
PULSARI U DVOJNOM SISTEMU - TEST OPŠTE TEORIJE RELATIVNOSTI

SEMINARSKI RAD IZ ASTROFIZIKE

MAJ 2018.

Predmetni profesor:
prof. dr Olga Atanacković

Student:
Milana Vuković

Sadržaj

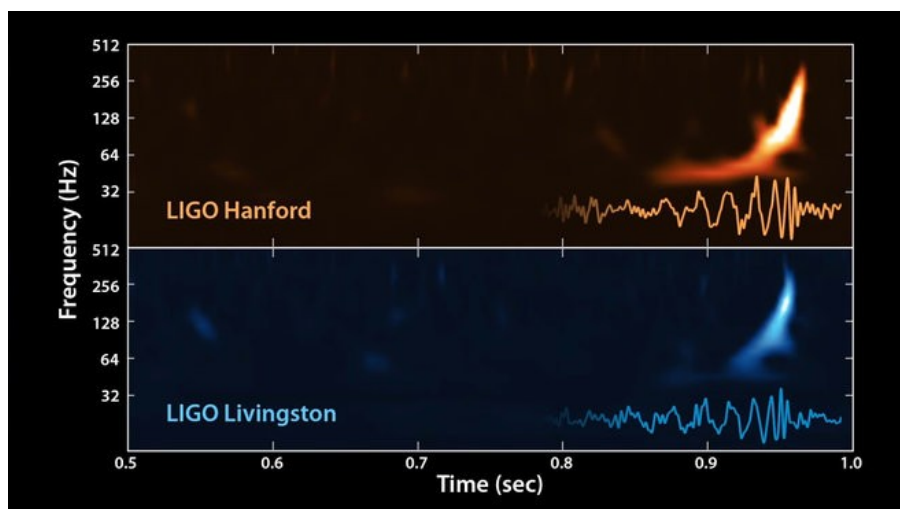
1.Uvod.....	3
2.Otkriće dvojnog sistema.....	4
3.Gravitacioni talasi i OTR.....	5
4.Zašto su pulsari dobri za relativistička merenja?.....	6
5.Testiranje Ajnštajnovе teorije na dvojnim pulsarima.....	6
5.1.Pomeranje periastrona.....	6
5.2.Smanjenje orbite.....	7
5.3.Precesija.....	10
6.Zaključak.....	12
Literatura.....	13

1.Uvod

Albert Ajnštajn je 1915. godine objavio opštu teoriju relativnosti koja se bavi fenomenom gravitacije i predviđa postojanje gravitacionih talasa. Prošlo je 100 godina do prve detekcije gravitacionih talasa nastalih spajanjem dve crne rupe. Oni su detektovani u **LIGO** opservatorijama (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) sagrađenim u saveznm državama Vašington i Luizijana. Vodeći naučnici ovog projekta, Reiner Weiss, Barry C. Barish i Kip S. Thorne su za tu detekciju dobili Nobelovu nagradu za fiziku 2017. godine.

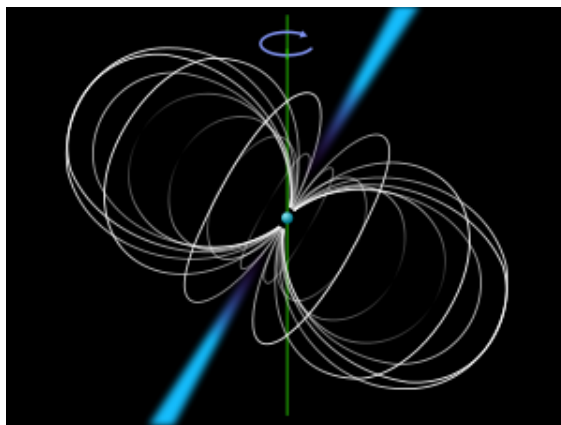


Slika 1. *LIGO Livingston*



Slika 2. *Detekcija gravitacionih talasa u dve opservatorije*

Iako se na ovu detekciju čekalo dugo, potvrda postojanja gravitacionih talasa i opšte teorije relativnosti (OTR) je bilo i mnogo ranije. Otkriće pulsara 1967. a zatim i otkriće prvog dvojnog pulsara **PSR 1913+16** 1974. godine je otvorilo mogućnost za testiranje Ajnštajnovne teorije. U kretanju ove dve komponente dvojnog sistema primećene su određene pojave kao što su pomeranje periastrona orbite, smanjenje orbite i njene ekscentričnosti kao i lagano klaćenje ose rotacije pulsara. Upravo ove pojave su posledica gravitacije i zakrivljenosti prostor-vremena koji su opisani opštom teorijom relativnosti. Ovi efekti su u jakom gravitacionom polju pulsara veoma izraženi, pa su se mogli precizno izmeriti.



Slika 3. Pulsar sa prikazanom osom rotacije i osom magnetnog polja. Radio-zračenje unutar uskog konusa oko magnetne ose primamo u pravilnim impulsima u ritmu rotacije pulsara.

2.Otkriće dvojnog sistema

Pulsari su bili tema doktorske disertacije koju je Russell Hulse radio kod profesora Josepha Taylora (slika 3.). Njihovo istraživanje je dovelo do otkrića prvog dvojnog pulsara 1974. godine u Arecibo opservatoriji u Portoriku.

Otkriveno je 40 novih pulsara, ali jedan je posebno privukao pažnju. To je bio pulsar PSR 1913+16 sa periodom ponavljanja impulsa tj. periodom rotacije od 59 ms. Jedini koji je imao bržu rotaciju od njega je bio pulsar u Krab maglini. Posle otkrića novih pulsara, Hulse se posvetio preciznijem određivanju njihovog perioda rotacije .

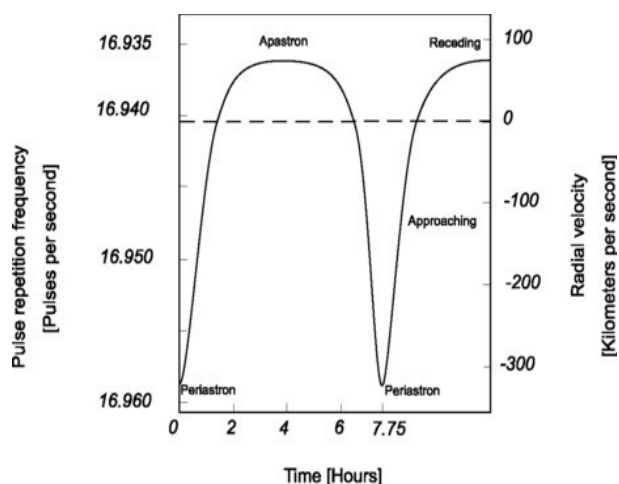
Procedura se sastojala od dva odvojena posmatranja koja su trajala od 5 do 15 minuta i vršila su se na početku i na kraju dvočasovnog intervala, koje je Arecibo omogućavao za posmatranje datog objekta u jednom danu. To je služilo za korekciju rezultata koja je bila potrebna da bi se eliminisao Doplerov efekat koji nastaje zbog kretanja Zemlje. Kada je ovo urađeno i za PSR 1913+16 dobijeni su zbnjujući rezultati. Umesto da posle eliminacije Doplerovog efekta dva izmerena perioda daju skoro identične rezultate koji se razlikuju na nivou malih eksperimentalnih grešaka, dobijena je razlika od 27 mikrosekundi [1]. Ovo je bilo zbnjujuće jer su pulsari opisani kao veoma precizni časovnici. Kada je Hulse ponovio posmatranja dva dana kasnije, došlo je do još većeg neslaganja. Da bi odgonetnuo ovu misteriju, on je uspostavio novi sistem¹ namenjen

1 Hulse je za dobijanje preciznijih perioda pulsacija koristio ZBTREE algoritam. Smatrao je da greška pri određivanju perioda rotacije veoma brzog pulsara PSR 1913+16 nastaje zato što kompjuter ne može dovoljno brzo da izvršava ovaj algoritam. Zbog toga je za dobijanje bolje vremenske rezolucije morao da napiše novi program namenjen posmatranju ovog pulsara.

posmatranju ovog pulsara, ali nakon ponovnog nepoklapanja shvatio je da uzrok tome nije bila nepreciznost prethodnog sistema. Pretpostavio je da neslaganje potiče od Doplerovog efekta izazvanog kretanjem pulsara oko druge zvezde. Ovo je trebalo detaljno ispitati i proveriti da li je zaista otkrio prvi pulsar u dvojnog sistema². Zaključio je da na osnovu toga u jednom trenutku frekvencija primljenih impulsa mora dostići minimum, a zatim ponovo nastaviti da raste.

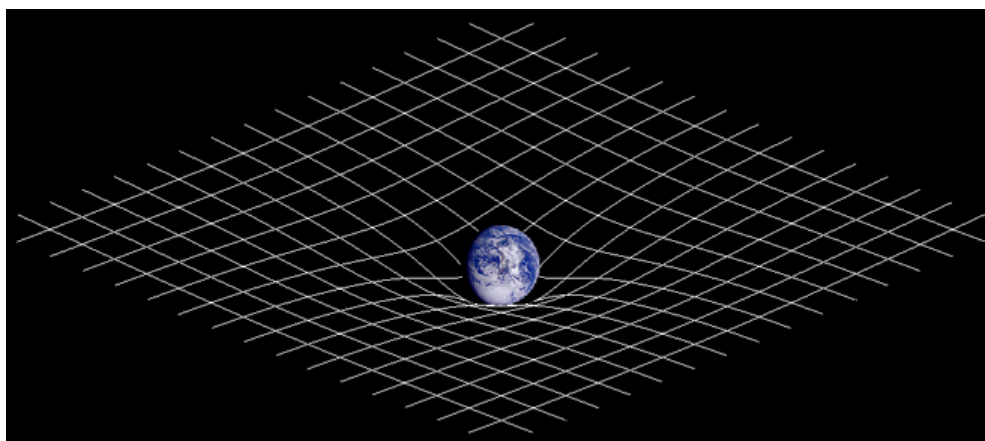
Obavestivši profesora Taylora, prešli su na detaljnija istraživanja. Dok je Hulse bio zadužen za prikupljanje što preciznijih podataka, Taylor se bavio analizom orbite pulsara. Primetili su da je promena frekvencije primljenih impulsa bila periodična i ponavljala se svakih 7.75 sati. To je upravo orbitalni period kretanja pulsara i njegovog pratioca. Ta promena je prikazana na slici 4.

“Za otkriće novog tipa pulsara, otkriće koje je otvorilo nove mogućnosti za izučavanje gravitacije “ Russell Hulse i Joseph Taylor su dobili Nobelovu nagradu 1993. godine.



Slika 4. Promena frekvencije primljenih impulsa kod dvojnog pulsara i odgovarajuća promena radialne brzine u toku vremena

3.Gravitacioni talasi i OTR



Slika 5. Dvodimenziona analogija zakrivljenosti prostor-vremena

Opšta teorija relativnosti je geometrijska teorija gravitacije. U ovoj teoriji u stvari ne postoji sila gravitacije, umesto toga, svaka masa na precizan način krivi oko sebe prostor i rasteže vreme.

U Ajnštajnovom viđenju gravitacije, zakrivljenost prostor-vremena u svakoj tački data je gustinom mase i energije u njoj. Ako malo pomerimo Sunce, dolazi do promene gustine mase i u

2Nije bilo začuđujuće što su skoro svi detektovani pulsari bili usamljene zvezde pošto nastaju pri eksploziji supernove koja na taj način uništava orbitu pratioca. Otkriće ovog dvojnog pulsara je pokazalo da iako je poremećaj u orbiti česta pojava, ona nije i nužna.

starom i u novom položaju, što onda menja zakrivljenost prostor-vremena u njima, a zatim menja te veličine i u obližnjim tačkama u narednom trenutku. Dakle, promena zakrivljenosti prostor-vremena se širi kroz prostor u vidu gravitacionih talasa.

Gravitacioni talasi se emituju kada je neka masa ubrzana, ali tako da ne postoji sferna simetrija u njenom kretanju [7].

4. Zašto su pulsari dobri za relativistička merenja?

Detekcija gravitacionih talasa u Sunčevom sistemu je na granici mogućnosti merenja zbog slabog gravitacionog polja Sunca, a samim tim i slabo izraženog efekta Ajnštajnovе teorije. Zbog toga se tragalo za objektima čija je gravitacija znatno jača.

Pulsari su neutronske zvezde prečnika oko 10 km. Iako su malog radijusa, njihova masa je veća od mase Sunca ($1.4 - 3 M_{\odot}$), pa samim tim imaju veliku gravitaciju i u velikoj meri zakrivljuju prostor-vreme. Orbitalna brzina pulsara PSR 1913+16 iznosi približno 0.001 brzine svetlosti, a njegova orbita je reda veličine radijusa Sunca. Pulsari su na međusobnom rastojanju od $1.1 R_{\odot}$ u periastronu, a $4.8 R_{\odot}$ u apoastronu. Pri kretanju pulsara u dvojnog sistema sa eliptičnom putanjom dolazi do velikog ubrzanja (posebno u periastronu) što dovodi do emisije gravitacionih talasa koji smanjuju energiju sistema. Iako su oni slabi za direktna merenja, možemo meriti njihov uticaj na orbitalno kretanje pulsara.

Mnogo jača gravitaciona polja imaju crne rupe, ali zbog te gravitacije nijedan oblik poznate materije ni zračenja ne može da se otisne od nje, zbog čega nisu pogodne za direktno posmatranje.

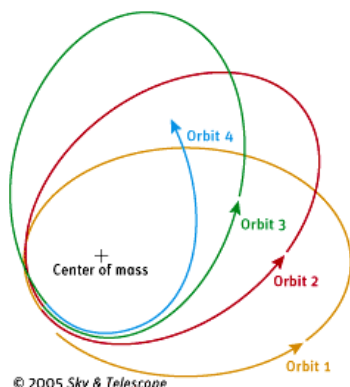
5. Testiranje Ajnštajnovе teorije na dvojnim pulsarima

U narednom tekstu će biti opisana zapažanja o prvom otkrivenom dvojnog pulsaru PSR 1913+16. To su pojave koje su pomenute u prethodnom tekstu: pomeranje periastrona, smanjenje orbite i njene ekscentričnosti i lagano klaćenje ose rotacije.

Pošto se ove dve zvezde nalaze na jako malom rastojanju, Njutnova teorija gravitacije nije pogodna za opisivanje njihovog kretanja.

5.1. Pomeranje periastrona

Ono što Njutnova teorija nije mogla da objasni je zašto ekscentrične orbite zvezda ne ostaju fiksirane već rotiraju za nekoliko stepeni godišnje. Ovo je upravo jedno od prvih posmatranja vezanih za opštu teoriju relativnosti van Sunčevog sistema, koje se odnosi na orbitu pulsara (slika 6).



Ta pojava je testirana i mnogo ranije u Sunčevom sistemu gde je mereno pomeranje perihela Merkurove orbite oko Sunca. Zbog relativno malih masa i gravitacije ova pojava je teško merljiva i iznosi oko $43''/100$ god. Zato je bilo potrebno pronaći sistem sa mnogo jačom gravitacijom. Pomeranje periastrona orbite pulsara PSR 1913+16 je oko 30 000 puta veće nego što je slučaj kod Merkura i iznosi $4.2^{\circ}/\text{god}$.

Slika 6. Pomeranje periastrona orbite

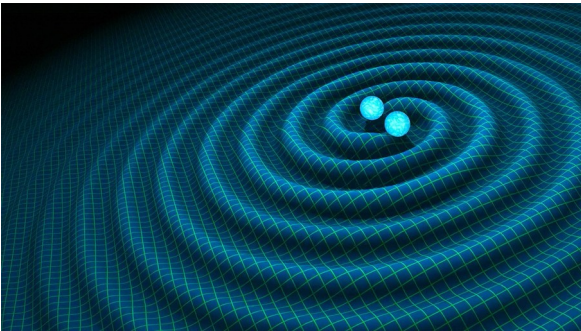
Po OTR pomeranje periastrona je dato formulom za problem dva tela (koju je dao Robertson 1938.):

$$\omega' = \frac{3G^{2/3}(M_1+M_2)^{2/3}}{(1-e^2)c^2} \left(\frac{2\pi}{P_{orb}} \right)^{5/3} \quad (1)$$

G je gravitaciona konstanta i iznosi $6.6732 \cdot 10^{-8} \text{ dyn cm}^2 \text{ g}^{-2}$, a c je brzina svetlosti. Orbitalni period P_{orb} je precizno određen i iznosi 27906.982151 s ili kako je ranije navedeno oko 7.75 h. Zbir masa M_1+M_2 je 2.82787, izražen u masama Sunca. Odavde se vidi i da veća ekscentričnost orbite e povećava ω' , a za ovaj dvojni sistem je prilično velika i iznosi $e=0.6171338$. Manja ekscentričnost Merkurove putanje i period koji iznosi oko 3 meseca u velikoj meri smanjuju pomeranje perihela jer period doprinosi sa $P_{orb}^{-5/3}$.

5.2.Smanjenje orbite

Pošto su pulsari masivni objekti koji u blizini periastrona dostižu veliko ubrzanje, oni tada emituju najjače gravitacione talase. Po OTR sistem na taj način gubi energiju. Posledica toga je smanjenje orbite i njene ekscentričnosti.



Slika 7. Umetnička predstava gravitacionih talasa nastalih kretanjem neutronske zvezde

Da bi se izračunala jačina gravitacionog zračenja, i kao posledica, brzina smanjena orbite, odnosno orbitalnog perioda, potrebno je odrediti masu i orbitalne parametre sistema iz jednačina OTR.

Preko klasične analize moguće je odrediti pet orbitalnih parametara: projektovanu veliku poluosu orbite pulsara $a_p \sin i$, ekscentričnost orbite e , vreme prolaska kroz periastron T_0 , orbitalni period P_b i longitudu periastrona ω_0 . Relativistički efekti uvode još tri parametra: pomeranje periastrona ω' , parametar gravitacionog crvenog pomaka i dilatacije vremena γ i promena orbitalnog perioda \dot{P}_b . Očekivane vrednosti ω' i γ se mogu izraziti preko klasičnih parametara i mase pulsara m_p i njegovog pratioca m_c . ω' se dobija pomoću formule (1) a γ na sledeći način:

$$\gamma = G^{2/3} c^{-2} e (P_b/2\pi)^{1/3} m_c (m_p + 2m_c) (m_p + m_c)^{-4/3} \quad (2)$$

Dobijene vrednosti su (prema [2]):

$$\omega' = 2.11353 \left(\frac{m_p + m_c}{M_\odot} \right)^{2/3} [^\circ / god]$$

$$\gamma = 0.00293696 \left(\frac{m_c}{M_\odot} \right) \left(\frac{m_p + 2m_c}{M_\odot} \right) \left(\frac{m_p + m_c}{M_\odot} \right)^{-4/3} ["]$$

Zamenom merenih vrednosti ovih veličina mogu se dobiti mase pulsara i njegovog pratioca. Dobijene vrednosti su $m_p = 1.42 \pm 0.06 M_\odot$ i $m_c = 1.41 \pm 0.06 M_\odot$ ³ (sl. 11). Zanimljivo je što je ovo prvo korišćenje opšte teorije relativnosti za dobijanje veoma preciznih astrofizičkih merenja.

Pošto su poznati klasični orbitalni parametri i mase zvezda moguće je odrediti preostale nepoznate parametre: inklinaciju i , velike poluose relativne orbite a , orbite pulsara a_p i orbite pratioca a_c . Dobijene vrednosti su date u tabeli 9.

$$\sin i = G^{-1/3} c (a_p \sin i / m_c) (P_b / 2\pi)^{-2/3} (m_p + m_c)^{2/3} \quad (3)$$

$$a = G^{1/3} c^{-1} (P_b / 2\pi)^{2/3} (m_p + m_c)^{1/3} \quad (4)$$

$$a_p = a m_c (m_p + m_c)^{-1} \quad (5)$$

$$a_c = a m_p (m_p + m_c)^{-1} \quad (6)$$

Fitovani parametri	Vrednosti
$a_p \sin i$ (")	2.3417725
e	0.6171338
T_0 (MJD)	52144.90097844
P_b (dan)	0.322997448930
ω (°)	292.54487
Ω' (/god)	4.226595
γ (s)	0.0042919
\dot{P}_b (10^{-12})	-2.4184

Vrednosti izračunate preko orbitalnih parametara dobijenih posmatranjima do 1982. godine	
Ukupna masa	$M = 2.8275 \pm 0.0007 M_\odot$
Masa pulsara	$M_p = 1.42 \pm 0.06 M_\odot$
Masa pratioca	$M_c = 1.41 \pm 0.06 M_\odot$
Inklinacija	$\sin i = 0.72 \pm 0.03$
Velika poluosa relativne orbite	$a = 6.5011 \pm 0.13$ "
Velika poluosa orbite pulsara	$a_p = 3.24 \pm 0.13$ "
Velika poluosa orbite pratioca	$a_c = 3.26 \pm 0.13$ "

Tabela 8. Izmereni orbitalni parametri

Tabela 9. Vrednosti dobijene iz prethodnih formula

Sada imamo sve potrebno za izračunavanje smanjenja perioda. Peters i Matthews (1963) su pokazali da je u opštoj teoriji relativnosti smanjenje perioda dato formulom:

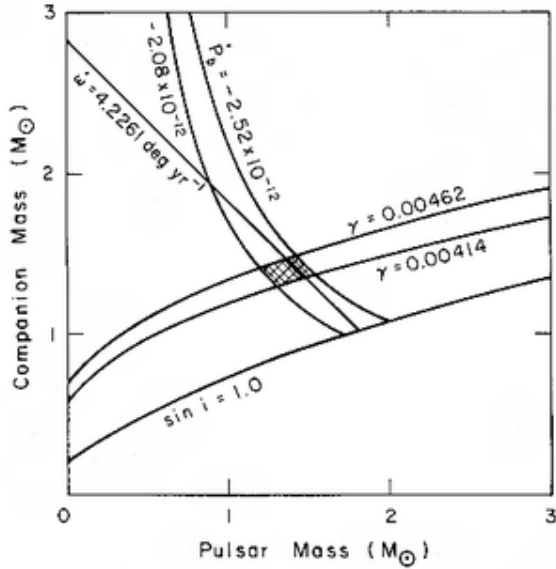
$$\dot{P}_{b,GR} = -\frac{192\pi G^{5/3}}{5c^5} (P_b/2\pi)^{-5/3} (1-e^2)^{-7/2} \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) m_p m_c (m_p + m_c)^{-1/3} \quad (7)$$

Predviđena promena orbitalnog perioda izračunata preko jednačine (7) u kojoj su zamenjene prethodno dobijene vrednosti je $\dot{P}_{b,GR} = -(2.40242 \pm 0.00002) * 10^{-12}$. Merena vrednost zahteva malu korekciju $\dot{P}_{b,correction}$ u odnosu na teorijsku vrednost, zbog relativnog ubrzanja između Sunčevog sistema i sistema PSR 1913+16, projektovanog na pravac vizure (Damour i Taylor 1991.). Korigovanu vrednost dobijamo kao $\dot{P}_{b,corrected} = \dot{P}_b - \dot{P}_{b,correction}$. Ova korekcija zavisi od nekoliko slabo poznatih veličina koje uključuju udaljenost i sopstveno kretanje pulsara kao i udaljenost Sunca od centra galaksije. Izračunato je da iznosi $\dot{P}_{b,correction} = -(0.0128 \pm 0.0050) * 10^{-12}$, odakle sledi da je $\dot{P}_{b,corrected} = (2.4056 \pm 0.0051) * 10^{-12}$ [3]. Dakle,

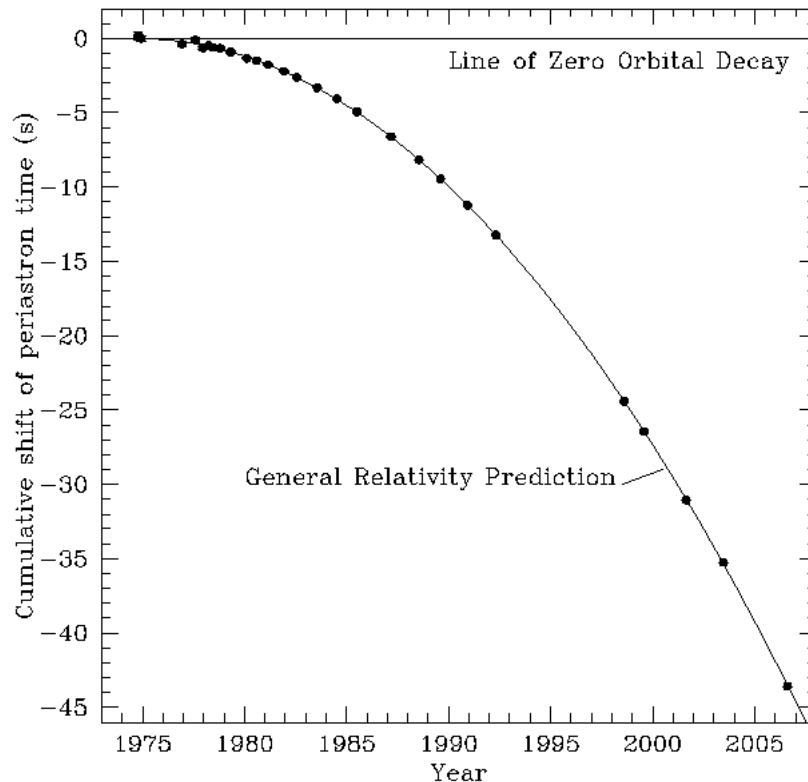
$$\frac{\dot{P}_{b,corrected}}{\dot{P}_{b,GR}} = 1.0013 \pm 0.0021$$

3 Ove vrednosti su dobijene preko posmatranja i izračunavanja koja su vršena do 1982. godine. Novija merenja pokazuju da su date vrednosti $m_p = 1.4414 M_\odot$ i $m_c = 1.3867 M_\odot$.

Vidimo da se korigovana merena vrednost i vrednost dobijena teorijom poklapaju u velikoj meri. U narednim godinama nastavljeno je sa praćenjem sistema, a rezultati toga su prikazani na slici 11 koja predstavlja poređenje merene i teorijski dobijene promene orbitalnog perioda za period od 30 godina. Vidi se skoro savršeno poklapanje i ovo je bila fantastična potvrda OTR!



Slika 10. Prikazana je usaglašenost između merenih veličina \dot{P}_b , $\dot{\omega}$ i γ . Krive predstavljaju ograničenja za moguće kombinacije masa pulsara i pratioca. Te kombinacije su predstavljene podebljanim delom linije ω' .



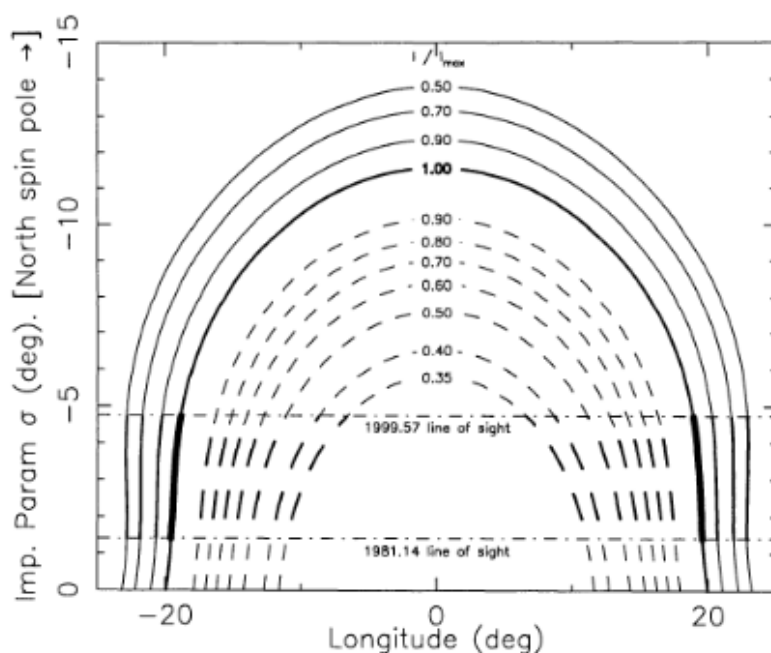
Slika 11. Promena orbitalnog perioda. Tačke predstavljaju posmatrane vrednosti, a parabola ilustruje teorijska predviđanja

Smanjenje orbite u ovom slučaju iznosi 3.5 m godišnje, a to je nemerljivo za sistem koji je udaljen više od 20 000 svetlosnih godina. Na osnovu brzine smanjenja orbitalnog perioda izračunato je da će posle 8 godina pulsar doći u periastron 2 sekunde ranije. Merenja iz 1982. su to i pokazala.

Ukupna snaga emitovana preko gravitacionih talasa u ovom sistemu je $7.35 \cdot 10^{24}$ W, dok Sunčev sistem izrači samo 5000 W preko gravitacionih talasa [5]. Sa ovakvim gubitkom energije, pulsari se približavaju jedan drugom, što će dovesti do njihovog spajanja. Prva detekcija gravitacionih talasa koji potiču od spajanja dve neutronske zvezde bila je avgusta 2017. godine (GW 170817). Pojava je nazvana kilonova, i praćena je gama-bljeskom (GRB 170817). To je ujedno bila i prva potvrda OTR detekcijom elektromagnetnog zračenja.

5.3.Precesija

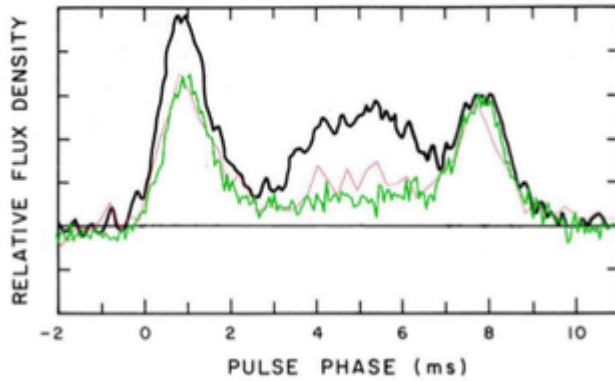
Geodezijska precesija predstavlja lagano klaćenje ose rotacije pulsara. Ona nastaje zbog kretanja pulsara u prostor-vremenu koji je zakrivljen od strane pratioca. Zbog ove pojave je omogućeno posmatranje različitih delova snopa kao i predstavljanje njegovog dvodimenzionog modela. Izračunata stopa precesije iznosi 1.2° godišnje.



Slika 12. Izduženi dvodimenzioni model konusnog snopa

Weisberg, Romani i Taylor su uočili promene u obliku snopa na 1400 MHz i to su pripisali pomeranju pravca vizure preko konusnog snopa. Kramer je 1998. ustanovio da se udaljenost između dve glavne komponente snopa smanjuje i pretpostavio je da je pravac vizure nastavio da se udaljava od centra. Na osnovu toga je zaključeno da za nekoliko godina više nećemo biti u mogućnosti da registrujemo pulsacije pulsara PSR 1913+16. Weisberg i Taylor su potvrdili ove rezultate 2002. i uočili da je konusni snop izdužen u pravcu koji je paralelan osi rotacije pulsara, a sužen longitudinalno blizu centra kao što je prikazano na slici 12.

Rankin je pokazao da su jezgra emisije većine pulsara najupadljivija na niskim frekvencijama. Na slici 13 su prikazana tri merenja na frekvenciji od 430MHz u različitim epohama. Vidi se da je relativna gustina fluksa komponente jezgra bila visoka 1980. godine, ali je značajno oslabila do 1998. i zatim skoro nestala do 2003. godine. Ovo dodatno potvrđuje model u kom se pravac vizure udaljava od središta. Iako još nije potvrđeno, pretpostavlja se da postoji simetrija dvodimenzionog modela snopa u pravcu sever-jug.



Slika 13. Profili pulsara PSR 1913+16 na 430 MHz u tri epohe. Komponenta jezgra slabi od 1980. do 2003. godine.

6.Zaključak

Oduševljenost Ajnštajnovom teorijom i želja za što boljim shvatanjem kosmosa nas konstantno tera da istražujemo, a samim tim i otkrivamo tajne sveta koji nas okružuje. Zato su nakon ovog prvog, otkriveni i drugi dvojni pulsari, a neke sisteme su činila čak dva pulsara čiji su snopovi pogadali Zemlju. Razvoj astronomije i tehnologije nam je omogućio da upoznamo i mnogo brže i masivnije objekte koji su još više učinili da se zaista divimo Ajnštajnovom umu. Ipak, ova teorija nije usaglašena sa kvantnom mehanikom, a to znači da ćemo morati još da se potrudimo da nađemo jedinstveno objašnjenje za sve pojave koje posmatramo. Ono što velika usaglašenost između posmatranja i OTR pokazuje je da će bilo koje novo sveobuhvatno viđenje pojava u vasioni verovatno biti zasnovano na ovom viđenju gravitacije.

Literatura

- [1] Hulse, R. A. 1994, *The discovery of the binary pulsar*, *Reviews of Modern Physics* vol.66, No.3, 699-710.
- [2] Taylor, J. H. i Weisberg, J. M. , *A new test of general relativity: gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16*, 1982. *Astrophysical Journal* 253, 908-920.
- [3] Weisberg, J. M. i Taylor, J. H. 2005, *Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis*, ASP Conference Series, Vol.328, *Proc. of the conference held 11-17 January 2004, Aspen*, Eds. F. A. Rasio and I. H. Stairs, San Francisco, 25-31.
- [4] Vukićević-Karabin, Mirjana i Atanacković, Olga : *Opšta astrofizika*, Zavod za udžbenike, Beograd, 2010.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/HulsTaylor_binary
- [6] <http://www.people.carleton.edu/~jweisber/binarypulsar/First-Binary-Pulsar.html>
- [7] <http://www.astronomija.org.rs/nauka/fizika/10107-sta-su-gravitacioni-talasi>
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/LIGO>