

Univerzitet u Beogradu

Matematički fakultet

Vanja Petković

CRNE RUPE

Seminarski rad iz Opšte astrofizike

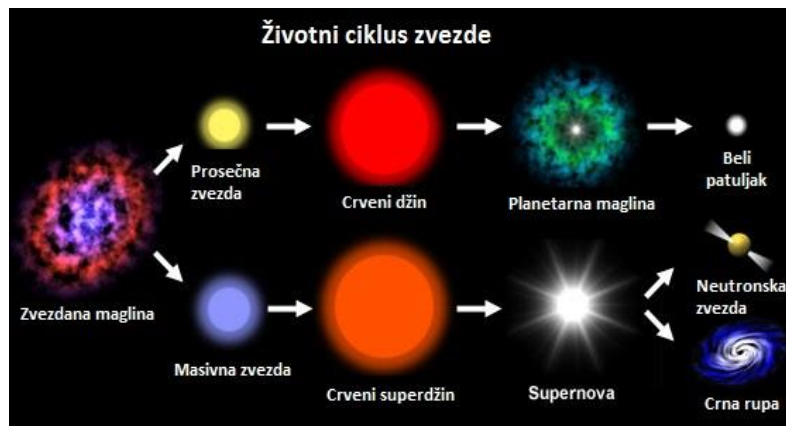
Beograd, 2015

Sadržaj

1. Formiranje crnih rupa – poslednji stepenik u evoluciji zvezda.....	3
2. Osnovne karakteristike	4
3. Opšta i specijalna teorija relativnosti.....	5
4. Posmatrački dokazi	7
5. Supermasivne crne rupe	8
6. Eksplozije crnih rupa	8
Literatura	10

1. Formiranje crnih rupa – poslednji stepenik u evoluciji zvezda

Kao i živa bića, i zvezde imaju svoj životni vek, pa se samim tim može govoriti o rađanju, životu i smrti zvezda. Životni put zvezde može se podeliti na nekoliko faza (sl. 1). Kako će one izgledati, kao i to kako će se okončati život zvezde, najviše zavisi od toga kolika je njena masa. Najveći deo života, zvezda provede na glavnom nizu H-R dijagrama¹. To je stabilna i, može se reći, najmanje uzbudljiva faza termonuklearnih reakcija sagorevanja (fuzije) vodonika u jezgru. Kada količina vodonika u jezgru postane toliko mala da energija oslobođena nuklearnim reakcijama nije više dovoljna da se zvezda suprotstavi sopstvenoj gravitaciji, narušava se ravnoteža i počinje sažimanje. To sažimanje predstavlja kraj dugog boravka zvezde na glavnom nizu.



Slika 1. Evolutivni put zvezda različitih masa (preuzeto sa: scioly.org)

Međutim, kada zvezda istroši vodonik u svom jezgru, sažimanjem temperatura u njoj raste, pa i u tankom sloju oko jezgra, gde počinje da sagoreva vodonik. Kako se gorivo troši, goreći sloj se postepeno pomera sve dalje od jezgra. Izvor zračenja u omotaču zagreva spoljne slojeve, oni se šire i hlade ([4]). Rezultat ovog procesa je crveni džin – zvezda velikog radijusa, a relativno niske površinske temperature. Budući da su crveni džinovi ogromnih dimenzija, gravitacija nema mnogo uticaja na njihove spoljne slojeve. Zbog toga velika količina njihovog materijala odlazi u međuzvezdani prostor (zvezdani vetar). U ovom stadijumu zvezda se bliži kraju svog života. Masivne zvezde mogu proći kroz ovu fazu više puta u toku svog života. U zavisnosti od mase koju sadrži posle gubitka spoljnih slojeva, zvezda provodi poslednji stadijum svog života kao beli patuljak ($M < 1,4M_{\odot}$), neutronska zvezda ($1,4M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$) ili crna rupa ($M > 3M_{\odot}$).

Dakle, kada kod zvezda najvećih masa (zvezda roditelj ima više od $30 M_{\odot}$) prestanu termonuklearne reakcije, ne postoji sila koja bi mogla da se suprotstavi katastrofalnom gravitacionom kolapsu, koji masivnu zvezdu sabija u singularitet beskonačne gustine. Gravitaciono polje ovakvog objekta je toliko jako da čak ni svetlost ne može da ga napusti. Ovakav završetak života zvezde naziva se *crna rupa*.

¹ *Hercšprung-Raselov* ili *H-R dijagram* je grafička sistematizacija zvezda po njihovoj spektralnoj klasi i apsolutnoj veličini.

Termin *crna rupa* osmislio je američki naučnik Džon Viler, krajem šezdesetih godina prošlog veka ([3]). Ideja o postojanju ovih objekata pojavila se dve stotine godina ranije. Međutim, na Kongresu Međunarodne astronomske unije 1970. godine, na oglasnoj tabli je bila napisana poruka „Crna rupa = pogrešna reč“ ([2]). To je bila posledica povezivanja teorije postojanja ovih objekata sa raznim idejama koje potiču iz naučne fantastike. Ipak, mišljenje se promenilo i astronomi su procesom eliminacije došli do toga da prihvate crne rupe kao jedino objašnjenje za neke objekte. Poput Šerloka Holmsa, zaključili su da ono što ostane kad se odbaci nemoguće, ma kako bilo neverovatno, mora da bude pravi odgovor.

2. Osnovne karakteristike

Kako kod crnih rupa dolazi do bespovratnog iščezavanja materije koja na nju padne, može se definisati vrlo malo konkretnih parametara koji karakterišu ove objekte. U opštem slučaju, može se smatrati da je crna rupa opisana ako je data njena masa. Za opisivanje uslova koji vladaju u izuzetno jakom gravitacionom polju crnih rupa nije dovoljna Njutnova mehanika, već se mora primeniti Ajnštajnova teorija relativnosti. Pri analizi druge kosmičke brzine², uzima se u obzir da: 1) nijedna brzina nije veća od brzine svetlosti i da 2) gravitacija ima znatnog uticaja i na svetlost, kao i na svu ostalu materiju. Ova brzina je data formulom:

$$v_c = \sqrt{\frac{2GM}{r}}, \quad (1)$$

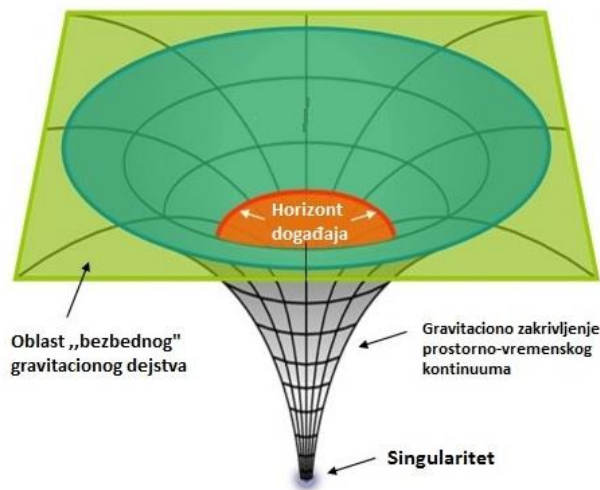
gde je G - gravitaciona konstanta, M – masa tela čiji se gravitacioni uticaj ispituje i r – poluprečnik tog tela. Na primer, za Zemlju, čiji je poluprečnik 6400km, brzina bekstva je 11km/s. Hipotetički, ako bismo Zemlju smanjili znatno zapreminski, ne menjajući joj masu, vrednost kritične brzine bi dosta porasla. Recimo, ako bi se smanjila na četvrtinu sadašnje veličine, brzina bekstva bi bila dvaput veća, a ako bi se poluprečnik smanjio hiljadu puta, brzina bi iznosila čak 630km/s. Ako nastavimo sa smanjivanjem i dovedemo Zemlju do veličine zrna grožđa, tada bi kritična brzina iznosila 300 000km/s, a to je upravo brzina svetlosti – najveća moguća brzina koju zakoni fizike dozvoljavaju. Kako je ta brzina nedostižna, nijedan objekat ne bi uspeo da napusti našu tako umanjenu planetu sa veoma jakim gravitacionim poljem ([1]).

Upravo iz tih razloga ništa ne može da napusti crnu rupu. Nemački naučnik, Karl Švarcšild, prvi je korektno odredio kritični radijus R_g , kao graničnu vrednost ispod koje masivna zvezda zbog gravitacionog kolapsa prestaje da bude vidljiva za posmatrača. Taj kritični radijus nazvan Švarcšildovim ili gravitacionim radijusom je:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} = 2,96 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) [\text{km}]. \quad (2)$$

² *Druga kosmička brzina* ili *brzina bekstva* je kritična vrednost brzine koju objekat mora da dostigne kako bi u potpunosti napustio gravitaciono polje nekog tela.

Za Zemlju, ovaj radijus je 1cm, za Jupiter 3m, a za Sunce oko 3km. Granična površ radijusa R_g naziva se *horizont događaja* (sl. 2), jer ograničava oblast iz koje spoljni posmatrač ne dobija nikakve informacije. Unutar nje ne znamo šta se dešava i to je, zapravo, crna rupa. Dakle, horizont događaja se može razumeti i kao površina (granica) crne rupe, ali to nije nikakva fizička granica, već samo granica prestanka svakog vida komunikacije sa „drugom stranom“.



Slika 2. *Horizont događaja i struktura crne rupe (preuzeto sa: tragomzvezda.net)*

Međutim, treba imati na umu da crne rupe nisu svemirski usisivači, koji idu naokolo i uništavaju svu materiju oko sebe. Orbita objekta oko crne rupe je ista kao što bi bila oko zvezde iste mase. Samo ako objekat priđe bliže od Švarcšildovog radijusa, dolazi do promene. Takođe, ako bi Sunce iznenada postalo crna rupa, gravitaciono privlačenje koje Zemlja trpi ne bi se ni najmanje promenilo.

3. Opšta i specijalna teorija relativnosti

Kao što je ranije napomenuto, za opisivanje događaja iz okoline crne rupe nisu dovoljni principi klasične mehanike. Javljaju se brzine merljive brzinom svetlosti, kao i veoma jako gravitaciono polje. U pomoć dolaze specijalna i opšta teorija relativnosti, koje je početkom XX veka postavio čuveni fizičar Albert Ajnštajn.

Pred kraj XIX veka, naučnici su bili svesni da brzina svetlosti (c) ima poseban status. Znali su da je c brzina kojom se kreću elektromagnetni talasi i, koliko je bilo poznato, da je to gornja granica za moguće brzine svih poznatih čestica. Eksperiment iz 1887. američkih fizičara A.A.Majkelsona i E.V.Morlija pokazao je da je *izmerena vrednost brzine svetlosti nezavisna od kretanja bilo posmatrača, bilo izvora*. Bez obzira na našu relativnu brzinu u odnosu na izvor zračenja, uvek se dolazilo do vrednosti za c : 299 792 458 m/s. Ako putujemo automobilom koji se kreće brzinom od 100km/h i ispalimo metak unapred brzinom od 1000km/s u odnosu na auto, posmatrač sa strane će uočiti da se metak kreće brzinom od 1100km/h. Međutim, ako smo u raketi

koja se kreće brzinom $0,1c$ i pustimo svetlosni zrak u smeru našeg kretanja, posmatrač sa strane neće uočiti da je brzina zraka $1,1c$, već da je ostala nepromenjena i iznosi c ([1]). Pravila koja važe za brzine veoma bliske brzini svetlosti ne važe i u svakodnevnom životu.

Ajnštajn je 1905. objavio specijalnu teoriju relativnosti (STR). Proširio je zakone fizike i na relativističke brzine – brzine uporedive sa c . Osnovni principi STR su: 1) brzina svetlosti, c , je najveća moguća u prirodi, 2) ne postoji apsolutni referentni sistem u univerzumu i 3) prostor i vreme se ne mogu izučavati odvojeno.

Deset godina kasnije, Ajnštajn je došao i do opšte teorije relativnosti (OTR) koristeći se misaonim eksperimentima. Na primer, ako neko vozi auto i naglo ga ubrza, zbog inercije tela, vozač će biti pritisnut u sedišta sve dok traje ubrzanje. Ako ubrzanje traje duže vreme, silu koja ga potiskuje nazad vozač oseća na isti način kao i silu teže. Ajnštajn je zaključio da ne postoji način da se utvrdi razlika između dejstva gravitacionog polja i inercijalnog sistema referencije. To se naziva principom ekvivalencije. Takođe, OTR kaže da gravitacija uslovljava geometriju prostor-vremena, a to utiče na kretanje mase i zračenja. Ovo je bilo teško proveriti zato što mi živimo u slabom gravitacionom polju.

Svi objekti savijaju prostor oko sebe. Što su veće mase, to je veće savijanje. Tako se, prema OTR, tela u jakom gravitacionom polju ne kreću prema zakonima klasične mehanike, već prate zakrivljenja prouzrokovana obližnjim masivnim telima. Kao što je fizičar Džon Viler rekao: „Prostor-vreme govori materiji kako da se kreće, a materija govori prostor-vremenu kako da se savija.“. Shodno tome, svetlost koja prolazi pored masivne zvezde, biva dosta zakrivljena. Kada je gravitaciono polje slabo, Njutnova i Ajnštajnova teorija se slažu. Međutim, što je veća masa (gravitacija), ove dve teorije se sve više razilaze.

Na slici 2 je prikazano kako bi izgledalo savijanje prostor-vremena u okolini crne rupe. Ona predstavlja oblast prostora u kojoj gravitaciono polje postaje nesavladivo, a zakrivljenost prostora ekstremna. Na samom horizontu događaja, zakrivljenost je tolika da dolazi do „presavijanja“ prostora u kome materija ostaje zarobljena.

Kada se OTR primeni u slučaju crnih rupa, nastaju dve značajne posledice: gravitacioni crveni pomak i dilatacija vremena. Pretpostavimo da smo poslali robota u letelici do crne rupe radi izučavanja karakteristika prostora i vremena u njenoj okolini. Robot ima precizan časovnik i svetlosni izvor poznate frekvencije, a mi pomoću nekog teleskopa, sa bezbedne udaljenosti, očitavamo vreme i talasnu dužinu. Primetili bismo da, što se robot više približava crnoj rupi, to je izraženiji crveni pomak svetlosti koju on emituje. Ovo bi bila posledica uticaja jakog gravitacionog polja crne rupe (u skladu sa OTR) na emitovano zračenje, tako da se on naziva *gravitacioni crveni pomak*.

Da bi fotoni „pobegli“ od izvora gravitacije koja ih privlači, moraju da utroše deo energije. Dakle, oni vrše neki rad kako bi napustili to jako gravitaciono polje. Poznato je da fotoni ne usporavaju, već se uvek kreću brzinom svetlosti i pritom troše energiju. Kako je energija direktno proporcionalna frekvenciji³, dok se energija smanjuje, smanjuje se i frekvencija, odnosno

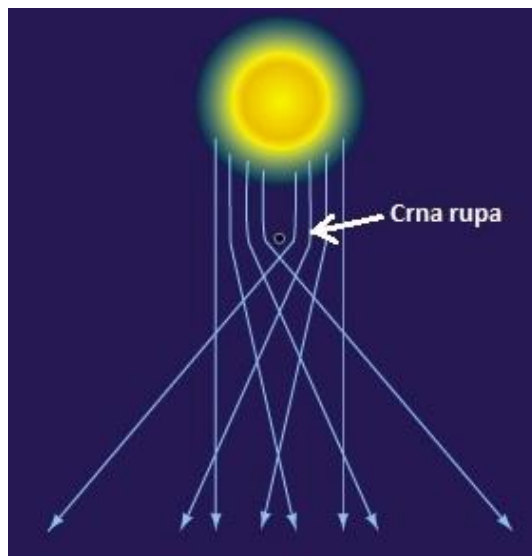
³ $\varepsilon = h\nu$, gde je ε - energija, h – Plankova konstanta, a ν - frekvencija

povećava talasna dužina ($\lambda \sim 1/v$). Tako da bi zelena svetlost, koju emituje ovaj robot, do nas stigla kao žuta, a zatim kao crvena. Iz perspektive robota, svetlost ostaje zelena. Kada bi se robot još više približio horizontu događaja, detektovali bismo radio talase. Svetlost emitovana sa samog horizonta događaja bi gravitacionim pomakom dobila beskonačnu talasnu dužinu. Foton bi potrošio svu energiju u pokušaju bekstva sa horizonta događaja. Tako da ne bi imao dovoljno energije da stigne do nas.

Sa druge strane, kako se robot približava crnoj rupi, tako sat na njemu sve sporije i sporije otkucava. Pri dostizanju samog horizonta događaja, sat bi se potpuno zaustavio. Svako kretanje robota bi bilo prividno zamrznuto u vremenu. Tako da, nikada zapravo ne bismo videli kako robot biva usisan iza horizonta događaja, činilo bi se da taj proces traje beskonačno dugo. Ova pojava se zove *dilatacija vremena* i to je još jedna posledica OTR.

4. Posmatrački dokazi

Crne rupe se, iz ranije navedenih razloga, ne mogu detektovati direktno, već posrednim putem. Jedna od ideja za „lov na crne rupe“ bilo je posmatranje njenog tranzita preko neke zvezde. Međutim, to bi bilo nemoguće uočiti usled njenih jako malih dimenzija. Čak i kada bismo bili dovoljno blizu posmatrane zvezde, javilo bi se veliko skretanje zvezdane svetlosti koja prolazi pored crne rupe na putu do nas (sl. 3). Crna rupa se ne bi videla kao tačka, već bi čitava slika bila zamrljana i nejasna ([1]).



Slika 3. Gravitaciono savijanje svetlosti (*preuzeto sa astronomy.nju.edu.cn*)

Mnogo efikasniji način za nalaženje crnih rupa jeste uočavanje njihovog uticaja na druge objekte. Posmatraju se dvojni zvezdani sistemi u kojima je samo jedan član direktno vidljiv. Drugi član, koji ne vidimo, može prosto biti neka manja zvezda okružena prašinom ili nečim drugim što je čini nevidljivom za nas. Međutim, u nekim slučajevima, taj nevidljivi pratilac može biti upravo crna rupa.

Veruje se da u sazvežđu labuda (Cygnus), na oko 2000pc od nas, postoji kandidat za crnu rupu, koji je nazvan je *Cygnus X-1* (jak izvor X zračenja). Posmatran je satelitom *Uhuru*, početkom 70-ih godina prošlog veka i došlo se do sledećih rezultata: vidljivi član ovog izvora zračenja je plava zvezda tipa B i ima masu od oko $25M_{\odot}$; dvojni sistem ima orbitalni period od 5,6 dana, a ukupna masa sistema je $35M_{\odot}$ (odatle sledi da Cygnus X-1 iznosi oko $10M_{\odot}$); vreli gas se kreće od vidljivog ka nevidljivom članu; prečnik kandidata za crnu rupu iznosi oko 300km. Sve ove stavke ukazuju na to da je nevidljivi član upravo crna rupa. Oko nje se formira akrecioni disk gasa koji napušta vidljivu zvezdu dvojnog sistema. Taj gas se pritom veoma zagreva i emituje zrake koje uočavamo neposredno pre nego što bivaju zarobljeni zauvek iza horizonta događaja.

Poznato je još nekoliko kandidata za crnu rupu. U Velikom Magelanovom oblaku je to LMC X. On takođe kruži oko vidljivog sjajnog saputnika, na koji ima jasan gravitacioni uticaj. I za LMC X je zaključeno da ima oko $10M_{\odot}$ i odatle sledi da ne može da bude u pitanju neutronska zvezda, već crna rupa. Još jedan kandidat (mase $3,8M_{\odot}$) je jedan član u dvojnog sistema A0620-00.

5. Supermasivne crne rupe

Prethodno navedeni potencijalni primeri crnih rupa imaju masu od nekoliko Sunčevih masa. Međutim, veruje se da postoje i mnogo, mnogo masivnije crne rupe. Aktivna galaktička jezgra se objašnjavaju mogućim prisustvom supermasivnih crnih rupa, čija se masa meri u milionima masa Sunca.

Radio-merenjima je 1974. godine otkriven neobično jak „tačkasti“ izvor na $\lambda = 1.35\text{cm}$ i to u samom centru naše galaksije ([4]). Ista merenja otkrila su i vlaknastu strukturu velikih razmera koja kao da uvire u centar. Najjači radio-izvor u centru Galaksije nazvan je Sagittarius A. Centar Mlečnog puta je ujedno i najintenzivniji izvor γ -zračenja u našoj galaksiji. Najverovatnije je da se u centru nalazi upravo supermasivna crna rupa, mase 3-6 miliona Sunčevih masa.

6. Eksplozije crnih rupa

Britanski teorijski fizičar, Stiven Hoking, ujedinio je dve najsloženije teorije u fizici – kvantnu teoriju i teoriju relativnosti. On je razmatrao svojstva malih crnih rupa gde je gravitacija veoma jaka i znatno se menja na vrlo malim daljinama. Utvrdio je da princip neodređenosti⁴ važi i u domenu energije ([3]). Nije moguće izmeriti energiju koju poseduje bilo koje telo ili sistem u tačno određenom trenutku. Tako da, neki mali paket energije može iznenada da se pojavi i, ako dovoljno brzo iščezne, mi ga ne bismo mogli detektovati, a ipak zakon održanja energije ne bi bio narušen. Taj kratkoživući paket energije mogao bi da se pretvori u par čestice i antičestice (npr.

⁴ *Princip neodređenosti* nam govori da ne možemo dovoljno precizno istovremeno odrediti i trenutni položaj i brzinu čestice.

elektron i pozitron), koje bi obično skoro trenutno anihilirale jedna drugu, a pošto bi se to desilo jako brzo, mi ne bismo uspjeli da detektujemo njihovo postojanje.

Ali ako se par čestica-antičestica pojavi u oblasti prostora neposredno van crne rupe, jedna čestica iz para može da „upadne“ u crnu rupu i tako ne bude u mogućnosti da se poništi sa drugom. Iz daljine izgleda kao da crna rupa emituje pojedinačne elektrone i pozitrone, koji u stvari dolaze iz oblasti oko nje. Pozitivna energija tako emitovane čestice uravnotežuje se „negativnom“ energijom koju crna rupa obezbeđuje u procesu apsorpcije antičestice. Slobodne čestice, u stvari, odnose masu iz crne rupe, tako da se njena ukupna masa smanjuje. Konačno, sva masa crne rupe „ispariće“ na taj način. Crna rupa se na kraju raspada kao pljusak najjednostavnijih čestica. To je ideja koju je razvio Hoking, koja, međutim, važi samo za manje crne rupe. On kaže i da se konačni nestanak crne rupe odigrava u deliću sekunde ([2]). Crna rupa tako eksplodira.

Literatura

- [1] Chaisson, E., McMillan, S., *Astronomy today - 6th edition*, 2008, Pearson Education, Pearson Addison - Wesley
- [2] Henbest, N., *Eksplozija vasiona*, 1983, Globus, Zagreb
- [3] Hoking, S., *Kratka povest vremena*, 2002, Alnari, Beograd
- [4] Vukićević-Karabin, M., Atanacković, O., *Opšta astrofizika*, 2010, Zavod za udžbenike, Beograd