

**„Einstein befejezetlen szimfóniája”,
avagy
Az univerzum zenéjének relativisztikus szólamai**

**Szakmai háttéranyag
tudományos ismeretterjesztő film
elkészítéséhez**

**a Magyar Mozgóképfelnevelési Alapítványhoz
benyújtandó pályázathoz**

Pályázó:

Zsupos Zoltán
Duna Televízió

Tudományos szakértő:

Rácz István
a fizikai tudomány kandidátusa,
tudományos főmunkatárs
a KFKI RMKI Elméleti Főosztály,
Gravitációelméleti Osztályának vezetője

1. Bevezetés

A nemzetközi tudományos közösség idén, 2005-ben ünnepli a fizika évét. Miért éppen 2005-ben? Azért, mert éppen 100 éve annak, hogy Einstein az *Annalen der Physik* nevű tekintélyes német fizikai folyóiratban öt olyan írást tett közzé, amelyek közül három külön-külön is korszakalkotó jelentőséggel bír. Ezek közül az elsőben a fényelektromos jelenséget tárgyalja. A részletes indoklásban ez az egyik legfontosabb eredményként van megemlítve, amelynek alapján Einstein 1921-ben elnyerte Nobel-díjat. A második írásban a *speciális relativitás-elmélet* ismertetése található, amely azóta a modern fizika egyik legfontosabb alkotóelemévé vált. A harmadik írásműben Boltzmann statisztikus fizikai vizsgálatainak kiterjesztése által részletes magyarázatát adta a Brown-féle mozgásnak, ezzel közvetett bizonyítékát adva az atomok létezésének. Ezen eredmények alapján érthető, hogy a fizika éve alkalmából Einstein munkássága előtt tiszteleg a világ tudományos közössége. Így a fizika éve kiváló alkalmat biztosít az Einsteinnek köszönhető másik nagy átfogó elmélet, az általános relativitáselmélet, azaz az Einstein-féle gravitációelmélet legújabb, de a hazai nagyközönség számára majdnem teljesen ismeretlen kutatási eredményeinek népszerűsítésére is. Jelen pályázatunkban éppen egy olyan tudományos ismeretterjesztő film elkészítéséhez kérünk támogatást, amelyben az általános relativitáselmélet egyik legizgalmasabb jóslatának, a gravitációs hullámok létezésének bizonyítására irányuló – nemzetközi összefogás keretein belül kifejtett – erőfeszítések és a várható eredményeinek hosszú távú jelentőségét szeretnénk a hazai nagyközönségnek – elsősorban a középiskolás és egyetemista diákságnak – bemutatni.

A gravitációs hullámok létezésének elvi lehetőségét elsőként 1916-ban maga Einstein vettette fel az általa javasolt új gravitáció elmélet keretein belül. A kitartó, évtizedekig tartó elméletei és gyakorlati előkészítő munka ellenére a gravitációs hullámok detektálásának technikai feltételei csak mostanra érték el azt a szintet, hogy új detektorok beindulásától joggal várhatunk sikeres asztrofizikai megfigyeléseket is. A Weber-féle rezonátor típusú detektorok továbbfejlesztett változatainak rendszerét kiegészítve, napjainkra kiépült a sokkal szélesebb spektrumban mérni tudó, lézer-interferometria elvén működő, földi telepítésű gravitációs hullámdetektorok hálózata is. A különféle típusú detektorok az elmúlt években végre hozzáálltak az első igazán tudományosnak nevezhető párhuzamos mérősorozatok végzéséhez. Hatékony és gyors fejlesztő munka tapasztalható az alacsony frekvenciás hullámok megfigyelésére alkalmas, világűrbe telepített gravitációs hullámdetektor 2013-re tervezett beindítása érdekében is. Az összes említett eszköz hosszú távú közös célja nem más, mint a gravitációs hullámok bevonása révén a csillagászati megfigyelési módszerek egy új ágának a kifejlesztése. Filmünkben azt szeretnénk megmutatni, hogy a gravitációs hullám-detektorok miként lehetnek majd segítségünkre a gravitációs hullámforrások által „beszél”, teljesen új nyelv megtanulásában és megértésében, és hogyan készítik elő a majdani *gravitációs hullám csillagászat* megszületését.

Az alábbi háttéranyag megkísérli annak összefoglalását, hogy mi olvasható ki a kérdéses tudományterület gyors fejlődéséből, miért éri meg a költséges és bonyolult kísérleti eszközöket kifejleszteni, és várakozásaink szerint az asztrofizikai jelenségek megfigyeléséhez és azok jobb megértéséhez milyen egyedi módszert kínálnak a gravitációs hullámok. A terveink szerint elkészülő 50 perces tudományos ismeretterjesztő filmünkben ezekre a kérdésekre kívánunk választ adni úgy, hogy az a legszélesebb nagyközönség számára is érthető legyen. A film elsősorban a középiskolai alapszintű fizikai ismeretekkel rendelkező szélesebb réteget megcélözva kísérli meg közelebb hozni a nézőkhöz az Einstein-féle gravitációelmélet egyik legizgalmasabb jóslatának megfigyeléseken keresztül történő ellenőrzésére tett erőfeszítések értelmét és belső izgalmát. Bemutatni a felmerülő technikai kihívásokat és az ezek hatására természetes módon kifejlesztésre kerülő eszközök által biztosított új csillagászati megfigyelési módszerek kialakulásának folyamatát, illetve az emberiség ismereteinek ezek által előidézett bővülésének magával ragadó új lehetőségeit.

Filmünk elkészítésével egyrészt a fizika éve alkalmából Einstein korszakalkotó tudományos munkásságának egyik legjelentősebb alkotását, az általános relativitáselméletet szeretnénk közelebb hozni a nézőkhöz. Másrészt a tudományos gondolkodás módszereinek és értékeinek, közelebről a modern fizikának a társadalom különféle, elkülönültnek gondolt területén megjelenő lehetséges pozitív hatására szeretnénk rámutatni. Az alábbiakban – a teljesség igénye nélkül, és a későbbi folyamatos fejlődésnek teret engedve – igyekszünk felvázolni a filmünkhöz tartozó tudományos háttéranyagot. Ennek mintegy kiegészítéseként, mellékelünk egy forgatókönyv tervezetet, valamint a filmünk elkészítését biztosító költségvetés tervezetét.

2. Történeti háttér

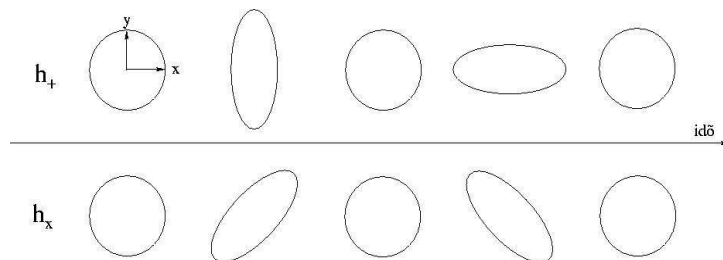
A gravitációs kölcsönhatáshoz kapcsolható sugárzási jelenségek lehetősége meglepően régen megjelent a fizikában. Laplace már 1776-ban felvettette annak gondolatát, hogy a Hold látszólag rendellenes gyorsulása (ennek értékét Edmund Halley számolta ki a középkori Al-Batani és a Ptolemaiosz által még korábban végzett

megfigyelésekre alapozva) megmagyarázható lenne, ha feltennénk, hogy a gravitációs kölcsönhatás véges terjedési sebességgel bír. Poincaré 1908-ban lényegében ugyanennek az ötletnek a felhasználásával kívánta értelmezni a Merkúr perihélium vándorlását. Mindkét effektus valódi és végleges magyarázatát a gravitációs kölcsönhatás Einstein-féle elmélete szolgáltatta. Ennek az elméletnek a sikerei tették a gravitációs hullámok létezésének gondolatát a szakmai közvélemény számára is elfogadhatóvá. Valójában az általános relativitáselmélet megszületését követően nagyon hamar, már 1916-ban megjelent Einstein első dolgozata, amelyben a gravitációs hullámok tulajdonságait vizsgálja. Ebben Einstein rámutatott arra, hogy a gravitációs hullámok keletkezését, valamint az általa elszállított energia mértékét a forrás kvadrupól-momentumának időbeni változásából határozhatjuk meg. Ez megerősítette azt az intuitív elképzelést, hogy ahhoz hasonlóan, ahogyan az elektromágneses sugárzás esetében a töltések gyorsulása vezet az elektromágneses sugárzáshoz, úgy a gravitáció esetében is a forrás tömegeloszlásában bekövetkező gyorsulások felelősek a sugárzási jelenségekért. Amíg azonban az elektromágneses sugárzás legalacsonyabb rendben a dipól-momentum időbeni változásából származik (a monopól sugárzás ellentmondana a töltésmegmaradásnak), a gravitációs hullámok esetében a forrás tömeg-energia kvadrupól eloszlásának időbeni változását tükrözi (hiszen a monopól sugárzás a tömeg, míg a dipól sugárzás az impulzus megmaradásának mondana ellent).

Az első igazán meggyőző, standard csillagászati megfigyelésekkel alátámasztott közvetett bizonyíték a gravitációs hullámok létezésére vonatkozóan a Hulse és Taylor által 1975-ben felfedezett PSR 1913+16 jelű, kettős pulzár viselkedéséből volt származtatható. Ha két csillag egymás körül kering, akkor az általuk meghatározott rendszerben a gravitációs hullámok által elvitt energiaveszteség következtében egyrészt a keringési sugaraknak csökkenniük, míg a keringési frekvenciának növekednie kell. A Hulse-Taylor rendszerben az egyik résztvevő egy pulzár, amely egy természetes órát kínál fel a megfigyelésekhez. Mivel a két résztvevő távolsága csak Napsugárnyi, a sugárzási energiaveszteség már viszonylag rövid (néhány száz tíz éves) időintervallum alatt is nyomon követhető változásokat eredményez a mozgások geometriai méreteiben és a keringési frekvenciában. Így a pulzár által kibocsátott órajel időbeni változásából következtetni lehet a pulzár helyzetében és sebességében beálló változásokra. Az ezek alapján számolható – a gravitációs hullámkeltés által előidézett – energiaveszteség éppen az általános relativitáselmélet formulái alapján megjósolt mértékűnek adódott. Mindezek a következtetések nem válhattak volna lehetővé Hulse és Taylor 1975-ös felfedezése és évtizedekig tartó kitartó megfigyeléseik nélkül. Ezek elismeréseként 1993-ban Hulse és Taylor fizikai Nobel-díjat kaptak.

3. Néhány gondolat a gravitációs hullámok mibenlétéről

A gravitáció Einstein-féle elméletében nincs abszolút gyorsulás (nincs mihez képest abszolút gyorsulni, hiszen a teret és az időt magába ötvöző téridő, mint geometria csak az anyageloszlás által meghatározottan létezik, és fordítva, az anyag mozgása is csak az általa meghatározott, görbült geometriájú téridőben jeleníthető meg). Így csak a relatív gyorsulások, azaz a próbatetek egymáshoz viszonyított ún. ár-apálygyorsulásai bírnak fizikai jelentéssel. A gravitációs hullámok is az ár-apálygyorsulásokon keresztül hatnak kölcsön környezetükkel. Ezek a gyorsulások egy kiterjedt test esetében úgy jelennek meg, hogy azt egy időpillanatban valamely irányban összenyomó, ugyanakkor a rá merőleges irányban széthúzó, továbbá ezen irányok folyamatos változása miatt nyíró erőhatások érik. A gravitációs hullámok korrekt fizikai leírásából ismert az, hogy ezeket a hullámokat a hullámforrástól távol két független polarizációs állapottal, az ún. „+” (pluszos) és a „×” (keresztes) polarizációval jellemezhetünk. Ezeknek a környezetük geometriájának megváltoztatásában kifejtett hatását a következő egyszerű elrendezéssel szemléltethetjük. Először tekintsünk a háromdimenziós tér x - y síkjában egy körvonal mentén elhelyezkedő nyugvó pontszerű részecskéket! Ezen a rendszeren a z -tengely irányából érkező gravitációs síkhullám két polarizációs állapotának hatását az alábbi ábra szerint jeleníthetjük meg.



Mindezeknek megfelelően a gravitációs hullámok leírásában használható alkalmas megfigyelhető mennyiség a tér egy adott helyén egy adott irányban történő váltakozó nyújtását, összenyomását tükröző hullám amplitúdó, $h(t)=\delta L(t)/L$, ahol $\delta L(t)$ az eredetileg egymástól L távolságra lévő tömegpontok távolságának időbeni

megváltozását jelöli. A $h(t)$ mennyiség téridőbeni változására vonatkozó egyenlet a görbült geometriákat jellemző, geodetikus görbék deviációs egyenletéből származtatható. Ennek megfelelően, egy adott helyen a $h(t)$ hullám amplitúdó mért értéke többek között függ az érkező gravitációs hullámot kibocsátó forrás távolságától, valamint a hullámot és a detektort jellemző fő irányok egymáshoz viszonyított elrendezésétől.

A gravitációs sugárzás keltésének és terjedésének tulajdonságai a sok hasonlóság ellenére is alapvetően eltérnek az elektromágneses hullámok megfelelő tulajdonságaitól. Ezen eltérések számbavétele segíthet a detektálásra tett erőfeszítések értelmének, valamint a detektálás során fellépő technikai nehézségek megértésében is:

1. Az elektromágneses hullám nem más, mint az elektromos és mágneses mező változásának terjedése a téridőben. Ezzel szemben a gravitációs hullámok a téridő geometriájában, annak görbültségében fellépő, és ott fénysebességgel terjedő zavarai. Ráadásul az Einstein-elmélet a gravitáció nem lineáris elmélete, ezért nincs olyan precíz eljárás, amely által szétválasztható lenne a görbület gravitációs hullámok alkotta részre, valamint például a Föld, a Nap, a galaxisunk, és a többi égitest által együttesen meghatározott háttérre. Így a gravitációs hullámok nem teljesen jól definiált entitások. Ennek ellenére, a szokásos csillagászati körülmények között úgy gondolhatunk a gravitációs hullámra, mint a görbület azon oszcilláló részére, amelynek karakterisztikus változásának hossza, a $\lambda/2$ fél-hullámhossz, sokkal rövidebb, mint a görbület domináns részének hasonló karakterisztikus változási hossza. Kicsit képszerűen fogalmazva a görbületnek a gravitációs hullámok által képviselt része úgy viszonyul a háttér görbületéhez, mint egy narancs felületén lévő egyenetlenségek görbülete a narancs egészét jellemző gömb görbültségéhez.
2. A jelenleg alkalmazott csillagászati megfigyelési módszerek mindegyike az elektromágneses sugárzások valamely típusának detektálására irányul. Ezeknek egy nagyon fontos közös jellemzője, hogy minden esetben csak az individuális atomok, molekulák által kibocsátott fotonok – ezek jöhetnek pl. egy csillag korona részéből, de a korai univerzum plazma állapotából is – inkoherens szuperpozícióját figyelhetjük meg. Ezzel szemben a gravitációs hullámok a forrásoként szolgáló anyag mozgásának olyan koherens állapotváltozásairól (azaz a folyamat által érintett anyag olyan összehangolt együttes mozgásáról) hordoznak információt, amely pl. egy csillag magjának gravitációs összeomlása során, vagy a téridő görbületében fellépő olyan vibrációiban öltenek testet, amelyek pl. két nagy tömegű fekete lyuk egymás körüli keringése során jön létre.
3. Mivel a gravitációs hullámok keletkezését az anyag koherens együttmozgása jellemzi, maga a keltett hullám is, a lézer fényhez hasonló, koherens tulajdonságokkal bír. Ennek a koherenciának a felhasználása révén az új detektorok észlelési távolsága lényegesen megnövelhető.
4. Az elektromágneses hullámok nagyon erősen kölcsönhatnak azzal a közeggel, amelyen éppen áthaladnak, míg a gravitációs hullámok alig. Ez egyszerű következménye a két kölcsönhatás relatív erősségében testet öltő különbségnek. A gravitációs hullámok viszonylag gyenge kölcsönhatási hajlandóságának egyszerre van áldott és kevésbé örömteli következménye: Egyrészt a gravitációs hullámok lényegében torzulás, azaz abszorpció nélkül juthatnak el a forrástól a detektorokhoz. Ennek köszönhetően a szokásos megfigyelési módszerek számára láthatatlan folyamatokról – pl. két fekete lyuk összeolvadásáról, egy csillag magjában lejátszódó gravitációs összeomlásról, vagy a korai univerzumban lejátszódó dinamikai folyamatokról – is eljuttathatnak hozzánk információt. A kevésbé örömteli következmény az, hogy a gravitációs hullámok nagyon kicsiny hajlandóságot mutatnak a detektorainkkal történő kölcsönhatásra is, minek következtében meglehetősen nagy technikai kihívást jelent a detektálásukra irányuló bármely kísérlet.
5. Az is elmondható, hogy míg az elektromágneses hullámok majdnem mindig olyan térrészből érkeznek, ahol gyenge a gravitáció és a források mozgása lassú, addig a – detektorainkkal elsőként érzékelhető – gravitációs hullámok feltehetőleg olyan dinamikai folyamatok során keletkeznek, amelyekben a gravitációs effektusok különösen erősek, továbbá a résztvevő anyag mozgása is relativisztikus. Éppen ezért ezek a források az elektromágneses észlelési módszerekkel láthatatlanok. Ez azt is jelenti, hogy a gravitációs hullámok olyan, az univerzumban zajló folyamatokról is eljuttathatnak hozzánk információt, amelyek az eddig használatos észlelési eljárások egyikével sem megfigyelhető, így keveset, vagy egyáltalán semmit sem tudunk róluk. Így a várakozások szerint lehetőség lesz a gravitációs hullámok felhasználásával esetleg a kozmológiai rekombináció előtti időszakra is visszatekinteni, ahonnan elektromágneses sugárzás által hordozott információt már biztosan nem kaphatunk.

6. Az elektromágneses megfigyelhető mennyiségek többsége energia-fluxus jellegű, ennek következtében $1/r^2$ -es rendben csengnek le. Ezzel szemben a gravitációs sugárzás alapvető megfigyelhető mennyisége, a h hullám amplitúdó a forrástól mért távolsággal fordítottan arányos, azaz $h \sim 1/r$. Ennek megfelelően a gravitációs hullámdetektorok érzékenységének bármilyen egyszerű javítása az észlelésekkel lefedett tartomány mértékét lényegesen megnöveli. Az érzékenység megduplázása például megkétszerezi az észlelési távolságot, minek köszönhetően a megfigyelésekbe bevonható tartomány térfogata nyolcszorosára változik. Így már a detektorok érzékenységének megduplázása is közel egy nagyságrenddel növeli a megfigyelhető források számát.
7. Az elektromágneses sugárzások tipikus hullámhossza sokkal kisebb, mint a megfigyelt csillagászati objektumok karakterisztikus mérete. Lényegében ez biztosítja azt, hogy az adott égitestekről optikai képet alkothassunk. Ezzel szemben a gravitációs sugárzás hullámhossza általában a forrás méretével megegyező, vagy annál nagyobb. Így a gravitációs hullámok segítségével nem tudunk optikai értelemben vett képet előállítani a forrásokról. Éppen ezért sokkal adekvátabb a gravitációs hullámokra úgy gondolni, mint a hanghullámokra, a kétféle polarizációs állapotra pedig, mint a távolban lejátszódó dinamikai folyamat sztereo összetevőire.
8. Az elektromágneses sugárzások bármilyen fajtájára alapozott csillagászati megfigyelések során az égbolt egy nagyon kicsiny szögtartományából nagyon sok információ összegyűjtésével nyert képet alakítunk ki. Ezzel szemben a gravitációs hullámokra alapozott csillagászati megfigyelések lényegében mindenkor a teljes égboltra, azaz majdnem 4π térszögre vonatkoznak. Ennek megfelelően a gravitációs hullámdetektorok a forrás helyének meghatározásában nem olyan hatékonyak, mint a szokásos csillagászati eszközök, amelyek mindig egy adott megfigyelési pontra irányítottak.

Az a kontraszt, amely a gravitációs hullám-detektorok és a csillagászati távcsövek térszög felbontásának különbségében ölt testet, hasonló ahhoz az eltéréshez, amely a hallásunk és a látásunk szögfelbontását jellemzi. Ezen észrevétel – azzal a kiegészítéssel, hogy nagyfrekvenciás gravitációs hullámok frekvenciatartománya nagyjából megfelel az emberi fül által felfogható hang spektrumának – tovább erősíti azt a vélekedést, hogy a gravitációs hullámok sokkal inkább a hangra, mint fényre utaló jellemzőkkel bírnak. Ebben az értelemben tekinthetünk a gravitációs hullámokból kiolvasható új ismeretekre úgy, mint Einstein befejezetlen szimfóniájának hallgatására. Egy kis túlzással azt is mondhatjuk, hogy a gravitációs hullámok megfigyelésére úgy is gondolhatunk, mint az univerzumban lezajló erősen relativisztikus folyamatok hullámdetektorok segítségével történő „meghallgatására”.

4. A gravitációs hullámok keletkezése

Az elektromágneses tereket leíró Maxwell-elmélet elektromágneses hullámainak kísérleti ellenőrzését Heinrich Hertz végezte el a 1880-as évek vége felé. Hertz a kísérletei elvégzéséhez szükséges hullámforrásokat és detektorokat a labor adta körülményeknek megfelelően fejlesztette ki. A gravitációs és az elektromágneses kölcsönhatás relatív erősségében fennálló hatalmas különbség következtében a szokásos földi méretek nem teszik lehetővé detektálható erősségű gravitációs hullámok keltését. Várakozásaink szerint a detektorok által érzékelt első hullámok asztrofizikai mértékű tömegek, erősen relativisztikus mozgásai során keletkeznek. Ebben talán nincs is semmi meglepő, hiszen maga Newton is a bolygók mozgásának megfigyeléséből leszűrt tapasztalatok felhasználásával származtatta a gravitációs erőtvényt.

Mivel csak egyféle gravitációs töltés létezik, és a források impulzusának is meg kell maradnia a gravitációs kölcsönhatás esetében, nem létezhet sem monopól-, sem pedig dipólsugárzás. Így, amint arra már Einstein is rámutatott, csak a kvadrupól sugárzás lehetséges. A kialakuló hullám amplitúdó h arányos a kvadrupól momentum második idő deriváltjával, és fordítottan arányos a forrástól mért távolsággal, míg a forrás luminozitása, a gravitációs hullámoknak időegységenként átadott összes energia a kvadrupól momentum harmadik időderiváltjának négyzetével arányos.

Ennek megfelelően a legjelentősebb gravitációs hullámforrásoknak a gömbszimmetriától lényegesen eltérő időben gyorsan változó tömegeloszlással kell rendelkezniük. Ilyenek például az olyan kompakt kettős rendszerek, amelyek fehér törpe-, vagy neutron csillag párokból, esetleg két fekete lyukból épülnek fel. Hasonlóan erős hullámforrások lehetnek például a neutron csillagokon belüli olyan koherens tömegáramlások, amelyek a csillagok magjában lejátszódó összeomlási folyamatok során jelennek meg, de a korai univerzum dinamikai folyamatai is, amennyiben azok nem gömbszimmetrikusan zajlottak le.

Az elméleti megfontolások figyelembevételével az adódik, hogy a gravitációs hullámspektrum nagyon széles, a kozmológiai háttér *ultra alacsonyfrekvenciás* $\sim 10^{-17}$ Hz-es részétől egészen a neutron csillagok II-es típusú szupernóva robbanás folyamatában történő kialakulásának $\sim 10^4$ Hz-es *magas frekvenciás* részéig terjed.

A gravitációs hullámok lehetséges asztrofizikai forrásai:

- Kettős neutron csillagok

A rádiócsillagászok megfigyeléseinek köszönhetően már a mi galaxisunkban is ismert három olyan neutron csillagokból álló kettős rendszer, amelyek a Hubble-időn belül, azaz rövidebb, mint 10^8 - 10^9 év alatt összeolvadnak. Ezen megfigyeléseknek az univerzum asztrofizikusok által feltérképezett részére a kettős rendszerek evolúciójára vonatkozó, néhány bizonytalan faktort is tartalmazó jóslatokból következtetve azt várjuk, hogy ott évente néhány száz ilyen összeolvadás történik. Ezek közül az érzékenységi mutatók ismeretében még a következő generációs gravitációs hullámdetektorok is csak kb. 10 évenként figyelhetnek meg egy-egy ilyen összeolvadást.

- Szupernóvák

A gravitációs hullámkeltés szempontjából hosszú ideje ígéretes eseményként vannak számon tartva a II-es típusú szupernóva robbanások. Ezen folyamatok során valamely nagy tömegű forgó csillag magja (a forgás következtében feltehetőleg nem gömbszimmetrikus módon) omlik össze. Az összeomlás erősségét jellemzi az, hogy annak során, a modellektől függően, 1-100 Naptömegnyi anyag áramlik relativisztikus ($v \sim c/5$) sebességgel egy néhány száz, vagy ezer kilométer sugarú kompakt térrészen belül. Az ilyen típusú folyamatokban a gravitációs hullámok keltésére fordított energia mértéke erősen függ attól, mennyire aszimmetrikus maga az összeomlás. Nagyon gyorsan forgó csillagok esetén ez az aszimmetria feltehetőleg elegendően nagy lesz. Ismert az is, hogy évszázadonként kb. csak egyszer fordul elő ilyen típusú összeomlás galaxisonként. Ezért, annak érdekében, hogy elegendő gyakorisággal megfigyelhetőek legyenek az ilyen jellegű hullámforrások, az észlelési távolságnak ebben az esetben is megfelelően nagyoknak kell lennie.

- Pulzárak

Periodikus gravitációs hullámforrásként többek között számításba jöhetnek olyan aszimmetrikus neutron csillagok, amelyekben a forgástengely és a geometriai szimmetria tengelye nem esnek egybe. Ilyen torzulást előidézhethet a csillag belső mágneses terének és a forgástengelynek az eltérő irányítottasága, de egy társ csillag anyagának akréciós árama is. Az ilyen típusú rendszerek mind, mint stabil gravitációs hullám pulzárak sugároznak.

- Fekete lyukak

Kettős fekete lyuk rendszerek összeolvadásának megfigyelésére nagy lehetőséget kínálnak majd a LIGO továbbfejlesztett változata és a LISA detektorok. Utóbbival például két $\sim 10^5$ - 10^6 Naptömegű galaxis magjának összeolvadása során olyan erős jel keletkezését várjuk, hogy azok nagyon nagy távolságból (akár $z \sim 4$ -5 vöröseltolódás mellett) is érzékelhetőek lesznek. Így várakozásaink szerint az univerzum szerkezetének nagyon korai dinamikus folyamatairól is hírt hozhatnak majd a gravitációs hullámok. A kettős fekete lyuk rendszerek összeolvadása kapcsán a becslések nagyon nagy számú, évente ~ 500 esemény előfordulásával számolnak.

- Statisztikus háttér

Léteznie kell egy olyan statisztikus háttérnek, amely különféle, nagy számú és független forrástól származó hullámok együtteséből áll össze. Ennek egy jelentős része származhat a kozmológiai háttér geometria fluktuációinak felerősödéséből. Ezek a hullámok feltehetőleg egy széles spektrumot feszítenek ki.

Érdekes azt is megvizsgálunk, mekkora érzékenységre kell szert tennie a gravitációs hullámdetektoroknak ahhoz, hogy valóban sikeres detektálásokra kerülhessen sor. Vegyünk például egy kettős neutron csillag rendszert. Tegyük fel, hogy a neutron csillagok tömege a Nap tömegének kb. 1,4-szerese, azaz a Chandrasekhar-limit által meghatározott értékűek, valamint azt, hogy a csillagok egymástól mért távolsága ~ 20 km, ebben az esetben a pályafrekvenciájuk kb. 400 Hz. (Igen meglepő, de ezek valóban asztrofizikailag reális adatok!) Végül azzal a feltételezéssel élve, hogy a kettős rendszer a legközelebbi Virgo halmazban található, azaz a tőlünk mért távolsága kb. 15 megaparszek ($\sim 4,5 \cdot 10^{20}$ km). Azt kapjuk, hogy h értéke kb. 10^{-21} nagyságrendű kell, legyen. Ez egy elképesztően kicsiny effektus, amelynek érzékeltetése végett gondoljuk meg, hogy a mérés során a detektorok két, egymástól 1 m távolságra lévő pontjának relatív elmozdulásában egy atommag átmérőjének 1/100 000-ed részének megfelelő változást kell tudnunk kimutatni. Hasonlóan, ha szükséges mérési pontosságot a LIGO típusú gravitációs hullámdetektorok geometriai méreteire hivatkozva szeretnénk érzékelteni, az adódik, hogy a detektor karok minden egyes kilométerén a δL hosszváltozást minimum 10^{-16} cm-es pontossággal kell

tudnunk megmérni. Általában ez az az adat, amelynek hallatán mindenki azt gondolja, a gravitációs hullámok detektálásán dolgozó kollégák ugratnak minket. Hogyan lenne lehetséges egy olyan kicsiny elmozdulás észlelése, amely a látható fény hullámhosszának $1/10^{12}$ -ed részénél is kisebb? Hogyhogy nem teszi a rendszer hőmozgása lehetetlenné az ilyen kicsiny effektus mérését?

5. A gravitációs hullámok detektálásának következményei

A gravitációs hullámkeltési mechanizmusok számbavétele után érdemes végiggondolni azt is, hogy milyen fontos elméleti és gyakorlati következménye lehet a gravitációs hullámok sikeres megfigyelésének.

1. A gravitációs hullámok elméleti leírására az Einstein-féle általános relativitáselméleten kívül más, azóta született elmélet is alkalmas lehetne. A majdani detektálás tapasztalatai direkt és egyértelmű választ adnak arra a kérdésre, hogy az Einstein-féle elmélet valóban minden szempontból alkalmas-e a gravitációs hullámok leírására, vagy esetleg a gravitáció valamely másik relativisztikus elméletét kell segítségül hívnunk. Addig azonban, míg ezzel ellentétes megfigyelési eredmények nézőpontunk megváltoztatására nem kényszerítenek, az Einstein-féle elméletre úgy tekinthetünk, mint a gravitáció fizikai mérésekkel legjobban megerősített elméletére.
2. Például két fekete lyuk egymásba olvadása során keletkező hullámformákat összehasonlítva azokkal, amelyek ugyanezen dinamikai rendszereknek az Einstein-elméleten belüli, numerikus módszerekkel történő leírása során származtathatóak, egy nagyon egyedi, közvetett bizonyítékát kaphatjuk, egyrészt a fekete lyukak létezésének, másrészt az Einstein-elmélet ilyen extrém relativisztikus körülmények közötti helytállóságának, vagy tarthatatlanságának.
3. A gravitációs hullámok detektálása révén olyan erős gravitációs térben lejátszódó és erősen relativisztikus fizikai folyamatok közvetlen megfigyelésére nyílik lehetőség, amely semmilyen más ismert csillagászati módszerrel nem valósítható meg.
4. Például egy távoli szupernóva robbanás folyamatának megfigyelése során az elektromágneses és a gravitációs hullámok megérkezéséhez szükséges időt összehasonlítva lehetőség adódik arra, hogy nagy pontossággal ellenőrizzük, vajon a gravitációs hullámok terjedési sebessége valóban megegyezik-e a vákuumbeli fényterjedés sebességével.
5. A polarizációs tulajdonságok megfigyelésével ellenőrizhetővé válik az általános relativitáselmélet azon jóslata, hogy a gyenge hullámok ún. „transzverzális” és „nyommentes” jelleggel kell rendelkezzenek, azaz az Einstein-elméleten belül kettes spinű „graviton” -részecske állapotokkal írhatók le.
6. A már működő interferometrikus gravitációs hullámdetektorok, egy meglepő, ugyanakkor nagyon fontos alkalmazási teret nyerhetnek a geofizikai kutatásokban. Míg az asztrofizikai eredetű gravitációs hullámok detektálása várhatóan a $\sim 30\text{--}10^3$ Hz-es tartományban történik majd, a detektor ellenőrző rendszerének állandóan regisztrálnia és kompenzálnia kell egy sokkal intenzívebb alacsonyfrekvenciás, $\sim 10^{-5}\text{--}3\times 10^{-3}$ Hz-es rezgéseket is. Utóbbiak, a föld magjának, a geofizikai kutatások szempontjából nagyon érdekes sajátrezgéseiből származnak, így ezekről a rezgésekről hordoznak fontos, más módszerrel nem megszerezhető információt.
7. A neutron csillagok belső felépítésének, állapotegyenletének meghatározásához elengedhetetlen a csillag tömegének és sugarának pontos ismerete. A szokásos csillagászati megfigyelésekkel reményünk sincs a csillag sugarának meghatározására, bár a röntgen csillagászat segítségével a sugár értékére felső korlát adható meg. Az újgenerációs gravitációs detektorok feltehetően mérni tudják majd a neutron csillagok sajátrezgéseinek frekvenciáját és élettartamát, amelyből közvetve a sugár és a tömeg értéke is pontosan meghatározható lesz. Ez a módszer teljesen ahhoz hasonló, ahogyan a nap sajátrezgéseinek detektálásából a belsejében lejátszódó folyamatokra tudunk következtetni. Így a gravitációs hullámdetektorok segítségével kialakulhat az asztro-szeizmológia tudománya is.

6. A gravitációs hullámok detektálása

A gravitációs hullámok detektálására tett erőfeszítések is viszonylag hosszú múltra tekintenek vissza. A 70-es évektől kezdve működnek, és a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően egyre inkább megközelítik azt a tartományt, ahol már valódi asztrofizikai megfigyelések valószínűsíthetők, a Weber által javasolt *rezonancia*

elven működő detektorok. Ezek mellett egyre nagyobb várakozás előzi meg az ezekkel szinte párhuzamosan fejlesztett, olyan, a *lézer-interferometriai elvét felhasználó* detektorok, mint pl. a LIGO, VIRGO, GEO600 és a TAMA300 detektorok. Ezeket mind érzékenységekben, mind pedig az észlelési frekvenciatartományban szervesen egészíti majd ki az űrbe telepített, szintén *interferometrikus elven működő detektor*, a LISA.

6.1. A rezonancia elvén működő detektorok

Az első határozott lépést a gravitációs hullámok detektálása érdekében Joseph Weber tette meg a 1950-es évek második felében. Az általa javasolt és a marylandi egyetemen megépített detektor egy, kb. egy tonnás alumínium hengerből és annak a szimmetriatengelyén elhelyezett piezo-kristály jelátalakítókból állt. A vibrációktól való elszigetelés érdekében az alumínium henger egy vákuum tartályban volt felfüggesztve. A detektor elve nagyon egyszerű. A gravitációs hullámok által keltett ár-apályerők a hengert rezgésbe hozzák, és ha az érkező hullám frekvenciája éppen a henger sajátrezgésének frekvenciájával esik egybe, akkor a sajátrezgések amplitúdója elegendően nagy, így azt a piezo-kristályok jól érzékelhető elektromos jellé képesek alakítani.

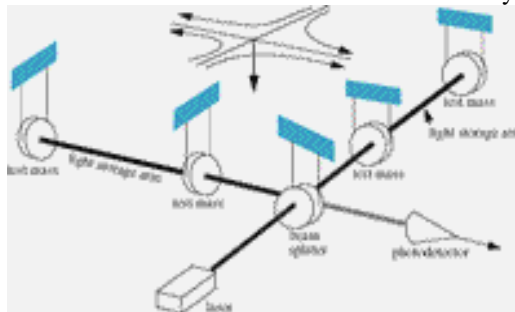
Az első detektor megépítését követően, a hetvenes évek elejére további rezonancia elven működő detektor kezdett megfigyeléseket, pl. a moszkvai állami egyetemen, Yorktownban, Rochesterben, és a müncheni asztrofizikai kutatóintézetben. Ezeknek az első generációs detektoroknak az érzékenysége kb. a 10^{-16} -os skálán mozgott, ami messze alatta van a ma gondolt megfigyelhetőségi határnak.

A rezonátor típusú detektorok érzékenységét komoly fejlesztőmunka elvégzése árán sikerült a lényegesen feljavítani, így napjainkban is nagyon sok helyen használják őket. Valójában a detektálási elv típusától függetlenül mindig kétféle lehetőség kínálkozik a detektor érzékenységének javítására. Egyrészt törekedhetünk a háttérzajszint csökkentésére, másrészt a detektor méreteinek és egyéb tulajdonságainak megfelelő megválasztásával előidézhetjük a detektált jel felerősítését. Az első generációs rezonátor típusú detektorok hatásfokát leginkább a henger és a jelátalakító-rendszer hőmozgása által keltett rezgések csökkentették. Így az első módszert alkalmazva nagyon alacsony hőmérsékletre, néhány Kelvin fokra hűtötték le az egész detektort, miáltal a jelenleg használt berendezések érzékenysége legalább három nagyságrenddel jobb, mint a korábbiak.

Jelenleg a detektorok ~50 milli Kelvin fokra való hűtésével kívánják az érzékenység további növelését elérni. Egy másik érdekes fejlemény az, hogy több helyen gömb formájú rezonátorok használatára térnek át. Ezzel a módszerrel növelhető a befogási/detektálási keresztmetszet, valamint a detektor irányérzékenysége is.

6.2. A földi telepítésű LIGO-típusú detektorok

Ezeknél a detektoroknál az ár-apályerők két, egymástól néhány kilométer távolságra lévő próbatestekre kifejtett hatását regisztrálják. Ezeket a testeket az alábbi ábra szerinti elrendezésben helyezik el egy interferométerben.



A próbatestek nagyon körültekintően kifejlesztett, ingaszerű felfüggesztéssel vannak ellátva, melynek az a célja, hogy a lokális földi eredetű zajok hatását csökkentse.

A detektor karjai úgy vannak méretezve, hogy amikor nincsenek jelen gravitációs hullámok a két kar hossza, L_1 és L_2 , közel ugyanaz az L érték legyen. Amikor megjelenik egy gravitációs hullám, akkor váltakozva a karok egyike mentén összehúzódás, míg a másik mentén szét húzó ár-apályerők lépnek fel. Az interferometria elvén működő detektorokban a karok hosszának különbségében beálló változásokat $\delta L(t) = L_1(t) - L_2(t)$ tudjuk nyomon követni. Ennek, és a közös L nyugalmi hosszának a hányadosa a gravitációs hullám által okozott *hullám-nyújtás*, ami megegyezik a hullám amplitúdóval $h(t)$ -vel, és így $\delta L(t) = h(t)L$.

A magas frekvenciás hullámtartomány (10-10⁴Hz) az, amelyben az újgenerációs, földi telepítésű lézer interferometrikus hullámdetektorok működnek. Ennek a tartománynak az alacsonyfrekvenciás végét éppen azok a technikai korlátok jelölik ki, amelyeket lehetetlen elszigetelni. Ilyenek például a talaj szeizmikus rezgőmozgása, a légkör sűrűségfluktuációja és az emberi tevékenység különféle hatásai. A felső határ a kettős rendszerek által keltett gravitációs sugárzás f frekvenciájának közelítő értékére kapott $f \propto 10^4 \text{ Hz} (M_{\odot}/M)$ összefüggés alapján adódik. A magas frekvenciás hullámtartományban a legnagyobb hibaforrás a lézerimpulzusok által tartalmazott fotonok számában fellépő fluktuációból adódik. Alacsonyabb frekvenciákon a próbatetek – ezekhez tükrök vannak rögzítve – hőmozgás folytán kialakult sajátrezgéseinek hatása erősödik fel. Az utóbbi frekvenciákat a méretezések gondos megválasztásával a mérni kívánt gravitációs frekvenciatartományon kívülre szorítják. A nagyon alacsony frekvenciáknál a szeizmikus mozgások dominálják a detektorban megjelenő zajszintet. Ennek csökkentését, azaz a próbatetek izolálását többszintes, frekvenciájában gondosan hangolt ingafelfüggesztéssel próbálják elérni.

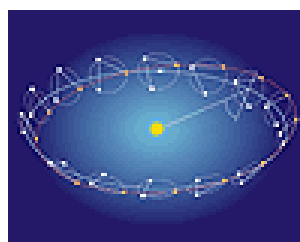
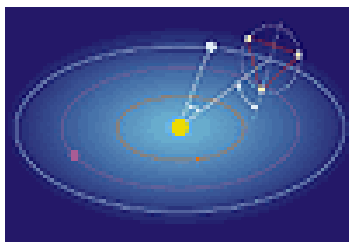
Az eddig megépült, vagy ezután üzembe helyezendő interferometrikus elven működő hullámdetektorok lassan behálózják a földgolyót. A legfontosabb futó megfigyelési programok a következők:

- LIGO: Az USA-ban működtetett, három interferométerből álló rendszer. Az egyik négy kilométeres karhosszúságú interferométer a Louisiana állambeli Livingston-ban található, míg két, egymásba foglalt interferométer, egy négy kilométeres és egy másik két kilométeres található a Washington állambeli Hanford laboratóriumban. Ez a két detektor egymástól 3000 km távolságra van, így segítségükkel az észlelési események koincidenciája is ellenőrizhető.
- VIRGO: Ennek a Pisa melletti Cascina-ban francia-olasz együttműködés keretében fejlesztett és működtetett detektornak a karhossza három kilométer. Technikai megoldásait tekintve a LIGO-hoz hasonló, bár egy nagyon kifinomult szeizmikus szigetelési eljárás alkalmazásának köszönhetően a többiekénél várhatóan nagyobb érzékenysége lesz a nagyfrekvenciás tartomány 10 Hz körüli alsó részében is.
- GEO600: Ez egy német-angol együttműködésben Hannover mellett megépített és működtetett hatszáz méter karhosszúságú detektor. A karok rövidegét egy különleges interferometrikus eljárás alkalmazásával kompenzálják, miáltal a GEO600 érzékenysége a nagyobb detektorokéhoz hasonló mértékű lesz.
- TAMA300: Ez a Tokió mellett található háromszáz méteres karhosszúságú japán detektor már több éve üzemel. A TAMA300 legjobb érzékenységi mutatója, $h \sim 10^{-19}$. A TAMA300 csoport jelenleg szintén egy új, három kilométer karhosszúságú detektort épít a 300-as detektor tapasztalataira alapozva.
- ACIGA: Az ausztrál vállalkozás, amely jelenleg a Perth mellett építi a detektort. Ennek a detektornak a meglévő hálózatba történő bekapcsolása nagyon jelentős lesz a források irányának és távolságának meghatározása szempontjából, hiszen az összes többi detektor az északi féltekén található, ráadásul közelítőleg mindannyian egy közös síkra illeszkednek.

Több szempontból is fontos az, hogy egymástól nagy távolságra elhelyezkedő, több – akár különböző elveken működő – detektor összekapcsolásából álló hálózatok alakuljanak ki. Ezek között említhetjük a detektorok által regisztrált háttérzaj kiszűrését, a megfigyelések kölcsönös megerősítését, valamint a források lehetséges irányának és távolságának meghatározását. A források irányának és távolságát, például háromszögelési eljárásokkal, valamint a hullámoknak a különböző detektorokhoz történő megérkezési időkülönbségeit figyelembe véve határozhatjuk meg.

6.3 Az űrbe telepített LISA

A földi telepítésű gravitációs hullámdetektorok esetében, a légkör, és egyéb lokális tömegeloszlások sűrűségfluktuációi még a szeizmikus zajoktól történő tökéletes szigetelés esetén sem tennék lehetővé a 10⁻⁵-10 Hz frekvenciatartományba eső hullámok detektálását. Az említett hatások kiküszöbölése érdekében érdemes az űrbe telepíteni a detektort. Lényegében ez valósul majd meg a NASA és az ESA közös LISA (Laser Interferometer Space) programjában, amelynél a fellépő ár-ápályerőknek, három darab, az ábrának megfelelően Nap körüli pályára állított 5×10⁶km oldalhosszúságú egyenlő oldalú háromszög csúcaiban elhelyezett próbatesten kifejtett hatása lesz regisztrálva.



A háromszög 20° -os szöggel lemaradva követi a Földet pályáján. Az elrendezésnek köszönhetően a LISA évente egyszer kerüli meg a Napot és ugyanazon idő alatt saját tengelye körül is megfordul egyszer. A LISA ezen mozgásnak köszönhetően a hosszan sugárzó, pl. periodikus hullámforrások helyének meghatározására is képes lesz. Mindegyik műhold két-két optikai egységet tartalmaz, melyek egyenként egy 30cm-es teleszkópból és egy 1W-os lézerekből épülnek fel. Bár ennek a detektornak a működése is a lézer interferometria elvén alapul, itt szó sem lehet a fényjelek többszöri ide-oda küldéséről, hiszen az 5×10^6 km-es távon a lézernyaláb egy 20 km széles folttá nyílik szét a diffrakció következtében. Ehelyett az érkező jelből mintát vesz a fedélzeti távcső, majd azt a fedélzeti lézer fényéből vett mintával interferáltatja. A három műhold segítségével egy időben összesen hat jel cseréjére képes a rendszer. Ezekből a LISA karhosszainak időbeni változása és a két polarizáció komponense is meghatározható.

Természetesen a LISA-t is különféle zajok érik. Például a bolygók által okozott perturbációk. Az is igaz, hogy az ezek által okozott elmozdulások lényegesen nagyobbak, mint a gravitációs hullámok által előidézett néhány pikométeres elmozdulások. A kétféle hatás mégis különválasztható, mert a perturbációk hatása hónapos skálán mutatkozik meg és nagyon simán, jól modellezhetően változik, így kiszűrhető. Ugyanakkor a gravitációs hullámok hatása a vizsgálni kívánt frekvenciatartományban egy napnál is rövidebb skálán érvényesül. A külső sugárzási hatások, pl. a Napszél hatását úgy tervezik kiküszöbölni, hogy a szabadon eső próbatesteket, amelyek távolságának változásait kell mérni, a műholdak mintegy burokként veszik körbe és mozgásukat úgy korrigálják, hogy a belső testeket külön-külön folyamatosan követni tudják.

A LISA előfutáraként a SMART-2, két műholdból álló rendszert tervezik elindítani 2006 körül, melyek segítségével tesztelhetők lesznek a LISA-nál felhasználni kívánt technikai elemek.

A LISA beindításával a teljes gravitációs hullámspektrumnak még mindig csak egy kis részét fedik le majd a működő detektorok. Javaslatok formájában természetesen különféle tervek léteznek, amelyek kivitelezése esetén további források megfigyelésére nyílik majd lehetőség. Ezek közé tartozik például a „Big Bang Observer”, mely a LISA-hoz hasonló elven, de több, és egymástól távolabb elhelyezett űrbe telepített eszköz segítségével keresi majd az ősrobbanás során feltehetően keletkezett gravitációs háttérsugárzást, és vizsgálja majd annak tulajdonságait.

7. Záró megjegyzések

Tudományos háttéranyagunk lezárásaként ismételten hangsúlyozni szeretnénk, hogy a gravitációs hullámok tanulmányozása által közelebb juthatunk azon asztrofizikai objektumok megértéséhez, amelyek forrásai ezeknek a hullámoknak. A sikeres detektálásuk várhatóan maguknak a csillagászati módszereknek a megújulásához is elvezet. A potenciális lehetőségek jobb megértése érdekében gondoljunk arra, milyen elképesztően nagy fejlődést eredményezett az univerzum különféle struktúráinak megértésében a hagyományos csillagászatnak a rádió, infravörös, ultraibolya, röntgen és gamma-sugárzások felhasználására építő detektorokkal való bővülése. Valójában fel sem tudjuk mérni az ismereteink bővülésének azzal kapcsolatos lehetőségeit, hogy most nem csak az elektromágneses hullámok egy új részspektrumával, hanem hullámoknak egy teljesen új osztályával bővíthetjük a palettát. Lényegében már az ehhez kapcsolódó természetes tudományos kíváncsiság is elegendő motivációt biztosít azon erőfeszítések kifejtéséhez, amelyek jelenleg az elegendően érzékeny gravitációs hullámdetektorok létrehozására irányulnak.

Fontos éssben tartanunk azt is, hogy a fent megfogalmazott várakozásaink azon alapszanak, amit tudunk, illetve amit a tudásunk alapján plauzibilisnek tartunk. Azonban a tudomány, különösen az asztrofizika fejlődése során számos alkalommal előfordult már az, hogy valamely korábban nem ismert, vagy esetleg lényegtelennek gondolt jelenség fontos szerephez jut. Ilyen jellegű meglepetések felbukkanása valószínűleg még inkább jellemzi majd az asztrofizika új ágának, a gravitációs hullámcsillagászatnak a megszületését is.

Összegezve megállapíthatjuk, hogy az elkövetkező 20-30 évben olyan új korszakalkotó megfigyelésekre kerülhet sor, amelyek várhatóan átrendezik, és lényegesen kibővíti a különféle egzotikus és extrémén relativisztikus asztrofizikai objektumokra vonatkozó elképzeléseinket. A tudományos ismereteink ilyen irányú bővülése érdekében tett korábbi és jelenlegi erőfeszítéseket, valamint az elért technikai és tudományos eredményeket szeretnénk a tervezett filmünk segítségével a nagyközönség számára bemutatni.

A fenti szakmai anyag szolgál kiindulási alappal a tervezett ismeretterjesztő filmünk forgatókönyvéhez.

Tervezett forgatási helyszínek:

- 1. LIGO (Livingstone, Louisiana, USA)**
- 2. VIRGO (Pizza, Olaszország)**
- 3. AURIGA (Padova, Olaszország)**
- 4. ELTE, Elméleti Fizika Tanszék és Atomfizika Tanszék, Budapest**
- 5. KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest**

A fenti anyagot összeállította:

Rácz István

Budapest, 2005. február 2.