

Detekce gravitačních vln na detektoru LIGO

Jakub Dorňák¹, Maximilian Eška², Daniela Kopáčková³,
Karel Lintimer⁴, Aneta Pjatkanová⁵, Tibor Staněk⁶

¹dornak.k7@gmail.com, ²maximilian.eska@gmail.com, ³danikropack@seznam.cz

⁴karel.lintimer@seznam.cz, ⁵a.pjatkanová@gmail.com, ⁶tibor.stanek@gmail.com

Abstrakt

Tato práce se soustředí na technický a matematický princip detekce gravitačních vln. Využili jsme měření z detektoru LIGO a k analýze dat jsme použili Fourierovu transformaci, která má široké využití i v jiných oborech.

1 Úvod

Rok po publikování obecné teorie relativity, přichází Albert Einstein s dalším převratným tvrzením, předpovídá existenci gravitačních vln. Tyto vlny by měly vznikat v případě, že dojde k nerovnoměrné změně tvaru hmotného tělesa, jež svou existencí zakřivuje časoprostor ve svém okolí. K takovému jevu může dojít například v případě splnutí dvou vzájemně se obíhajících černých děr, případně neutronových hvězd. Na potvrzení existence gravitačních vln jsme si museli počkat téměř sto let, tedy do roku 2015, kdy došlo k jejich první detekci na detektoru LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory).

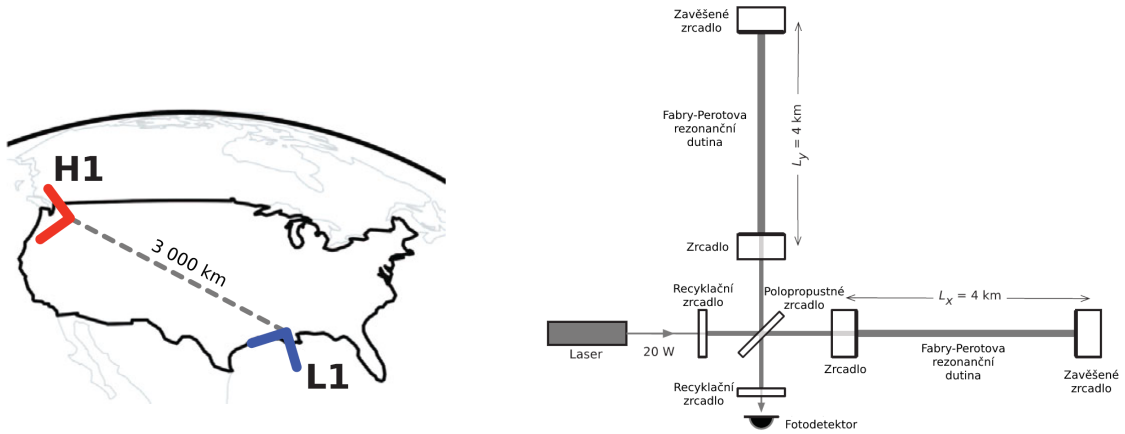
2 LIGO

Interferometr LIGO se skládá ze dvou stejných detektorů, umístěných v Hanfordu a Livingstonu ve Spojených státech amerických, viz [1](#) vlevo. Vzájemná vzdálenost těchto detektorů činí 3000 km, což umožňuje ověřování správnosti signálů. Detektory se skládají ze dvou navzájem kolmých ramen, každé o délce 4 km, v nichž je po celou dobu udržováno vysoké vakuum (jedná se o největší vakuovou aparaturu na světě). Na začátku je laserem o výkonu okolo 20 W vyslán paprsek, který se následně v polopropustném zrcadle rozdělí na dva. Na koncích ramen se tyto paprsky odrazí od zavěšených zrcadel a putují zpět k polopropustnému zrcadlu, kde spolu interferují a dopadají na fotodetektor, viz [1](#) vpravo. Díky Fabry-Perotově rezonanční dutině jsou paprsky na cestě zpět mnohokrát odraženy, čímž se až 300 krát zvýší citlivost detektoru.

Pokud detektorem prochází gravitační vlna, dojde ke změně délky ramen, rozdílne interferenci paprsků a v důsledku toho poklesu intenzity výsledného paprsku dopadajícího na fotodetektor. Změnu délky ramen můžeme popsat pomocí relativního prodloužení h :

$$h = \frac{\Delta l}{l},$$

kde Δl je vzdálenost, o kterou se posunula ramena při průchodu gravitační vlny a l je původní vzdálenost ramen (4 km).



Obrázek 1: Vlevo: Mapa umístění detektorů. Vpravo: Schéma detektoru LIGO. Převzato z [1]

3 Fourierova transformace

Jakákoliv periodická funkce může být zapsána nekonečným součtem sinů a kosinů s vhodně zvolenými parametry.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} [a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)] \quad (1)$$

Při sečtení dostatečného množství součtu sinů a kosinů se libovolně přiblížíme původní funkci. K výpočtu jednotlivých parametrů používáme tyto vztahy:

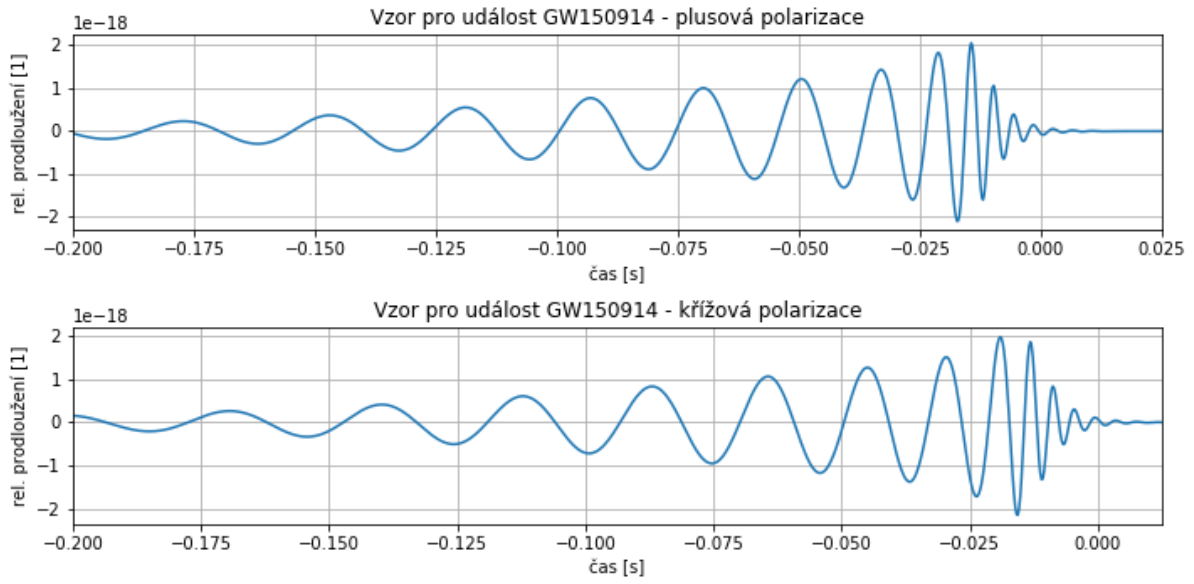
$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx. \quad (2)$$

Fourierova transformace se používá k reprezentaci signálu pomocí amplitud jednotlivých frekvencí a_k, b_k .

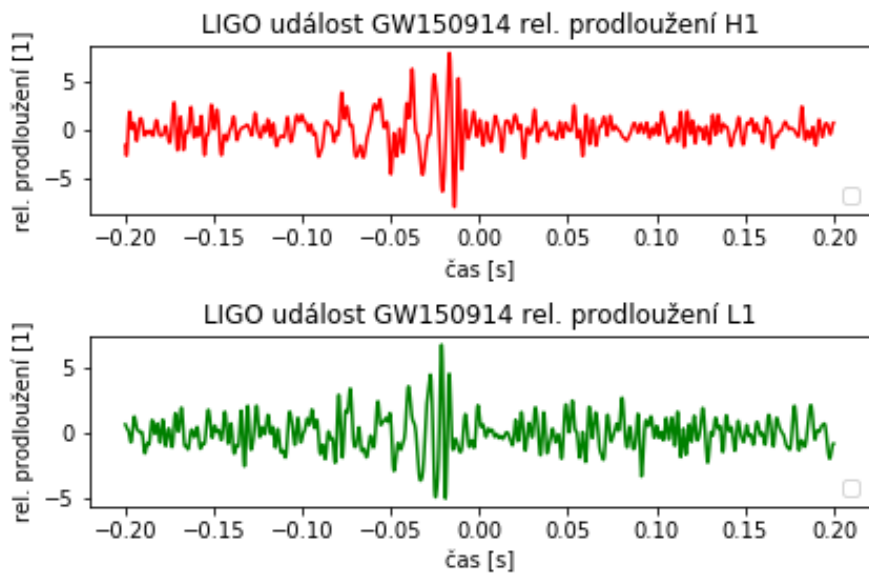
V praxi se tato metoda používá v spektroskopii různého druhu, úpravě signálu (ladění starých televizí, a.j.) nebo ke komprimování fotek ve formátu JPEG. Obecnější verze Fourierové transformace se využívá i při analýze signálu gravitačních vln, jako v našem případě.

4 Výsledky

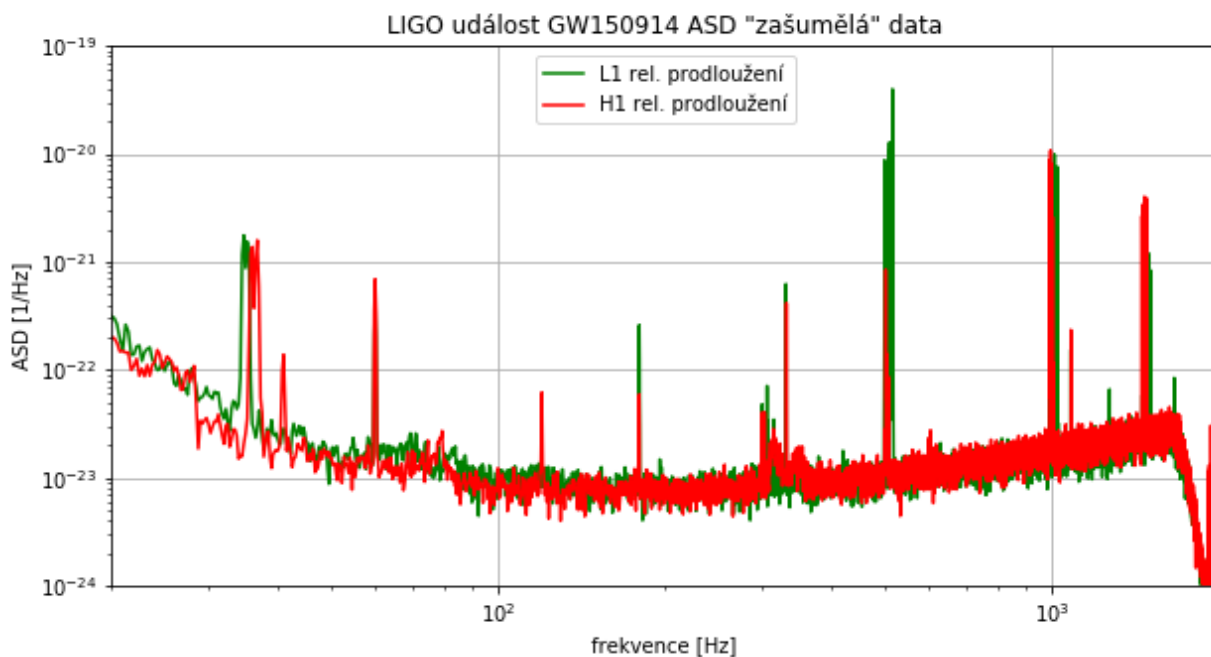
Srážka dvou černých děr GW150914 zaznamenaná detektorem LIGO Hanford (H1) a Livingston (L1). Pro analýzu dat jsme měli k dispozici vzorový graf (viz obr. 2) vytvořený počítačovou simulací, který jsme porovnávali s naměřenými hodnotami (viz obr. 3). Výsledkem byl profil téměř shodný se vzorovým a znázorňující srážku dvou černých děr ke které došlo 14. 9. 2015 v 9:50:45. U těchto hodnot jsme museli odstranit nežádoucí šum vymazáním určitých vlnových délek/frekvencí, které jsou znázorněny na obr. 4.



Obrázek 2: Vzorový profil gravitační vlny vytvořený počítačovou simulací.



Obrázek 3: Naměřená data po odstranění frekvencí vzniklých vlivem vnějších faktorů.



Obrázek 4: Frekvenční spektrum znázorňující naměřené hodnoty včetně šumových frekvencí.

5 Shrnutí

Zreprodukovali jsme první zaznamenání gravitační vlny na detektoru LIGO. K úpravě signálu jsme použili Fourierovu transformaci a další analýzou jsme získali graf, který téměř odpovídal grafům nasimulovaných událostí.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali rodičům za finanční podporu, Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské za poskytnutí prostorů a vedoucímu miniprojektu Ing. Josefu Schmidtovi, Ph.D. za vedení naší práce během miniprojektu.

Reference

- [1] B. P. Abbott. *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*. Phys. Rev. Lett. **116** 061102 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- [2] B. P. Abbott. *Binary Black Hole Mergers in the First Advanced LIGO Observing Run*. Phys. Rev. X **6** 041015 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.6.041015>
- [3] P. Kulhánek. *Gravitační vlny byly konečně polapeny*. https://www.aldebaran.cz/bulletin/2016_06_gra.php.