

ГРАВИТАЦИОНИ ТАЛАСИ

Ново чуло за посматрање Универзума

Марко Војиновић

Група за гравитацију, честице и поља
Институт за физику, Универзитет у Београду



ТЕМЕ

- Концепти и теорија
- LIGO експеримент
- Детекција гравитационих таласа
- Будућност

КОНЦЕПТИ И ТЕОРИЈА

Њутнова гравитација:

- Нерелативистичка теорија гравитације: тренутно “дејство на даљину”

АЛИ!

- У специјалној теорији релативности нема појма “симултаности”
- У односу на који референтни систем је дејство гравитације “тренутно”?
- Релативистичка гравитациона сила треба да се простира коначном брзином

⇒ **Постоје гравитациони таласи!**



Дакле, постојање гравитационих таласа је очекивано. Које су њихове особине?

КОНЦЕПТИ И ТЕОРИЈА

Општа теорија релативности (Ајнштајн, 1915):

- Релативистичка теорија гравитације
- Метрика просторвремена је динамичка варијабла

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu .$$

Метрички тензор $g_{\mu\nu}$ **дефинише растојања** између тачака у просторвремену, и добија се решавањем Ајнштајнових једначина поља

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G T_{\mu\nu} .$$

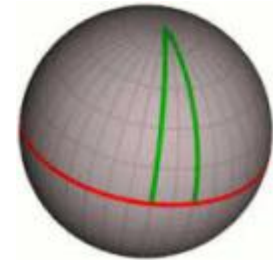
- Играмо се са дефиницијом растојања!
- Мноштво предикција, нас интересују две:
 - **геодезијска девијација,**
 - **гравитациони таласи.**

КОНЦЕПТИ И ТЕОРИЈА

Геодезијска девијација:

- Одговорна за ефекте плиме и осеке
- Ако је $\mathbf{u}$ тангента на геодезик, а ϵ размак између два геодезика, тада је

$$\nabla_{\mathbf{u}} \nabla_{\mathbf{u}} \epsilon^\mu = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma} u^\nu u^\rho \epsilon^\sigma .$$

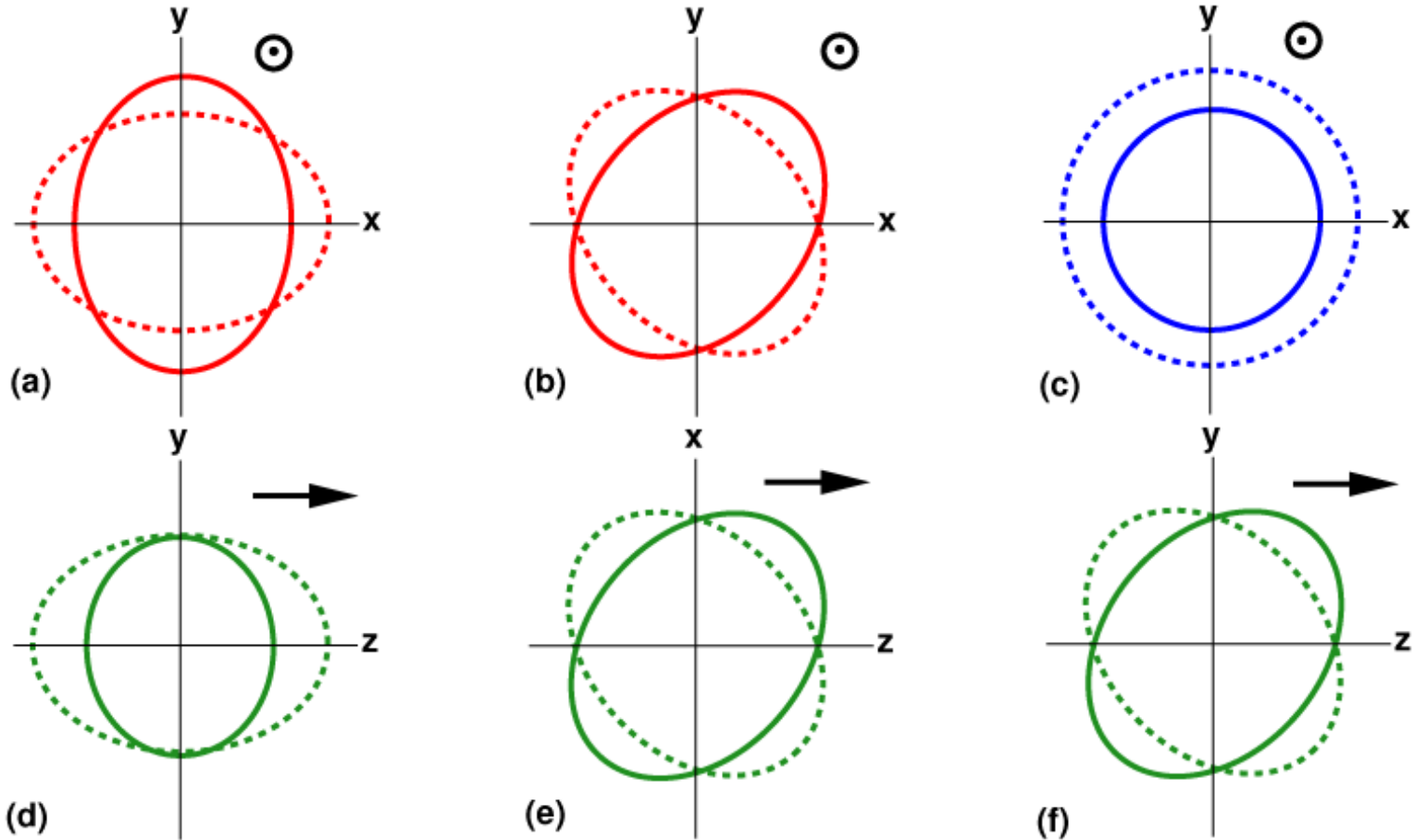


Гравитациони таласи:

- Осцилације метричког тензора (тј. дефиниције растојања) са временом
- Слични ЕМ таласима: трансверзални, две поларизације (“плус” и “пута”), крећу се брзином светлости, носе енергију и импулс
- Индиректно детектовани прецизним мерењем орбита бинарних неутронских звезда (PSR B1913+16)
- Нобелова награда за физику 1993: R. A. Hulse, J. H. Taylor, Jr.

КОНЦЕПТИ И ТЕОРИЈА

Могуће поларизације гравитационог таласа:

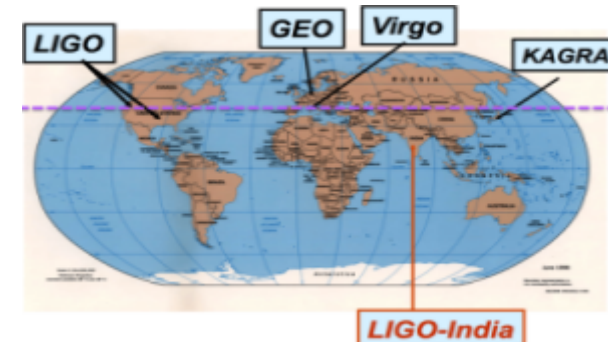


[анимације 1 - 4]

LIGO ЕКСПЕРИМЕНТ

Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory: [//www.ligo.org//](http://www.ligo.org//)

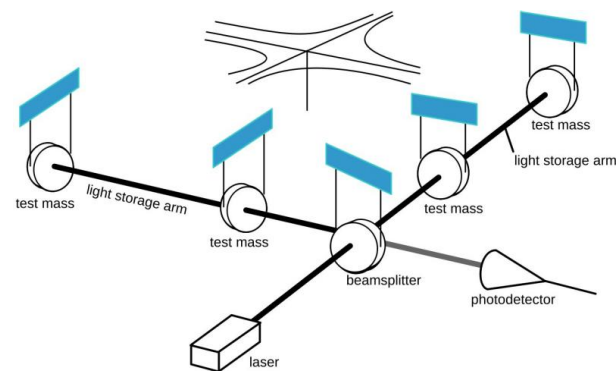
- 1970-тих: идеја, 1990-тих: изградња, 2010-тих: унапређивање, 2015: прва мерења, 2021: design sensitivity
- Обрада података: **Einstein@home**
- Највећи пројект икада финансиран од стране NSF
- У колаборацији са сличним експериментима у Европи и Азији (VIRGO, GEO600, KAGRA, INDIGO)



LIGO ЕКСПЕРИМЕНТ

Мајкелсонов интерферометар:

- Ласер: 1064 nm Nd:YAG, 20 W улаз, 700 W beam splitter, 100 kW између огледала
- Вакуум: 5000 m³ на мање од 1 μ Pa
- Огледала: силицијум, 40 kg
- Осетљивост: $\Delta L \sim 10^{-20}$ m, $L = 4$ km, $\Delta L/L \sim 10^{-23}$
- На апаратуру не сме да делује **ниједна хоризонтална сила!** Извори шума: механички, термални, електромагнетни, Хајзенбергови, гравитациони.
- Шум се компензује армијом сензора: сеизмометри, акцелерометри, микрофони, магнетометри, радио-пријемници, метеоролошки сензори, монитори АС напајања, детектори космичког зрачења...



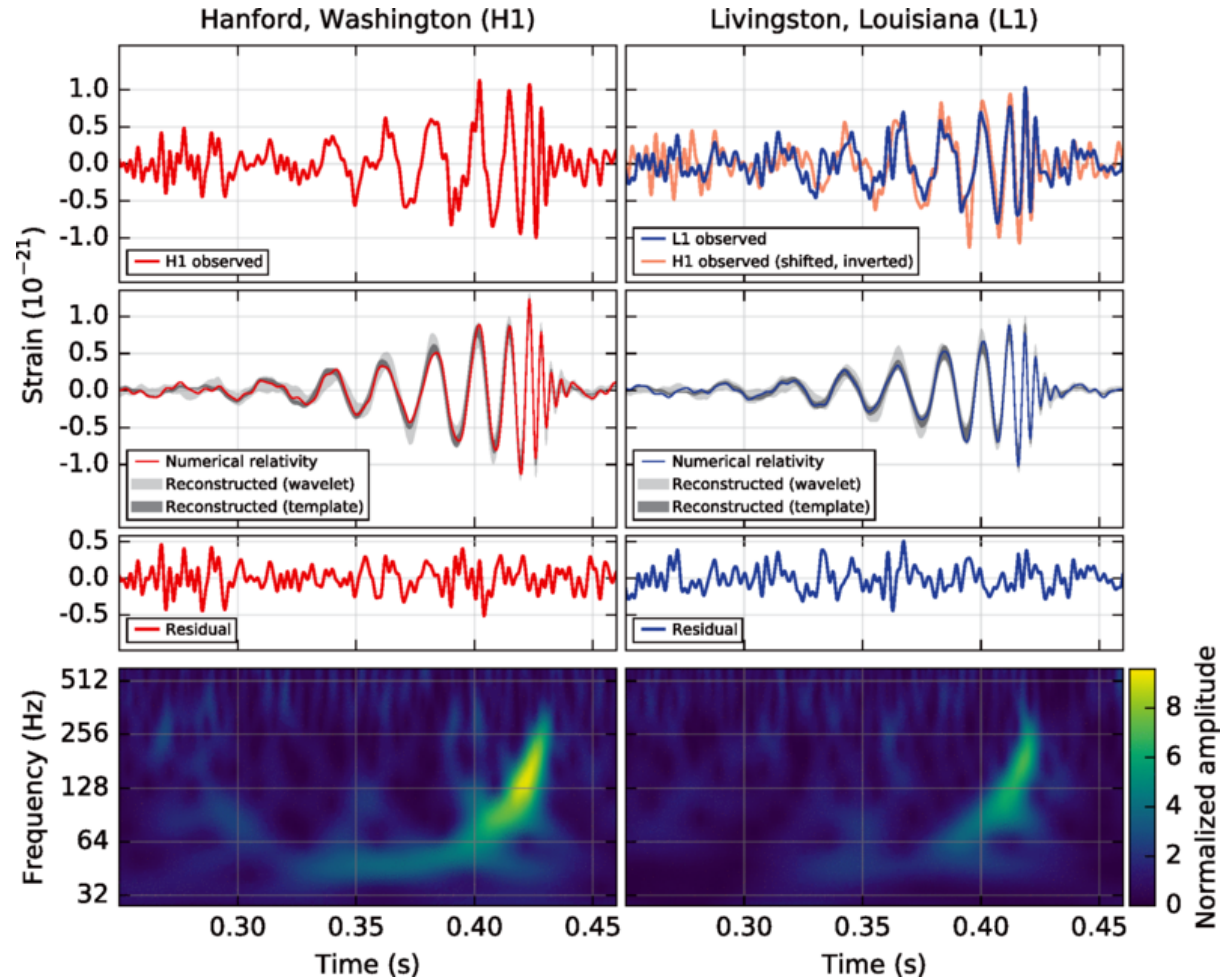
[анимација 5]

LIGO ЕКСПЕРИМЕНТ



ДЕТЕКЦИЈА ТАЛАСА

14. септембар 2015, 09:50:45 UTC, догађај GW150914:



ДЕТЕКЦИЈА ТАЛАСА

Убрзо прихваћен у општој јавности:



[COLLECTIONS](#) [ABOUT](#) [BLOG](#) [HELP](#) [CONTACT](#)

[SIGN IN](#) [Q](#) [0](#)



GRAVITATIONAL WAVES DRESS

\$179.00

SIZE

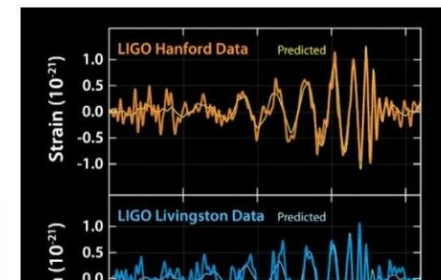
X-SMALL	SMALL	MEDIUM	LARGE	X-LARGE
X-SMALL WITH 15" SLEEVES		SMALL WITH 15" SLEEVES		
MEDIUM WITH 15" SLEEVES		LARGE WITH 15" SLEEVES		
X-LARGE WITH 15" SLEEVES				

ADD TO CART

Want to wear the fabric of space time?

Celebrate the [discovery of gravitational waves](#) with this smart casual look. At first glance, you see plaid. Look a bit further and- surprise, you'll recognize the data from the [LIGO](#) detectors. It's a classic professional dress with an educational twist.

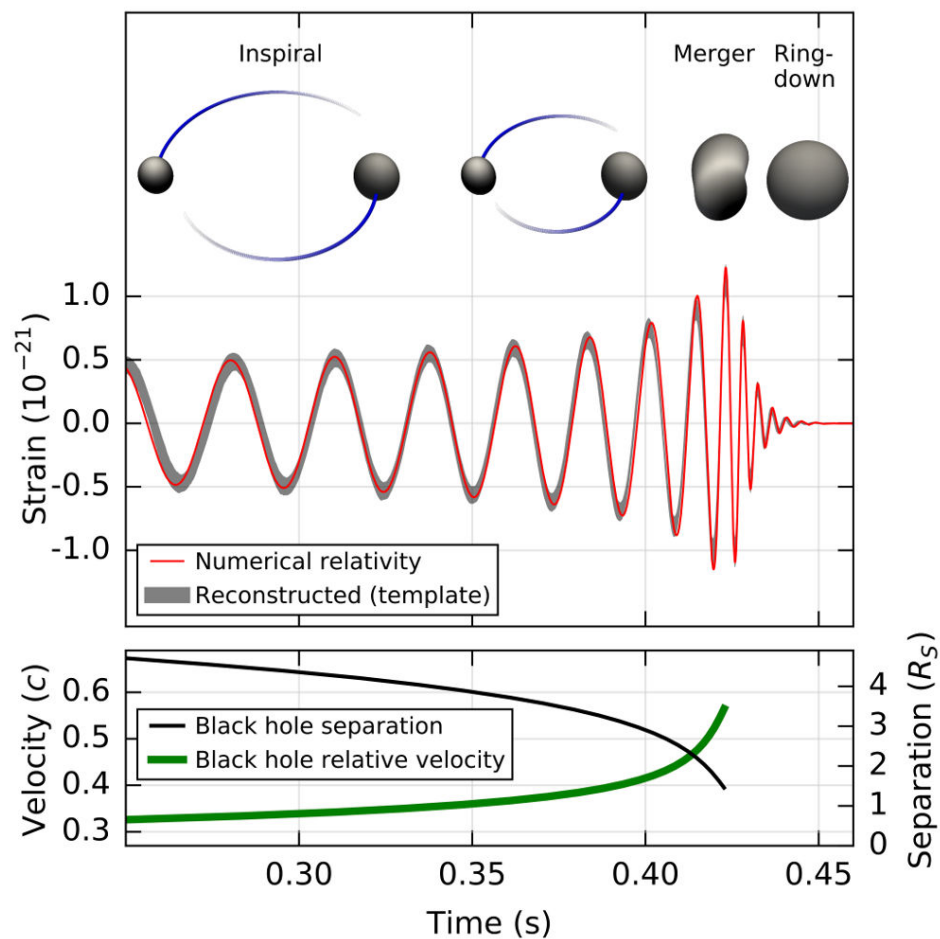
[MATCHING PLAID TIE AND ACCESSORIES NOW AVAILABLE FROM ZAZZLE!](#)



ДЕТЕКЦИЈА ТАЛАСА

Теоријски фит сигнала:

- Трајање: 0.2 s
- Кашњење: 6.9 ± 0.5 ms
- Ниво поверења: 5.1σ
- Фреквенца: 35 – 250 Hz
- Растојање: 1.3 ± 0.6 Gly
- Иницијалне масе:
 $36 \pm 5 M_{\odot}$, $29 \pm 4 M_{\odot}$
- Брзине: 0.3 – 0.6 c
- Радијус: 350 km
- Финални маса и спин:
 $M = 62 \pm 4 M_{\odot}$
 $J = 0.67 \pm 0.07 J_{\text{Kerr}}$



ДЕТЕКЦИЈА ТАЛАСА

Енергетски најинтензивнији догађај икада измерен:

- Енергија израчена гравитационим таласима:

$$E = 3.0 \pm 0.5 M_{\odot} c^2 \approx 5 \cdot 10^{47} \text{ J},$$

односно милион експлозија супернових!

- Максимална луминозност извора:

$$200 \pm 30 \frac{M_{\odot} c^2}{\text{s}} \approx 3.6 \cdot 10^{49} \text{ W},$$

односно 50 пута више него укупна снага ЕМ зрачења свих звезда у опсервабилном Универзуму!

Квалитативни закључци мерења:

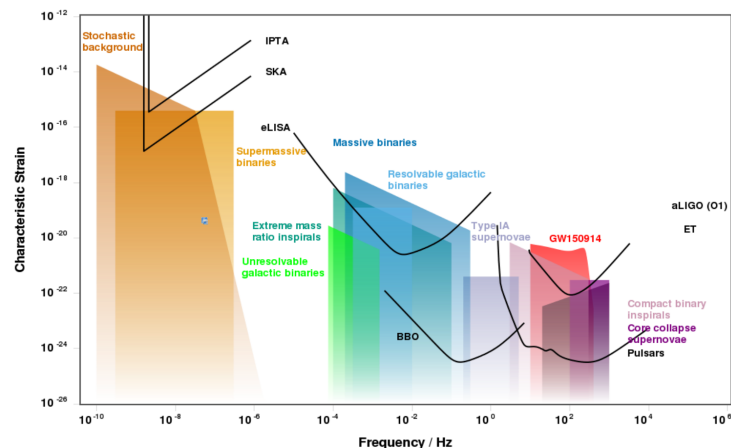
- Постоје бинарни системи црних рупа са масама већим од $25 M_{\odot}$, и могу да колапсирају у Хабловом времену
- Ограничење на масу гравитона: $m_g < 1.2 \cdot 10^{-22} \frac{\text{eV}}{c^2}$.

[анимације 6,7]

БУДУЋНОСТ

Гравитациона астрономија, нов извор података о Универзуму:

- Три скале детектора:
 - Земља (LIGO, ET)
 - Сунчев систем (LISA, BBO)
 - Млечни Пут (IPTA, SKA)
- LISA-Pathfinder мисија се успешно одвија у Лагранжевој тачки између Земље и Сунца
- Три космичка позадинска зрачења:
 - Cosmic Microwave Background (CMB), време декупловања фотона 380 000 yrs
 - Cosmic Neutrino Background (CνB), време декупловања неутрина 2 s
 - Gravitational Wave Background (GWB), време декупловања гравитона 10^{-44} s
- GWB носи најстарију могућу информацију о стању раног Универзума!



БУДУЋНОСТ

Гравитација — интеракција екстремних појава:

- Најважнија сила на највећим растојањима ($l_{\text{Universe}} \approx 10^{26} \text{ m}$) и на најмањим растојањима ($l_{\text{Planck}} \approx 10^{-35} \text{ m}$)
- Најслабија сила по интензитету, одговорна за енергетски најинтензивније појаве у Универзуму
- Сила којом је започео процес уједињења интеракција (Бошковић, идеја универзалне силе) и са којом ће се завршити (“теорија свега”)
- Сила одговорна за три револуције у фундаменталној физици:
 1. формулација класичне механике (револуција у разумевању кретања тела)
 2. формулација опште теорије релативности (револуција у разумевању простора и времена)
 3. формулација квантне теорије гравитације (револуција у разумевању опште теорије релативности и квантне механике)

ГРАВИТАЦИЈА ЈЕ КЉУЧ ЗА ФУНДАМЕНТАЛНУ ФИЗИКУ !!!

ХВАЛА!