

Гравитациони таласи - шта се то таласа?

100 година ОТР

23. јун 2015. године, САНУ, Београд

др Бојан Николић, Институт за физику, Београд

План излагања

- Геометријски подсетник
- Основе ОТР
- Гравитациони таласи
- Детекција гравитационих таласа - врсте детектора
- Закључак

Метрика простора

- Посматрајмо криву у еуклидској равни $y = f(x)$. Дужина бесконачно малог дела криве је дата Питагорином теоремом

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 = (1 + f'^2)dx^2.$$

- Горњи израз можемо записати у облику

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu,$$

где је

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad x^\mu = (x, y), \quad \mu = 1, 2.$$

- Величину $g_{\mu\nu}$ зваћемо **МЕТРИКОМ** простора.

Метрика простор-времена

- Ајнштајн, формулишући специјалну теорију релативности (СТР), уводи **простор-време** са координатама

$$x^\mu = (x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv (ct, x, y, z).$$

- У СТР интервал између две бесконачно блиске тачке је

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1).$$

Метрика $\eta_{\mu\nu}$ је равна метрика простор-времена позната као метрика Минковског.

Закривљено простор-време

- За простор-време кажемо да је **закривљен** уколико метрика $g_{\mu\nu}$ зависи од координата и не може се ни једном координатном трансформацијом превести у метрику Минковског. У том случају интервал између две бесконачно блиске тачке је

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

- Ова формула представља Питагорину теорему за закривљено простор-време.
- Узимајући квадратни корен од десне стране, после интеграције од почетне до крајње тачке, добијамо растојање између те две задате тачке.

- По Њутновој теорији гравитације, извор гравитационог поља је маса а гравитација је **СИЛА** (крај 17. века).
- Почетком 20. века немачки физичар Алберт Ајнштајн поставља захтев да закони физике морају бити инваријантни на избор координатног система што значи да њихов облик остаје исти и у инерцијалним и у неинерцијалним системима референце. Из тог захтева рађа се Општа теорија релативности (ОТР).
- У ОТР гравитација је еквивалентна са **геометријом** ($g_{\mu\nu}(x)$) просторно-временског континуума.

Ајнштајнове једначине

- Ајнштајнове једначине за гравитационо поље $g_{\mu\nu}(x)$ су облика

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

где је на левој страни **геометрија** а на десној страни **материја**.

- ОТР објашњава прецесију Меркуровог перихела као и скретање светлосног зрака при проласку кроз гравитационо поље. Такође предвиђа и нове феномене као што су почетни сингуларитет, црне рупе и **гравитациони таласи**.

- Осцилација у једној тачки простора која се преноси кроз **материју** назива се механички талас. Механички талас може бити и трансверзалан и лонгитудиналан.
- Пренос енергије ЕМ поља (кроз простор) наелектрисане честице која се креће убрзано назива се ЕМ талас. ЕМ талас је трансверзалан и за његово простирање није потребна материјална средина (проблем етера).
- Таласна једначина

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) u(\vec{r}, t) = 0.$$

Гравитациони таласи

- Метод позадинског поља - узмимо метрику у облику $g_{\mu\nu}(x) = g_{\mu\nu}^{(0)}(x) + h_{\mu\nu}(x)$ где је $h_{\mu\nu}$ мала пертурбација простор-времена чија је метрика $g_{\mu\nu}^{(0)}$. Метрика $g_{\mu\nu}^{(0)}$ задовољава Ајнштајнове једначине.
- Ајнштајнове једначине за метрику $g_{\mu\nu}$ дају таласну једначину

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h^{\mu}_{\nu}(x) = 0.$$

- Гравитациони таласи су трансверзални и простиру се брзином $c = 3 \times 10^8 m/s$.

Шта се то таласа?

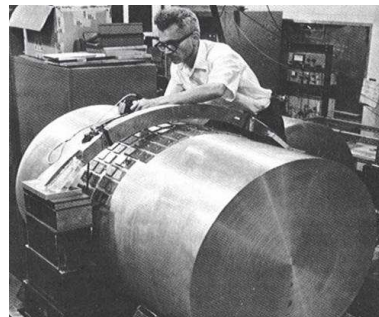
- У случају механичких таласа таласа се материјална средина. Када је материјална средина одсутна (вакуум) нема механичких таласа.
- Појавом ЕМ таласа, по аналогији са механичким таласима, уводи се појам **етера**. Мајкелсон-Морлијев експеримент показао да етер не постоји. ЕМ талас је таласање електричног и магнетног поља.
- Пренос енергије гравитационог поља се врши таласањем метрике или, слободније речено, таласањем простор-времена.

Детекција гравитационих таласа

- Принцип мерења - мерење таласања растојања између тела.
- Директна детекција таласа је тешко остварива због изузетног слабог ефекта гравитационих таласа (амплитуда $\sim \frac{1}{r}$). Постоје индиректни докази да постоје гравитациони таласи нпр. еволуција бинарних пулсара.
- Основна подела детектора гравитационих таласа је на **механичке**, **интерферометарске** и **високофреквентне**.

Веберова шипка

- Чврста метална шипка изолована од спољашњих вибрација. Принцип рада - упадни талас изазива резонантно осциловање. Шипка осцилује а осетљиви пијезоелектрични сензори детектују промену дужине.
- Године 1987. проф. Јозеф Вебер објавио је детекцију гравитационих таласа, али су те тврдње касније оповргнуте.



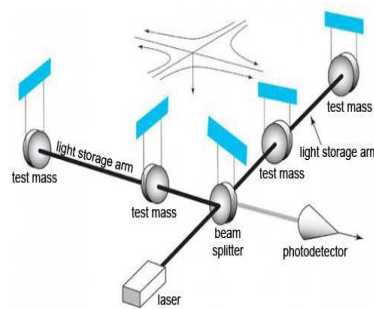
Слика 1: Проф. Јозеф Вебер

Савремени механички детектори

- Савремене варијанте механичких детектора су охлађене до веома ниских температура и опремљене суперпроводним квантним интерференционим уређајима за прецизно мерење промена димензија тела (AURIGA, MiniGRAIL).
- MiniGRAIL је детектор сферног облика а састоји се од кугле масе 1150kg охлађене до 20mK. Најбоље ”хвата” таласе фреквенције 2 – 4kHz па је погодан за детекцију зрачења из бинарних пулсара. AURIGA се састоји од алуминијумског цилиндра дужине 3 метра који је охлађен на температуру \sim mK.

Интерферометарски детектори

- Ови детектори користе ласерску интерферометрију за детекцију гравитационих таласа. Светлост се креће тако што прати закривљење простора. На тај начин настаје путна разлика која се детектује у виду интерференционе слике.



Слика 2: Шема детектора

- Познати детектори овог типа - LIGO, VIRGO
Гравитациони таласи - шта се то таласа? - п . 14
ИТД.

Интерферометарски детектори

- Интерферометарски детектори имају своја ограничења - шум који долази из самог ласера, затим сеизмички шумови, фино померање огледала услед притиска ласерског зрака итд.
- Данас се ради на прављењу интерферометарских детектора у орбити око Земље (eLISA). Три сателита би била у теменима једнакостранчног троугла страница дужине 5 милиона километара. Један део шума би био елиминисан али остаје проблем космичког зрачења.

Високофреквентни детектори

- Раде на горњој граници фреквентног опсега ($\sim 10^5 \text{ Hz}$). Данас постоје два оперативна детектора овог типа: један у Бирмингему (В. Британија) и један у Ђенови (Италија). Трећи се гради у Кини.
- Детектор у Бирмингему мери промене у стању поларизације микроталасног зрака који кружи по кругу полупречника 1m. Детектор у Ђенови је резонантна антена која се састоји од два спрегнута сферна суперпроводна хармонијска осцилатора неколико редова величина веће осетљивости него детектор у Британији.

- До сада није било директне детекције гравитационих таласа. Индиректни доказ за постојање гравитационих таласа је еволуција путања бинарних пулсара.
- Технологија се усавршава и побољшава се осетљивост земаљских детектора, а ради се и на развоју детектора у свемиру.