

Az alábbi írás *Bartos Imre és Raffai Péter: Keresztkorrelációs módszerek alkalmazása gravitációs hullám kitörések kutatásában* című diákköri dolgozatának rövid ismertetése. A dolgozat, melynek témavezetői: *Márka Szabolcs*, California Institute of Technology és *Laura Cadonati*, Massachusetts Institute of Technology, az ELTE fizikus szakának III. éve után az USA-ban eltöltött nyári gyakorlaton készült, és a 2005. évi Országos Tudományos Diákköri Konferencián II. díjat nyert. Ez a rövid beszámoló bepillantást enged az egyetemeken folyó diákköri munkákba, és talán azt is érzékelteti, hogyan lehet Magyarországról bekapcsolódni a világ legigényesebb, legdrágább és a legfejlettebb csúcstechnológiát felhasználó kutatásaiba.

Gravitációs hullámok kutatása

Bevezetés

A csillagászati megfigyelések döntő többsége napjainkig elektromágneses (*EM*) sugárzás detektálásán alapult. Mindazon ismereteket, melyeket Világegyetemünkéről csillagászati, galaktikus és extragalaktikus méretekben eddig tudunk, beleértve az Univerzum kozmológiáját, asztrofizikai objektumainak fejlődéstörténetét, döntő részt ilyen, az elektromágneses spektrum feltérképezése, EM-hullámok detektálása (pl. távcsöves mérések) segítségével nyertük.

Könnyen belátható azonban, hogy ha a természet négy alapvető kölcsönhatása (az elektromágneses-, az erős-, a gyenge- és a gravitációs kölcsönhatás) közül csupán az egyiket használjuk fel, akkor csak korlátozott információszerzési lehetőségeink vannak. A huszadik században az atom-, a mag- és részecskefizika fejlődésével, a részecskegyorsítóban végzett kísérletek révén lehetőségünk nyílt arra, hogy az információszerzés körébe az erős- és a gyenge kölcsönhatást is bevonjuk. Ha ezzel – a kölcsönhatások rövid hatótávolsága miatt – konkrét asztrofizikai objektumokból nem is vagyunk képesek közvetlen információt nyerni, az Univerzum történetének kísérleti úton megismerhető időtartamát mégis sikerült így tovább tágítani.

Az EM-mérések legigényesebb kiegészítője, s ezzel a jövő asztrofizikájának legfontosabb, mindeztidáig kiaknázatlan információszerzési lehetősége a gravitációs kölcsönhatás kísérleti vizsgálata lehet. Az einsteini általános relativitás-elmélet ugyanis már évtizedekkel ezelőtt megjósolta egy, az elektromágneses hullámokhoz hasonló, ám gravitációs kölcsönhatásból származtatható sugárzás létezését. Hasonlóan az EM-hullámokhoz, a *gravitációs hullámok* (*GH*) is nagy hatótávolságúak, ami biztosítja, hogy detektálásukkal távoli objektumok, vagy a korai Univerzum tulajdonságait is képesek legyünk feltérképezni. Jóllehet létezésük közvetett úton már bizonyított, közvetlen kísérleti kimutatásuk a mai napig várat magára. Felfedezésük jelentőségét mi sem mutatja jobban, mint a közvetett bizonyítékokért már kiosztott Nobel-díj, valamint az az első észlelésért folytatott nemzetközi verseny, amelynek megnyerésére az Amerikai Egyesült Államok például (eddig) több mint 400 millió dollárt áldozott. GH-detektorok építésében, technikai felkészültséget tekintve jelenleg kétségkívül az Egyesült Államok áll az élen a Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) kutatóintézet három detektorával (Hanford 2 és 4 km, Washington állam; és Livingston 4 km, Louisiana állam). Mindhárom detektor immár adatgyűjtési fázisban van, az – eddig – felhalmozódott, minden korábbinál nagyobb detektorérzékenység mellett szerzett adatsoraik pedig elérhetőkké váltak a kutatók számára.

E detektorok lényegében óriási (2 és 4 km karhosszúságú) interferométerek: bennük egy koherens lézernyalábot féligáteresztő tükörrel kettéosztanak, az így kapott nyalábokat tükrökkel (többszörösen) visszaveretik, majd egy fotodióda felületén interferáltatják úgy, hogy zavar nélkül kioltás, azaz a találkozási pontban „sötét” jöjjön létre. (A cikk ábrái a hátsó belső borítón láthatók.) Az einsteini elmélet szerint, amikor a berendezésen GH halad át, az a tükrök távolságát növeli illetve csökkenti, és ez a fotodióda felületén felfénylést eredményez. A felfénylés mértékét digitális jellé alakítva így végül egy idő-fényintenzitás adatsort kapunk.

Felfénylés azonban korántsem csak GH-jel beérkezése esetén következik be. A berendezés rendkívüli érzékenysége miatt rengeteg tényező okozhat „zajt”, amely a mért fényintenzitás-értékeket, s ezáltal az adatsort torzítja. Ilyen zaj lehet a Föld szeizmikus mozgása, vagy bizonyos atomi részecskék szintjén lezajló folyamatok: a berendezést (pl. tükröket) alkotó atomok hőmozgása, vagy a lézernyom kvantumossága miatti határozatlansági effektusok. Mivel ezek körülbelüli frekvenciafüggését ismerjük, bizonyos szintű korrekciókat: egyfajta súlyozást, *filterezést* a különböző frekvenciatarományokra elvégezhetünk.

A zajszűrésre azonban más lehetőségünk is van. A zaj helyi (lokális) jellege – szemben a távoli forrásból jövő GH-jel globális hatásaival – lehetővé teszi, hogy a Föld különböző pontjain épített detektorok adatsorait összehasonlítsuk, az egyenként eltérő zajhatásokat nagy mértékben kiszűrjük, míg a mindenütt azonos módon megjelenő GH-jeleket kiemeljük. Ezt, az adatsorok összehasonlítását végző matematikai módszert nevezzük *kereszt-korreláltnak*.

Elméleti és szoftveres eredmények

TDK-munkánk oroszlánrészét a Los Angeles-i California Institute of Technology (CALTECH) egyetemen végeztük a többek között LIGO-adatsorok feldolgozásával is foglalkozó LIGO Scientific Collaboration egyik kutatócsoportjában.

Munkánk során a 20 másodperc időtartamnál rövidebb GH-jelek, az ún. *GH-kitörések* utáni kutatást tűztük ki célul. A rendelkezésre álló adatsorok feldolgozására egy merőben új algoritmust és programot fejlesztettünk ki, amely alapját a különböző detektorokból származó adatsorok kereszt-korreláltatása képezte. Fejlesztési és tesztelési munkálatainkat két programnyelven párhuzamosan végeztük: a program *Matlab* környezetben megírt változatát az új ötletek kipróbálására, míg *C++* nyelven megírt verzióját a konkrét keresési feladatokra készítettük el. A *C++*-ban megírt program előnye a keresési gyorsaság, valamint a LIGO saját szoftveres rendszerével való kompatibilitás, ezek mindegyikére szükségünk volt. Célunk a LIGO által gyűjtött adatok valós idejű, adattorlódásmentes analízise volt, amelyet ha elérni ezidáig nem is sikerült, a hasonló elven és érzékenységgel működő, addig létezett leggyorsabb jelkeresési algoritmushoz képest 3-szoros sebességnövekedést értünk el.

Programunk három matematikai objektumot definiált, amelyekkel az adatsorok jellemezhetővé váltak. Ezek:

- *Egyszerű kereszt-korreláció (jele: C);*
- *korrelációs együttható (jele: R);*
- *korrelált felesleg (jele: E).*

E mennyiségek lényegében 2 paramétertől függő, egyértékű függvények, melyeket speciálisan végzett kereszt-korrelációs eljárásokkal kapunk.

Ha adott két különböző detektor adatsora, ezeket egymáshoz képest t_{eltolt} idővel eltolhatjuk, majd egy adott t időérték-középponttal egy t_{ablak} nagyságú időtartamon belül a helybenhagyott és az eltolatott adatsorok pontonkénti szorzatát integrálhatjuk. Így minden t , t_{ablak} és t_{eltolt} értékre egy számot, azaz egy 3 paraméterű, egyértékű függvényt kapunk. E függvényt a t_{eltolt} paraméterre integrálva kapjuk a $C(t, t_{\text{ablak}})$, azaz az egyszerű kereszt-korreláció függvényt.

Ha a C függvényt megfelelő módon normáljuk, az adatsorokban pedig nincs közös vonás (nincs jel), azt várjuk, hogy a normált C értékek a t_{eltolt} paraméter szerint Gauss-féle (normális) valószínűségeloszlást fognak követni, zérus átlaggal és valamekkora ismert (a t_{eltolt} pontok számától függő) szórással. Jel jelenléte esetén az eloszlás átlaga az 1-hez kell közelítsen. A valódi adatsorok alapján kapott normált C értékek eloszlását (ún. *Kolmogorov-teszt*tel) összehasonlítva a jel nélkül várt eloszlással, megállapíthatjuk annak a valószínűségét, hogy a mért adatsorokban nincs azonos tag (azaz nincs jel). Ha ez a valószínűség egy önkényesen választott értéknél kisebb (tehát az adatsorokban valószínűleg *van* jel), a normált C értékek közül minden t , minden t_{ablak} értékre megtartjuk a t_{eltolt} -ok szerinti maximális normált C értéket. Így ismét egy csak t -től és t_{ablak} -tól függő egyértékű függvényt, az $R(t, t_{\text{ablak}})$ -ot kapjuk.

A három függvény közül a korrelált felesleg kiszámítása a legbonyolultabb, annak leírása sajnos túlmutatna e cikk terjedelmén. A korrelációt itt lényegében úgy hajtjuk végre, hogy minden t és t_{ablak} értékre végzett szorzási-integrálási műveletben az adatsorok t -ben vett t_{ablak} nagyságú tartományán kívül eső (vagyis időben távoli) tartományok tulajdonságait is figyelembe vesszük. Így tehát az adatsorok nemcsak közel azonos időpontokra eső tartományait, de az adatsorok amolyan „globális” tulajdonságait is összehasonlítjuk, még akkor is, ha az adatsorok távoli időtartományai között egyébként „naivan” nem várnánk semmiféle ok-okozati (ún. kauzális) kapcsolatot. E bonyolult számítás eredménye az $E(t, t_{\text{ablak}})$ függvény.

Bármely két különböző detektorból kapott adatsor esetén megadhatjuk tehát e három függvényt. Ha ezek függvényértékeit színazonosítással ellátva a paraméterek függvényében ábrázoljuk, jel felbukkanása esetén a jel beérkezésének t időpontja körül színes „tölcséreket” kapunk (lásd a hátsó belső borító középső ábráját), amely a növekvő t_{ablak} értékek felé kiszélesedik. Csak zaj esetén ilyen tölcsérek nem jelennek meg. A tölcsérek t helye alapján tehát megállapíthatjuk a jel beérkezésének időpontját, a tölcsérbeli maximális függvényértékkel jellemezhetjük a jel nagyságát, a maximális függvényértékhez tartozó t_{ablak} ablaknagyságról pedig belátható, hogy jó közelítéssel a jel időbeli hosszának felel meg. Az ábrák alapján, a tölcsérek elkülönítésével tehát a jelek számos tulajdonságát is meg tudjuk állapítani. Sőt, ha megkeressük azt az időtartamot, amellyel a két adatsort egymáshoz képest eltolva a legnagyobb „hasonlóságot” kapjuk (azaz amikor a két adatsorban ugyanazon GH-hoz tartozó két jel egybeesik), ismeretlen jelforrás esetén a forrás éggömbbeli helyzetét is meghatározhatjuk. A Föld távoli pontjain elhelyezkedő detektorokba ugyanis az azonos forrásból jövő GH nyilvánvalóan különböző időpillanatokban érkezik meg, az időkülönbségből pedig e pozicionálás elvégezhető – annál pontosabban, minél több detektor adatsorát hasonlítjuk össze. Nemcsak a jelek tulajdonságait, de a talán még távcsöves vagy szondás mérésekkel láthatatlan források helyét is meg tudjuk állapítani!

A három függvény ilyen, külön-külön végzett vizsgálatával még viszonylag kis valószínűséggel találjuk meg a jeleket. Az érzékenység nagyságrendekkel növelhető, ha a három függvényt „összekombináljuk”: a függvényértékeket egymás „függvényében” ábrázoljuk, függetlenül attól, milyen t és t_{ablak} értékekhez is tartoznak. Jel megléte esetén a C – R – E koordináta-rendszerben kapott ponthalmaz a csak zaj-minták korreláltatásából kapott ponthalmaztól markánsan (a jel nagyságától függő mértékben) elkülönül, ami a GH-jelet szemmel láthatóan, vagy a program által automatikusan jelezhető módon mutatja (lásd a hátsó belső borító alsó ábráját).

Földi viharok és a gravitációs hullámok

A C , R és E függvényeket bármilyen két adatsorra megadó programunk, amely e függvényeket összekombinálja, a jel meglétét és annak tulajdonságait is automatikusan jelzi, idővel elkészült. Hatékonyságát, futási sebességét többféle

tesztel is vizsgáltuk. Vizsgálataink során azonban főleg mesterségesen generált, de realisztikus zaj- és jelmintákkal dolgoztunk, mivel a LIGO valódi mérési adataihoz csupán hosszú engedélyezési procedúra után lehet csak hozzáférni. A teszteredmények sikerei azonban mind afelé mutatnak, hogy keresőprogramunkat a jövőben valódi adatsorok feldolgozásában is kipróbálhatjuk.

Munkánk során programunk hatékonyságát egy fontos vita eldöntésében is bizonyíthattuk. A detektorok érzékenysége korábban kérdésessé tette, hogy a detektorépületek közelében lezajló viharok, villámlások vajon nem okoznak-e hamis jeleket, komoly zavarokat az adatsorokban. Zavar jelenléte esetén ugyanis ezen időszakokban az adatgyűjtés lehetetlenné válna, s ez, valamint a viharok folyamatos előrejelzésének igénye komoly anyagi megterhelést okozna a LIGO hivatali apparátusának. A kérdés megválaszolásával korábban több kutatócsoport is foglalkozott, eltérő eredményeik miatt azonban a probléma vizsgálataink előtt megoldatlan maradt.

Mivel a LIGO hanfordi épületében egyszerre két interferométer, egy 2 és egy 4 km karhosszúságú működik (azonos vákuumcsövön osztozva), a Hanford-környéki viharok hatásait e két detektor adatsorának összehasonlításával vizsgáltuk. A detektorok teszt-fázisú adatsoraihoz hozzáférhettünk, s így azokban 4 db, meteorológiaiilag regisztrált, közeli villámcsapás zavarait kerestük – negatív eredménnyel. Következtetésünk tehát: a viharok zavaró hatásait úgy látszik figyelmen (és költségvetésen) kívül hagyhatjuk.