

RÁCZ ISTVÁN

# Hogyan hallgatható meg az Univerzum zenéje?

A modern fizika egyik legfontosabb megoldatlan problémája a gravitációs hullámok létezésének közvetlen igazolása. Napjainkban erre nemzetközi kutatócsoportok gigantikus méretű és szuperérzékeny gravitációshullám-detektorok segítségével tesznek kísérletet.

## Mi a gravitációs hullám?

A gravitáció napjainkban elfogadott legpontosabb elmélete az Einstein-féle általános relativitáselmélet, amely néhány éven belül ünnepli 100. születésnapját. Az Einstein-elmélet a gravitáció egy olyan geometrizált elmélete, melyben a gravitációs hatások a téridő geometriájának görbültségén keresztül jeleníthetők meg. Ebben az elméletben fogalmazódott meg először tudományos igénnyel az a Bolyai, Riemann, Mach és mások által intuitív módon sokkal korábban felvázolt elképzelés, hogy a világmindenségben található anyag elhelyezkedése és mozgása határozza meg „a világ” geometriáját, ugyanakkor a kozmoszt felépítő anyag fejlődése csak ennek az időben és térben is változó geometriának a fejlődésével együtt írható le.

A gravitációs hullámok szintén ebben az elegáns geometriai elméletben jelentek meg először. Ezek – leegyszerűsítve – olyan geometriai változásoknak a téridőben fénysebességgel tovaterjedő hatása, amelyek az aszimmetrikus gyorsuló mozgást végző testek környezetében lépnek fel. Míg például az elektromágneses hullámokra az elektromágneses tér változásainak terjedéseként gondolhatunk, addig a gravitációs hullámok magának a színpadnak, azaz a geomet-

riának a hullámlásai. Ráadásul ezek a hullámok csak relatív gyorsulások, azaz a próbatestek egymáshoz viszonyított ún. árapálygyorsulásain keresztül hatnak kölcsön környezetükkel, hiszen az Einstein-elméletében nincs abszolút tér, így nincs mihez képest abszolút gyorsulni. A relatív gyorsulások egy kiterjedt test esetében úgy jelennek meg, hogy a testet egy időpillanatban valamely irányban összenyomó, ugyanakkor a rá merőleges irányban széthúzó, továbbá ezen irányok folyamatos változása miatt nyíró erőhatások is érik.

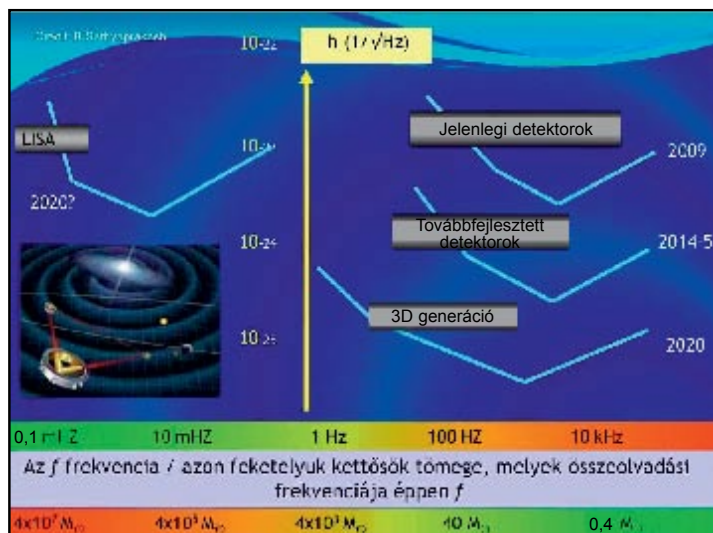
Mindezeknek megfelelően a tér egy adott helyén egy adott irányban történő váltakozó nyújtását, összenyomását tükröző hullámamplitúdóra  $h(t) = \delta L(t)/L$ , ahol  $\delta L(t)$  az eredetileg egymástól  $L$  távolságra lévő (tömeg)pontok távolságának időbeni megváltozását jelöli – mint a legfontosabb megfigyelhető mennyiségre szokás hivatkozni. Valamely fizikai folyamat által keltett gravitációs hullám esetén a  $h(t)$  hullámamplitúdót a görbült téridőben szabadon eső testek mozgását leíró geodetikusok eltérési egyenlete alapján határozhatjuk meg. Így egy adott helyen  $h(t)$  mért értéke többek között függ az érkező gravitációs hullámot kibocsátó forrás távolságától, valamint a hullámot és a detektort jellemző fő irányok egymáshoz viszonyított elrendezésétől.

## Léteznek-e a gravitációs hullámok?

Einstein már 1916-ban vizsgálta a gyenge gravitációs hullámok tulajdonságait és meghatározta a hullámok által szállított energia mértékét. Mivel a gravitációs kölcsönhatás a négy ismert alapkölcsönhatás közül a leggyengébb, észlelhető nagyságú gravitációs hullámokat csak asztrofizikai méretű testek kelthetnek. És mivel csak egyféle gravitációs töltés létezik, továbbá az energiának és az impulzusnak is meg kell maradnia, nincs sem monopól-, sem pedig dipól-sugárzás, csak kvadrupól- vagy annál magasabb rendű sugárzás lehetséges. (Már Einstein is rámutatott, hogy a kialakuló hullám amplitúdója,  $h$  arányos a kvadrupólmomentum második időderiváltjával, és fordítottan arányos a forrástól mért távolsággal, míg a forrás luminozitása – a gravitációs hullámoknak időegységént átadott összes energia – a kvadrupólmomentum harmadik időderiváltjának négyzetével arányos.)

Mindezek után természetesen merül fel a kérdés, miért nem detektáltunk eddig gravitációs hullámokat. Bár közvetlenül még senkinek nem sikerült gravitációs hullámokat észlelnie, van egy nagyon fontos közvetett bizonyíték, mely a létezésüket igazolja. A Hulse és Taylor által 1975-ben felfedezett, majd rádióteleszkópok segítségével több évtizeden keresztül megfigyelt B1913+16 jelű neutroncsillagokból álló kettős mozgásának változásai nagyon nagy pontossággal magyarázhatók az Einstein-elmélet által megjósolt mértékű sugárzási veszteségek figyelembevételével.

1. ábra. A LISA és a földi telepítésű interferometrikus detektorok frekvencia-érzékenység függése



## Melyek a gravitációs hullámok legígéretesebb asztrofizikai forrásai?

Az elméleti megfontolásoknak 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 neutroncsillag-párokból, esetleg két feketelyukból épülnek fel. Hasonlóan erős hullámforrások lehetnek például a neutroncsillagokon 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.

**1. Kettős neutroncsillagok:** A rádiócsillagások megfigyeléseinek köszönhetően már a mi galaxisunkban is ismert több olyan neutroncsillagokból álló kettős rendszer, amelyek a Hubble-időn belül, azaz kevesebb mint százmillió év alatt összeolvadnak. A megfigyelésekből, valamint a kettős rendszerek evolúciójára vonatkozó jósálatokból következtetve azt várjuk, hogy évente néhány száz ilyen összeolvadás történhet az Univerzum általunk ismert részében. A második generációs detektorok érzékenységi mutatóit figyelembe véve azt várjuk, hogy a berendezések az évtized közepétől évenként kb. tíz ilyen eseményt figyelhetnek meg.

**2. Szupernóvák:** A gravitációs hullámkeltés szempontjából hosszú ideje ígéretes eseményként vannak számon tartva a II-es típusú szupernóvarobbanások. Ezen folyamatok során valamely nagy tömegű forgó csillag magja omlik össze. Az összeomlás erősségét jellemzi, 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 térrészben belül. Az ilyen típusú folyamatokban a gravitációs hullámok keltésére fordított energia mértéke erősen függ attól, mennyire aszimmetrikus maga az összeomlás. Várakozásaink szerint a nagyon gyorsan forgó csillagok esetén ez az aszimmetria 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 nagygnak kell lennie.

**3. Pulzárak:** Periodikus gravitációs hullámforrásként többek között számításba jöhetnek olyan aszimmetrikusan forgó neutroncsillagok, amelyekben a forgástengely és a geometriai szimmetria tengelye nem esik egybe. Ilyen torzulást előidézhethet a csillag belső mágneses terének és a forgástengelynek az eltérő irányítottsága, de egy társcsillag anyagának akkréciós árama is.

**4. Fekete lyukak:** A kettős feketelyuk-rendszerek összeolvadásának megfigyelése nagyon fontos a LIGO és Virgo detektorok továbbfejlesztett változatai számára, de az űrbe telepíteni kívánt LISA detektor számára is. Érdekes megfontolni, hogy két, körülbelül egymillió naptömegű galaxis magjának összeolvadása során például olyan erős jel keletkezik, hogy azok nagyon nagy távolságból (akár  $z=4-5$  vöröseltolódás mellett) is érzékelhetőek lesznek. Így várakozásaink szerint az Univerzum szerkezetének nagyon korai dinamikus folyamatairól is hírt hozhatnak majd a gravitációs hullámok. A kettős feketelyuk-rendszerek összeolvadása kapcsán a becslések nagyon nagy számú, évente néhány száz esemény előfordulásával számolnak.

**5. Statisztikus háttér:** Léteznie kell egy olyan statisztikus háttérnek, amely különféle, nagy számú és független forrástól származó hullámok együtteséből áll össze. Ennek egy jelentős része többször skálázódhatott a kozmológiai háttérfluktuációval történő kölcsönhatás következtében. Ezek a hullámok egy széles, ugyanakkor nehezen modellezhető spektrumot feszítenek ki.

A felsorolt források figyelembevételével az adódik, hogy a gravitációs hullámspektrum igen széles, a kozmológiai háttér *ultra-alacsonyfrekvenciás*  $\sim 10^{-17}$  Hz-es részétől egészen a neutroncsillagok II-es típusú szupernóvarobbanás-folyamatában történő kialakulásának  $\sim 10^4$  Hz-es *nagyfrekvenciás* részéig terjed (**1. ábra**).

## Milyenek a gravitációs hullámok?

Bár a gravitációs és elektromágneses sugárzás keltése és terjedése sok hasonlóságot mutat, az eltérések lényegesek, így ezek számbavétele segíthet a kérdés megválaszolásában.

1. Mivel az Einstein-elmélet a gravitáció nemlineáris elmélete, nincs olyan precíz eljárás, amellyel a görbület szétválasztható lenne gravitációs hullámok alkotta részre, valamint például a Föld, a Nap és a galaxisunk által együttesen meghatározott háttérre. Így a gravitációs hullámokra a szokásos csillagászati körülmények között úgy gondolhatunk, mint a görbület azon oszcilláló részére, amelynek karakterisztikus változása, a fél hullámhossz, sokkal rövidebb, mint a görbület domináns részének hasonló karakterisztikus változási hossza.

2. A jelenleg alkalmazott csillagászati megfigyelési módszerek majdnem mindegyike az elektromágneses sugárzások észlelésén alapul. Ezeknek egy nagyon fontos közös jellemzője, hogy minden esetben csak az egyes különálló atomok, molekulák által kibocsátott fotonok – melyek jöhetnek pl. egy csillag koronarészből – összességét figyelhetjük meg. Ezzel szemben a gravitációs hullámok a forrásoként szolgáló anyag összehangolt együttes mozgásáról hordoznak információt. Mivel a gravitációs hullámok keletkezését az anyag ilyen koherens együttmozgása jellemzi, a keltett hullám is a lézertényhez hasonló, koherens tulajdonságokkal rendelkezik. Ennek a koherenciának a kihasználása révén a detektorok észlelési távolsága lényegesen megnövelhető.

3. Az elektromágneses hullámok nagyon erősen kölcsönhatnak az a közeggel, amelyen éppen áthaladnak, míg a gravitációs hullámok alig. Ez egyszerű következménye a két kölcsönhatás relatív erősségének. 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 feketelyuk összeolvadásáról, egy csillag magjában lejátszódó gravitációs összeomlásról, vagy a korai Univerzumban lejátszódó dinamikai folyamatokról – is eljuttathatunk hozzánk információt. A kevésbé örömteli következmény az, hogy a gravitációs hullámok nagyon kicsiny hajlandóságot mutatnak arra is, hogy a detektorainkkal kölcsönhatásba lépjenek, ezért meglehetősen nagy technikai kihívást jelent a detektálásuk.

4. 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 részt vevő anyag mozgása is relativisztikus. Ez azt jelenti, hogy a gravitációs hullámok az Univerzum olyan folyamatairól is eljuttathatnak hozzánk információt, amelyek az eddig használatos észlelési eljárások egyikével sem megfigyelhetőek, így keveset, vagy egyáltalán semmit sem tudunk róluk. Várakozásaink szerint a gravitációs hullámok felhasználásával esetleg a kozmológiai rekombináció előtti időszakra is visszatekinthetünk, ahonnan elektromágneses sugárzás által hordozott információt már biztosan nem kaphatunk. Hasonlóan fontos annak hangsúlyozása is, hogy az Univerzum 97%-a ismeretlen eredetű sötét anyag és energia, mely azonban gravitációsan kölcsönhat a megfigyelt anyaggal, valamint a téridő geometriájával. Így a gravitációs hullámok segítségével ez a 97% is megismerhetővé válhat, és ha a gravitációs hullámokat bekapcsoljuk a csillagászati megfigyelésekbe, feltehetőleg teljesen átalakulnak az Univerzumról alkotott eddigi elképzeléseink.

5. Az elektromágneses megfigyelhető mennyiségek többsége energiafluxus jellegű, ezért a távolság négyzetével fordítottan arányosan cseng le. Ezzel szemben a gravitációs sugárzás alapvető megfigyelhető mennyisége, a  $h$  hullámamplitúdó a forrástól mért távolsággal fordítottan arányos. Így a gravitációs hullám-detektorok érzékenységének bármilyen egyszerű javítása az észlelésekkel lefedett tartomány mértékét lényegesen megnöveli. Az érzékeny-

ség megduplázása például megkétszerezi az észlelési távolságot, tehát a megfigyelésekbe bevonható tartomány térfogata nyolcszorosára változik, azaz már a detektorok érzékenységeinek megduplázása is közel egy nagyságrenddel növeli a megfigyelhető források számát.

6. Az elektromágneses sugárzások tipikus hullámhossza sokkal kisebb, mint a megfigyelt csillagászati objektumok karakterisztikus mérete. Lényegében emiatt alkothatunk az adott égitestekről optikai képet. Ezzel szemben a gravitációs sugárzás hullámhossza általában a forrás méretével megegyező, vagy annál nagyobb. Ezért a gravitációs hullámok segítségével nem tudunk optikai értelemben vett képet előállítani a forrásokról, az egyes detektoroknak külön-külön nincs irányérzékenysége, így a forrás helyének gyors meghatározásában csak több detektor együttműködése nyújthat olyan hatékonyságot, mint a szokásos csillagászati eszközök, amelyek mindig egy adott megfigyelési pontra irányítottak.

Az a kontraszt, amely a gravitációshullám-detektorok és a csillagászati távcsövek térszögfelbontásának különbségében ölt testet, hasonló ahhoz az eltéréshez, amely a hallásunk és a látásunk szögfelbontását jellemzi. Ez az észrevétel – azzal együtt, hogy a nagyfrekvenciás gravitációs hullámok frekvenciatartománya nagyjából megfelel az emberi fül által felfogható hang spektrumának – alakította ki azt a vélekedést, hogy a gravitációs hullámok sokkal inkább a hangra, mint fényre utaló jellemzőket mutatnak. Ebben az értelemben a gravitációs hullámok megfigyelésére úgy is gondolhatunk, hogy a hullámdetektorok segítségével „meghallgatjuk” az Univerzumban zajló erősen relativisztikus folyamatokat.

### A gravitációs hullámok detektálása

Bár a gravitációs hullámok detektálására tett első komolyabb erőfeszítések a hatvanas évekre nyúlnak vissza, napjainkra érte el a technikai fejlettség azt a szintet, hogy esélyünk lehessen a gravitációs hullámok első közvetlen detektálására. Mára a földi telepítésű, a lézer-interferometria elvén működő gravitációs hullámdetektorok hálózata épült ki – ez a LIGO, a Virgo, a GEO600 és a TAMA300 detektorokból áll. Az első közvetlen detektálásra feltehetőleg 5–6 éven belül a második generációs detektorok (az Advanced LIGO, az Advanced Virgo, a GEO-HF és az új Japán LCGT detektor) üzembe helyezése után kerülhet sor. A húszas évek közepétől a gravitációs hullámokat valószínűleg már alkalmazhatják a csillagászati megfigyelésekben. Erre a világűrbe telepített LISA, valamint az olyan földi telepítésű harmadik generációs detektorok, mint az európai Einstein-teleszkóp nyújtanak majd lehetőséget.

### A földi telepítésű lézerinterferometria elvén működő detektorok felépítése

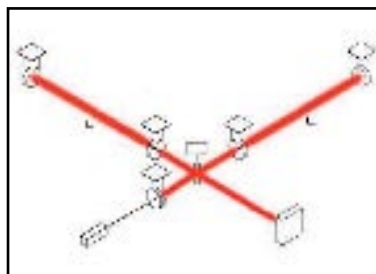
Az eddig megépült, interferometrikus elven működő hullámdetektorok lassan behálózják a földgolyót. A mai legfontosabb megfigyelési programok a **2. ábrán** láthatók.

Fontos, hogy egymástól nagy távolságra elhelyezkedő, több – akár különböző elveken működő – detektor összekapcsolásából álló hálózatok alakuljanak ki, ahogyan ez megvalósult a két LIGO, valamint a Virgo és GEO600 detektorok esetében. Az előnyök között említhetjük a detektorok által regisztrált háttérzaj kiszűrését, a megfigyelések kölcsönös megerősítését; de a források irányát és távolságát csak háromszögelési eljárásokkal határozhatjuk meg, amikor figyelembe vesszük azokat az időkülönbségeket, amelyekkel a hullámok a különböző detektorokhoz érkeznek.

Ezek a detektorok az árapályerők két, egymástól néhány kilométer távolságra lévő próbatestre kifejlesztett hatását mérik. A testek a **3. ábra** szerinti elrendezésben az interferométer karjainak végén és azok találokási pontjában elhelyezett tükrök.



2. ábra. A földi telepítésű interferometrikus (ITF) detektorok elhelyezkedése



3. ábra. Az interferometrikus detektorok (ITF) sematikus ábrázolása



4. ábra. A próbatest felfüggesztése

A próbatesteket nagy gondossággal kifejlesztett, egy fordított ingából és egy ingasorból álló, kb. 10 m magas felfüggesztés tartja (**4. ábra**), melynek az a feladata, hogy a lokális szeizmológiai jellegű zajok hatását azok  $10^{-14}$ -ed részére csökkentse.

A detektor karjai úgy vannak méretezve, hogy nyugalmi elrendezésben 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 összehúzódó, míg a másik mentén széthúzó árapályerők lépnek fel. Az interferometria elvén működő detektorokban a karok hosszának különbségében beálló változásokat  $dL(t)=L_1(t)-L_2(t)$  tudjuk nyomon követni. Ennek és a közös  $L$  nyugalmi hosszának a hányadosa a gravitációs hullám által okozott relatív hosszváltozás, ami megegyezik a hullámamplitúdóval,  $h(t)$ -vel, azaz  $dL(t)=h(t)L$ .

### A méréseket befolyásoló hatások

Érdekes azt is megvizsgálunk, mekkora érzékenységre kell szert tennie a gravitációs hullámdetektoroknak ahhoz, hogy valóban sikeres detektálásokra kerülhessen sor. Vegyünk például egy kettős neutroncsillag rendszert. Tegyük fel, hogy a neutroncsillagok tömege a Nap tömegének kb. 1,4-szerese, azaz a Chandrasekhar-limit által meghatározott értékű, valamint azt, hogy a csillagok összeolvadásuk során annyira közel kerültek, hogy éppen egymást érintik, tehát a középpontjuk távolsága  $\sim 20$  km. Ebben az esetben a pályafrekvenciájuk kb. 400 Hz. Végül azzal a feltételezéssel élve, hogy a kettős rendszer a legközelebbi Virgo galaxishalmazban található, azaz a tőlünk mért távolsága kb. 15 megaparszek ( $\sim 4,5 \cdot 10^{20}$  km), azt kapjuk, hogy  $h$  értéke

$10^{-21}$  nagyságrendű kell, legyen. Ez egy elképesztően kicsiny effektus, amelynek érzékelésére gondoljuk meg, hogy a mérés során földi telepítésű hullámdetektoraink esetén a karok minden egyes kilométerén a dL hosszváltozást minimum  $10^{-16}$  cm-es pontossággal kell tudnunk megmérni. Ez az a követelmény, ami nyilvánvalóvá teszi, mekkora technikai és technológiai kihívást jelent egy olyan kicsiny elmozdulás észlelése, amely a látható fény hullámhosszának  $1/10^{12}$ -ed részénél is kisebb. Az elmúlt három évtizedben erre a célra fejlesztették ki a fizikusok a lézinterferencia elvén működő, több kvantumoptikai rezonátor is magukba foglaló eszközöket.

Az első és második generációs, földi telepítésű lézinterferometriai hullámdetektorok a magas frekvenciás hullám tartományban ( $10^4$ – $10^5$  Hz) működnek. Ennek a tartománynak az alacsony frekvenciás végét éppen azok a zajforrások jelölik ki, amelyeket nagyon nehéz kiküszöbölni. Ilyenek például a talaj szeizmikus rezgőmozgása, a légkör sűrűségfluktuációja és az emberi tevékenység különféle hatásai. A magas frekvenciás hullám tartományban a legnagyobb hibaforrás a detektort tápláló lézer által bevitt fotonok számában fellépő fluktuációból adódik. Középfrekvenciákon a próbatestek – ezek maguk a tükrök – hőmozgás folytán kialakult sajátrezgései hatása erősödik fel.

### Harmadik generációs hullámdetektorok

A harmadik generációs gravitációs hullámdetektorok tervezése során – ilyen például az európai Einstein-teleszkóp projekt (5. ábra) – további új technikai megoldásokat kell alkalmazni annak érdekében, hogy a mérési pontosságot tovább növelhessük, valamint az alacsonyabb frekvencia-tartomány irány felé nyithassunk. Például a magas frekvenciás hullám tartományban az érzékenység növelését kvantumoptikai módszer, az ún. „squeezed light”, vagy „préselt fény” alkalmazásával igyekszünk elérni. A nagyon alacsony frekvenciáknál a próbatestek izolálását többszintes, frekvenciájában gondosan hangolt ingafelfüggesztéssel, valamint a földfelszín alatti elhelyezéssel kívánjuk elérni. A hőmozgások hatását hatékony hűtési módszerek segítségével próbáljuk csökkenteni.

Fontos azt is megemlíteni, hogy a mind a LIGO, mind pedig az európai Virgo és Einstein-teleszkóp projektekhez sikerrel csatlakoztak magyar kutatócsoportok. Az MTA Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetében működő Virgo-csoport különösen fontosnak tartja az európai programokban való hatékony részvételt, mert azok sikere erősen visszahat az európai tudományfejlődés menetére is. Az Einstein-teleszkóp program célja, hogy Európa vezető szerepet játszhasson a gravitációs hullámok észlelésére alapozott új tudományág, a gravitációs hullám-csillagászat létrehozásában, mely a kozmoszról alkotott jelenlegi elképzeléseinket lényegesen átalakíthatja. Magyarország, közelebbről a Mátra nagyon jó eséllyel pályázik arra,

5. ábra. Az Einstein-teleszkóp elképzelt elrendezése. Az ábrának megfelelően a teleszkóp három, részben átfedő, két-két karú detektorból áll



6. ábra. Az Einstein-teleszkóp tervezett elhelyezkedése a Mátrában. A vastag narancssárga vonal a tengerszint feletti 400 m-es magasságot jelöli

hogy a teleszkóp nálunk épülhessen meg (6. ábra). Az Einstein-teleszkóp jelenléte öt évtizeden keresztül szinte elképzelhetetlen mértékű tudományos, műszaki, ipari és gazdasági fejlesztések forrásául szolgálhatna.

### Miért fontosak a gravitációs hullámok detektálására irányuló erőfeszítések?

A gravitációs hullámok sikeres detektálása várhatóan a csillagászati módszerek megújulásához vezet. Elég, ha csak arra gondolunk, milyen elképesztően nagy fejlődést hozott az Univerzum különféle struktúráinak megértésében, amikor a hagyományos csillagászat eszköztára a rádió-, infravörös, ultraibolya, röntgen- és gamma-sugárzások felhasználására építő detektorokkal gyarapodott. Valójában fel sem tudjuk mérni, milyen lehetőségekkel jár, hogy most nemcsak az elektromágneses hullámok egy részspektrumával, hanem hullámoknak egy teljesen új osztályával bővíthetjük a palettát. Már a tudományos kíváncsiság is elegendő motiváció a minél érzékenyebb gravitációs hullámdetektorok létrehozásához, de nem elhanyagolható az sem, hogy az Univerzumot felépítő anyag és energia eddig ismeretlen összetételű és tulajdonságú 97%-a válhat megfigyelhetővé a gravitációs hullám-csillagászat megszületése folytán.

Várakozásaink azon alapszanak, amit tudunk, illetve amit a tudásunk alapján plauzibilisnek tartunk. A csillagászat fejlődése során számos alkalommal előfordult, hogy valamely korábban nem ismert, vagy lényegtelennek gondolt jelenség fontos szerephez jutott. Ilyen meglepetések felbukkanása valószínűleg együtt jár majd az asztrofizika új ága, a gravitációs hullám-csillagászat megszületésével is. Azt várjuk, hogy az elkövetkező 5–10 évben olyan korszakalkotó megfigyelésekre kerül majd sor, amelyek lényegesen átrendezik és kibővítik a különféle egzotikus és extrém relativisztikus asztrofizikai folyamatokra vonatkozó elképzeléseinket. A kísérleti eredmények segítségével arra is lehetőség nyílik majd, hogy a térről és az időről alakított elképzelések helyességét érintő tudományos kérdéseket válaszoljunk meg.

A szerző kutatásait az OTKA a 67942 sz. projekt keretében támogatja.

### IRODALOM

- LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, Rept.Prog. Phys.72:076901 (2009), <http://xxx.lanl.gov/abs/0711.3041>  
 Status of Virgo, Class.Quant.Grav.25:114045 (2008), <http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/0406123>  
 ET design study document, <http://www.et-gw.eu/etdsdocument>  
 Scientific Potential of Einstein Telescope, arXiv:1108.1423 (2011), <http://lanl.arxiv.org/abs/1108.1423>