

# Válaszok Debreczeni Gergely opponensi kérdéseire

Köszönöm opponensemnek, dr. Debreczeni Gergelynek, hogy a doktori dolgozatomat átolvasta, részletesen értékelte, és hasznos megjegyzésekkel látott el!

A dolgozatomban az opponens javaslatainak megfelelően javítottam a "false dismissal", a "squeezed light", és az "ultra-high vacuum" kifejezések magyar fordítását. A "false alarm" kifejezés magyar használatában egyformán találtam példákat a "téves jelzés" és a "téves riasztás" fordításokra, hosszas gondolkodás után végül a "riasztás" kifejezés megtartása mellett döntöttem. Szintén megtartottam a "injektálás" kifejezést, mint képszerű, az angol nyelvű szakszövegben is felismerhető, és a közvetlen magyar kollégáim között gyakran használt kifejezést.

Sajnos nem találtam jó magyar fordítást a "matched filtering" technika nevére. Szerencsésebbnek tartanám, ha a kifejezésre azok a kollégák javasolnának magyar megfelelőt, akik a gravitációshullám-fizika ezen részterületén végeznek elméleti vagy adatfeldolgozó munkát. A javaslatukat magam is örömmel átvenném.

A legfontosabbnak azonban a "strain" kifejezés magyarítását tartanám, amire a dolgozatomban kétféle magyar megfelelő ("torzulás" és "torzítás") is megadtam. A kifejezés angol nyelvű, vagy néhol következetlen használata valójában azt tükrözi, hogy magam is mennyire változó néven találkozom ezzel a fogalommal a magyar nyelvű szakmai közösségen belül. Véleményem szerint a szakterület nagy hasznára válna, ha a közösség együtt hozna konszenzusos döntést a kifejezés helyes, egységes használatára. Ha a kérdésben egyetértés születik, vállalom, hogy a dolgozatom megfelelő részeit ennek megfelelően átdolgozom.

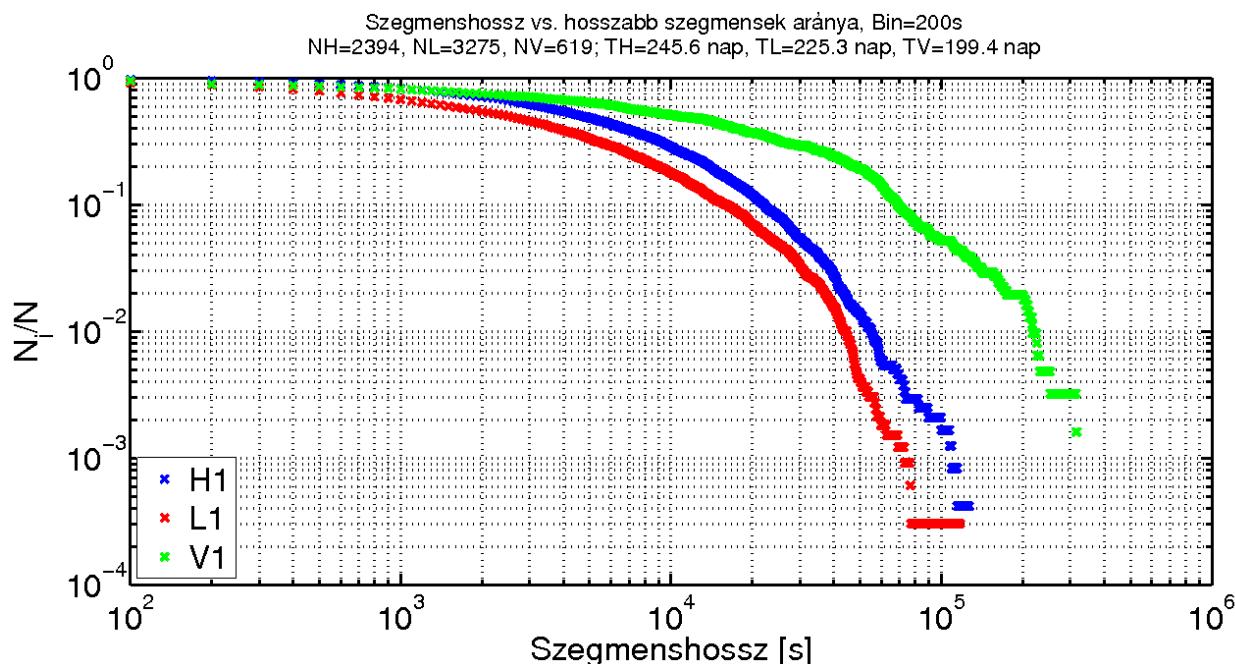
A dolgozat frissített változatát elérhetővé tettem a [http://bolyai.elte.hu/~praffai/Phd\\_praffai.pdf](http://bolyai.elte.hu/~praffai/Phd_praffai.pdf) honlapcímen. A következőkben Debreczeni Gergely opponensi kérdéseire válaszolok.

**Kérdés 1:** *"A definíció szerint a hosszú gravitációshullám-tranziensek 1 és  $10^5$  másodperc közé esnek. A dolgozatban csak rövid jelek keresésére láthattunk példát. Kérdés: Mivel lehetne jellemezni és mennyire stacionárius a detektorzaj a  $10^4 - 10^5$  másodperc hosszakon? Hogyan aránylik ez a Ligo, Virgo detektorok tipikus 'locking' időszakainak hosszához? A jelenlevő nemstacionaritást, hogyan lehetne figyelembe venni a kereső algoritmusban?"*

## Válasz 1:

A több órás, vagy akár napi időskálákon az egyes detektorok zajszintje és glitch gyakorisága is követi a külső környezetre jellemző napi aktivitást. Ezenkívül két olyan adatszegmens alapzaja és glitch gyakorisága, amelyek között a detektor kikerült a lezárt állapotból, esetenként szintén eltérhet egymástól.

A 1 ábrán a különböző szegmenshosszakra megadom a H1, L1, és V1 detektorokra az adott szegmenshossznál hosszabb, tudományos minőségű adatszegmensnek számarányát a



1. ábra. Ezen az ábrán a különböző szegmenschosszakra megadom a H1 (kék), L1 (piros), és V1 (zöld) detektorokra az adott szegmenschossznál hosszabb, tudományos minőségű adatszegmensek számarányát a teljes S6 adatgyűjtési időszakra. Az ábra előállításához 200 sec hosszú bineket használtam. Az adatszegmensek száma H1-re 2394, L1-re 3275, V1-re 619 volt. A H1 így összesen 245,6 napnyi, az L1 225,3 napnyi, a V1 pedig 199,4 napnyi feldolgozható adatot gyűjtött össze az S6 alatt.

teljes S6 adatgyűjtési időszakra. Az ábra előállításához 200 sec hosszú bineket használtam. Az adatszegmensek száma H1-re 2394, L1-re 3275, V1-re 619 volt. A H1 így összesen 245,6 napnyi, az L1 225,3 napnyi, a V1 pedig 199,4 napnyi feldolgozható adatot gyűjtött össze az S6 alatt.

Ilyen időskálán a zaj tulajdonságainak és csökkenthetőségének vizsgálata külön munkaráfördítást igényel. Mivel a munkacsoport keresési terveinek egyike sem vonatkozott a  $10^4 - 10^5$  másodperces időskálákra, ezeket a vizsgálatokat egyelőre még nem végeztük el. A jövőben, megfelelő motiváltság esetén, foglalkozni fogunk a problémával.

**Kérdés 2:** "Bizonyos jelek esetén nem igaz, hogy a jel nem változik, vagyis stacionárius a  $\Gamma$  halmazon, hisz jól közelíthető idő-frekvencia-amplitúdó karakterisztikája van. Kérdés: Hogyan kéne ezt figyelembe venni és mennyiben javítaná a keresési statisztikát specifikus jelalakok esetén?"

**Válasz 2:**

A dolgozatom 1.2.2 alfejezetében, "A több tf-pixelre vett statisztikák" cím alatt foglalkoztam a több pixelből álló  $\Gamma$  halmazra vonatkozó keresési statisztikákkal. A többpixeles halmaz definiálása a képfeldolgozó eljárások feladata, amelyek a GH-jelek modelljeihez iga-

zodva különítik el az idő-frekvencia térkép egy  $\Gamma$  pixelhalmazát, pl. alakzat (Hough) vagy energiatartalom (Locust) alapján. A képfeldolgozó eljárások az elkülönítés után az 1.2.2 alfejezetben leírtak szerint számolják ki az alakzat több pixeljére vett statisztikákat.

Minél specifikusabban ismert egy hullámforma-modell (jelalak), a képfeldolgozó eljárás annál specifikusabbá tehető. Ez az adott jeltípusra csökkenti a téves riasztások gyakoriságát. Ha a keresett hullámforma kevés (2-3) paraméterrel leírható, akkor idő-frekvencia térképek előállítására, és képfeldolgozó eljárások alkalmazására nem is feltétlenül van szükség. Helyette a GH-detektorok adatai közvetlenül kifejtethők a különböző paraméter-kiosztású hullámformák bázisán (mint pl. a bespirálózó kettősök *matched filtering* keresésében). Szerencsés esetben az új reprezentációval akár a teljes GH-jel egyetlen "pixelbe" (egyetlen bázisra) leképezhető, ami a jel jelenlétét élesen elkülöníthetővé teszi a zajháttértől.

**Kérdés 3:** *"A különböző kevésbé érzékeny de robusztus modellfüggetlen keresési algoritmusok a tf térképeken a küszöbérték feletti pixelekkel dolgoznak. Ezek a térképek és a rajtuk kialakuló alakzatok - megfelelő ábrázolás esetén - szabad szemmel is láthatók, felismerhetők. A mintafelismerés tipikusan olyan feladat amit az emberi szem és agy esetenként sokkal jobban és gyorsabban végez el mint az algoritmusok. Kérdés: A bemutatott algoritmusok bármelyike képes-e olyan alakzatot felismerni, ami - megfelelően begyakorolt - emberi szemlélő nem? Érdemes lenne-e, akár csak népszerűsítő cézzal egy ilyen játékos alakzatkereső weboldalt létrehozni, ahol önkéntesek vizsgálhatják és kereshetik a valós és mesterségesen hozzáadott hosszú gravitációs hullám tranzienseket?"*

**Válasz 3:**

A GH-jeleket kereső kétdimenziós módszerek kidolgozásakor nem a képfeldolgozás jelenti a fő nehézséget, hanem az adatok olyan reprezentációja, ahol a jel a lehető legkontrasztosabban elválik a zajháttértől. A STAMP ereje ezért nem a képfeldolgozó módszereiben rejlik, hanem az idő-frekvencia térképeket előállító módszereiben. Mégis, olyan esetekben, amikor a hullámforma pontatlanul, vagy csak sok paraméterrel írható le, a megfelelő adatrepresentáció mellett elengedhetetlen a képfeldolgozó algoritmusok használata. Ilyenkor az adatrepresentációt úgy választjuk meg, hogy a keresendő jeltípusok körét minél robusztusabban lefedje, majd az egyes konkrét jelekre már a képfeldolgozó algoritmusokat specializáljuk. Ez történik a STAMP keresések kivitelezésében is.

Nehéz megmondani, hogy a képfeldolgozó eljárásainkkal keresett jeleket egy "gyakorlott" szem megtalálná-e. Ehhez mindenekelőtt az adatrepresentációt az emberi szem érzékenységehez kellene optimalizálnunk. Mind a Locust, mind a Hough kontrasztos alakzatokat keres, azonban az első előre nem meghatározott alakzatokat, míg a második jól leírható, de akár sokpixelnnyi szakadásokkal is bíró görbéket. Mind a két eset az emberi jelfelismerés számára nehézséget jelenthet.

Ha az elméleti modellek által előrejelzett hullámformákat vesszük alapul, ezek a STAMP képfeldolgozása mellett általában olyan egyszerű görbékkel közelíthetők, amiket alkalmas áb-

rázolás mellett az emberi szemlélő is felismerhet. A kihívást azonban nem maga az észlelés jelenti, hanem az észlelések matematikai jellemzése, ami pusztán emberi megfigyelőkkel már nem elvégezhető. Ez különösen igaz az olyan esetekben, ahol nem várunk jelészlelést, csupán a jelek hiányában a paramétertér szűkítését. A GH-fizikában ma még - sajnos - ez a gyakoribb eset.

A javasolt alakzatkereső önkéntes munkára több példa van már az asztrofizikában (pl. GalaxyZoo 2007; GZSupernovae 2011). Ha az önkéntesek bevonását ténylegesen tudományos eredmények eléréséért szeretnénk megtenni, elsősorban két szempontot kell mérlegelnünk: a kijelölt feladat elvégzéséhez szükséges processzoridőt, és a téves riasztások gyakoriságát. A feladat jellegétől függően az önkéntesek pl. csökkenthetik a feladat elvégzéséhez szükséges időt, miközben a téves riasztások számát növelik meg; vagy nehezen formalizálható problémák esetén épp a téves riasztások száma csökkenthetik (mint pl. a galaxismorfológiai osztályozásnál). Olyan esetekben, ahol a képfeldolgozási probléma jól formalizálható és automatizálható (vagy mert egyszerű az alakzat, vagy épp mert az előre nem definiálható) az önkéntesek a szoftveres eszközöknél tipikusan nem végeznek hatékonyabb munkát. A LIGO által keresett jelek egyelőre jellemzően ilyenek.

Egyelőre további nehézséget jelent az önkéntesek bevonásában, hogy az LVC a GH-jelek első detektálásáig igyekszik elkerülni, hogy a GH-adatok nyilvánosságra kerüljenek. Az adatok nyilvánossá válása elkerülhetetlenül be fog következni, mivel a LIGO projekt a National Science Foundation-ön keresztül az amerikai adófizetők pénzéből valósult meg, és mint ilyen, az LVC-t törvény kötelezi az adatok nyilvánosságra hozatalára. Az adatok nyilvánosságra hozásának ideje és módja jelenleg is aktív vitatéma a Kollaboráció találkozóin. A Kollaboráció egyaránt meg kíván felelni a törvényi előírásoknak, miközben el akarja kerülni, hogy a gravitációs hullámok - úgymond - "első felfedezése" heti szintű médiahírré váljon.

Egy jelenlegi javaslat alapján a Kollaboráció akkor teszi nyilvánossá a detektorok adatait, ha az Advanced LIGO két detektora kb. 1 évnyi adatot gyűjtött össze a tervezett érzékenységgel (Fairhurst et al, 2010). Ennyi idő alatt vagy meg kell, hogy történjen a gravitációs hullámok észlelése, vagy a felfedezés már a későbbiekben sem valószínűsíthető. Véleményem szerint az adatok nyilvánosságra hozásának dátumáig Kollaboráción kívüli önkéntesek bevonása az adatfeldolgozásba nem elképzelhető.

Az önkéntesek bevonása véleményem szerint akkor látna el népszerűsítő funkciót, ha az elvégzendő feladat "jutalmazó" jelleggel bírna; ha a civil résztvevők fontos eredményeket, felfedezéseket érezhetnek magukénak. A kétdimenziós GH-adatok feldolgozásában - a fenti megfontolások alapján - én nem látok ilyen potenciált. Ezzel szemben pozitív példának látom a Kollaboráció által elindított Einstein@Home programot (EinsteinHome, 2009), amelynek önkéntes résztvevői periodikus GH-források és pulzárok felfedezésében nyújthatnak hasznos segítséget. A programban egy "képernyőkímélő" alkalmazás letöltésével vehetnek részt a civilek, ami a számítógépük processzorának alacsony kihasználtságakor automatikusan bekapcsolódik a LIGO teljes eget feltérképező forráskeresésébe. A felhasználó a képernyőkímélő

beindulásakor megjelenítve láthatja is azt az égterületet, amelyet a számítógépe éppen feldolgoz, periodikus forrásokat keresve. Az Einstein@Home program GH-jelek felfedezését eddig ugyanúgy nem eredményezte, a rádióteleszkópok adataiban való pulzárkeresés során azonban pl. épp egy szentendrei magyar önkéntes számítógépe fedezett fel egy korábban ismeretlen pulzárt, 2011. decemberében.

Egy oktató és szórakoztató céllal megírt internetes játék született már, amiben a játékos egy bespirálózó kettősrendszer "hangját" próbálhatja meg azonosítani mesterségesen szimulált adatmintákban. A játék a (BlackHoleHunter, 2008) webcímen elérhető; hosszabb távú lekötöttséget azonban nem biztosít a felhasználók számára.

A 2012. márciusában tartott kollaborációs találkozón dr. Márka Szabolcsot választották meg az LVC ismeretterjesztésért és népszerűsítésért felelős bizottságának (*Education and Public Outreach Committee*) az élére. Ez kiváló lehetőséget nyújt arra, hogy az LVC népszerűsítő munkájában a magyar részvétel bővüljön. Az egyik legfontosabb feladatnak a bizottság a szakterület nemzeti nyelveken való meghonosítását jelölte meg. Emellett bármilyen innovatív népszerűsítő ötlet megvalósítására is adott a lehetőség.

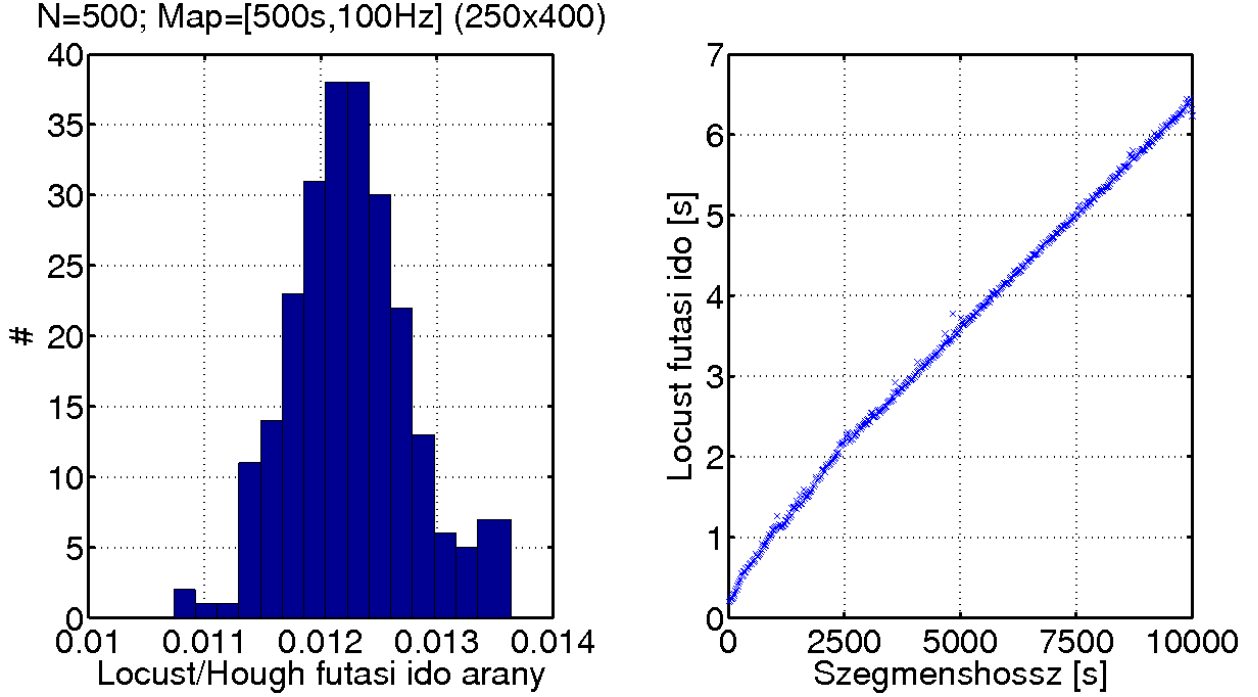
**Kérdés 4:** *"Míg a Hough transzformáció az összes küszöbérték feletti ponton elvégzi a  $N$  paraméterrel leírható görbe illesztését a STAMP egy (globális) maximumból indul ki, így valószínűleg jóval gyorsabb. Kérdés: Hogyan aránylik egymáshoz a Hough és a STAMP számítási igénye 1 hónap felvett adaton? Hogyan függ ez az arány az adathossz hosszától?"*

**Válasz 4:**

Mindenekelőtt pontosítanék: a STAMP a teljes programcsomagot jelenti, aminek részei a Hough és Locust képfeldolgozó szoftverek. A térképek feldolgozása a során globális maximumból a Locust algoritmus indul ki.

A Locust és a Hough egyaránt alkalmaz egy vágást az idő-frekvencia térképeken, ami feletti értékű képpontokat megtartja további feldolgozásra, míg az az alatti pontokat elveti. A vágási küszöbértéket tipikusan úgy állítjuk be, hogy a képpontok egy bizonyos hányada maradjon meg feldolgozásra. Ha a Hough algoritmussal a megmaradt  $N$  képpontot egy  $D$  dimenziós paramétertérbe képezzük le (ahol a Hough transzformáció során illesztett polinomgörbe fokszáma  $D - 1$  lesz), úgy a Hough eljárás  $F$  futási ideje az  $F \sim N^D$  arányosságot fogja követni (Raffai et al., 2007). Ha a képpé alakított adatszegmens hosszát  $T$ -vel jelöljük, úgy  $N \sim T$  miatt az  $F \sim T^D$  arányosság fog teljesülni. Látható, hogy ha futási időt akarunk spórolni, úgy elsősorban az illesztett polinomgörbe fokszámát érdemes alacsonyan tartanunk, de a keresésben használt fokszámnak csak a rendelkezésre álló processzoridő szab határt.

A Locust eljárás futási idejét a 2 ábra jobb oldali részén ábrázoltam. A keresést egy 100 Hz-es sávra,  $(2s) \times (0,25\text{Hz})$  képpont-felbontású térképre futtattam, ami megfelel a GRB-keresésben használt paramétereknek. A 20 másodperctől 10000 másodpercre növelt szegmenshossz mellett a feldolgozás ideje lényegében lineárisan nőtt. Ez a linearitás érthető, ha figyelembe vesszük, hogy a feldolgozott képpontok száma a szegmenshosszal lineárisan nő,



2. ábra. A Locust és a Hough algoritmus futási ideje arányának hisztogramja,  $D = 3$  Hough-paraméterre, és 500 futtatásra (balra). A térkép mérete 500s  $\times$  100Hz, azaz 250  $\times$  400 képpont volt; a Hough transzformációval 50 képpontot transzformáltam.

hiszen a lokális kereséssel végzett műveletszám a feldolgozandó pontok számával lesz arányos.

Végül 500 futtatást végezve megadtam a Locust és a  $D = 3$  Hough eljárás futási idejének arányát a 2 ábra bal oldali részén. Itt olyan paraméterkiosztást használtam a két algoritmusra, amiket a GRB-keresések kivitelezésére terveztünk. A szegmens hossza 500 másodperc volt, a (Baret et al., 2011) publikációnkban javasolt időablak-hossznak megfelelően; a térkép sávszélessége 100 Hz volt. A térkép (2s)  $\times$  (0, 25Hz) felbontás mellett így 250  $\times$  400 képpontból áll. A Hough algoritmussal transzformál képpontok száma ebben a példában 50 volt, a Locust/Hough futásiidő-arány átlagára így jött ki kb.  $1,2 \times 10^{-2}$ . Ha tehát azt vesszük, hogy  $F_{Hough} \sim T^D$  és  $F_{Locust} \sim T$ , úgy a futási idők arányára az  $F_{Hough}/F_{Locust} \sim T^{D-1}$  szabályt kapjuk.

A Locust és Hough eljárások futási ideje természetesen függ a használt számítógépes infrastruktúrától. A kódok Matlabban vannak megírva, és azon keresztül is futtatjuk őket, ami a futási idő szempontjából messze nem optimális. A keresésekkel ugyanakkor az adatokat off-line módon, nem valós időben akarjuk feldolgozni, a Matlab platform ezért megfelel a célnak (a programnyelv átláthatósága például a kódellenőrzés folyamatát lerövidíti).

A GRB-keresésben 500 másodperc hosszú adatszegmensből kell feldolgoznunk 182 darabot (ennyi azon GRB-k száma, amelyeket az S6 adatgyűjtés alatt figyeltek meg, és amelyek észlelési ideje alatt legalább két GH-detektor volt adatgyűjtési módban a H1, L1, és V1 detektorok közül).

**Kérdés 5:** "A folytonos hullámokat kereső csoport által alkalmazott Hough transzformációban a küszöbérték feletti pontokhoz 1-et az az alatti értékek 0-t rendelnek. Mindezt azért, hogy a rövid tranziens (környezeti) zajok által okozott csúcsok ne kerüljenek figyelembe vételre túl nagy súllyal. Hosszú jelek vizsgálatakor a glitch-rate már befolyásolhatja STAMP algoritmust által választott kezdeti pixeleket. Kérdés: Milyen szinten jelenthet ez problémát?"

**Válasz 5:**

Az általunk használt - általánosított - Hough algoritmus hasonlóan jár el: csak egy küszöbérték feletti pixelekre végezzük el az illesztést, az illesztéskor pedig a pixelek értékét nem vesszük figyelembe.

Lényeges különbség van azonban a pulzárokból érkező, folytonos hullámokat kereső algoritmusok, és a tranziens jeleket kereső algoritmusok nehézségei között. Mindkét típusú jelkeresés történhet célzott módon, egy égi forráspozíció irányába; valamint célzás nélkül, a teljes eget végigpásztázva. Ha egy keresés célzott módon történik, úgy több detektor adatsora, a célzott égterülethez tartozó időkézéseket figyelembe véve, keresztkorrelációval összekombinálható. Célzás nélküli esetben vagy kénytelenek vagyunk a detektorok adatsorait minden lehetséges időkézással keresztkorreláltatni, és egyesével elvégezni mindre a keresést (e módszer számításigényeinek a biztosítására született meg az Einstein@Home program; EinsteinHome 2009), vagy a keresést az egyes detektorokra külön kell elvégeznünk, és legfeljebb az egyes detektorok adatsoraiban azonosított jelöltek között utólag kereshetünk idő- és frekvenciasávbeli egybeeséseket. Számításigényes módszereknél, mint amilyen a Hough módszer, ez utóbbi történt a korábbi pulzárkeresések során (de la Jordana, 2010). Mivel tehát a folytonos jelkereséseknél a Hough módszert az egyes detektorokra külön alkalmazták, természetes módon kellett szembenézni az egyes detektorok magas glitch-gyakoriságával.

Ha egy célzott keresés során detektorpárok adatait keresztkorreláltatjuk, és a képfeldolgozó technikákat már a keresztkorrelált térképeken használjuk, úgy kizárólag a két detektor közötti korrelált glitchek maradnak meg zavaró hatásként. Ezek gyakorisága radikálisan alacsonyabb, mint az egyes detektorok glitch-gyakorisága. A STAMP esetében tehát, ahol az idő-frekvencia térképek előállítására keresztkorrelációval történik, az egyes detektorok glitch gyakorisága nem jelent akkora problémát. A pulzárkeresésekben ugyanez lett volna a helyzet, ha a Hough módszert célzott keresésekben, keresztkorrelált térképeken alkalmazzák. Itt azonban egy újabb lényeges különbség van a pulzár jeleinek keresésében, és a tranziensek keresésében. A pulzár jele ugyanis nagyon pontosan modellezett, arra tehát a keresztkorrelált adatokon a *matched filtering* technika is alkalmazható. Célzott pulzárkereséseknél a Hough technika nem kelhetett versenyre sem érzékenységben, sem számításigényeit tekintve a *matched filtering* technikával. Mivel a tranziensek esetén a modellek pontatlanok, vagy a paraméterterük túl nagy, ezekre *matched filtering* technika - egyelőre - nem alkalmazható. Az általánosított Hough transzformáció nem jelent optimális keresési technikát, de a nagyszámú elméleti modell sok különbözőségét lefedi; kényyszerű, de a robusztusságát tekintve ésszerű kompromisszumot jelent.

**Kérdés 6:** *"Hasonló képfeldolgozási problémák vannak az orvosi diagnosztikában (például szűkoszorú felismerése CT képeken) vagy a részecskefizikában (nyomvonalak rekonstrukciója). Kérdés: Milyen más már létező megoldások lettek megvizsgálva a Locus, Hough, STAMP algoritmusok kidolgozásakor. Miért vagy miért nem voltak alkalmazhatók?"*

**Válasz 6:**

A Locus és Hough algoritmusok mellett más képfeldolgozó/klaszterező eljárásokat is használunk a STAMP által előállított térképeken. A "Box Search" nevű módszer többféle méretű téglalapokon belül számol többpixel-statisztikákat, és elsősorban szélessávú GH-kitörések keresésében alkalmazható. A "BurstCluster" algoritmus egy küszöbérték mentén történt vágás után a közvetlenül szomszédos pixeleket foglalja egy klaszterbe, és az így kapott legnagyobb klasztert vizsgálja tovább. Végül a Radon transzformációval a térkép-pixelet különböző paraméterű egyenesek mentén integráljuk össze, és az így kapott integrálértékek között keresünk statisztikailag kiugró elemeket. A Radon transzformációt alkalmazó algoritmus (Radon, 1986) a Hough algoritmus egy speciális, csak lineáris alakzatokat kereső esete, érzékenységük az egyeneskeresésben lényegében megegyezik.

A felsorolt módszereket más kutatási területeken is alkalmazzák. Az ötféle módszerrel szűk- és széles frekvenciasávú, a térképek méretéhez képest rövid és hosszú időtartamú, valamint meghatározott alakzatot produkáló GH-kitöréseket is tudunk keresni. A hullámforma-modellek kidolgozottsága alapján úgy ítéltük, hogy további módszerek kidolgozására vagy átvételére egyelőre nincs szükség.

**Kérdés 7/a:** *Okozhat-e bármilyen asztrofizikai hatás 1000 másodperc nagyságrendű eltérést egy gamma-felvillanás forrása által kibocsátott elektromágneses és gravitációs hullám megérkezési ideje között?*

**Válasz 7/a:**

A 7/b kérdésben felvetett eseten kívül két jelenséget tartok még érdemesnek vizsgálni. Az első a gravitációs lencsehatás miatt bekövetkező időkéésés; a második a nemzérus gravitontömeg esete.

A GRB a gamma fotonokat feltételezések szerint egy szűk, kollimált nyaláb mentén bocsátja ki, miközben a forrás GH-kibocsátása közel izotrópikusnak feltételezhető. Ha a kollimált nyaláb nem a megfigyelő felé mutat, úgy elképzelhető, hogy a megfigyelő a GRB-forrás GH-jelét észlelni fogja, de az elektromágneses sugárzását nem. Tekintsünk azonban egy olyan speciális példát, amiben a GRB-forrás és a megfigyelő között egy  $M$  tömegű kompakt objektum helyezkedik el, ami a GRB gamma fotonjaira erős gravitációs lencsézéssel hat! Ha a nyaláb nem esik ki nagyon a GRB-forrás látóirányából, elképzelhetünk egy olyan esetet, amikor a megfigyelő a GRB-forrás GH-jelét közvetlenül a forrásból érkező észleli, míg a gamma fotonok csak a lencsézésnek köszönhetően, időkééséssel érkeznek meg hozzá.



Legyen a GRB-forrás távolsága a megfigyelőtől  $D$ , és legyen a lencséző objektum tömege  $M = \eta M_\odot$ . Helyezkedjen el a lencséző objektum pontosan a GRB-forrás látóirányában, a megfigyelőtől  $D_L = xD$  távolságra, ahol  $0 < x < 1$ ! Ha mind a gamma fotonok, mind a GH-jel esetében eltekintünk a nemzérus gravitációs potenciálon való áthaladás közben fellépő Shapiro időkééséstől (Narayan&Bartelmann, 1997), akkor a GH-jel megérkezésének idejéhez képest a gamma fotonok - a lencsézett pályán haladva -  $t_{GL}$  időkééséssel érkeznek meg. A (Narayan&Bartelmann, 1997) (63) és (21) egyenletei alapján:

$$t_{GL} = \frac{8G^2M^2}{Dc^5} \frac{1}{x(1-x)}, \quad (1)$$

ahol  $G$  a gravitációs állandó,  $c$  pedig a fény vákuumbeli sebessége. Az (1) egyenletből a lencse tömegére jellemző  $\eta$  szám kifejezhető:

$$\eta = \frac{c^2}{2GM_\odot} \sqrt{\frac{ct_{GL}D}{2}} \sqrt{x(1-x)}. \quad (2)$$

Észrevehetjük, hogy a szorzat első tagja a Nap  $r_S \simeq 3$  km Schwarzschild-sugarának reciproka. Legyen a kérdésben megfogalmazott feltétel alapján  $t_{GL} \gtrsim t^* = 1000$  s! Ekkor:

$$\eta \gtrsim \frac{c^2}{2GM_\odot} \sqrt{\frac{ct^*D}{2}} \sqrt{x(1-x)}. \quad (3)$$

Tegyük fel, hogy a GRB-forrás GH-jelét legfeljebb csak  $D \lesssim 100$  Mpc távolságról tudjuk észlelni. Ezt, és a GRB-források tipikusan nagy távolságait figyelembe véve vegyük úgy, hogy  $D = 100$  Mpc! Ekkor:

$$\eta \gtrsim 2,3 \times 10^{14} \sqrt{x(1-x)}. \quad (4)$$

Ha a lencséző objektum a forrás és a megfigyelő között pont félúton van, akkor az  $\eta \gtrsim 1,15 \times 10^{14}$  feltételt kapjuk.

Az  $\eta$  értéke alapján a feltételt akkor tudjuk teljesíteni csak (más, reális  $x$  értékekkel számolva is), ha a lencséző objektum egy galaxishalmaz. Ilyenből 100 Mpc-es távolságon belül van néhány darab. A feltétel teljesülése tehát nem mondható triviálisan kizárhatónak, a számolás mégis néhol túlbecsült, a feltétel teljesülése pedig valószínűtlen. Figyelembe kell vennünk továbbá, hogy a GH-jel a lencséző objektum közelében elhaladva nagyobb Shapiro időkéésést szenved el, mint a távolabb haladó fotonok. Emiatt a két jel megérkezése közötti időkülönbség a fentiekben számoltaknál kisebb lesz. Ez is amellettt szól, hogy  $t^* \gtrsim 1000$  s különbség a jelek észlelési ideje között nehezen elképzelhető.

Vegyük most azt az esetet, amikor a két jel akadálytalanul jut el a forrástól a megfigyelőig, azonban legyen most a graviton nyugalmi tömege  $m_0 > 0$ ! Az összefüggés ekkor a graviton nyugalmi tömege,  $v$  terjedési sebessége, és  $f$  (de Broglie) frekvenciája között:

$$m_0 = \frac{hf}{c^2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (5)$$

ahol  $h$  a Planck-állandó. A  $c$  sebességgel haladó fotonok a  $D$  távolságra lévő forrásból  $\Delta t$  idővel előbb érkeznek meg, mint a gravitonok. Ezt figyelembe véve:

$$m_0 = \frac{hf}{c^2} \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{c\Delta t}{D})^2}}. \quad (6)$$

Vizsgáljuk meg, legalább milyen nyugalmi tömeggel kell, hogy rendelkezzen egy  $f = 100$  Hz de Broglie frekvenciájú graviton ahhoz, hogy egy  $D \simeq 100$  Mpc távolságra lévő forrásból a fotonokhoz képest  $\Delta t \gtrsim t^* = 1000$  s időkéssel érkezzen meg:

$$m_0 \gtrsim \frac{hf}{c^2} \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{ct^*}{D})^2}} = 3,25 \times 10^{-55} \text{ kg}. \quad (7)$$

Ezt a tartományt a graviton tömegére már több kísérlet is kizárta (Goldhaber&Nieto, 2010), így egy esetleges nemzérus gravitontömeg miatt bekövetkező időkéssel nem érdemes számolnunk.

**Kérdés 7/b:** *Mekkora és milyen sűrűségű óriás molekulafelhőt kellene a fény útjába állítani ahhoz, hogy ekkora időkést tapasztaljunk optikai fotonokra? Létezik-e ilyen?*

**Válasz 7/b:**

Tekintsük a probléma egy egyszerűsített, klasszikus modelljét! Egy asztrofizikai forrásból egyszerre indul el egy fényjel és egy GH-jel a megfigyelő felé! Tegyük fel, hogy a GH-jel a forrás és a megfigyelő közötti útszakaszon végig  $c$  sebességgel halad, miközben a fényjel egy  $s$  hosszúságú szakaszon egy  $n > 1$  törésmutatójú közegen halad át! A fényjel ekkor  $\Delta t$  időkéssel érkezik a megfigyelőhöz a GH-jel megérkezése után:

$$\Delta t = (n - 1) \frac{s}{c}. \quad (8)$$

Legyen az  $n$  törésmutatójú közeg egy homogén csillagközi óriás hidrogénmolekula-felhő, amelynek molekulásűrűsége  $N$ , molekuláinak polarizálhatósága pedig  $\alpha \simeq 0,8 \text{ \AA}^3$  (Ishiguro et al., 1952). Tekintsük továbbá a felhő anyagát ideális gáznak! A felhő  $n$  optikai törésmutatója ekkor a Lorentz-Lorenz egyenlet (Aspnes, 1982) értelmében a következő formulával közelíthető:

$$n \approx \sqrt{1 + 4\pi\alpha N}. \quad (9)$$

Egy csillagközi óriás hidrogénmolekula-felhő molekulásűrűsége a megfigyelések alapján  $N \sim 10^6 - 10^{12} \text{ 1/m}^3$  (lásd Barta 2008 és hivatkozásai). Vegyünk a példánkban egy olyan sűrű csillagközi felhőt, amelynek molekulásűrűsége  $N_{HII} = 10^{12} \text{ 1/m}^3$ ! Tekintve, hogy erre

az esetre  $4\pi\alpha N_{HII} \simeq 10^{-17} \ll 1$ , a (9) egyenlet alapján a felhő törésmutatója így közelíthető:

$$n_{HII} \approx 1 + 2\pi\alpha N_{HII}. \quad (10)$$

Ahhoz tehát, hogy az optikai fényjel a GH-jelhez képest legalább  $\Delta t^* = 1000$  sec időké-  
sést szenvedjen, a példa molekulafelhőjének összesen legalább  $s_{HII}$  útszakaszt kell lefednie:

$$s_{HII} > \frac{c\Delta t^*}{n_{HII} - 1} \approx \frac{c\Delta t^*}{2\pi\alpha N_{HII}} = 2 \times 10^6 \text{ Mpc}. \quad (11)$$

Mivel  $s_{HII}$  nagyságrendekkel meghaladja azt a távolságot ( $\mathcal{O}(10\text{Mpc})$ ), amelyen belül egy ma létező GH-detektor képes lehet egy gamma-felvillanásból érkező GH-jel detektálására, a forrás és a megfigyelő közti távolságon  $\Delta t^* = 1000$  sec nagyságrendű időkésés a látóirányba eső csillagközi molekulafelhők miatt elképzelhetetlen (bármely ma tervben lévő GH-detektorra úgyszintén). Ha feltételezzük, hogy egy  $D = 10\text{Mpc}$  látótávolságot a teljes útszakasz mentén lefed egy  $N_{HII}$  sűrűségű hidrogénmolekula-felhő, az emiatt bekövetkező  $\Delta t_{HII}$  időkésés:

$$\Delta t_{HII} \approx 2\pi\alpha N_{HII} D/c \simeq 5 \text{ ms} \quad (12)$$

lesz, amit a gyakorlatban elhanyagolhatóan kicsinek vehetünk.

Ahhoz, hogy az időkésés ekkora látótávolságon  $\Delta t^* = 1000$  sec legyen, egy a teljes útszakaszt lefedő molekulafelhőnek  $N_{HII} \simeq 2 \cdot 10^{17} \text{ 1/m}^3$  sűrűségűnek kellene lennie. Ez a legsűrűbb csillagközi molekulafelhők sűrűségénél is öt nagyságrenddel nagyobb sűrűségérték, ez az eset is tehát elképzelhetetlen. Ha figyelembe vesszük, hogy a csillagközi óriás hidrogénmolekula-felhők mérete  $\mathcal{O}(10\text{kpc})$  nagyságrendű (lásd Barta 2008 és hivatkozásai), a  $\Delta t^* = 1000$  sec időkésés megvalósulásához egy ilyen méretű, látóirányba eső felhő molekulásűrűségének  $N_{HII} \simeq 2 \cdot 10^{20} \text{ 1/m}^3$  kellene lennie, ami a legsűrűbb megfigyelt felhőkénél nyolc nagyságrenddel nagyobb sűrűségérték.

Végül tekintsünk egy olyan gammafelvillanás-forrást, amit egy 100 fénymásodperc sugarú gázburok vesz körül! Közelítsük a burok anyagát továbbra is ideális gázként, amely anyagának polarizálhatósága szintén  $\alpha \simeq 0,8\text{\AA}^3$ ! Ahhoz, hogy egy optikai fényjel a burkon áthaladva  $\Delta t^* = 1000$  sec időkésést szenvedjen el, a burok részecskéinek számsűrűsége  $N_{\text{burok}} \simeq 1,2 \cdot 10^{31} \text{ 1/m}^3$  kellene, hogy legyen. Ez hidrogénanyagot feltételezve  $\rho_{\text{burok}} \simeq 4 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$  tömegsűrűséget jelent, ami a Nap feltételezett belső magsűrűségének közelítőleg a negyede. Jóllehet ilyen tömegsűrűségű "gáznál" a (9) képlettel közelített Lorentz-Lorenz egyenlet már érvényét veszti, ekkora sűrűségű "ideális gáz" burok a forrás körül nem is lehetséges. A gamma-felvillanás forrása körül feltételezett burokból a fényjel kijutásához szükséges időt továbbá a (Baret et al., 2011) publikációnkban már figyelembe vettük.

**Kérdés 7/c:** *Lehetséges-e a  $\Delta t^* = 1000$  sec időkésés egy molekulafelhőn áthaladó gamma fotonokra?*

### Válasz 7/c:

Az optikaihoz közeli hullámhosszakon egy közeg törésmutatójának hullámhossz-függése a Cauchy-egyenlettel közelíthető (Jenkins&White, 1981):

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots, \quad (13)$$

ahol  $A$ ,  $B$ ,  $C$  kísérletileg mérhető állandók. Ez a formula azonban a  $\lambda \sim 10^{-12}$  m hullámhosszú gamma-tartományban már nem használható.

A gamma-fotonok kölcsönhatása egy csillagközi felhővel az optikai fotonokhoz képest más természetű lesz. Ilyen energiájú fotonok a közegen áthaladva fotoeletromos-effektuson, Compton-szóráson, vagy párkeltésen keresztül hathatnak kölcsön a közeggel. A kölcsönhatás tipikusan utófényt okoz, ami a gammánál nagyobb hullámhossz-tartományokon esetenként ténylegesen meg is figyelhető (Nousek et al., 2006).

Egy gamma-felvillanásból származó gamma-fotonok és a csillagközi anyag kölcsönhatását részletesebben a (Barkov&Bisnovaty-Kogan, 2005) publikációban vizsgálták. A csillagközi anyagnak az esetleges gamma-fotonokat késleltető hatását, mint a kölcsönhatás egy lehetséges következményét ebben a publikációban sem említik.

A továbbiakban tisztelettel kérem a fenti válaszaim elfogadását.

Raffai Péter,  
doktorjelölt

*Budapest, 2012. április 23.*

# Irodalomjegyzék

- Galaxy Zoo Project: <http://www.galaxyzoo.org/>; Raddick, J. et al 2007, Bulletin of the American Astronomical Society, 39, 892
- Galaxy Zoo Supernovae Project: <http://supernova.galaxyzoo.org/>; Smith, A. M. et al 2011, MNRAS, 412, 1309
- Fairhurst, S., Kalogera, V., Mandel, I., & Weinstein, A. 2010, "An Astrophysical Metric for LIGO Open Data Release", LIGO Document T1000414
- Einstein@Home: <http://einstein.phys.uwm.edu/>; The LSC 2009, Phys. Rev. D, 80, 042003
- Black Hole Hunter 2008: <http://www.blackholehunter.org/>
- Raffai, P., Frei, Z., Márka, S., & Márka, Z. 2007, Class. Quantum Grav., 24, S457
- Baret, B., Bartos, I., Bouhoua, B., Corsic, A., Di Palma, I., Donzauda, C., Van Elewyck, V., Finley, C., Jones, G., Kouchnera, A., Márka, S., Márka, Z., Moscoso, L., Chassande-Mottin, E., Papa, M. A., Pradier, T., Raffai, P., Rollins, J., & Sutton, P. 2011, Astroparticle Physics, 35, 1
- de la Jordana, S., & The LVC 2010, Journal of Physics: Conference Series, 228, 012004
- Ishiguro, E., Arai, T., Mizushima, M., & Kotani, M. 1952, Proc. Phys. Soc. (London) A65, 178
- Radon, J. 1986, IEEE Transactions on Medical Imaging, MI-5, 4
- Narayan, B., & Bartelmann, M. 1997, "Lectures on Gravitational Lensing", arXiv:astro-ph/9606001v2
- Goldhaber, A. S., & Nieto, M. M 2010, Rev. Mod. Phys., 82, 939
- Aspnes, D. E. 1982, Am. J. Phys. 50, 704
- Barta, D. 2008, "Gravitációs hullámok terjedése és diszperziója csillagközi anyagban", TDK dolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Jenkins, F. A., & White, H. E. 1981, "Fundamentals of Optics", 4th ed., McGraw-Hill Inc.

Nousek, J. A., et al. 2006, ApJ, 642, 389

Barkov, M. V., & Bisnovatyi-Kogan, G. S. 2005, Memorie della Società Astronomica Italiana, 76, 650