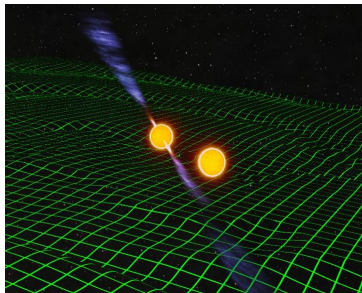


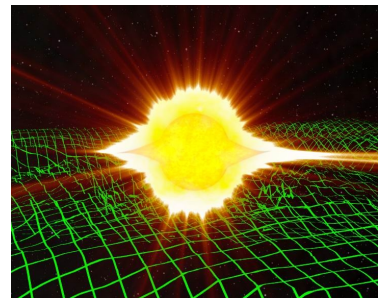
Az asztrofizika új dimenziója: a gravitációs hullámok kutatása

A gravitációs mező változása hullámok kibocsátásával jár, ami a téridő rezgéseként fogható fel és fénysebességgel terjed. A gravitációs hullámok természete lényegesen eltér a jól ismert elektromágneses hullámokétól - pl. a rádió-, ultraibolya-, látható, infravörös, röntgen-, illetve gammatartománytól. Ugyanis, míg azok a molekulákból, atomokból illetve elektronokból származnak, és a csillagászati objektumok fizikai paramétereire - pl. hőmérséklet, radiális sebesség, kémiai összetétel... - engednek következtetni, a gravitációs hullámok a tömegükhöz képest kis méretű, azaz rendkívül sűrű objektumokról - amilyenek a fehér törpék, neutroncsillagok, kvarkcsillagok, fekete lyukak, szupernóvák, aktív galaxismagok közepei... szóval sok olyan objektum, ami az asztrofizikát izgalmassá teszi - hordoznak információt. És persze az is fontos érvet jelent kutatásuk mellett, hogy míg az elektromágneses hullámok ki vannak téve a galaxisközi térben lévő diffúz por- és gázfelhők elnyelésének, a gravitációs hullámok esetében ilyen eshetőség ki van zárva.

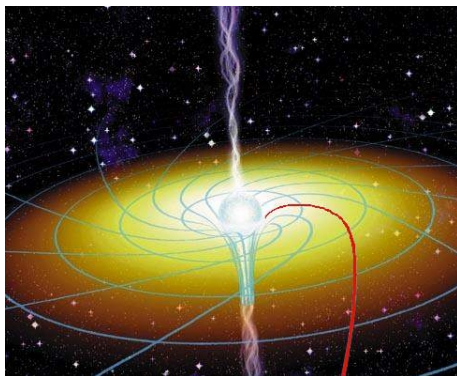
A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOK EREDETE ÉS A LIGO



Olyan események során alakulnak ki, mint a kettős neutroncsillagok impulzusmomentum-vesztése miatti egymásba spirálozódása, majd ütközése - pl. a Hulse-Taylor pulzár (PSR 1913 + 16) is ilyen, amiért 1993-ban kapott Nobel-díjat



Russel Hulse és Joseph Taylor. Az általuk tanulmányozott rendszer két komponense a Föld - Hold távolsággal közel azonos méretű pályán kering. Fekete lyukak ütközése (pl. galaxisok ütközésekor a központi fekete lyukak kölcsönhatása) és szupernóvák robbanása során is ugyanígy gravitációs sugárzást várhatunk, illetve az Univerzum keletkezését követő első nanoszekundumok (az infláció) alatt lezajlott anyagmozgások során is jelentős gravitációs sugárzás keletkezhetett - ennek nyomai a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás fluktuációiban is megmutatkoznak (ami egyébként az asztrofizika egy másik problémájának, a galaxisok keletkezésének kulcsa is lehet).

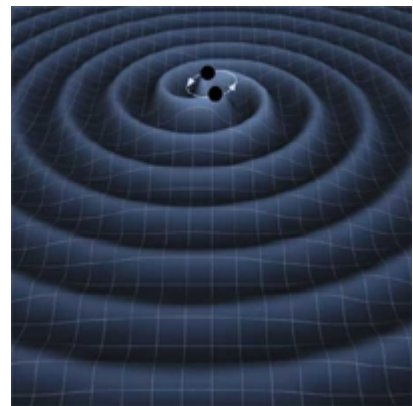


Kip Thorne asztrofizikus saját kutatási területének, a fekete lyukak létezésének kérdése körül folytatott vitának egy újabb alátámasztását várja a gravitációs hullámok detektálásától. A fekete lyukak - definíciójuk alapján, miszerint van egy olyan felület (eseményhorizont), ami a fekete lyuk körül helyezkedik el, és ezen a felületen a fénysebességgel egyezik a szökési sebesség - közvetlenül nem megismerhető objektumok, hiszen az eseményhorizont által határolt térrészről nem juthat ki semmilyen

elektromágneses sugárzás, ami információt szolgáltatna a fekete lyuk belsejében uralkodó szélsőséges körülményekről. Éppen ezért a fekete lyukak

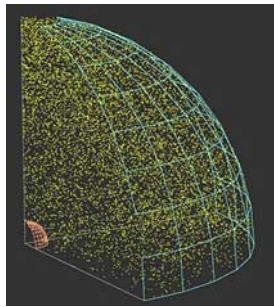
kutatásának területe jelenleg elméleti fizikusok számításaiból és szuperszámítógépes szimulációkból áll - tehát még van mit pontosítani rajta. Thorne azonban optimista: a fekete lyukakról eddig megszerzett ismeretek hatványozódását várja az új gravitációshullám-detektoroktól, amikkel „rövid időn belül fel fogjuk térképezni a fekete lyukakat és a fekete lyukak összeütközésének szimfóniáját: olyan hangok ezek, melyek tömérdek információt szolgáltatnak a görbült téridő viselkedéséről, amikor azt heves rengések érik. A szuperszámítógépes szimuláció lemásolja majd ezeket a szimfóniákat, elárulja jelentésüket, és így a fekete lyukak aprólékos kísérleti vizsgálódások tárgyaivá válhatnak.”

A gravitációs hullámok három, jól elkülöníthető csoportját különböztethetjük meg. A szoros kettős rendszerek esetén, amelyek gravitációs sugárzása hosszú ideig (pár 10 - pár 100 millió év) közelítőleg azonos rezgésszámú marad, **periodikus gravitációs hullámok**at észlelhetünk. Az ilyen szoros kettősök az életük végén az impulzusmomentum-veszteség miatt - az sugározódik ki gravitációs hullámok formájában! - egymásba spirálozódnak, ekkor azonban a frekvencia már korántsem állandó: egy perccel az ütközés előtt pályájuk mindössze pár száz km-es nagyságú, ami kb. 30 Hz-es frekvenciát jelent. Közvetlenül az ütközés előtt már 1000 Hz körüli a keringési frekvencia. (A már említett Hulse-Taylor pulzár esetén a tudósok számításai minden kétséget kizárhatóan igazolták, hogy az energiaveszteség a gravitációs hullámok energiájával egyezett meg. Ez a rendszer azonban még abban a stádiumban van, amikor még a kialakuló gravitációs hullámok frekvenciája nem érte el azt az értéket, hogy a földi obszervatóriumok is észlelhessék. Ilyen alacsony frekvenciájú hullámok kimutatása még 2011-ig várat magára - ld. LISA). Az ütközés pillanatában **kitörést** érzékelhetünk - ez a gravitációs hullámok 2. típusa, és a szupernóva-robbanások során is hasonló gravitációs hullámok keletkeznek, mint a neutroncsillagok ütközésekor (ahol egyébként egy fekete lyuk születésének folyamatába nyerhetünk bepillantást a gravitációs hullámok észlelésével). A 3. típusba azok a **véletlenszerű gravitációs hullámok** tartoznak, amik az Univerzum létrejötte utáni intenzív mozgások során alakultak ki.



Az új évezredben remélhetőleg lehetőség nyílik arra is, hogy ezt az eddig szinte csak elméleti jelenséget kísérletileg is kimutathassák. Több projekt célja a gravitációs hullámok igazolása. Az egyik a **LIGO** (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Gary Sanders - a LIGO vezetője - szavait idézve: „Ez egy rendkívül izgalmas és csábító lehetőség - lehetőség, hogy új ablak nyíljon az Univerzumra.”

A LIGO - a Kaliforniai és a Massachusettsi Műszaki Egyetem fejlesztése - amely 2002 augusztusa óta működik, két interferométer-rendszerből áll. Az egyik a Washington állambeli Hanfordban, míg a másik Louisiana állambeli Livingstonban. Mindkét elrendezés 2, egymásra merőleges csőből áll, amelyek belsejében tökéletes vákuumot hoztak létre, illetve lézersugarak segítségével próbálják érzékelni a gravitációs hullámokat. Az elv a következő: a 4-4 km-es csövekben terjedő lézersugarak eredetileg azonos hosszúságú utat tesznek meg, tehát a detektort elérve pont ellenkező fázisban vannak, így kioltják egymást. Ha a műszer gravitációs hullámot érzékel, akkor az egyik lézersugár megnyúlik, a másik pedig összenyomódik - egy proton szélességével azonos nagyságrendű mértékben. Ennek hatására a lézersugarak a detektort elérve már nem oltják ki egymást, hanem összeadódnak, vagyis az interferencia jelensége áll fenn. Több mint 30 ezer ellenőrző rendszer működik, amelyek folyamatosan korrigálják a tükrök helyzetét, illetve a lézersugarakat a hullámhossz töredékével a 4 km hosszú karok teljes hosszában. Az újabb tervek között szerepel a LIGO eddigi érzékenységének egy nagyságrenddel történő javítása. A projekt - az ún. „Advanced LIGO”, vagyis „Továbbfejlesztett LIGO” észlelései 2009-ben kezdődnek. Az Univerzum eddigi legtávolabbi - legrégebbi - hangjai, amiket felfogtunk, a WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) űrszondának a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzásról készített - és annak fluktuációit, vagyis anizotrop eloszlását bizonyító - térképe, és az Ősrobbanást követő 400 000 éves időtartamba nyúlik vissza. A LIGO fejlesztői ezzel az előrelépéssel az Ősrobbanást követő 10^{-35} másodpercig akarnak visszamenni a gravitációs hullámok észlelése által, újabb kozmikus távolságrekord megdöntését megcélozva.



A következő táblázat a LIGO jelenlegi és továbbfejlesztett változatát hasonlítja össze.

	LIGO	Advanced LIGO
Szupernóva-robbanás során keletkező gravitációs hullámok	A Tejútrendszeren belül képes érzékelni. 100 év alatt kb. 1-3 ilyen esemény detektálása várható.	60 millió fényéves környezetünkben érzékelni. 2-3 esemény detektálása várható évente.
Két fekete lyuk ütközése	A Föld 300 millió fényéves környezetében érzékelheti. Az esemény gyakorisága az évi egytől az 1000 év/1 eseményig lehetséges.	6 milliárd fényév sugarú környezetünkben képes érzékelni. Gyakorisága a napi 10 és az évi tíz között változik.
Két neutroncsillag ütközése	60 millió fényév távolságig érzékelni. 10 évente egy, de lehet, hogy 10 ezer évente várható egy ilyen esemény kimutatása.	1,5 milliárd fényév sugarú környezetünkben várhatunk észleléseket. Gyakorisága napi egytől évi egyig terjed.
Neutroncsillag és fekete lyuk ütközése	300 millió fényév sugarú környezetünkben érzékelhető a LIGO-val. 10 évente 1, de az is	3 milliárd fényév távolságig érzékelheti. Gyakorisága napi 10 és évi egy között változik.

	lehet, hogy 10 ezer évente várható ilyen esemény gravitációs sugárzásának detektálása.	
--	----------------------------------------------------------------------------------------	--

Hogy mi a céljuk a kutatóknak?

„Az Einstein iránti tiszteletünk. - mondja Rainer Weiss, a MIT kutatója, az egyik alapító tag - Ez az egyetlen ok, amiért itt vagyunk. Ha elmész egy kongresszusra, és azzal állsz elő, hogy Heisenberg határozatlansági relációja nem tökéletes, akkor reménytelen útra léptél... De ha azt mondd, hogy mérsz valamit, amivel majd megcáfолhatod vagy alátámaszthatod Einstein elméletét, akkor minden ajtó feltárul előtted.”

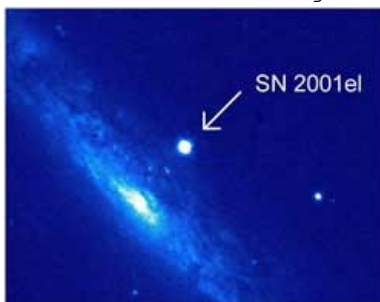
HARC A RELATIVISZTIKUS EFFEKTUS KIMUTATÁSÁÉRT...

De hogy jön a képbe Einstein? A gravitációs hullámok létezését már 1915-ben megjósolta az általános relativitáselméletből, ám ekkor Einstein még maga sem gondolta volna, hogy valaha is észlelhetjük majd a jelenséget. 1916-ban megszületett a híres Einstein-féle **kvadrupólformula** is, miszerint a mozgó tömeg nyomatékának változásából származik a gravitációs teljesítmény, vagyis egy gyorsuló tömeg - rendkívül kis hullámhosszú, ugyanakkor nagy energiasűrűségű - gravitációs hullámokat bocsát ki, melyek fénysebességgel terjednek.

Az első kísérlet a kimutatásukra az 1960-as évek elején történt, amikor Joseph Weber amerikai fizikus egy szupernóva-robbanás „visszhangjait” szerette volna felfogni egy 3,3 tonnás alumíniumhengerből és piezoelektromos kristály érzékelőkből álló kísérleti berendezésével. Azt várta, hogy a szupernóva-robbanás során keletkezett gravitációs sugárzás hatására az alumíniumtömb rezgésbe jön - számításai szerint kb. 1660 Hz frekvenciával.

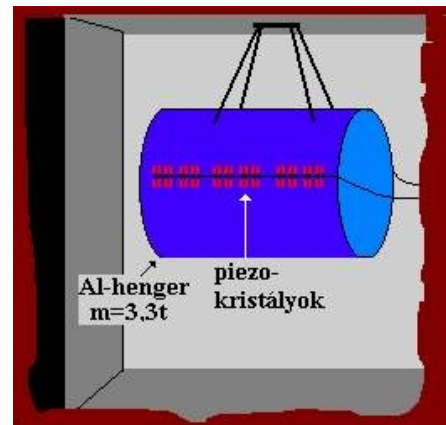
Az elrendezést vákuumban helyezte el, és a koincidencia jelensége miatt két külön műszert épített, hogy így azokat a jeleket érzékelhesse, amelyeket mindkét berendezés detektorai észlelik. A műszert kellőképpen lehűtötte, így kizárt volt, hogy a rezgések a saját részecskéinek hőmozgásából eredjenek, illetve a vákuum miatt a levegő részecskéi sem okozhatták. Ám a kísérlet sikertelen volt: az összes rezgés, amit érzékelt, csupán a Nap mágneses viharainak következtében alakult ki...

Ebben persze még semmi megdöbentő nincs: egy Tejútrendszerbeli szupernóva robbanása keltette gravitációs hullámok kimutatását már a 90-es évek elején



lehetővé tette ugyan a technika, ám a legutóbb 1604-ben robbant szupernóva a galaxisunkban - ez a híres Kepler-féle szupernóva. Az extragalaxisok esetében egészen más a helyzet, évente kb. 100-200 szupernóvát fedeznek fel (2004-ben pl. az NGC 2403 és az NGC 6946 galaxisokban volt megfigyelhető az SN 4004dj ill. SN 2004et jelű szupernóva - mindkettő kellően fényes volt a nagyon alapos tanulmányozáshoz.) Ám ezek esetében kb. ezerszer gyengébb gravitációs hullámokat várhatunk, mintha az esemény a galaxisunkban történt volna...

Weber után több kutató ill. kutatócsoport is megpróbált gravitációs hullámok detektálására alkalmas műszereket fejleszteni, így Robert Forward elkészítette kis, egy asztalon is elférő műszerének prototípusát 1972-ben a



Hughes Laboratóriumban, Kaliforniában. Több interferométert fejlesztettek Skóciában és Németországban is, melyek egyre hosszabb karokkal voltak felszerelve, tehát egyre érzékenyebbek voltak. Az áttörés végül 1979-ben következett be a Caltech és a skót tudós, Ronald Drever által tervezett, 40-es karú interferométerrel, mely a korában a legmodernebb volt és így a LIGO (és a többi napjainkban használt gravitációshullám-obszervatórium) méltó elődjének tekinthető.

A VIRGO-PROJEKT

A LIGO európai változata a VIRGO 2, 3 méteres, 1,2 m átmérőjű karjai szintén ortogonális rendszert alkotnak valahol Pisa mellett. A Michelson-típusú interferométer az EGO (*European Gravitational Observatory*) részeként működik, francia-olasz együttműködésben jött létre, működési elve a LIGO-éval egyezik. A 6-10 kHz közötti frekvenciatartományban érzékeny, ami elegendő ahhoz, hogy a kompakt kettős rendszerekből, illetve a közeli -



Virgo-halmazból származó - szupernóva-robbanások gravitációs sugárzását detektálja. Innen ered a neve is. Az európai keretek között legtökéletesebben előállított vákuum fenntartásához a csövekben a nyomás 10 mbar körül van, és a hőmérséklet 150 fok C körüli - mindezek fenntartásához pedig 1 MW teljesítmény szükséges! Nem elhanyagolható feladat a műszerek stabilizálása sem, hiszen a távoli objektumokról érkező gyenge gravitációs hullámoknál sokkal erősebb a szeizmikus hullámok hatása.

A GEO-600 (HANNOVER)

Bár a „lézeralagutak” ez esetben mindössze 600 métereseek, az angol-német



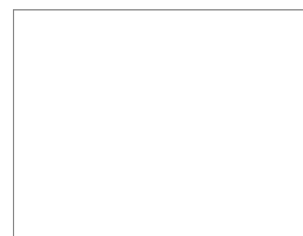
építésű GEO-600 érzékenysége összemérhető a LIGO-éval is. 2001 óta működik Hannover mellett, naponta kb. 50 GB adat keletkezik, amit - az együttműködés révén - összehasonlíthatnak a LIGO méréseivel, illetve közvetlenül Birminghamben, Hannoverben és Cardiffban dolgoznak fel az AEI-Golm számítógép-hálózaton belül. Az egyik első mérések közé tartozik egyébként a 2001. nov. 22-i koronakitörés (CME - Coronal Mass Ejection) hatására kialakult geomágneses

vihar észlelése, a műszerhez kapcsolt magnetométerrel.

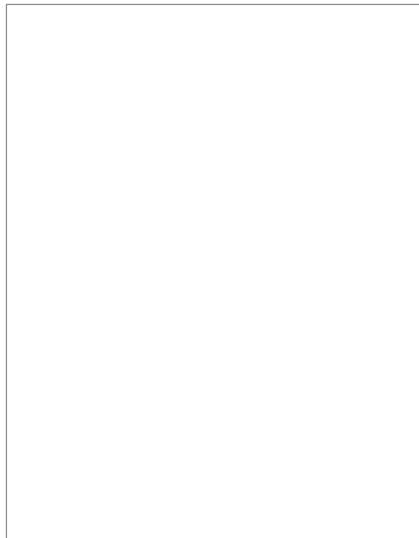
Már az előző detektorok bemutatása alapján is láthatjuk - bár a kép még korántsem teljes, csak a legjelentősebb obszervatóriumok bemutatására törekedtem - hogy valóban dinamikusan fejlődő új területről van szó, amely mind a fizika, mind a csillagászat fejlődését elősegíti, ha egyszer valóban sikerrel járnak a gravitációs hullámok detektálására irányuló kísérletek. Jelenleg a már bemutatott obszervatóriumokon kívül a japán TAMA projekt tűnik ígéretesnek, ugyanakkor további gravitációshullám-obszervatóriumokat is terveznek. A japánok egy második generációs, kriogén (rendkívül alacsony hőmérsékletre hűtött) interferométert terveznek, Ausztráliában is tervekben van véve egy ez irányú kutatási program: az ACIGA (Australian Consortium for Interferometric Gravitational Astronomy).

A NAGY ELŐRELÉPÉS: LISA

Talán nem meglepő, hogy ennek a tudományágnak az előretörő tervei is az űrbe mutatnak. A világűrben

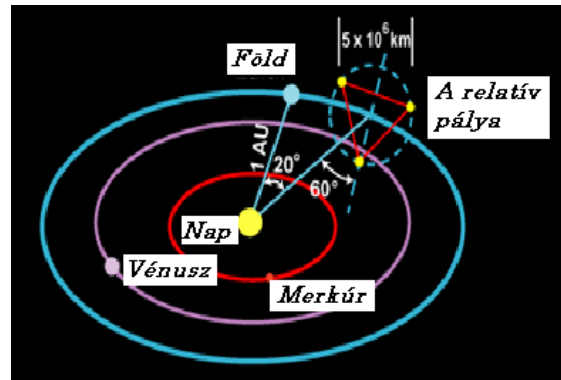


pedig a **LISA (Laser Interferometer Space Antenna)** egyenlő oldalú háromszöget alkotó formációja és 163 GB adat körvonalazódik biztató jövőt sejtetve... A háromszög oldalainak hossza 5 millió km (a Föld - Nap távolság, vagyis egy csillagászati egység - CSE - vagy AU - Astronomical Unit - kb.



150 millió km...), ami azt jelenti, hogy a lézersugaraknak ekkora távolságot kell megtenniük, amíg a detektort eléri. A LISA érzékenysége révén a legalacsonyabb frekvenciájú gravitációs hullámok észlelésére is képes lehet, ilyen a legtávolabbi galaxisokban lévő, nagy tömegű fekete lyukak ütközése, vagy Tejútrendszerünk több ezer - feltételezett - kettős fehér törpéinek egymásba spirálozódása során keletkező sugárzás is. A LISA tervezése a Goddard Űrközpontban történt és a NASA közreműködésével kerülnek majd a modulok pályájukra, amelyen majd a Sugárhajtás Laboratóriumból (Jet Propulsion Laboratory) vezérlik. A tervezett üzembe helyezés időpontja 2011, amelytől számítva 5 éven át működik a LISA, várhatóan közel két nagyságrenddel pontosabb méréseket végezve majd, mint bármely, a LISA-t

megelőző, gravitációs hullámok kimutatására tervezett műszer. Az egyenlő oldalú háromszög középpontja a Föld Nap körüli pályáját követi majd, mégpedig 20 fokkal elmaradva Földünktől. A pozíciójának megválasztásánál nagyban közrejátszott, hogy a Föld gravitációs hatását a lehetőségekhez mérten minimálisra csökkentsék, ugyanakkor ne hátráltassa a kommunikációt a műholdakkal, vagyis az adatok átvitelét. Bár - mint már írtam - sokkal érzékenyebb műszerei nagyobb valószínűséggel észlelik majd a gravitációs hullámokat, mint földi társaik, ám nagyon jól kiegészítik majd egymást: míg a LISA inkább az alacsonyabb frekvenciatarományban érzékeny, a földi bázisú interferométerek - pl. a LIGO - a magasabb frekvenciájú események detektálásának kedvez. Így a LISA a kompakt kettős rendszerekben keletkező gravitációs sugárzást már az ütközés előtt több ezer évvel észlelni fogja, míg a LIGO az ütközést megelőző pillanatokban detektálja majd. (A gravitációs hullámok frekvenciája a komponensek távolságának csökkenésével nő.) A LISA céljai között azonban nemcsak a távoli galaxisokból érkező gyenge gravitációs sugárzás kimutatása, hanem Naprendszerünk bolygói és holdjai gravitációs terének feltérképezése is szerepel, amely majd a belső szerkezet feltérképezésében jelent előrelépést pl. a talaj alatt húzódó vízkészletek és egyéb anyagok eloszlásának tanulmányozásában.



A kocka tehát el van vetve. Hogy valóban siker koronázza-e a tudósok erőfeszítéseit, azt majd a jövő dönti el, mindenesetre, ha csak egy lépéssel is közelebb kerülünk ezen projektek révén az Univerzum titkainak megfejtéséhez, akkor elmondhatjuk, hogy csaknem 100 évvel Einstein híres elméletének születése után annak újabb tételét is kiemeltük az elmélet elvont szférái közül, és az észleléseink a fizika axiómái közé emelték.