

Uvod

Astronomija je ograničena na proučavanje fenomena koji se javljaju u našem svemiru. S obzirom na crne rupe, ovo ograničenje je važno jer površina crnih rupa predstavlja granicu našeg svemira, odvajajući ga od unutrašnje oblasti koja je posmatrački nepoznata - uzročno odvojena od nas. Iako teorija predviđa značajno singularno ponašanje materije unutar crne rupe (i njene prognoze zbog toga moraju biti sumnjive), te prognoze nisu relevantne nekom astrofizičaru spolja.

Značajno je da u svemiru mogu postojati granice uzročnosti (nazvane *konačni horizonti*) koje su kompaktne i lokalizovane; i što je još značajnije kada uočimo da takve ograničene oblasti gravitaciono interaguju sa spoljašnjosti i koje se, gledano izdaleka, ponašaju kao kompaktni masivni objekti. Oni poseduju masu, ugaoni moment i (u principu) naboj (naelektrisanje); mogu biti plimski poremećeni distribucijom (raspodelom) spoljašnje mase; mogu usisavati materiju i postati veće ili mogu da se stapaju međusobno. Detalji ovih specifičnih stanja se izračunavaju pomoću Ajnštajnovе OTR [Brans-Dikeova (1961) teorija gravitacije daje skoro identične rezultate]. Fizički uslovi za crne rupe u većini (ali ne u svim) relativističkih teorija gravitacije su sledeći:

1. uzročna struktura je određena putanjama fotona (i ostalih čestica čija je masa mirovanja nula), jer nijedna čestica koja nosi informaciju ne može pobeći iz svojeg budućeg svetlosnog konusa;
2. gravitacija ispoljava privlačnu silu na sve čestice, npr. telo daje crveni pomak izlaznim fotonima i skreće ka unutra one koji se kreću transverzarno;
3. snaga gravitacije se povećava kako telo postaje kompaktnije; pa, tipično, u nekoj tački (trenutku) svetlost i usled toga sva informacija ostaje zarobljena.

Za Njutnovu gravitaciju, i za čestični model svetlosti, ovo je prvi put izračunao Laplas (1798).

Formiranje crne rupe kolapsom zvezde ili galaktičkog jezgra je buran proces koji povezuje normalne astrofizičke kompleksnosti (jednačine stanja, hidrodinamika, oslobađanje nuklearne energije) sa relativističkim kompleksnostima jake dinamičke gravitacije. Poznat je veliki broj izolovanih činjenica iz kojih je sklopljen mozaik onoga što danas generalno znamo o crnim rupama.

Sferni kolaps je dobro shvaćen; kada se objekat mase M ili "srednje" gustine ρ približava svom Švarcšildovom radijusu $2R_*$:

$$2R_* \equiv 2 \frac{G}{c^2} M = \left(\frac{3\pi}{8} \frac{c^2}{G\rho} \right)^{1/2} = 3,0 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) km = \left(\frac{\rho}{1 \frac{g}{cm^3}} \right)^{-1/2} 1,3 * 10^{14} cm \quad 1)$$

formira se "zarobljena površina" fotona koji pokušavaju da pobegnu, a usled toga, i konačni horizont. "Stroga" jednačina stanja može da zaustavi formiranje crnih rupa malih masa ($\sim M_\odot$) stvarajući degeneracijom održane bele patuljke ili neutronske zvezde veće od njihovih Švarcšildovih radijusa. Za nerotirajuće degenerisane patuljke, ravnotežne konfiguracije su moguće do Čandrasekarove mase:

$$M_c \approx 1,2 M_\odot \left(\frac{\mu}{2} \right)^{-2} \quad 2)$$

(gde je μ srednji broj nukleona po elektronu, 2 za ^4He). Brzi, diferencijalno rotirajući degenerisani patuljci mogu imati nešto veću masu; gornja granična masa za stabilne konfiguracije je slabo poznata, ali je verovatno $\sim 3M_\odot$. Za neutronske zvezde odgovarajuća gornja granična masa, masa Openhajmer-Volkofa M_{ov} , nije toliko precizno utvrđena, jer zavisi od jednačine stanja nuklearne materije velike gustine (degenerisani neutronske gas). Verovatno je u opsegu $0,7M_\odot < M_{ov} < 2,5M_\odot$ i vrlo pouzdano je manja od $3,5 M_\odot$.

Sferni objekti većih mase mogu postići stalnu konfiguraciju podržanu pritiskom degenerisanih fermiona. Oni moraju eventualno kolapsirati u crnu rupu ili eksplodirati, na neki drugi način šaljući njihovu materiju u beskonačnost. Teorija relativnosti dozvoljava da crne rupe poseduju bilo koju masu, ali intervali masa koji će biti populisani crnim rupama su određeni sa nepredvidljivim promenama zvezdane evolucije (za crne rupe zvezdanih masa) i sa pretežno nepoznatom prirodom formiranja supermasivnih zvezda ($\sim 10^2 - \sim 10^6 M_\odot$) i kolapsom protogalaktičkih jezgara ($\sim 10^7 - \sim 10^{12} M_\odot$).

Sa sfernih objekata se prelazi na "opšte pretpostavke" (mešavina rigoroznog matematičkog rezonovanja, fizički argumenti, ekstrapolacija i "slepa" vera): kada objekat bilo kog oblika postaje mali kako je opisano u jednačini 1) u *svim* dimenzijama, tada se formira konačni horizont. Kada je horizont prisutan, unutrašnje stanje nije relevantno za dalji razvoj sistema. Spoljašnje gravitaciono polje se prilagođava emitujući gravitacione (i ponekad

elektromagnetne) talase, tražeći stacionarno, ravnotežno, konačno stanje. Ako su perturbacioni efekti spoljne materije mali, jedinstveno, stacionarno, konačno stanje je Kerova crna rupa.

Crne rupe brzo "sazrevaju". U nekoliko stotina revolucija (brzinom svetlosti) oko crne rupe, $\sim 10^{-2}$ (M/M_{\odot}) sekundi, dinamički procesi prostor-vremena su "zamrli". Sa, sada, virtuelno statičnom gravitacijom, kompleksnosti astrofizičkih interakcija rupe su mnogo manje egzotične: potrebno je modelirati samo hidrodinamičko ponašanje upadajuće materije, transport zračenja koje ona stvara i dinamičke efekte rupe kao tačkaste mase u sistemu drugih tela. Pošto je rupa jako gusta u poređenju sa običnom materijom, dobra aproksimacija je zanemarivanje uticaja perturbacija koje spoljašnja materija vrši na nju (rupu), čak i ako, npr. dođe do sudara sa običnom zvezdom. Ova aproksimacija fiksne pozadinske metrike ne važi samo u dva slučaja: 1. rupa oko koje orbitira masivan samogravitirajući disk, koji može biti prisutan oko masivne crne rupe (10^6 - $10^9 M_{\odot}$) u jezgru protogalaksije; 2. sudar sa neutronsom zvezdom ili drugom crnom rupom koji vraća rupu stelarne veličine u dinamičko stanje.

Prvi "poligon" za testiranje teorijskih predviđanja je binarni sistem crne rupe i zvezde. Podaci sakupljeni u x-oblasti sa Cyg X-1 (i sličnih izvora) potencijalno postavljaju prve posmatračke testove OTR u situaciji sa jakim poljima, te se mnogo napora ulaže u povezivanje teorije i posmatranja.

Gravitacioni kolaps

Nerotirajuće zvezde

Krajnja tačka totalnog gravitacionog kolapsa - formiranje crne rupe - se javlja kada gravitaciona vezivna energija zvezde postane uporediva sa ukupnom energijom njene mase:

$$\frac{GM^2}{R} \sim Mc^2 \Rightarrow R \sim \frac{GM}{c^2} \approx 1,5 \frac{M}{M_{\odot}} km \quad 3)$$

Početak kolapsa je određen različitim kriterijumima. Grubo govoreći, kada gravitaciona vezivna energija postane uporediva sa ukupnom masom čestica koje stvaraju pritisak, tada se efektivni adijabatski indeks približava kritičnoj vrednosti od 4/3 i preovladava dinamičan kolaps. Ukoliko je ϵ udeo mase odgovoran za pritisak, onda imamo:

$$\frac{GM^2}{R} \sim \epsilon Mc^2 \Rightarrow R \sim \frac{1}{\epsilon} \frac{GM}{c^2} \quad 4)$$

Za običnu materiju (ili elektron-degenerativnu materiju, tj. degenerisani elektronski gas) gde je pritisak obezbeđen elektronima, $1/\epsilon \sim m_p/m_e \approx 1836$; kada pritisak zračenja postaje značajan $1/\epsilon \rightarrow \infty$, što reflektuje tendenciju ka nestabilnosti u zračenjem dominantnim zvezdama. Neutronske zvezde sa: $1/\epsilon \sim 1$ mogu biti blizu svojih gravitacionih radijusa bez dinamičnog klapsa. Drugačije, nezavisno od toga da li je telo temperaturno ili degenerativno održano (u smislu kontra-sile), kolaps će započeti na $\geq 10^3$ gravitacionih radijusa.

Pitanje na koje moraju da odgovore detaljni proračuni zvezdane evolucije su sledeći: Koji opseg početnih zvezdanih masa će dovesti do evoluiranih zvezdanih jezgara koja će u nekom trenutku:

- a) doći unutar opasne zone u kojoj je moguć kolaps i;
- b) imati mase veće od gornje granice mase neutronske zvezde?

Trenutno ne postoji jedinstven odgovor na ova pitanja; sa jedne strane neki proračuni nalaze niz početnih modela koji su dovoljno masivni da kvazistatički prođu kroz faze nuklearnog sagorevanja do gvozdеног jezgra, ali ne toliko masivni da im evolucija bude prekinuta nestabilnostima poput formiranja elektronsko-pozitronskih parova. Masivna jezgra eventualno kolapsiraju u crne rupe. Koristeći funkciju brzine "rađanja" novih zvezda u okolini Sunca zaključuje se, doduše dosta nesigurno, da oko 0,1% mase naše Galaksije može biti u obliku crnih rupa. Sa druge strane, neki drugi skorašnji modeli su pokazali da su zvezde do 32, pa čak i do 64 M_{\odot} u stanju da odbace njihov slabo vezan omotač u nekom trenutku, ostavljajući jezgro od $\sim 1,4-2,2 M_{\odot}$, koje će najverovatnije postati degenerisani patuljak ili neutronska zvezda. Masivnije zvezde ne ostavljaju nikakve ostatke.

Zbog toga je nepoznato koliko je optimistično smatrati da se crne rupe formiraju prilikom normalne zvezdane evolucije izolovanih nerotirajućih zvezda. Ipak, čak i sa najpesimističnijim stavom, verovatno je da će neke crne rupe nastati iz binarnog sistema, gde beli patuljak ili neutronska zvezda

može u nekoj kasnijoj fazi akretirati materiju sa pratioca. Takođe, zvezdana rotacija može pomoći u formiranju crnih rupa od izolovanih zvezda.

Supermasivne zvezde i galaktička jezgra

U opsegu masa od $\sim 50 M_{\odot} < M < \sim 10^5 M_{\odot}$ formiranje crnih rupa preko uobičajene zvezdane evolucije je verovatno inhibirano. Za metalom bogate zvezde I populacije, kondenzovanje protozvezda $\geq 50 M_{\odot}$ razvija H II regione; njihova temperatura i pritisak se povećavaju i efektivno zaustavljaju dalje urušavanje. Za metal deficitarnu populaciju II, protozvezde u gornjem opsegu masa mogu da se kondenzuju i upale svoj vodonik (iako postoje nesigurnosti vezane za to). Problem je da se oslobađanje nuklearne energije startuje prebrzo i teži da "odbije" sistem u beskonačnost ili (što ne važi u slučaju rotacije) ga okarakteriše sa takvim načinom nelinearne pulsacije koja može dovesti do eventualnog poremećaja. Pri masi od $\sim 4 \cdot 10^5 M_{\odot}$ za supermasivne protozvezde postaje moguće da kolapsiraju usled gravitacije uprkos energiji koju oslobađaju, ali to je taman oko mase gde je kondenzacija interstelarnog medijuma inhibirana za zvezde populacije II, kao što je to bio slučaj sa zvezdama populacije I pri manjim masama, stoga, efektivna stopa nastajanja može biti zanemarljivo mala.

Druga mogućnost je da su supermasivni objekti nastali u galaktičkim jezgrima evolucijom gustih zvezdanih jata, pre nego kondenzacijom iz gasnog oblaka. Osnovna vremenska skala u evoluciji takvih objekata je vreme relaksacije, definisano na sledeći način:

$$t_{relax} \approx 8 \times 10^5 \frac{N^{1/2}}{\ln N} \left(\frac{R}{1 pc} \right)^{3/2} \left(\frac{m_{star}}{M_{\odot}} \right)^{-1/2} \text{ yr} \quad 5)$$

gde je N broj zvezda, m_{star} je njihova tipična masa, i R je radijus zvezdanog jata. Za vreme reda 20 t_{relax} jata teže da razviju singularitete gustine u svom centru; u nekom trenutku pre tog vremena, zvezdani sudari postaju važna evolutivna komponenta i - verovatno - da dovedu do formiranja supermasivnih objekata: model razvijen od strane Sandersa predviđa da će jato mase $10^7 M_{\odot}$ i radijusa 0,1 pc evoluirati u supermasivni objekat za 10^7 - 10^8 godina. Potom, pretpostavlja se, sledi kolaps u crnu rupu.

Još radikalniji je predlog dveju grupa (Gold, Aksford & Rej - 1965. i Linden-Bel & Vud - 1968.) po kom postoje tzv. kolektivni efekti u evoluciji

jata koji se odvijaju za kraće vreme od vremena relaksacije i direktno vode do relativistički gustih jata koja potom doživljavaju gravitacioni kolaps.

Drugi spekulativan scenario za postojanje crnih rupa u centrima galaksija je da se prepostavi da su one primordijalna ($\sim 10^7 M_{\odot}$) "semena" oko kojih se galaksije zapravo i formiraju.

Nijedan od navedenih mehanizama nije izrazito zastupljeniji od drugih. Glavni teorijski razlozi za proučavanje supermasivnih crnih rupa su ti da se ta znanja mogu primeniti za modeliranje kvazara i energetskih procesa u galaktičkim jezgrima.

Rotirajuće zvezde

Kako zvezda mase M kolapsira, podržavajući efekat ugaonog momenta J postaje sve izraženiji, sve dok pri karakterističnom radijusu

$$R \sim \frac{J^2}{GM^3} \sim 50 \left(\frac{J}{10^3 J_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{M}{10 M_{\odot}} \right)^{-3} \text{ km} \quad 6)$$

centrifugalna sila ne postane uporediva sa silom gravitacije. [Ovde J_{\odot} predstavlja prividan ugaoni moment Sunca, ne računajući mogućnost brzo-rotirajućeg jezgra (Dike 1964.). Zvezde ranog tipa sa $M \sim 10 M_{\odot}$ tipično imaju $J \sim 10^3 J_{\odot}$.] Gornje granične mase za normalne zvezde, degenerisane patuljke ili neutronske zvezde formalno nisu primenljive u ovim rotacijom-podržanim konfiguracijama, stoga se postavlja pitanje da li masivne rotirajuće konfiguracije mogu u potpunosti izbeći kolaps u crnu rupu. Postoje dobri pokazatelji da ne mogu.

Ako rotirajuća zvezda pređe primenjenu, sfernu graničnu masu za bilo koji značajniji faktor, onda rotaciono održavanje sistema mora dominirati nad održavanjem usled pritiska (ovde se pod održavanjem podrazumeva sila koja se suprotstavlja gravitacionom sažimanju). U tam slučaju zvezda je izrazito spljoštena. Za takve konfiguracije je poznato da ne održavaju stabilnost - dolazi do fragmentacije, pri čemu kao produkt nastaje jato orbitirajućih fragmenata u jednoj ravni, slično palačinki. Nestabilnosti su dinamičke, pre nego sekularne prirode, te je vreme fragmentacije uporedivo sa sistemskim dinamičkim vremenom:

$$\tau_{dyn} \sim \frac{J^3}{G^2 M^5} \sim 4 \times 10^{-4} \left(\frac{J}{10^3 J_{\odot}} \right)^3 \left(\frac{M}{10 M_{\odot}} \right)^{-5} \text{ sec} \quad 7)$$

Mehanizam dalje evolucije zavisi od toga da li je radijus tog diska (jednačina 6)) reda gravitacionog radijusa GM/c^2 . Ako jeste, onda je

$$J \leq GM^2/c \quad \text{ili} \quad \frac{J}{J_{\odot}} \leq 5,2 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2. \quad 8)$$

Ukoliko je jednačina 8) tačna, onda:

- a) ugaoni moment sistema je dovoljno mali (ili približno dovoljno mali) da sistem *može* postati Kerova crna rupa (koja *uvek* mora zadovoljavati jednačinu 8)), i
- b) sistem će gubi ugaoni moment gravitacionim zračenjem i spiralno čemu se smanjivati radijus za vreme uporedivo sa dinamičkim orbitalnim vremenom, tako da će, zapravo, lako kolapsirati u Kerovu crnu rupu, sa istovremenim haotičnim bljeskovima gravitacionog zračenja.

Karakteristično vreme za slučaj pod b) je:

$$\tau_{rad} \sim \tau_{dzn} \left(\frac{Rc^2}{GM} \right)^n \sim \tau_{dzn} \left(\frac{cJ}{GM^2} \right)^{2n} \quad 9)$$

gde eksponent n ima vrednost od 5/2 za standardne nestabilnosti, i veću (uporedivu sa ukupnim brojem fragmenata) za fragmentaciju nižeg ranga (slabiju) bez standardnih nestabilnosti. To je tzv. "kolaps, potera i urušavanje" (u originalu "collapse, pursuit and plunge") scenario koji su formulisali Rufini i Viler u radu iz 1971. godine.

Ako bi, sa druge strane, $J \gg GM^2/c$, onda bi disk bio znatno veći od svog gravitacionog radijusa. Gravitaciono zračenje još uvek deluje, ali bi po jednačini 9) moglo biti veoma usporeno. Radovi Ostriker i Bodenhamera (1973), Ostriker i Piblsa (1973), i drugih, pak, jako ukazuju da će se kolektivne nestabilnosti u disku nastaviti dok se slučajna kinetička energija ne poveća do fraction about unity sistemske rotacione energije. Za objekte zvezdanih masa gde je mehanizam disipacije uglavnom prilično buran, tj. turbulentni sudari materije, ovo unutrašnje povećanje energije će zagrejati materiju do temperature reda:

$$kT \sim m_p c^2 \left(\frac{GM}{Rc^2} \right) \sim m_p c^2 \left(\frac{GM^2}{cJ} \right)^2 \quad [m_p c^2 / k \approx 10^{13} \text{ } ^\circ K] \quad 10)$$

u vremenu uporedivom sa dinamičkim vremenom datim jednačinom 7). Vreo disk se zadebljava do nekakve elipsoidne forme i potom se hladi zračenjem.

Trenutno ne postoje proračuni koji nas mogu voditi dalje od ove slike, mada uzimajući u obzir održanje energije i momenta impulsa (i vodeći računa o tome da, kako se disk hladi on se ponovo stanjuje što dovodi do novih nestabilnosti) nastavak evolucionog puta je verovatno sledeći: vrelo centralno jezgro gubi energiju i prenosi svoj ugaoni momenat (preko turbulencija uzrokovanih nestabilnostima) ka spoljašnjim slojevima; centar se kondenzuje, eventualno postajući veličine reda svog gravitacionog radijusa i kolapsira u Kerovu crnu rupu, verovatno jednu sa skoro maksimalnim ugaonim momentom. Spoljašnja materija, koja sadrži samo mali delić ukupne mase, ali koja mora da preuzme veći deo početnog ugaonog momenta, može da se ohladi u tanak disk, sada gravitaciono stabilisan sa masom centralne crne rupe. Viskozni procesi će postepeno usloviti prenos ugaonog momenta (zajedno sa malom količinom materije) ka spolja, no većina materije će eventualno akrecijom upasti u crnu rupu.

Sumirajući, zaključuje se da efekti zvezdane rotacije mogu usporiti formiranje crne rupe, ali samo za vreme uporedivo sa vremenom potrebnim za opadanje orbite usled gravitacionog zračenja (jednačina 9)), ili je uporedivo sa vremenom za koje se preko zračenja ohladi vrelo, naduvan disk; uzima se ono vreme koje je kraće. Osim toga, pod nekim specifičnim uslovima zračenje može biti posrednik u formiranju crne rupe. U situacijama gde je sferni kolaps zvezdnog jezgra male mase u neutronska zvezdu dovoljno silovit da oduva masivniji omotač, efekat rotacije može za posledicu imati postepeno smirivanje jezgra, sa omotačem koji se potom takođe postepeno smiruje i sa jezgrom formira **stojeći udarni talas**. Na ovaj način jedan dodatni udeo zvezda masa između, recimo $8-60 M_{\odot}$, može razviti masivna jezgra i dovesti do formiranja crnih rupa prirodnim evolutivnim tokom.

Rotirajuće supermasivne zvezde i rotirajuća galaktička jezgra

Ako se formiranje zvezda odigralo pre ili za vreme kolapsa supermasivnog objekta, onda gasno-dinamička disipacija više nije prisutna. Unutrašnje zagrevanje rezultujućeg diska usled kolektivnih nestabilnosti, sada daje slučajno kretanje zvezda, koje se aproksimiraju kao tačkaste mase, samo u ravni diska. Vremenski interval potreban disku da zadeblja (tj.

da temperatura postane izotropna) može sada da bude veći od dinamičkog vremena; relevantno vreme je gravitaciono relaksaciono vreme koje je reda $N/\ln N$ puta duže (jednačina 5), gde je N broj zvezda. Posle zadebljavanja, formiranje jezgra i haloa, te gubitak energije jezgra, ne može da se desi usled zračenja, već mora da se odigra preko isparavanja zvezda ili **kolektivnih efekata**. Nije sa sigurnošću poznato koliko su ovi procesi brzi.

Opis sfernog kolapsa

Posle skiciranja nekih procesa koji dovode do kolapsa, treba videti šta se dešava kada se kolapsirajuće telo primiče gravitacionom radijusu. Van bilo kog sferno simetričnog tela, čak i onih vrlo dinamičnih, prostor-vreme nije samo sferno simetrično već i *statično*; nema sfernih gravitacionih talasa u opštoj relativnosti. Kada površina tela prođe kroz konačni horizont na $r=2R_*=2GM/c^2$ (ovde je r radijalna koordinata koja daje $2\pi r$ za sopstveni obim tela), tada to telo ne može više uzročno da utiče na naš univerzum i stoga ga više ne razmatramo u tom smislu. Ovaj prelaz se događa nakon perfektно konačnog vremena, mereno časovnikom na površini tela, i ugrubo ono je jednako njutnovskom vremenu slobodnog pada do gravitacionog radijusa. Svetlosni zraci sve teže i teže uspevaju da pobegnu u beskonačnost, i mereno časovnikom udaljenog posmatrača treba im sve više i više vremena za to. Udaljeni posmatrač nikada ne vidi da površina tela prelazi preko konačnog horizonta. On vidi da časovnik upadajuće čestice biva "zamrznut" u trenutku prelaska konačnog horizonta. Takođe vidi da se svi procesi na upadajućoj površini usporavaju. Posebno, izlazeće zračenje biva sve više i više pomereno ka crvenom delu spektra. U kasnijim vremenskim trenucima asimptotski crveni pomak je dat sledećom formulom:

$$v_{observed}/v_{emitted} \approx \exp(-c^3 t/4GM) \sim \exp\left(\frac{-t}{2 \times 10^{-5} \text{ sec}} \frac{M_{\odot}}{M}\right) \quad 11)$$

Opadanje ukupne luminoznosti zvezde je sporije:

$$L \sim \exp\left(-c^3 t/3^{3/2} GM\right) \quad 12)$$

jer je većina te luminoznosti uskladištena u spiralnim orbitama fotona i treba im dosta vremena da izađu iz domašaja crne rupe. Usled činjenice da je konačan broj fotona emitovan sa površine zvezde pre nego što je ona prešla

horizont, u nekom trenutku će doći i vreme kada je i poslednji od ovih fotona pobegao, tada rupa postaje potpuno crna.

Nesferni kolaps

Bez uvođenja pretpostavke o sfernom kolapsu, vrlo je teško postaviti čak i proste modele gravitacionog kolapsa do crne rupe, jer dolazi do značajnih komplikacija u računu, a i sam način kolapsa se ne slaže sa realnom slikom. Uzrok tome su sledeća dva razloga:

1. kolaps rotirajućeg tela je suštinski nesferan,
2. čak i u slučaju nerotirajućeg tela, veoma nesferan kolaps je verovatno opšti slučaj, jer odstupanja od sfernog kolapsa rastu sa recipročnom vrednosti rastojanja (kao $1/r$) prilikom dinamičkog kolapsa, koji možeda se javi pri $\leq 10^3$ gravitacionih radijusa.

No ipak, ključni elementi sfernog kolapsa, tj. formiranje konačnog horizonta, asimptotsko nestajanje zvezde do beskonačnih crvenih pomaka, i ubrzan kolaps do "crnog" stacionarnog stanja, se dešavaju i prilikom nesfernog kolapsa. Glavni dodatni element je raspad distorzija geometrije konačnog horizonta i spoljašnjeg prostor-vremena; koji se odigrava posredstvom gravitacionog zračenja.

Osnova svih ovih tvrdnji je teorema da "crne rupe nemaju dlake", tj. konfiguracije konačnih stanja gravitacionog kolapsa su značajno ograničene. Jedino moguće stacionarno stanje u vakuumu je Kerova crna rupa, čija je struktura u potpunosti određena njenom masom M i ugaonim momentom J . Sve ne-Kerove asferičnosti višeg reda multipolarnosti u gravitacionom polju koje su mogle nastati tokom kolapsa, kao i svi elektromagnetni momenti [izuzev ukupnog naelektrisanja koje je teško za poverovati u astrofizičkom kontekstu] moraju, laički rečeno, da se odvoje i oduvaju u beskonačnost u obliku zračenja.

Znajući da je konačno stanje stacionarna crna rupa, može se detaljnije opisati dinamička faza kolapsa koja dovodi do njega. Prvi lokalni znak da dolazi do formiranja crne rupe je pojava *zarobljene površine* unutar kolapsirajuće materije; ona predstavlja zatvorenu površinu prostora takvu da izlazeći nulti zraci normalni na nju *konvergiraju*, fokusirani od strane jakog gravitacionog polja, umesto da divergiraju ka beskonačnosti, što je obično slučaj. (Nulti zrak ili nulti geodezik je putanja fotona ili neutrina kroz prostor-vreme.) Ovakvi konvergentni nulti zraci nikada neće stići u beskonačnost; zarobljena površina je stoga *unutar* konačnog horizonta ili

granice uzročnosti, površine crne rupe. Kada nastaje zarobljena površina crna rupa je već formirana, iako ne postoji tačno merljiv način za određivanje položaja njenog horizonta dok traje dinamički kolaps (nešto slično kao princip neodređenosti u kvantnoj). Jedini siguran način je praćenje mnogo nultih zraka i određivanje koji od njih će eventualno stići do beskonačnosti. Konačni horizont je, u svakom vremenskom trenutku, dvodimenzionalna površina iscrtana "generišućim" nultim zracima koji samo marginalno nisu u stanju da pobegnu u beskonačnost, i takođe samo marginalno su u stanju da izbegnu konvergenciju i kolaps. U stacionarnoj situaciji (dugo posle kolapsa) površina sopstvene površi A konačnog horizonta je očigledno konstantna.

Ekstrakcija energije iz crnih rupa

Pametan pilot rakete može povećati efikasnost svoje rakete obilazeći zvezdu po vrlo bliskoj orbiti, trošeći M_{fuel} masu goriva u blizini periastrona. Ovakva strategija ostavlja izduvne gasove duboko u potencijalnoj jami zvezde, i preko održanja energije daje veću konačnu kinetičku energiju raketi. Ukoliko je zvezda crna rupa, i ukoliko je brzina isticanja gasova relativistička, taj višak energije je reda $M_{\text{fuel}}c^2$. Penrouz je 1969. godine prvi primetio da ukoliko rupa *rotira*, višak energije može da *pređe* granicu $M_{\text{fuel}}c^2$. to se dešava kada raketa proleti kroz "ergosferu" (tj. između statičkog limita i horizonta) i izbaci gasove u orbitu negativne ukupne energije, one za koju vezivna energija prevazilazi masu mirovanja. Gasovi upadaju u rupu i smanjuju joj ugaoni momenat, tako da se višak energije oslobađa preko rotacione energije rupe. Viler je 1970. godine predložio da plimski poremećaji zvezde u ergosferi masivne rupe u galaktičkom jezgru mogu da ostave nešto izbačenog materijala u orbitama negativne ukupne energije, dozvoljavajući ostatku da pobegne u beskonačnost sa energijom većom od $M_{\text{star}}c^2$.

Rotirajuća crna rupa takođe povećava energiju određenih elektromagnetnih i gravitacionih talasnih modaliteta posle rasejanja. Za talas sa t i φ zavisnošću, $\exp(-i\omega t + im\varphi)$, uslov za ovo "superradijaciono" rasejanje je $0 < \omega/m < \Omega_{\text{BH}}$, gde je Ω_{BH} ugaona brzina krute rotacije crne rupe, data jednačinom:

$$\Omega = \frac{J}{2M} \frac{1}{R_*^2 + R_* (R_*^2 - a^2)^{1/2}} \quad 13)$$

Značajna pojačavanja se javljaju samo pri talasnim dužinama uporedivim sa veličinom rupe. Po proračunima Teukolskog, kaorišćenjem

separativne talasne jednačine, maksimalno povećanje energije iznosi 138% za gravitacione talase i oko 4.4% za elektromagnetne talase. *Beskonačna povećavanja* bi bila ekvivalentna spontanom nestabilnostima rotirajućih rupa, ali numerička analiza ne ukazuje na postojanje takvih nestabilnosti.

Astrofizička relevantnost superradijativnog rasejanja zavisi od mogućih mehanizama povratne veze da učestalo pojačavaju elektromagnetni talas. Ogledalo oko rotirajuće crne rupe bi, u principu, eksplodiralo zbog slaganja reflektovanih i pojačanih radio talasa, ali prirodno formiranje takve reflektujuće šupljine dovoljno jake da dozvoli ekstrakciju značajne količine energije se čini nemogućim. Mogući slični efekti drugih vrsta bliskih provodnika (npr. plazmenih akrecionih diskova) treba da se prouče.

Čestica koja orbitira rotirajuću crnu rupu i zrači gravitacione talase može superradijativno dobiti onoliko energije od rupe koliko izgubi u beskonačnost; to bi bila neopadajuća "plutajuća orbita", koja bi se ponašala kao katalizator prilikom ekstrakcije rotacione energije iz rupe. Još uvek nije poznato da li je ovaj efekat zaista moguć.

ZAKLJUČAK:

Po nazivu rada neko bi mogao zaključiti da je u pitanju nekakav teorijski predlog ekstrakcije energije iz crne rupe kao ultimativnog reaktora. Međutim, to nije slučaj, jer ovaj rad predstavlja samo pregled načina nastanka crnih rupa i razmatra jedan od mogućih načina gubljenja njihove energije, ne računajući dobro poznati Hokingov efekat.

Za sada nam nije poznato da će čovečanstvo ikada (ukoliko uspe da preživi neki duži vremenski period) uspeli da koristi ovu energiju na bilo koji drugi način sem tzv. "gravitacione praćke", tj. pomoći pri ubrzavanju svemirskih letelica. Pošto još uvek nismo ostvarili kontakt sa nekakvim tehnološki mnogo superiornijim vanzemalcima, takođe je mala verovatnoća da u Univerzumu postoji neko ili nešto drugo što uspešno "žanje" tu energiju.

Znači, crne rupe nažalost bljujete ogromne količine energije nizašta. Ipak im treba odati priznanje za trud...

:)