



Градска школа физике ФИЗНИШ
Пројекат Друштва физичара Ниш који финансира
Град Ниш



О ГРАВИТАЦИОНИМ ТАЛАСИМА И ЊИХОВИМ ИЗВОРИМА

1

ГОРАН С. ЂОРЂЕВИЋ

КАТЕДРА ЗА ТЕОРИЈСКУ ФИЗИКУ - ПМФ И SEENET-MTP ЦЕНТАР, НИШ,

УВОД И ПЛАН

- Наше разумевање Свемира је засновано на детектовању и разумевању таласа.
- ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ ТАЛАСИ су нам пружили далеко највећи део информација.
- Уска област спектра, дуго једина доступна – видљива светлост, је постепено проширена: инфрацрвена, радио и високо-енергетска астрономија.
- Сваки нови „прозор“ је представљао револуцију и пружао нам све дубљи увид у природу Свемира.
- Може се рећи да је пре око 3 године отворен нови прозор и отпочело ново, посматрачко, доба – ГРАВИТАЦИОНИХ ТАЛАСА.
- Како то објаснити?

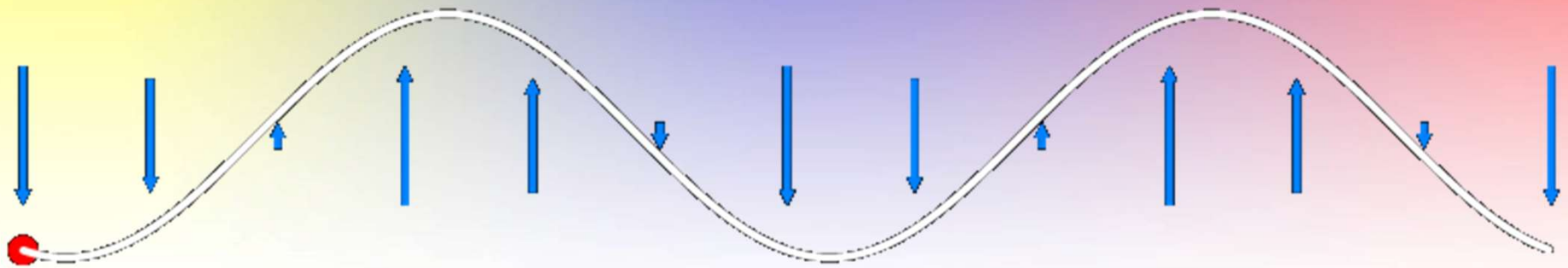
ПЛАН

- О електромагнетним таласима
- О релативности у физици
- О гравитационим таласима
- О детекцији и открићу гравитационих таласа
- О космологији
- О примордијалним гравитационим таласима
- Хоризонти модерне космологије

ТАЛАСИ: ЕМ И ГРАВИТАЦИОНИ

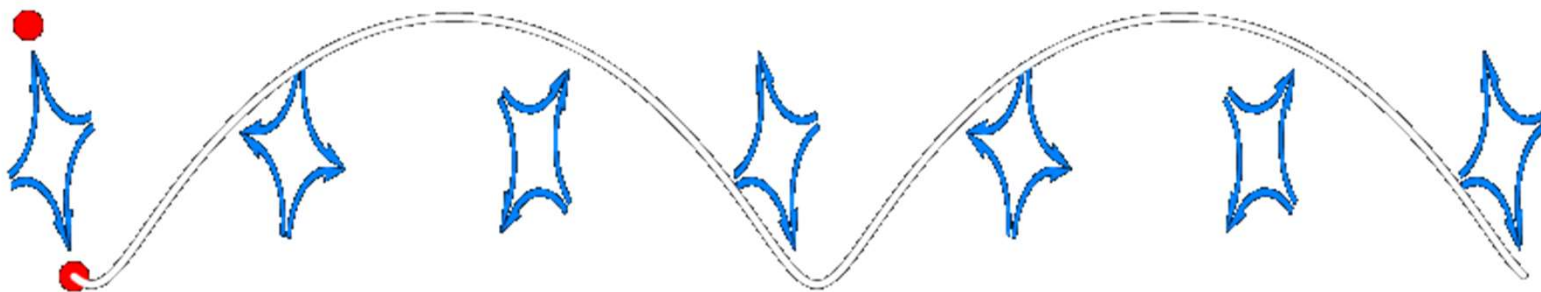
- ЕМ таласи: периодична промена ЕМ поља

Наелектрисања која осцилују. Најниже дозвољено мултиполно зрачење – ДИПОЛНО!



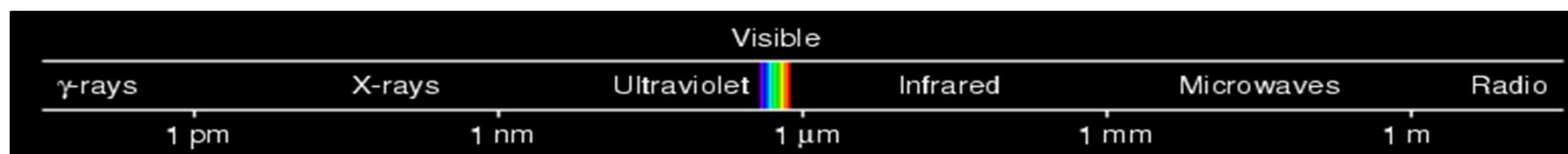
- Гравитациони таласи: периодична промена гравитационог поља

Масивна тела која осцилују. Најниже дозвољено мултиполно зрачење - КВАДРУПОЛНО!

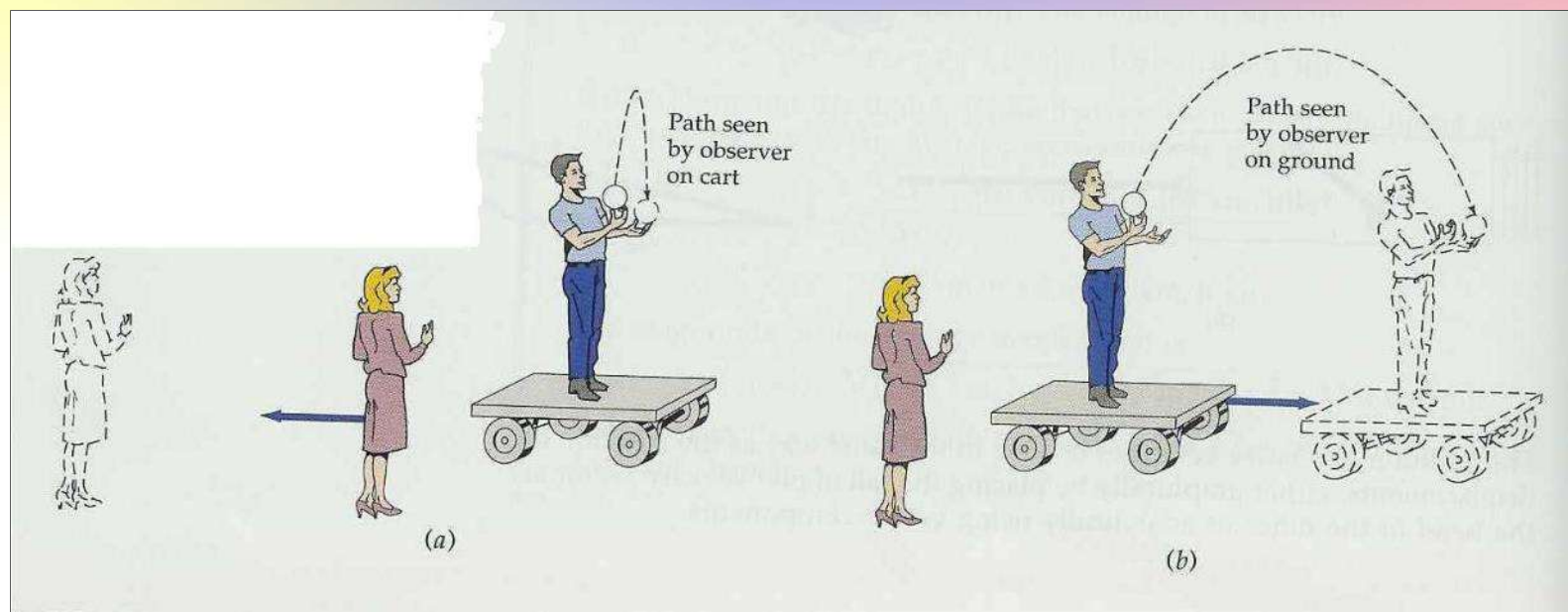


О ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИМ ТАЛАСИМА

- Под електромагнетним зрачењем подразумевамо таласе (ЕМТ) (или њихове кванте, фотоне) електромагнетног поља, који се крећу (зрачење) кроз простор-време, преносећи ``електромагнетну`` енергију. Са широким дијапазоном таласних дужина.
- Класично, ЕМТ су синхронизоване осцилације електричног и магнетног поља, које се крећу у облику трансверзалних таласа, брзином светлости у вакууму. Таласни фронт електромагнетних таласа емитованих из тачкастог извора је сферног облика.
- Електромагнетни таласи настају увек када се наелектрисане честице убрзавају!



РЕЛАТИВНОСТ, РЕЛАТИВНОСТ



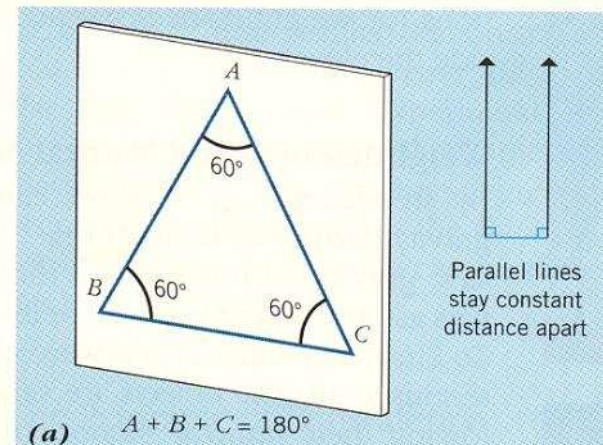
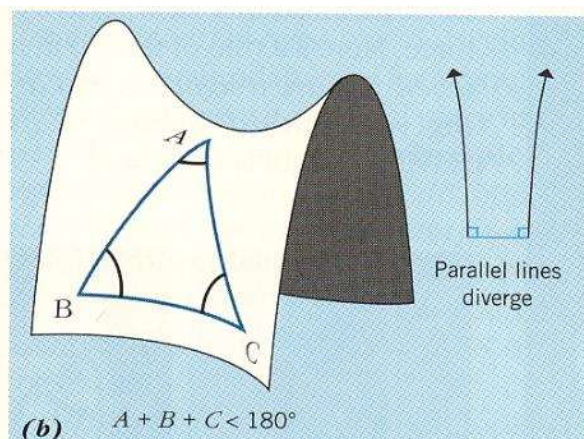
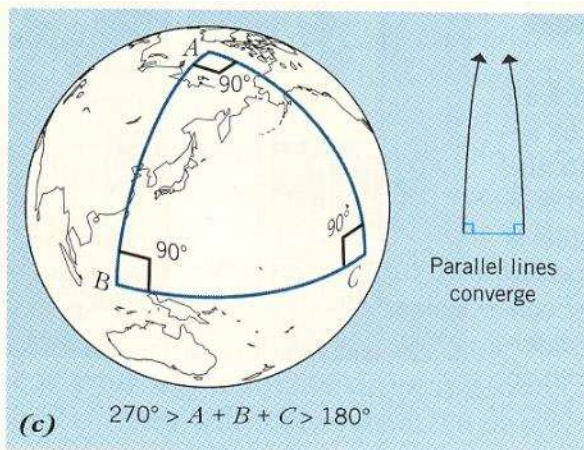
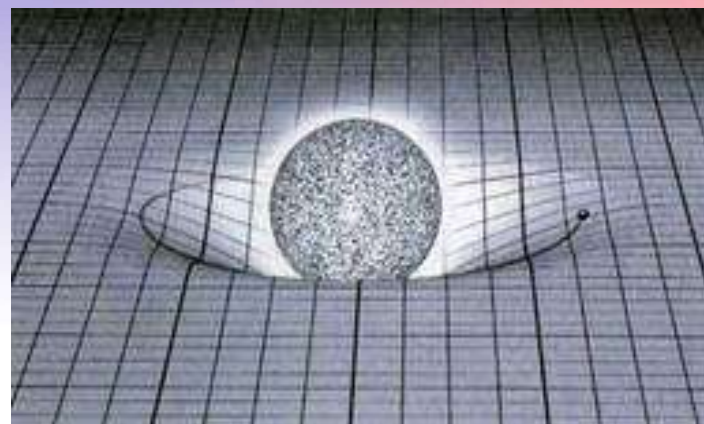
ТЕОРИЈЕ РЕЛАТИВНОСТИ

- Галилеј
 - Закони **механике** имају исти облик у свим Инерцијалним Системима Референце – нема привилегованих
- СТР - постулати
 - Закони **физике** имају исти облик у свим ИСР – нема привилегованих
 - Брзина светлости (у вакууму) је највећа брзина у природи.
- ОТР
 - Закони **физике** имају исти облик у свим СР – нема привилегованих
 - Није сувишно подсетити се: све су то последице особина простора-времена и одговарајућих симетрија $\Rightarrow$ закона одржања!
 - **Закони физике** $\Leftrightarrow$ **инваријантност метрике простора(-времена)!**

ГЕОМЕТРИЈА ПРОСТОР-ВРЕМЕНА

- Локална расподела масе и енергије одређује геометрију простор-времена – Гравитација је последица кривине простор-времена!
- Паралелне линије остају паралелне, конвергирају или дивергирају
- Бег у две димензије

$$\left(\begin{array}{l} \text{мера локалне кривине} \\ \text{простор – времена} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{мера густине} \\ \text{материје и енергије} \end{array} \right)$$



О ГРАВИТАЦИОНИМ ТАЛАСИМА

- Гравитациони таласи се јављају као једно од решења Ајнштајнових једначина ОТР.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

где су $R_{\mu\nu}$ и $T_{\mu\nu}$ компоненте Ричијевог тензора и тензора енергије-импулса, респективно, R – Ричијев скалар-кривина, G – универзална гравитациона константа, а c – брзина светлости у вакууму.

- Грубо говорећи, лева страна једначине описује *геометрију* простор-времена, десна страна *материју*.
- Ајнштајн је коренио променио перцепцију гравитације, времена и простора. Простор и време је објединио у јединствени ентитет – простор-време. Гравитација више није схваћена као сила, већ као „закривљење“ простор-времена које изазивају масивна тела.
- Растојање између две (инфинитезимално блиске) тачке простор-времена у Ајнштајновој ОТР је дато следећим изразом:

$$ds = \sqrt{g_{\mu\nu}(x)dx^\mu dx^\nu}, \quad \mu = 0,1,2,3 \quad (2)$$

- где су x^μ просторно-временске координате, а $g_{\mu\nu}$ представљају компоненте метричког тензора – функције просторно-временских координата које садрже информацију о геометрији простор-времена.

О ГРАВИТАЦИОНИМ ТАЛАСИМА

- Претпоставимо да се кроз простор-време простира неки мали „поремећај“, тј. пертурбација, тако да је „укупна“ метрика дата изразом:

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + h_{\mu\nu}, \quad (3)$$

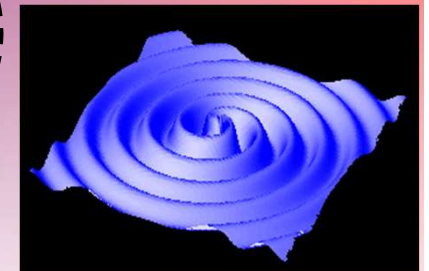
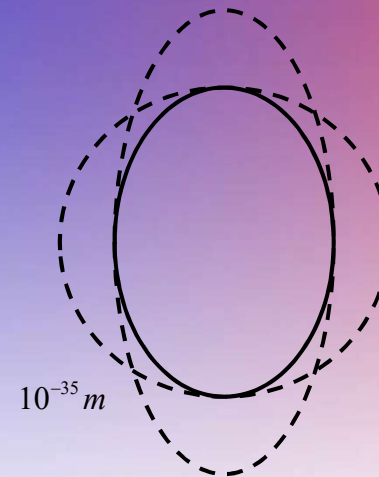
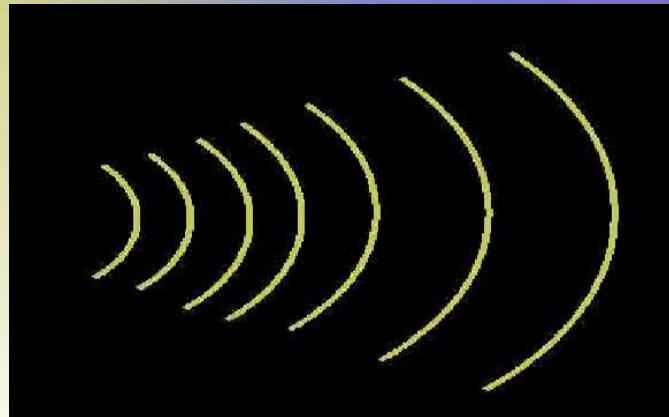
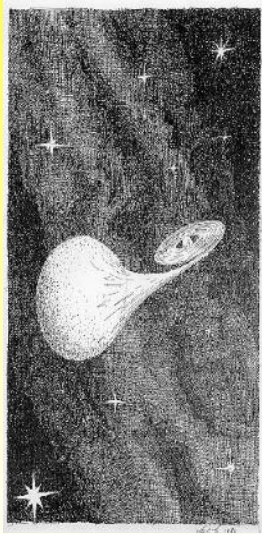
где величина $h_{\mu\nu}$ карактерише интензитет пертурбација. Заменом (3) у (1) добија се Даламберова таласна једначина:

$$\square h_{\mu\nu} = 0. \quad (4)$$

Оно што се „таласа“ је само *простор-време*! Услед проласка гравитационих таласа, растојање између две тачке простор-времена се периодично повећава и смањује!

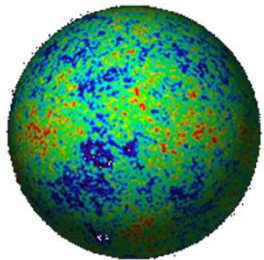
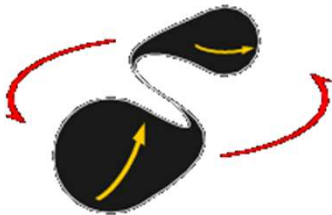
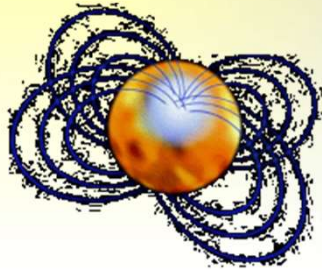
Пертурбације компоненти метричког тензора $h_{\mu\nu}$ дају меру промене овог растојања – *релативну промену растојања* између две тачке простор-времена.

О ГРАВИТАЦИОНИМ ТАЛАСИМА?



- „Набори“ у простор-времену. Изазивају промене растојања. Типична вредност h је $\sim 10^{-21}$.
 - Било је покушаји да се ПРОЦЕНИ вредност „Јанговог модула E_Y простор-времена“:
 - претпостављајући да се простор-време састоји од плочица ширине Планкове дужине,
 - затим да је оно сачињено од изузетно од изузетно танких, кратких „струна“, $l_p \sim 10^{-35} m$
 - на основу Казимировог ефекта ...
- Сваки од ових приступа је дао сличне и огромне вредности $\sim 10^{113} \frac{N}{m^2}$.
- „Јангов модул еластичности простор-времена“ је за око 100 редова величине већи од E_Y било ког познатог материјала, то „објашњава“ мајушне вредности амплитуда ΓT .
- Поређења ради, вредност Јанговог модула еластичности дијаманта износи $E_Y \sim 10^{12} \frac{N}{m^2}$.
- Само рудиментарна процене, заснованана механи(цисти)чким аналогијама. Питање природе простор-времена је далеко од разрешеног!

ИЗВОРИ ГРАВИТАЦИОНИХ ТАЛАСА



- Се могу поделити у 4 групе:
- Кратко-живећи и теоријски добро моделовани системи (парови црних рупа, неутронских звезда, комбинације);
- Кратко-живећи и слабо проучени системи (супернове, хипернове, „магнетар“ ...)
- Дуго-живећи и теоријски добро моделовани системи (брзо ротирајуће осно асиметричне неутронске звезде)
- Дуго-живећи, широко распрострањени – дифузни извори (пре свега примордијални гравитациони таласи).
- **Примордијална „позадина“:** Реликт зрачења са почетка универзума
- Изгледа као „шум“ (аналогно ЕМ шуму)
- Космичке струне ...

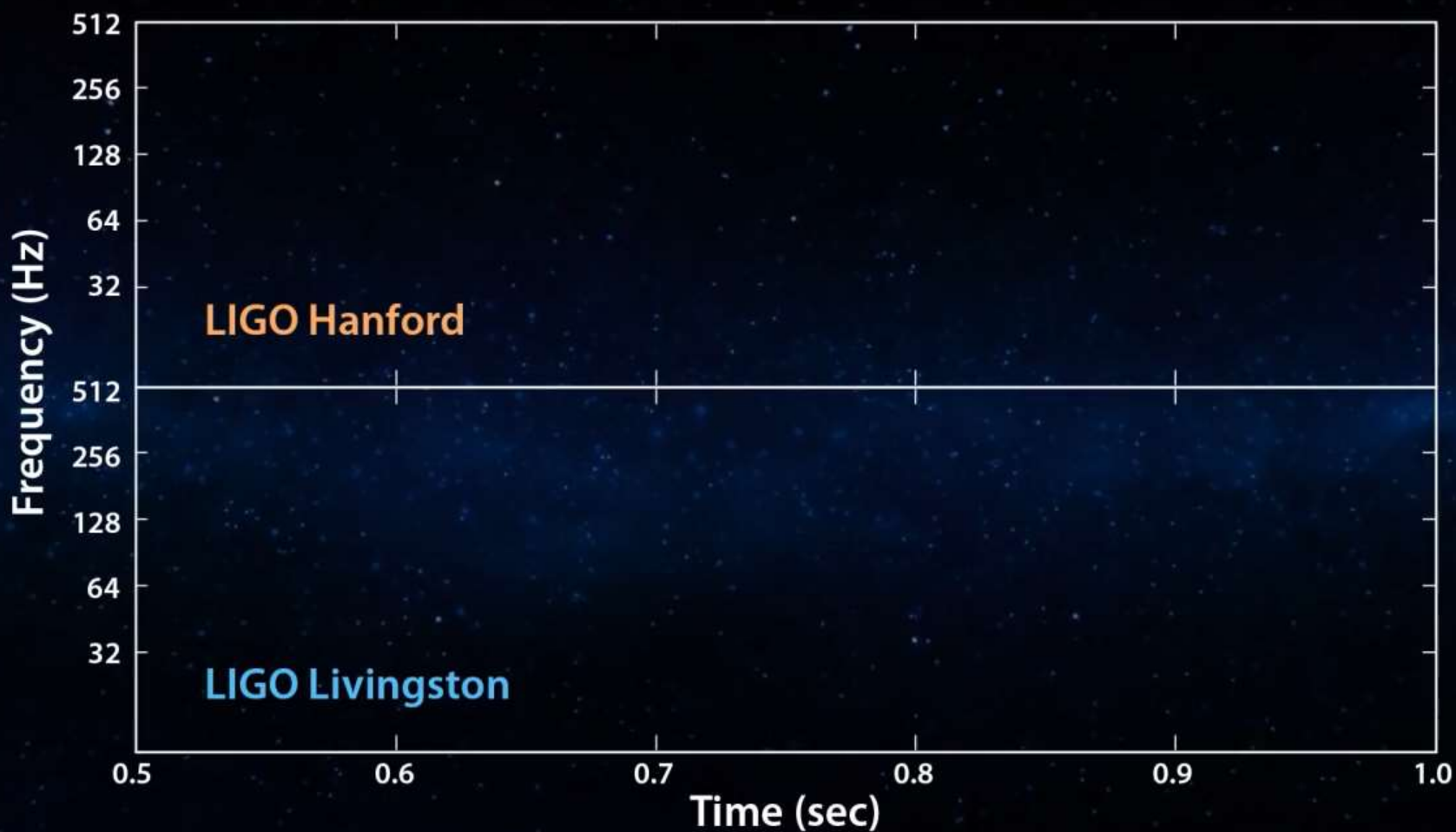
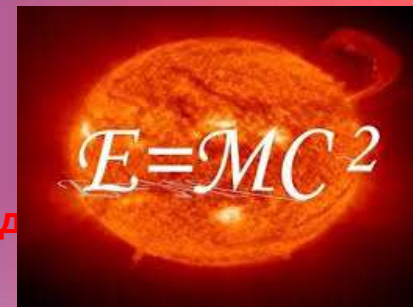
- Шта је регистровано 14.9.2015?

- Спајање две црне рупе:

- 36 маса Сунца
- 29 маса Сунца

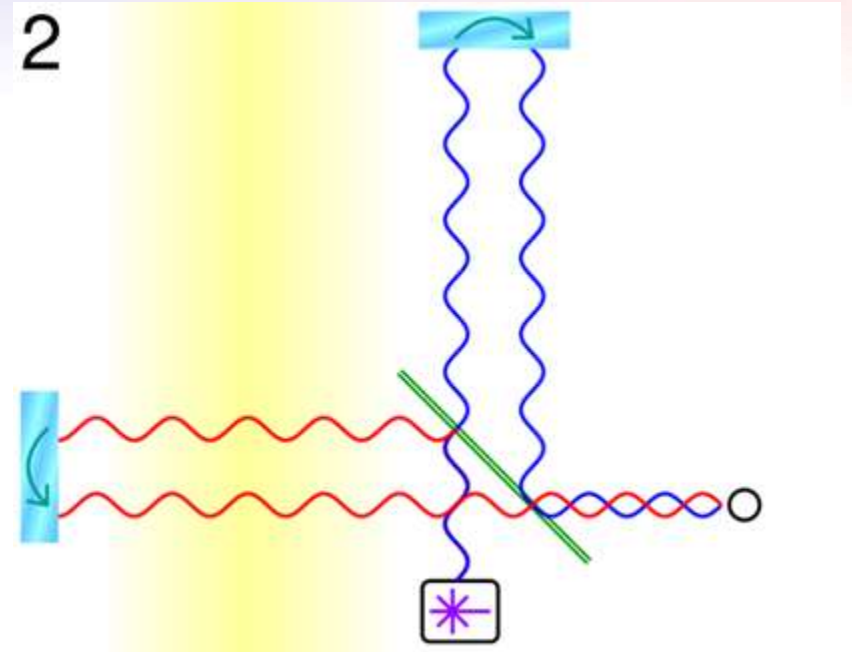
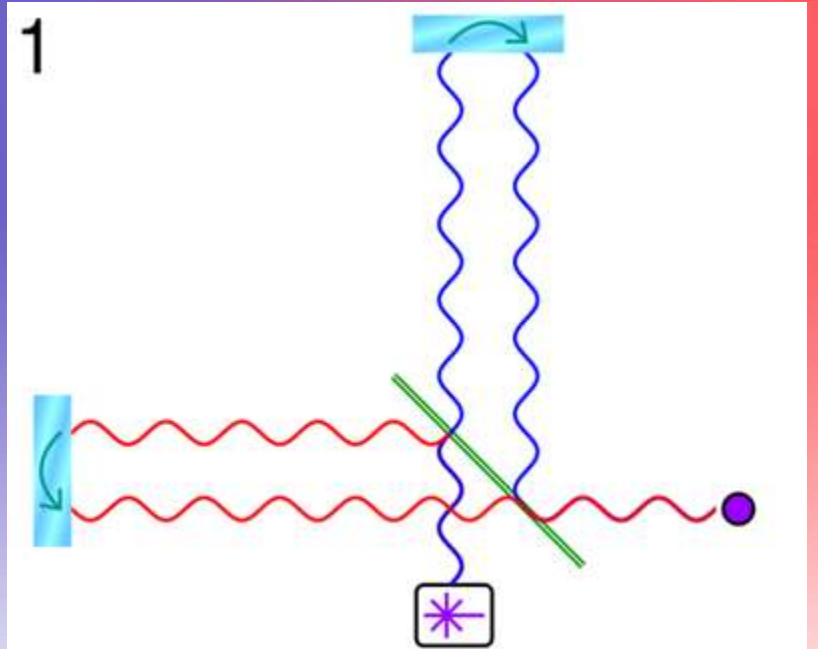
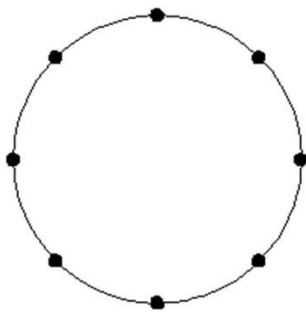
Нова црна рупа

- 62 масе Сунца
- 3 масе Сунца су израчене у виду таласа



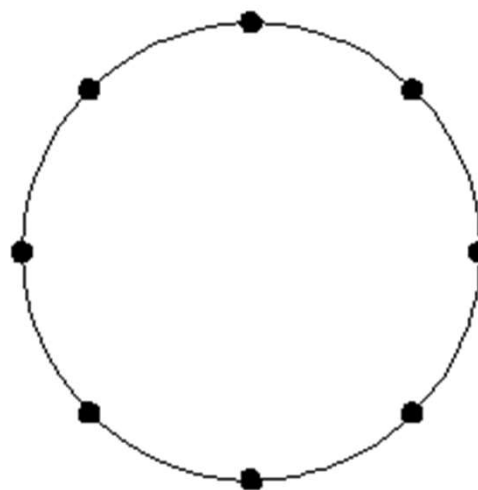
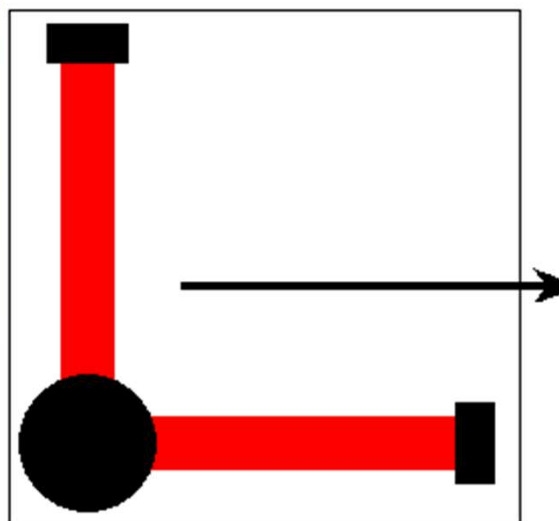
LIGO

- LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)



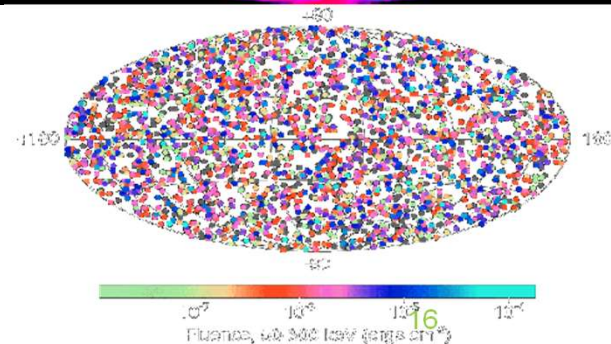
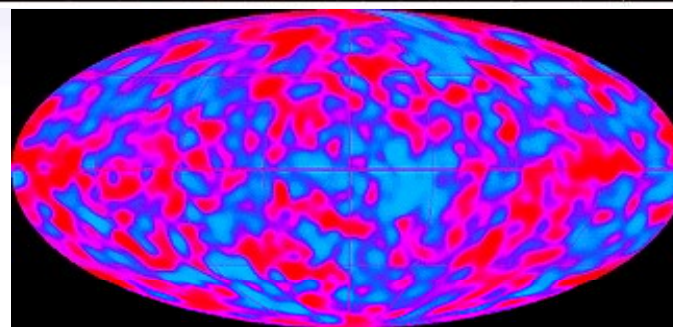
LIGO

- Мерење таласа



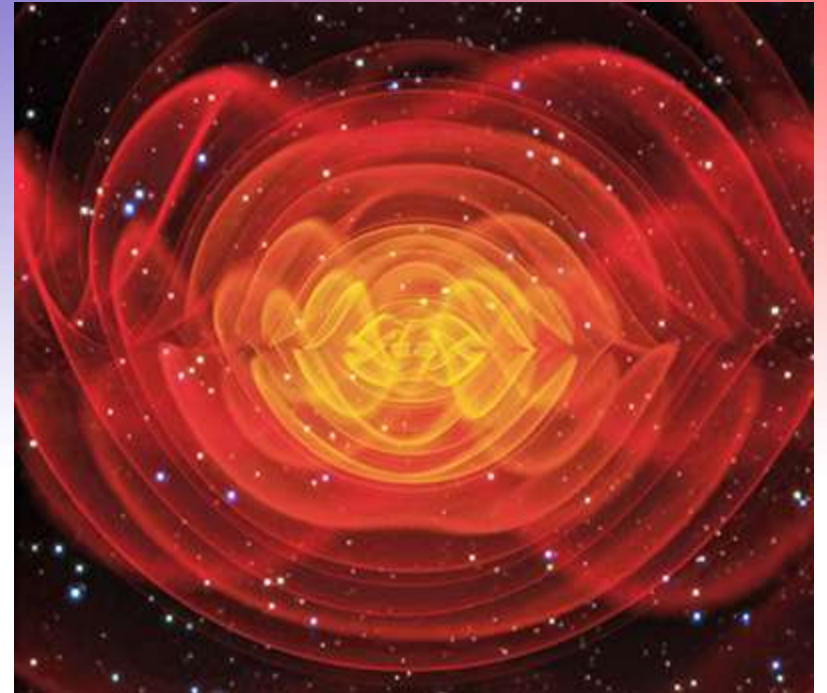
ШТА СМО ДО САДА/ТАДА РЕГИСТРОВАЛИ ИЗ УНИВЕРЗУМА?

- ВИС
- ИЦ - инфрацрвени
- Микроталасни опсег (COBE)
- Гама опсег (бљескови)

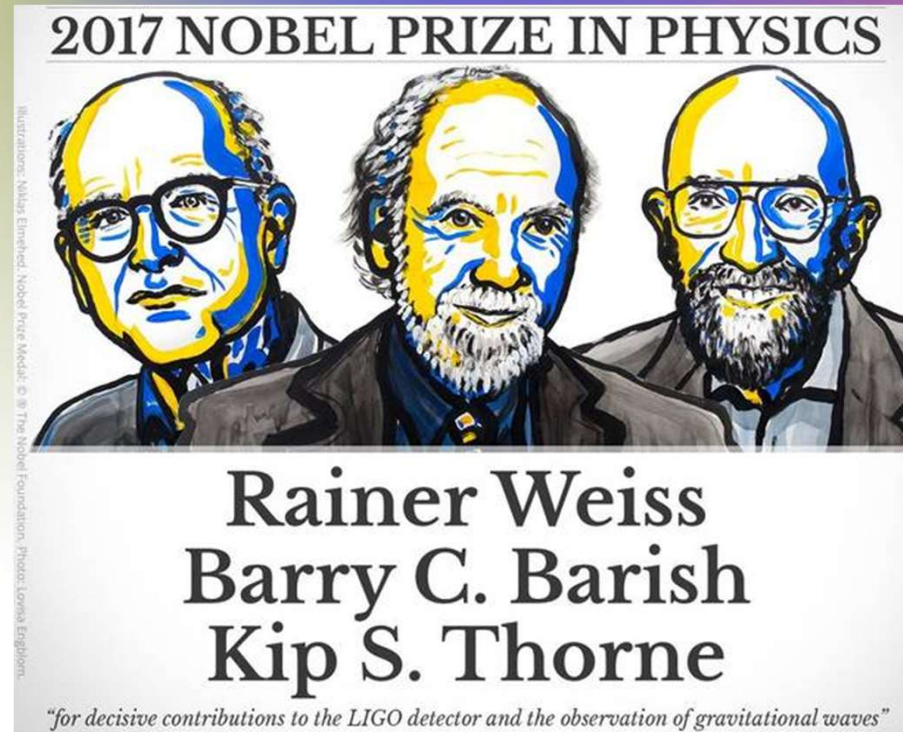


ШТА ЈЕ ВЕЋ ПОСТИГНУТО?

- Потврђено и последње предвиђање ОТР
- Гравитони су безмасени
- Директно доказано постојање црних рупа
- Спајање црних рупа чешће него што је очекивано
- Црне рупе чије је спајање детектовано имају неочекиване особине
- Откривено стапање неутронских звезда, затим посматрано у широком спектру ЕМТ



Нобелова награда



- за “одлучујући допринос *LIGO* детектору и успешну детекцију гравитационих таласа”.
- R. Weiss је добио половину награде, док су другу половину поделили B. Barry и K. Thorne.
- До тренутка објављивања детектовано: GW150914, GW151226, GW170104 и GW170814; касније најзначајнији догађај GW170817

О КОСМОЛОГИЈИ

- Динамика ширења хомогеног и изотропног свемира
 - А. Фридман (А. Ајнштајн, В. де Ситер, Ж. Леметр)
- Из основних постулата ОТР $\rightarrow$ Ајнштајнове једначине

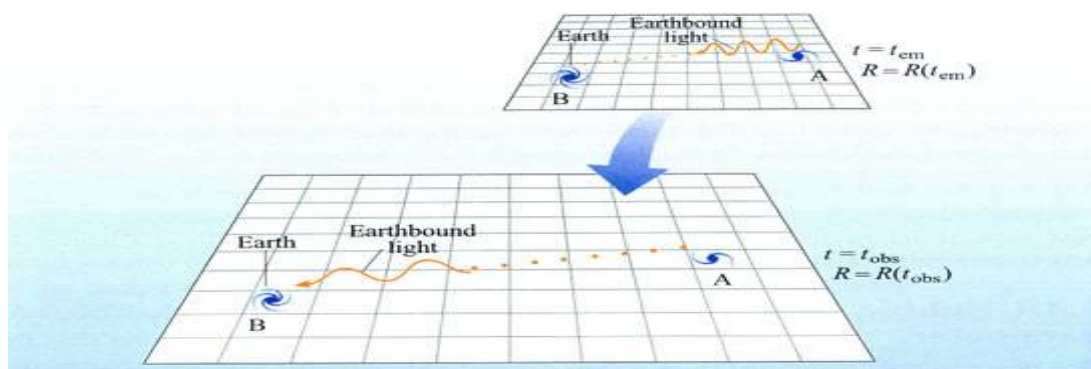
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

- Фридман-Робертсон-Вокерова метрика

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right],$$

- Покретни координатни систем и фактор скале!

$$\vec{r} = a(t) \vec{x}$$



ХВАЛА СВИМА ВАМА!

- И хвала Милану!