerben lévő (szabadon

eső vagy mozdulatlan) megfigyelők *ekvivalensek*. Mindebből következik egy másik interpretáció. Ha a gravitáció hatása „eltüntethető” azáltal, hogy a koordináta-rendszer szabadesést végez, azaz gyorsul, akkor ezt megfordítva, gyorsulással előidézhető az a fajta hatás, amit a gravitációs vonzóerő hozna létre, még akkor is, ha nincs a közelben tömeggel rendelkező test.

Azt, hogy a fenti hipotézis igaz, Eötvös Loránd segítette megmutatni a róla elnevezett torziós ingával. Eötvös megmutatta, hogy a gravitációs és a tehetetlen (inerciális) tömeg azonos: az a fajta tömeg, amelyet a newtoni egyenletekben a gravitációs erőhatás kiszámításakor használnunk kell, precízen azonos azzal a tömeggel, amit a dinamikát leíró egyenletekben használnunk a gyorsulással megszorozva az erőt kiszámolandó. Eötvös egy olyan ingát szerkesztett, amelyen egy torziós szálon egy

mérleg függött. A mérleg két karján tömegeket helyezt el, különböző magasságokban. A torziós szál elfordulásából, az az által kifejtett erő meghatározásából kiindulva kiszámítható a Föld által „mozgatott” rendszerben a tehetetlen és a gravitációs tömeg.

Megjegyzendő, hogy az 1. ábrán a Michelson–Morley- és az Eötvös-kísérletek (ezek sokáig folytak, de 1905-ben már kellően pontosak voltak, ezért az időskálán ennél az évszámnál tüntettük fel őket) időben megelőzik magát az általános relativitáselméletet. Nem feltétlenül kísérleti bizonyítékok ezek, inkább elengedhetetlen kísérleti előzmények.

A genesis korszakához tartozó, az ábrán szereplő másik két kísérlet sem sokkal tehető 1915 utánra. Sőt, az első, a Merkúr perihélium-elfordulása már az általános relativitáselmélet megszületése előtt ismert volt mint kísérleti tény, csak magyarázat nem volt rá. Az általános relativitáselmélet ismeretében azonnal megérthető a jelenség, ezért az időskálán az általános relativitáselmélet megjelenésének időpontjánál tüntettük fel. A newtoni fizika szerint a Merkúr pályájának olyan ellipszisnek kell lennie, amelynek egyik fókuszpontjában a Nap van, és a pálya mozdulatlan irányú. Ez utóbbi kijelentés úgy fogalmazható, hogy a pálya Naphoz legközelebbi pontja (a perihélium) mozdulatlan helyzetű. Természetesen nagyobb bolygók a pályát precesszióra készítetik, tehát a perihélium elmozdul, de ez ismert, számolható jelenség. A nagyobb bolygók hatását figyelembe véve is azt mutatták a csillagászati mérések, hogy a Merkúr perihéliumának még ismeretlen okból is van elmozdulása.

Einstein megmutatta, hogy ez az addig ismeretlen perihélium-elmozdulás az általános relativitáselmélet segítségével számolható és érthető. Az általános relativitáselmélet és a newtoni fizika predikciói ott különböznek leginkább, ahol a gravitációs erőter, azaz a tér görbülete nagy. A Nap körüli görbült tér mérhetően a legbelső bolygó, a Merkúr pályáját befolyásolja.

Ma, a 21. század elején a gravitációs lencsehatás jól ismert, sokszor és precízen megfigyelt jelenség. Egy évszázada azonban kimutatása technikailag nehéz volt. A legerősebb elhajlást azon csillag fénye szenved el, amelyik közvetlenül a Nap felszíné mentén ér a szemünkbe. Ez csak teljes napfogyatkozás alkalmával figyelhető meg. Eltérülést a newtoni elmélet is jósol, de pontosan feleakkorát, mint amekkora az általános relativitáselmélet szerint adódik. Az elmélet közzétételét nem sokkal követte egy teljes napfogyatkozás, 1919 májusában, amely Dél-Amerikából és Afrikából is megfigyelhető volt. Az angol királyi csillagász, *Arthur Stanley Eddington* is elvégezte a méréseket, és az általános relativitáselmélet által jósolt értéket kapta. A mérés akkoriban a legfontosabb kísérleti bizonyíték volt, és ezt 40 évig nem is követte más hasonló eredmény.

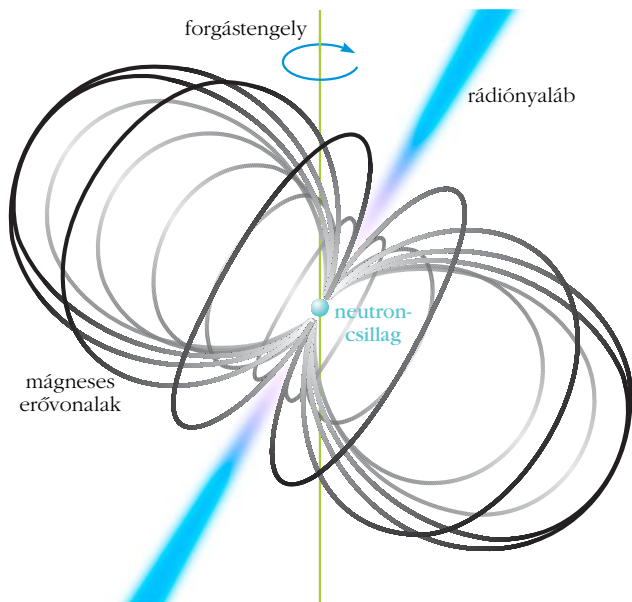
A hibernáció kora 1960-ban ért véget. A *Robert Pound* és *Glen Rebka* által végzett kísérlet, a gravitációs vöröseltolódás kimutatása az utolsó klasszikus ellenőrzésnek tekinthető (a következő mérések már nem laboratóriumban folytak, hanem asztrofizikai

megfigyelések eredményei). A gravitációs vöröseltolódás jelensége annak köszönhető, hogy a foton összes (természetesen megmaradó) energiája a $h\nu$ energiából és az E_{pot} potenciális energiából tevődik össze. Ha a foton elhagy egy mély potenciálgödrt, akkor attól nagy távolságra frekvenciája, ν' , csökken ($h\nu' = h\nu - |E_{\text{pot}}|$), hullámhossza nő, azaz a vörös felé tolódik. Ez igen kis mértékű jelenség, a Nap felszínét elhagyó foton esetén 10^{-6} nagyságrendű. Sokkal nehezebb laboratóriumi körülmények között a Föld felszínén kimutatni.

Pound és Rebka azért járt sikerrel, mert az 1957-ben felfedezett Mössbauer-effektus segítségével a korábbiaknál pontosabb mérést tudott tervezni. A Mössbauer-effektus lényege a következő: ha egy gerjesztett állapotú atom fotont bocsát ki, akkor az atomi átmenethez tartozó energiát veszít. Ezt az energiát azonban nemcsak a foton viszi el, hanem a visszalökődő atom is kap belőle. Ezért a távozó foton energiája nem pontosan akkora lesz, amely az adott atomi átmenethez tartozik, és emiatt azonos atomok ugyanezt a fotont nem tudják újra elnyelni. Ha azonban a foton kibocsátása szilárdtestben történik, akkor a visszalökődésben a teljes szilárd atomi rács vesz részt, amely nagy tömeget képvisel, és ezért a visszalökődéshez tartozó energiahányad zérus (az esetek azon nem elhanyagolható százalékában, amikor fononok sem keletkeznek). Ekkor a kibocsátott foton energiája pontosan az atomi átmenetnek megfelelő, ismert, és azonos atomok el is tudják nyelni (ez a rezonancia a Mössbauer-spektroszkópia alapja).

Pound és Rebka egy mindössze körülbelül 20 méteres távolságon (a Harvard Egyetem egyik épületének alagsora és padlása között) sikerrel mutatta ki azt, hogy az alagsorban kibocsátott foton a Föld gravitációs terében a 20 méter emelkedés után pontosan a gravitációs vöröseltolódásból számolt mennyiségű energiát veszít (a kísérlet végrehajtása során a detektor atomjait egy hangszóró tekercsével rezgették, és ez az extra kinetikus energia akkor, amikor a rezonancia bekövetkezett, akkora volt, mint a 20 méter magasság megtétele miatt előállt helyzetienergia-különbség).

A kvazárok felfedezése *Maarten Schmidt* nevéhez fűződik. 1963-ban rádióforrások tanulmányozása közben ismerte fel, hogy ezek a kvázi-csillagszerű, az égen pontszerű források nagyon nagy távolságban vannak, vöröseltolódásuk jelentős. Ha egy pontszerű forrás fényesnek látszik és távoli is egyszerre, akkor az objektum nemcsak kompakt, de luminozitása hatalmas. Mivel ismerünk változó fényességű kvazárokat is, amelyek fénye egy hónap, de néha egy hét alatt változik, ezért a kauzalitást feltételezve a méretére nagyságrendi felső becslés tehető: $R < t_{\text{per}}c$, ahol t_{per} a fényességváltozás periódusideje. Ha az objektum magreakciók során a belsejében termeli az energiát, akkor Eddington szerint ezen energiatermelésnek – adott tömegű objektum esetén – van egy, a tömegtől függő felső határa. Ha a luminozitás ezt az úgynevezett Eddington-határt meghaladná, akkor az objektumban a tömegtől származó



3. ábra. Pulsár. A mágneses erővonalak mentén kibocsátott rádiónyaláb nem feltétlenül esik egybe a forgástengellyel. A pulsár gyors pörgése következtében a nyaláb az égen egy keskeny tartományon végigsöpör.

gravitáció nem tudna ellentartani a fotonok nyomásának, az objektum megsemmisülne. A kvazárok számolt maximális mérete és az abból származó lehetséges maximális tömeg, az Eddington-határt figyelembe véve, nem teszi lehetővé, hogy akkora luminozitása legyen, mint amekkorát mérünk.

Nyilvánvaló tehát, hogy a kvazárok *nem* magreakciók során termelik energiájukat. A legelfogadottabb elmélet szerint egy központi fekete lyukba befelé áramló, energiát veszítő gázból származhat a kvazár luminozitása. Ebben a folyamatban elképzelhető, hogy a beáramló gáz Mc^2 energiájának akár 10 százalékat is fotonok formájában sugározza ki (a proton-neutron átalakulás során az M tömeg mindössze 7 ezreléke bocsátható ki fény formájában). Így a kvazárok pusztá léte az általános relativitáselmélet (kísérleti) bizonyítékának tekinthető.

Az ősröbbanás elméletének három kísérleti alappilléret szoktuk emlegetni. Ezek a 20. században végrehajtott kísérletek tették elfogadottá az elméletet. Időrendi sorrendben ezek a Hubble-féle tágulás, azaz a Hubble-törvény felfedezése (1930 tájékán); a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezése (Arno Penzias és Robert Wilson, 1965); illetve a könnyű elemek előfordulási gyakoriságának precíz megmérése (pontos évszám nélkül). Az, hogy az Univerzum

tágul, *Edwin Hubble* óta ismert dolog. Arra azonban, hogy ez valóban nagy forróságú, sűrűségű és nyomású állapotban volt 13,7 milliárd éve, a kozmikus háttérsugárzás léte enged következtetni. Az ősröbbanás dinamikáját, illetve az Univerzum metrikáját az általános relativitáselmélettel le lehet írni, és az így megjósolt, a korai Univerzumból származó háttérsugárzás felfedezése egyúttal az elmélet helyességét is alátámasztja.

Végül a Hulse–Taylor-pulsár az a jelentős kísérleti bizonyíték, amely nem csak az általános relativitáselmélet egyik kísérleti bizonyítéka, de pontosan az a bizonyíték, amely indirekt módon utal arra, hogy gravitációs hullámoknak létezniük kell. Jelen cikksorozat szempontjából ez a bizonyíték nyilvánvalóan fontosabb a többinél.

A pulsárok gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyek egy nyaláb mentén erős rádióhullámokat bocsátanak ki. A nyaláb irányát a neutroncsillag mágneses tere határozza meg, és ez nem feltétlenül esik egybe a forgástengellyel. Így a keskeny rádiónyaláb a forgás sebességével végigsöpör az égbolt egy meghatározott részén (3. ábra). Ha földi rádióantennáink egy ilyen, a pulsár által végigsöpört tartományra néznek, akkor a pulsár nagy frekvenciával kattogó, „pulsáló” jelet ad a detektorban. Ennek frekvenciája, azaz a pulsár rotációs periódusa a 10^{-3} – 10 s nagyságrendbe esik.

Russell Hulse és *Joseph Taylor* egy kettős rendszerben lévő pulsárt fedezett fel 1974-ben az Arecibo (Puerto Rico) rádiótávcsővel. A pulsár periódusideje 0,59 ms volt. A pulzáló jel érkezési ideje oszcillált, 7,75 óra periódusidővel. Ez arra engedett következtetni, hogy a pulsár távolsága periodikusan változik, azaz a pulsár egy kettős rendszer része. A pályamozgás rövid periódusideje arra utal, hogy a kettős másik tagja is kompakt objektum, feltehetően neutroncsillag. 10 évnyi pontos megfigyelés után Hulse és Taylor megállapította, hogy a pályamozgás periódusideje csökken. Ez a csökkenés évente mindössze 76 mikromásodperc, de kimutatható. Csakis annak köszönhető, hogy a két neutroncsillag pályája szűkül, egymás felé közelednek. Az így felszabaduló energiát minden bizonnyal gravitációs hullámok formájában bocsátják ki. Einstein elmélete alapján kiszámolható, hogy mi a pályabomlás időfüggése. A Hulse–Taylor-kettőspulsár megfigyelése az elmúlt évtizedek során ezt a jóslatot alátámasztotta. Ezzel nemcsak az elmélet kísérleti bizonyítékát szolgáltatta, de mindmáig a legkézzelfoghatóbb evidencia arra nézve, hogy **gravitációs hullámoknak lenniük kell...**



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**

