

Raffai Péter "Az interferometrikus gravitációshullám-detektorok alkalmazása az asztrofizikában és a gravitációkutatásban" című doktori értekezésének bírálata

Az értekezésről alkotott véleményemet az ELTE TTK Doktori Iskoláiban szokásos szempontok szerint rendezve a következő.

1. Az értekezés témájának időszerűsége

A gravitációs erő megértése, gravitációs hullámok (GH) vizsgálata a jelenkori fizika egyik legfontosabb kutatási témája. Az értekezésben ismertetett eredmények a LIGO gravitációshullám-detektor fejlesztéséhez és adatainak feldolgozásához kapcsolódik. A Jelölt azokat az eredményeket ismerteti értekezésében, amelyekhez hozzájárulása a legjelentősebb volt. A Jelölt munkája érdeklődésre tart számot. Ezt mutatja az is, hogy az értekezésben ismertetett 2011-s cikkekre is vannak már független hivatkozások.

2. Az értekezés fő fejezeteinek rövid ismertetése, a dolgozat felépítésének logikus volta

Az értekezés előszava hasznos betekintést nyújt a LIGO kollaboráció működésébe, bemutatja a Jelölt és az ELTE-s csoport szerepét és helyét a konzorciumon belül.

A bevezető áttekinti a gravitációs sugárzás elméleti hátterét, számba veszi lehetséges mérhető forrásait (kompakt kettősrendszerek, periódikus és kváziperiódikus jelforrások, nagyenergiájú ütközések és csillagösszeomlások, sztochasztikus GH-háttér), és bemutatja az észlelés alapjait, valamint a jelenleg működő és tervezett műszereket.

Az értekezés első része a hosszú GH-tranziensek keresését tárgyalja. A hosszú GH-tranziensek (kb. $1-10^5$ s hosszú jelek) időhosszukban a hagyományosan vizsgált rövid és "állandó" GH-jelek közé esnek. Áttekinti a hosszú GH-tranziens jelek lehetséges asztrofizikai forrásait. Megállapítja, hogy ezen jelek keresésére az eddigiektől eltérő megközelítésű jelkeresési módszerek ideálisabbak. A Jelölt ismertette a saját fejlesztésű programcsomagjuk (STAMP) eljárásait, alkalmazását környezeti zajok azonosítására. Végül a gamma-felvillanások GH-tranzienseinek keresését tárgyalja, különös tekintettel a keresési időablak meghatározására.

Az értekezés második részében az interferometrikus szenzorok kalibrálásának áttekintése után egy lehetséges eszközt (Dynamic Field Generator, DFG) javasol a kalibráció pontosítására. Eztán egy kísérletet javasol, amellyel alkalmas lehet 0,1-10m skálán Yukawa-típusú nem-newtoni gravitációs potenciálok kimérésére.

Az értekezés felépítése jó, logikusan következnek egymás után a Jelölt eredményei. Bár érteni vélem a Jelölt logikáját, egyes alfejezeteket talán máshol is el lehetne helyezni. Pl. a gamma-kitörések fenomenológiáját (1.1.3. alfejezet) nem az "Alapfogalmak és matematikai definíciók" (1.1.) fejezetben, hanem inkább a "Hosszú GH-tranziensek keresése" (1.2.) fejezetben ismertetném. Hasonlóan az 1.2.6 alfejezet lehetne az 1.3 fejezet elején is szerintem, de ezek valószínűleg csak izlésbeli különbözőségünkől adódnak.

3. A vizsgálati módszerek korszerűsége, színvonalassága

A gravitációkutatás területén a LIGO műszer a kutatás élvonalában van. A LIGO műszer és azzal végzett munka korszerűsége, színvonalassága nem kérdéses. A jelölt munkája során alkalmazott matematikai módszerek, a megírt szoftverek, amelyeket a LIGO konzorcium használ vagy

használni fog szintén azok.

4. Újként elfogadott eredmények felsorolása, a tézispontok tiszta megfogalmazása

- A rövid és az "állandó" GH-jelek mellett bevezetik a hosszú GH-tranziens fogalmát (1.2. fejezet ill. Thrane et al. 2011). Ezen jelek a másik két csoporttól eltérő forrásoktól származhatnak, másrészt a hosszú GH-tranziens jelek keresésére más fajta keresési módszerek optimálisabbak lehetnek.
- Áttekintették a lehetséges hosszú GH-tranziensek forrásokat és modelljeiket (1.2.1. alfejezet ill. Thrane et al. 2011). A modellek alapján megbecsülték a várható jelek detektálhatóságát. Kérem a Jelöltet, hogy a bíralatra adott válaszában **foglalja össze** ezeket az 1.1. táblázathoz hasonlóan.
- Megalkották a hosszú GH-tranziensek keresésére specializált programcsomagot (STAMP, 1.2.2. alfejezet ill. Thrane et al. 2011).
- Megvizsgálták egy teszt-statisztika valódi LIGO detektorok zajmintáiból nyerhető eloszlását, és megállapították, hogy az eloszlás - Gauss-eloszlású detektor-zajt feltételezve – Monte Carlo szimulációkkal is reprodukálható (1.2.3. alfejezet ill. Thrane et al. 2011). Ezáltal a teszt-statisztikák kereséshez használt észlelési határértékei beállíthatóak.
- Megalkották a kvázi-monokromatikus, hosszú GH-tranziensek keresésére specializált Locust és Hough képfeldolgozó eljárásokat (1.2.4. és 1.2.5. alfejezetek, valamint Thrane et al. 2011 és Raffai et al. 2007). Az eljárások alkalmazhatóságát hosszú GH-tranziensek keresésében demonstrálták.
- Gamma-felvillanásokból származó, kvázi-monokromatikus, hosszú GH-tranziensek célzott kereséséhez a keresési paraméterek optimalizálási folyamatában megállapítottak egy időablakot, amelyen belül egy gamma-felvillanás forrás objektumából a GH-jel megérkezése várható (1.3. fejezet ill. Baret et al. 2011). Az időablak [-350s,+150s] arányban oszlik meg a GRB észlelési ideje körül.
- Kidolgoztak egy kísérleti eljárást, amellyel a GH-detektorok alacsonyfrekvenciás érzékenységét korlátozó gravitációs gradiens zajra vett átviteli függvénye feltérképezhető (2.2. és 2.3. fejezetek ill. Matone et al. 2007). Az eljárásban eszközként egy olyan periodikusan változtatott tömegeloszlást (egy DFG-t) javasolnak, amelynek lokális gravitációs terében a kvadrupól tag dominál.
- Analitikus számolásokkal igazolták, hogy a GH-detektor tesztömegétől néhány méterre elhelyezett, kb. $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ kvadrupólmomentumú DFG gravitációs gradiens jelét a detektor észlelni tudja, és várhatóan képes a GH-detektorok 1%-nál pontosabb amplitúdó- és fáziscalibrációjára (2.3.2-2.3.5. alfejezetek ill. Matone et al. 2007).
- Numerikus szimulációkkal megállapították azt a méret és erősségi skálát, amely határokon belül a közeljövőben rendelkezésre álló interferometrikus szenzorok reálisan képesek lehetnek a Yukawa-típusú nem-newtoni gravitációs potenciálok kimérésére (2.6. fejezet ill. Raffai et al. 2011). A mérés kivitelezésére két DFG alkalmazását javasolják, egy kioltási kísérletben.

A felsorolt tézisek megfogalmazása világos, azokat új eredményként **elfogadom**.

5. Az eredmények megfelelő közlése referált publikációkban és publikációs teljesítmény

Az értekezésben leírt eredmények megfelelő formában szerepelnek a jelölt publikációiban. A Jelölt publikációs tevékenysége (26 referált cikk, ebből 2 elsőszerzős) meghaladja a doktori fokozat megszerzéséhez szükséges minimumot.

6. Az értekezés egészével és részleteivel kapcsolatos kérdések



A Jelölt a bevezetőben megadta a különféle kompakt kettősrendszerekre adott eseményráta becsléseket (20. oldal). Ezek alapján a második generációs LIGO évente több tucat ilyen forrás gravitációs hullámait fogja majd észlelni. Az első generációs LIGO érzékenysége ettől jócskán elmaradt. Milyen eredményeket vártak 2010-ig? (Nem csak a kompakt kettősökre gondolok itt.)



Az AdvLIGO milyen távolságig tud majd extragalaktikus szupernóva kitérősekből származó gravitációs hullámokat detektálni?

Van esély arra, hogy a Sgr A* körül keringő S-csillagoktól eredő, vagy az anyagelnyelési eseményekhez (amelyek a flereket okozhatják) kapcsolódó gravitációs hullámokat észlelni lehet majd? Léteznek ilyen eseményekre modellek?



Javul-e majd a LIGO asztrometriai pontossága a jelenlegi fejlesztésekkel?

Az értekezés első részében fontos szerepet játszanak a GRB-k. Együttműködnek GRB-kel foglalkozó magyar csillagászokkal (pl. Bagoly Zsolt, Balázs Lajos, Horváth István, Mészáros Attila, Mészáros Péter)?

Hogyan áll most az 1.2.6. alfejezetben leírt STAMP/GRB program? Milyen GRB-k észlelését várják? A GRB070201 jelű forrásnál kettősrendszert feltételezve, a STAMP más alsó határt tudna adni a forrás távolságára?

A 2.2 fejezetben szerepel, hogy nagyon sok környezeti tényezőt kell figyelni (pl. repülőgépek, futó nyulak), amelyek befolyásolhatják a gravitációs gradiens zajt. Meg lehet figyelni minden környezeti tényezőt?



A 2.3 fejezetben leírt módszerükkel elérhető a jó jel-per-zaj arányú detektáláshoz szükséges 2%-s mérési pontosság. Reálisan milyen eredményeket vártak a kisebb pontosságú LIGO-tól? A javasolt módszer mellett milyen más módszereken dolgoznak a konzorciumban? Mekkora a verseny? Versenyképes ez a megoldás? A 85-86. oldalon leírt foton kalibrátor mellett szükség lesz más módszerekre is? Mennyire reális a 2.3 fejezetben javasolt DFG eszköz megépülése? Mennyibe kerülne? Mennyivel kerülne többbe, ha figyelembe vennék az extra ötleteket (légmotor, stb.)? Mennyi munkát jelentene a megépítése (időben, FTE-ben)? Magyar vagy amerikai csoport építené meg?

A nem-newtoni potenciál méréséhez több hónapos mérésekre lenne szükség (ld. 2.6.2 alfejezet). Kivitelezhető a mérés a LIGO-nál? Nem jelentene többlet idővesztést a LIGO működésében?



A 6. ábrán nem világos számomra, hogy a sugárnyomás-sörétzaj görbe hogyan adódott. Kérem magyarázza el.

A 7. ábrán az S1 adatgyűjtési időszakra megadott 2002-s dátum látszólag ellentmond a 31. oldalon szereplő 2004-s kezdési időpontnak. Kérem magyarázza el.

Fel van-e oldva valahol az "IFO+PA" rövidítés? (ld. 113. oldal, ill. 2.24 ábra)



Kérem foglalja össze röviden mivel foglalkozik jelenleg.

7. Az értekezés szövegének helyesírása, a megfogalmazás tisztasága

Az értekezés szövegében csak pár hibát találtam (ld. alább). A szöveg megértését nagyban segíti, hogy a Jelölt a fejezetek elején ismerteti azok szerkezetét. A dolgozatot magyarul írta, de számos szakkifejezést angolul használ. Ez számomra nem volt zavaró, de felmerült bennem a kérdés, hogy a téma szakkifejezéseinek mekkora részének van magyar megfelelője, és azokat használják-e munka közben, a "hétköznapiokban". Pl. van-e magyar szakkifejezés a strain-re?

Hibajegyzék:

- 83. oldalon szerepel a GGN rövidítés, de csak a 86. oldalon oldja fel,
- 85. oldal 1. sor: Fabry-Peret – Fabry-Perot,
- 85. oldalon a latex *italics* parancs elöl lemaradt a \ ("it fringe counting"),
- 86. oldal 4. bekezdésben "arcmín" helyett lehetne ívperc,
- 105. oldalon "... összefoglaló Fig.18. jelű ábrája", helyett csak "18. ábrája".

Javaslatok:

- a 11. oldalon szereplő "elektromágneses teleszkópok" helyett lehetne hagyományos távcsövek vagy hagyományos, elektromágneses hullámokat detektáló távcsövek,
- a 2.103 egyenlet szerepelhetett volna korábban is (a 2.4 fejezetben),
- a 2.24 ábrán a különböző vastagságú piros vonalakat lecserélném egymástól jobban elütő vonalakra.

8. Az angol nyelvű összefoglaló helyessége

Az angol nyelvű összefoglaló megfelelő.

A fentiekben leírtak alapján Raffai Péter doktori értekezését vitára bocsáthatónak tartom, **summa cum laude** minősítést javaslok.

Budapest, 2012.03.13.

Mosoni László
MTA CSFK CSI
tudományos munkatárs