

PROBLEMI GRAVITACIJE I PERSPEKTIVE UJEDINJENJA

M. Blagojević

Laboratorija za teorijsku fiziku, IBK, Vinča, Beograd

Jedan od osnovnih principa klasične mehanike je Galilei-ev princip relativnosti: zakoni mehanike su istog oblika u svim inercijalnim sistemima. Pokušavajući da odgonetne ulogu neinercijalnih referentnih sistema u fizici i da generališe princip relativnosti, Einstein je uspeo da poveže gravitacione pojave sa geometrijom prostor-vremena (preko principa ekvivalentnosti), što predstavlja jedno od velikih dostignuća teorijske fizike. Einstein-ova opšta teorija relativnosti (OTR) i danas uspešno objašnjava sve postojeće eksperimentalne činjenice. Zašto se, onda, traže alternativni pristupi teoriji gravitacije? Iz niza motiva, ja bih izdvojio sledeća tri kao osnovna:

1^o U prirodi danas postoje, pored gravitacije, još tri tipa osnovnih interakcija: elektromagnetne, slabe i jake. Elektromagnetne i slabe interakcije su ujedinjene u okviru gradijentno invarijantnih teorija (Weinberg-Salam-ov model). Ovakve teorije su danas najozbiljniji kandidat i za opis jakih interakcija (kvantna hromodinamika). No, pažljiva analiza OTR pokazuje da i ona kao svoj suštinski princip sadrži princip gradijentne invarijantnosti. Uzimajući sada gradijentnu invarijantnost kao polazni princip jedinstvene teorije svih interakcija, može se doći do teorija gravitacije koje su različite od OTR.

2^o Pokušaji kvantizacije OTR dovode do problema nerenormalizabilnosti - pojave beskonačnih veličina koje ne mogu biti absorbirane u već postojećim konstantama teorije. Ovo je drugi motiv za traženje novih teorija gravitacije. Postoje i mišljenja da gravitaciju ne treba kvantizirati, ali je njih teško braniti s obzirom na činjenicu da su sve druge interakcije kvantne prirode.

3° Na kraju, u OTR se pojavljuje problem singulariteta prostor-vremena, što predstavlja izraz unutrašnje ograničenosti klasične teorije u odredjenim fizičkim situacijama. Postoji nada da se rešenje ovog problema nalazi ili u izmenjenoj klasičnoj teoriji, ili u kvantizaciji gravitacije.

U ovom izlaganju biće sumirane one osnovne karakteristike OTR koje su značajne sa gledišta ujedinjenja svih interakcije, neki pravci formulisanja novih teorija gravitacije, problemi kvantizacije i singulariteta.

I. KLASIČNA TEORIJA GRAVITACIJE

Analizirajući radove Einstein-a nakon nastanka specijalne teorije relativnosti (STR), može se uočiti da je OTR nastala iz pokušaja da se razume i prevaziđe izdvojena uloga inercijalnih referentnih sistema pri formulisanju fizičkih zakona kako u klasičnoj mehanici tako i u STR. Odlučujući korak ka rešenju problema načinjen je nakon shvatanja značaja tzv. principa ekvivalenosti. Na osnovu ovog principa može se shvatiti u kom smislu je OTR gradijento invarijantna teorija, čime se približavamo razumevanju jedinstva gravitacione i ostalih osnovnih interakcija.

Inercijalni referentni sistemi

U osnovnim zakonima klasične mehanike figurišu pojmovi sile i ubrzanja (Newton-ovi zakoni):

1° Zakon inercije: telo na koje ne deluje nikakva sila kreće se bez ubrzanja;

2° Zakon delovanja sile: ubrzanje tela srazmerno je sili koja deluje na njega:

3° Zakon akcije i reakcije.

Da bi ovi ^{bili} zakoni fizički potpuno definisani, moraju se dati izvesna dopunska objašnjenja o pojmovima sile i ubrzanja.

Za silu, koja potiče od interakcije sa drugim telima, se smatra da je unapred poznata iz nekih drugih razmatranja. Tek tada drugi Newton-ov zakon može da odredi ubrzanje tela pod dejstvom poznate sile. Tako se napr. iz poznatog oblika gravitacione sile (koju je objasnio Newton na osnovu izučavanja zakona kretanja nebeskih tela) može naći veličina gravitacionog ubrzanja nekog tela.

Prva dva zakona ne važe uvek u svom najprostijem obliku, koji je gore naveden. Ako se, na primer, neki posmatrač nalazi na disku koji rotira u odnosu na neku zemaljsku laboratoriju, on će osetiti "silu" koja ga gura ka periferiji diska, a koja nije uzrokovana interakcijom sa drugim telima. Ubrzanje se, dakle, pojavilo bez delovanja sile. Zato se mora dodati da prva dva zakona važe u svom najprostijem obliku samo u nekim referentnim sistemima, koje nazivamo inercijalnim. Inercijalni referentni sistem se može definisati kao onaj referentni sistem u kome se telo, na koje ne deluje nikakva sila (tj. koje smo dovoljno udaljili od svih drugih tela), kreće bez ubrzanja. Rotirajući disk nije inercijalni sistem, pa se na njemu javljaju odstupanja oblika Newton-ovih zakona od svog najprostijeg oblika. Ova odstupanja se ogledaju u pojavljivanju dopunskih sila, koje nisu uzrokovane interakcijom sa drugim telima, i koje se nazivaju inercijalnim silama. Tako vidimo da se oblik zakona mehanike menja u zavisnosti od izbora referentnog sistema.

Pojmovi sile i ubrzanja u Newton-ovim zakonima su, dakle, definisani u odnosu na neki inercijalni sistem. Ubrzanje, kao i sila, ima istu vrednost u dva referentna sistema koji se jedan u odnosu na drugi kreću konstantnom brzinom. Iz toga sledi da postoji čitava klasa inercijalnih referentnih sistema, čije je relativno kretanje bez ubrzanja.

Čime su inercijalni referentni sistemi zaslužili svoj privilegovan položaj pri formulaciji zakona klasične mehanike? Zašto su oni izdvojeni od svih neinercijalnih referentnih sistema? Da bi na ovakva i slična pitanja odgovorio, Newton je uveo pojam apsolutnog prostora, koji je zadat u priori i nezavisno od rasporeda i kretanja materije u njemu. Inercijalni sistemi se kreću konstantnom brzinom u odnosu na apsolutni prostor, a inercijalne sile se pojavljuju kao posledica ubrzanja u odnosu na ovaj prostor.

Apsolutni prostor nije objasnio posebnu ulogu inercijalnih sistema i pojavu inercijalnih sila - on je samo pomogao da se problem jasnije sagleda. Njegovo uvođenje nije opravdano niti logički nužno sa gledišta same klasične mehanike. Njegove fizičke karakteristike bile su jako čudne: zašto brzinu u odnosu na apsolutni prostor nije moguće opaziti, a ubrzanje jeste? Da bi pokazao fizički značaj ubrzanja u odnosu na apsolutni prostor, Newton je izveo poznati eksperiment sa rotirajućom posudom vode. Zaključci koje je on izveo na osnovu ovog eksperimenta u korist postojanja apsolutnog prostora nisu bili opravdani, kao što je kasniji razvoj događaja pokazao.

Prve sumnje u ideje Newton-a izneo je austrijski filozof E. Mach (1880), čije je učenje kasnije jako uticalo na Einstein-a. Mach je pojavu inercijalnih sila pokušao da potraži u ubrzanju tela u odnosu na neku srednju masu Vasiona. Njegova razmatranja nisu bila vezana za određenu realizaciju fizičke teorije. Čitav ovaj splet pitanja i pretpostavki dobio je prirodno objašnjenje u OTR, gde su neinercijalni sistemi, preko principa ekvivalencije, povezani sa efektima gravitacije.

Princip ekvivalencije

Rezultat delovanja svake sile F je ubrzanje tela a , $F = m_i a$. Konstanta proporcionalnosti m_i je tzv. inertna masa tela. Ona predstavlja meru inertnosti tela pri delovanju sile (za datu silu ubrzanje je manje ukoliko je inertna masa veća). S druge strane, poznato je da je u slučaju homogenog gravitacionog polja (male oblasti prostor-vremena) gravitaciona sila F_g oblika $F_g = m_g g$, gde g meri jačinu gravitacionog polja a m_g je tzv. gravitaciona masa tela. Još je Galilei znao da su inertna i gravitaciona masa svakog tela jednake: on je otkrio, na osnovu eksperimenata o kretanju tela po strmoj ravni, da sva tela padaju sa istim ubrzanjem. Iz toga se može zaključiti da je odnos m_i/m_g isti za sva tela, a pogodnim izborom sistema jedinica on se može uzeti da bude jedan, tj. $m_i = m_g$.

Na kojoj tačnosti se može uzeti ovaj iskaz? Kod Galilei-a tačnost nije bila velika, jer njegovi radovi predstavljaju začetke eksperimentalne fizike. Newton je kasnije takodje vršio eksperimente sa klatnima iste dužine, napravljenim od različitih materijala. Radovima Etvös-a (1889) i Dicke-a (1964) jednakost inertne i gravitacione mase utvrđena je sa tačnošću 10^{-8} ; Braginski (1971) je povećao tačnost (smanjio relativnu grešku) na 10^{-12} .

I tako, u gravitacionom polju sva tela imaju isto ubrzanje, nezavisno od njihovih masa. Po toj osobini gravitaciona polja su slična neinercijalnim referentnim sistemima, u kojima takodje sva tela dobijaju isto ubrzanje. To ubrzanje jednako je ubrzanju neinercijalnog referentnog sistema u odnosu na inercijalni. Za ilustraciju, poslužimo se primerom Einstein-ovog lifta: ako posmatrač u liftu uoči da sva tela imaju isto ubrzanje prema dnu lifta, on ne zna da li je to zato što se lift ubrzava prema gore, ili zato što se sa donje strane lifta nalazi neka masa koja gravitaciono ubrzava sva tela prema dole! Efekti gravitacionog polja i neinercijalnog referentnog sistema su ekvivalentni - time je iskazana

suština principa ekvivalencije. Za gravitaciona polja koja nisu homogena ekvivalentnost važi samo lokalno, tj. u malim delovima prostor-vremena u kojima se posmatrano polje sa dovoljnom tačnošću može smatrati homogenim.

Korisno je princip ekvivalencije reformulisati na sledeći način. Izaberimo referentni sistem koji slobodno pada u datom gravitacionom polju. U takvom sistemu se inercijalno ubrzanje tela poništava sa gravitacionim, i kretanje tela postaje isto kao i u inercijalnom referentnom sistemu. Slobodno padajući referentni sistem se zbog toga naziva lokalno-inercijalni referentni sistem. U ovom obliku iskazan, princip ekvivalencije je pogodan za razumevanje gradijentne invarijantnosti OTR, kao što ćemo odmah videti.

Gravitaciona kao gradijentno invarijantna teorija

Gravitacija kao kompenzujuće polje u OTR. Nakon predhodnih razmatranja postaje jasnija uloga neinercijalnih referentnih sistema: njihovo uvođenje ekvivalentno je uvođenju gravitacionih polja u teoriju. Ako gravitaciono polje postoji, onda se uvođenjem lokalno padajućih sistema ono može poništiti u svakom delu prostor-vremena. Skup svih lokalno-inercijalnih sistema potpuno definiše gravitaciono polje. Ako znamo da opišemo postupak kojim se svakoj maloj oblasti prostor-vremena (u graničnom slučaju svakoj beskonačno maloj okolini tačke x) pridružuje lokalno inercijalni sistem, onda smo time potpuno odredili gravitaciono polje. Pošto su svi lokalno padajući sistemi inercijalni, onda se situacija može lako opisati na sledeći način. Neka S označava inercijalni referentni sistem u slučaju kad gravitacionog polja nema. Ako gravitaciono polje postoji, onda u okolini svake tačke x postoji lokalno padajući sistem $S(x)$. Inercijalni sistem $S(x)$ se može dobiti iz inercijalnog sistema S na sledeći način: najpre se translacijom koordinatni početak od S poklopi sa onim od $S(x)$, a zatim se izvrši Lorentz-ova rotacija kojim se ose od S i

$S(x)$ poklope. Transformacije ovog tipa definišu Poincare-ovu grupu transformacija. Četiri parametra translacije i šest parametra Lorentz-ove rotacije čine ukupno deset parametara Poincare-ove grupe. Transformacija $S \rightarrow S(x)$ je, dakle, Poincare-ova transformacija sa parametrima koji zavise od tačke x u kojoj je zadat sistem $S(x)$. Pošto su oba sistema S i $S(x)$ inercijalni, ova transformacija je transformacija simetrije. Zato se kaže da je transformacija $S \rightarrow S(x)$ lokalna Poincare-ova transformacija simetrije. Time je pokazano da kad postoji gravitaciono polje i važi princip ekvivalencije (koji omogućava konstrukciju lokalno inercijalnih sistema $S(x)$), tada Poincare-ova grupa čini lokalnu grupu simetrije, dok gravitacija igra ulogu kompenzujućeg (gradijentnog) polja. U slučaju kad gravitacionog polja nema, grupa simetrije nije lokalna već globalna Poincare-ova grupa (čiji parametri ne zavise od x).

Gradijentno-invarijantne teorije gravitacije. Umesto da na osnovu principa ekvivalencije dokazujemo lokalnu Poincare-ovu invarijantnost, mi možemo čitav postupak i obrnuti, po ugledu na danas standardnu konstrukciju gradijentno-invarijantnih teorija u fizici elementarnih čestica. U slučaju kad nema gravitacionog polja, poznato je sa velikom pouzdanošću da Poincare-ova grupa pretstavlja grupu globalne simetrije fizičkih procesa. Ako zahtevamo da ova grupa bude i lokalne grupe simetrije, to se može postići uvođenjem u teoriju novih, kompenzujućih polja, koja ustvari pretstavljaju gravitaciju. Kompenzujuća polja služe da na pogodan način ponište neželjene efekte upotrebe lokalnih transformacija (koje ustvari označavaju prelazak na ubrzane sisteme), tako da teorija ostaje i dalje simetrična u odnosu na ove (lokalne) transformacije.

U slučaju lokalizacije Poincare-ove grupe dobija se tzv. U_4 -teorija gravitacije, koja uključuje OTR kao jedan specijalan slučaj. U njoj postoje dve vrste kompenzujućih polja: 4 četvoro-

vektora h_k^μ , koji kompenzuju lokalizaciju translacije, i 6 četvorovektora $A^{ij}_\mu = -A^{ji}_\mu$, koji kompenzuju lokalizaciju Lorentz-ovih rotacija. Ukupan broj četvorovektora je 10, što odgovara broju nezavisnih parametara Poincare-ove grupe. Broj stepeni slobode u ovoj teoriji je 40 (10 četvorovektora sa po 4 komponente), ali oni nisu svi dinamički, t.j. u teoriji postoje nefizički stepeni slobode. Da bismo ovo razumeli, opisaćemo detaljnije dinamičku strukturu ove teorije. Kao što se u elektrodinamici od gradijentnog potencijala A_μ pravi gradijentno-invarijantno fizičko polje $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$, tako se u U_4 -teoriji od gradijentnih potencijala h_k^μ i A^{ij}_μ prave dve vrste invarijantnih fizičkih polja: torzija $T^i_{\mu\nu}$ i krivina $R^{ij}_{\mu\nu}$. Nazivi torzija i krivina nastali su na osnovu geometrijske interpretacije U_4 -teorije. Dinamičke jednačine teorije polja se obično zadaju tako što se zada Lagranžijan, iz koga se one dobijaju variranjem po svim stepenima slobode. U elektrodinamici je Lagranžijan kvadratičan po polju $F_{\mu\nu}$, što osigurava gradijentnu invarijantnost teorije. Pošto je Lagranžijan kvadratičan po izvodima od A_μ , rezultujuće Maxwell-ove jednačine sadrže samo linearne izvode od A_μ . Slična je situacija u svim gradijentno invarijantnim teorijama sa unutrašnjim grupama simetrije (kao što su izospinska grupa $SU(2)$, ili $SU(3)$ itd.), koje ne uključuju prostorno-vremensku simetriju. Poincare gradijentna teorija gravitacije (U_4 -teorija) ima Lagranžijan koji takodje sadrži kvadratične članove po torziji i krivini, ali sadrži i član linearan po krivini, što je specifično obeležje prostorno-vremenskih gradijentnih teorija. Korišćenjem odgovarajućih jednačina polja, u aproksimaciji slabog polja, može se izuđiti čestični sadržaj ove teorije. U opštem slučaju se dobija da pored bezmasenog gravitona postoje još šest čestica, koje se nazivaju tordioni. Odredjeni uslovi konzistentnosti ove teorije daju da maksimalan broj tordiona koji mogu istovremeno da postoje kao nezavisni dinamički stepeni slobode iznosi tri.

Ako su kvadratični članovi odsutni iz Lagranžijana dobija se Einstein-Cartan-ova (EC) teorija gravitacije. U slučaju skalarne materije, za koju je torzija jednaka nuli, EC teorija prelazi u OTR, a U_4 -prostor (sa torzijom i krivinom) prelazi u Riemann-ov (za koji je torzija nula). Napomenimo da se OTR može alternativno opisati i u prostoru T_4 , za koji je krivina jednaka nuli a torzija različita od nule.

U_4 - teorija, kao i OTR, dobro opisuje sve klasične eksperimentalne provere teorije gravitacije. Pored energije-impulsa ona uključuje i spin kao izvor gravitacije, što je opravdanje sa gledišta teorije čestica. Njen poseban značaj leži u mogućem razrešenju problema signularnosti i/ili kvantizacije, što će biti diskutovano kasnije.

Pored U_4 - teorije, postoje i drugi pokušaji izgradnje gradijentno invarijantnih teorija gravitacije. Pošto je Poincare-ova simetrija veoma pouzdano utvrđena dosadašnjim razvojem fizike, to izgleda prirodno zahtevati da Poincare-ova grupa ne bude zaozbidjena prilikom ovakvih konstrukcija. Postoje pokušaji zasnovani na konformnoj grupi, opštoj afinnoj grupi (Poincare-ova grupa je podgrupa ovih grupa), de Sitter-ovoj grupi (koja u određenoj aproksimaciji daje Poincare-ovu grupu), itd. O ovim pokušajima nećemo diskutovati.

OTR kao nelinearna teorija polja

U elektrodinamici se jednačine polja mogu dovesti na oblik

$$\square A^\mu = e j_\mu \quad (1)$$

(ako se koristi Lorentz-ov gradijentni uslov $\partial^\mu A_\mu = 0$). Na desnoj strani se nalazi struja materije kao izvor elektromagnetnog polja. Ako materije nema, desna strana postaje jednake nuli. Elektromagnetno polje ne može biti izvor samog sebe, jer je foton neutralan.

U gravitaciji je situacija drugačija. Pošto je izvor gravitacije energija-impuls, a gravitoni i sami poseduju energiju-impuls, to oni mogu biti svoj sopstveni izvor. Drugim rečima, odgovarajuća struja je različita od nule čak kad materije i nema. Ova osobina je ekvivalentna osobini nelinearnosti teorije. Polazeći od zahteva da se u ravnom prostor-vremenu konstruiše unutrašnje konzistentna nelinearna teorija za polja spina 2 (zašto graviton ima spin 2 biće diskutovano u delu o kvantnoj teoriji gravitacije) može se dobiti OTR.

Pošto se i gradijentno invarijantne teorije sa unutrašnjom grupom simetrije (izospinska grupa SU(2), SU(2)xU(1) Weinberg-a i Salam-a, itd.) odlikuju nelinearnošću jednačina, konstrukcija odgovarajućih jednačina se može koristiti za ilustraciju situacije u gravitaciji, koja je tehnički mnogo komplikovanija.

Neka je $A_\mu^a(x)$ ($a=1,2,3$) četvorovektor izospina I=1, $F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a$ odgovarajuće fizičko polje a Lagranžijan teorije oblika

$$\mathcal{L}_0 = - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} - \frac{1}{2} m^2 A_\mu^a A^{\mu a} . \quad (2)$$

Jednačina kretanja je oblika

$$(\square - m^2) A_\mu^a = 0. \quad (3)$$

Ovo je jednačina slobodnog polja. Iz Lagranžijana \mathcal{L}_0 se na uobičajen način može konstruisati očuvana struja j_μ^a koja odgovara izospiskoj simetriji teorije (Noether-ina teorema). Sada postavljamo sledeće pitanje: može li se uvesti (nelinearna) interakcija potencijala $A_\mu^a(x)$ tako da izvor bude izospinska struja j_μ^a ? Drugim rečima, hteli bismo da imamo jednačinu kretanja oblika

$$(\square - m^2) A_\mu^a = g j_\mu^a , \quad (4)$$

gde je g konstanta samointerakcije potencijala A_μ^a . Da bi jednačina bila ovog oblika Lagranžijan \mathcal{L}_0 treba da se izmeni. Rešenje ćemo tražiti iteracijom po konstantni g . Počnimo sa

$$\mathcal{L}^{(1)} = \mathcal{L}_0 + g \mathcal{L}_1 . \quad (5)$$

Pogodnim izborom \mathcal{L}_1 može se dobiti jednačina oblika (4). No, u toj jednačini j_μ^a nije očuvana struja koja odgovara Lagranžijanu $\mathcal{L}^{(1)}$, tj. više ne važi $\partial^\mu j_\mu^a = 0$. Odgovarajuću očuvanu struju označimo sa $j_u^{a(1)}$. Jednačina koju na ovom koraku želimo da imamo je oblika

$$(\square - m^2) A_\mu^a = g j_\mu^{a(1)} . \quad (4')$$

Opet moramo da menjamo Lagranžijan:

$$\mathcal{L}^{(2)} = \mathcal{L}_0 + g \mathcal{L}_1 + g^2 \mathcal{L}_2 . \quad (6)$$

Nakon ovog drugog koraka teorija postaje konzistentna. Jednačine kretanja postaju oblika (4) gde je na desnoj strani očuvana izospinska struja koja odgovara Lagranžijanu (6).

U gravitaciji je situacija slična, ali se procedura usaglašavanja ne može uraditi u konačnom broju koraka. Ne postoji opšte i jednoznačno rešenje postavljenog zadatka. No, postoji jedno "prsto" rešenje (koje razni autori opravdavaju na različite načine) koje nas vodi na Einstein-ov Lagranžijan i OTR. Geometrijska interpretacija dobijene teorije nije nužna, ali se sama nemeće.

II. KVANTNA TEORIJA GRAVITACIJE

Razlozi za kvantizaciju gravitacije

Pre nego što predjemo na izlaganje različitih pristupa problemu kvantizacije gravitacije, iznećemo nekoliko argumenta u prilog ujedinjenja kvantne teorije i gravitacije.

1° U OTR se pojavljuju, pod veoma opštim uslovima, prostorno-vremenski singulariteti. Oni su povezani bilo sa ponašanjem lokalizovanih sistema pri gravitacionom kolapsu, bilo sa ponašanjem kosmoloških modela. Pored mogućnosti da se ovi singulariteti izbegnu modifikacijom klasične teorije, postoji nada da i kvantni efekti mogu bitno da izmene ponašanje teorije u uslovima velike gustine materije.

2° U standardnoj kvantnoj teoriji polja postoje tzv. ultraljubičasti singulariteti, koji su vezani za ponašanje teorije pri velikim impulsima. Moguće je da gravitacija može ove divergencije da ublaži ili čak i potpuno ukloni. U jednoj alternativni, ovaj bi efekat bio neperturbativan, i zasnivao bi se na modifikaciji strukture svetlosnog konusa zbog kvantnih fluktuacija gravitacije (struktura svetlosnog konusa ima važne posledice na oblik konutacionih relacija u kvantnoj teoriji polja). S druge strane, postoji nada da će u supergravitaciji beskonačnosti teorije da nestanu u svakom redu teorije perturbacije. Oba metoda, na različite načine, vode do konačne teorije.

3° Danas postoje pokušaji da se u okviru tzv. teorija velikog ujedinjenja (grand unified theories) ujedine elektromagnetne, slabe i jake interakcije. Energije na kojima ovo ujedinjenje počinje su reda veličine 10^{15} GeV, tj. na toj energiji efektivne konstante ovih interakcija postaju praktično jednake (efektivna konstanta interakcije se menja u zavisnosti od energije interakcije). Veoma je privlačna ideja da se veliko ujedinjenje još "malo" poveća, uključivanjem i gravitacione interakcije. Očekuje se da bi efekti kvantne gravitacije postali značajni na rastojanjima reda veličine Planck-ove dužine, $(Gh/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33}$ cm, čemu odgovara energija od 10^{19} GeV. Interesantno je pomenuti da uključivanje gravitacije može da ima efekat na strukturu preostalih interakcija, što bi predstavljalo veoma važan indirektan efekat kvantne gravitacije.

4° Na osnovu velikog ujedinjenja postoje pokušaji razumevanja rane faze razvoja Vasiona. Često se fenomenološki mogući kvantni efekti gravitacije koriste za objašnjenje pojava kao što su izotropizacija i homogenizacija Vasiona, asimetrija broja bariona u odnosu na broj antibariona, prisustvo zračenja 3°K , itd. Ovakvo stanje ukazuje na potrebu za razvojem korektne kvantne teorije gravitacije.

5° Pomenimo mišljenja po kojima se može desiti da je pri konstrukciji kvantne gravitacije potrebno radikalno izmeniti naša dosadašnja shvatanja prostor-vremena (možda je npr. prostor-vreme po strukturi slično rešetki čvrstog tela). Ako bi bilo tako, nerenormalizabilnost kvantne gravitacije bi odigrala ulogu koju je problem zračenja crnog tela imao u razvoju kvantne fizike.

Kvantni efekti gravitacije

Korisno je već na samom početku razmišljati koje kvantne efekte gravitacije očekujemo, pre no što smo i uspeli da uspešno konstruišemo kompletnu kvantnu teoriju.

Razmotrimo najpre klasičnu gravitaciju kao perturbaciju na osnovno stanje atoma vodonika. Gravitaciona interakcija elektrona i protona izaziva malu promenu energije veze atoma vodonika. Energija veze iznosi $E \approx 13 \text{ eV}$, čemu odgovara učestanost $f_0 = E/h \approx 10^{16} \text{ Hz}$. Energija gravitacione interakcije ($Gm_e m_p / r$) je daleko manja, $\epsilon \approx 10^{-36} \text{ eV}$, čemu odgovara učestanost $f \approx 10^{-23} \text{ Hz}$. Da bismo opazili ma kakve efekte na talasnoj funkciji sistema, treba čekati toliko dugo dok se neperturbirana i perturbirana talasna funkcija ne budu razlikovale u fazi za neku merljivu veličinu. No ϵ je tako malo da će fazna razlika biti oko 40 uglovnih sekundi za vreme sto puta veće od starosti Vasiona T ($T = \text{inverzna Hubble-ova konstanta} \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ sec}$). Takav efekat se, naravno, ne može opaziti.

No, ako posmatramo uticaj Zemljinog gravitacionog polja na

fazu talasne funkcije neutrona, efekat je mnogo veći: energija interakcije je reda veličine 1 eV. Nedavno je takav efekat i izmeren posmatranjem faze talasne funkcije neutrona pri interferenciji, uz uračunavanje Zemljinog gravitacionog polja.

Posmatrajmo, dalje, mogućnost nastanka vezanog stanja pod delovanjem gravitacione sile. Ako se, naprimer, izračuna veličina Bohr-ovog radijusa za dva neutrona vezana gravitaciono, dobija se vrednost $a \approx 10^7$ svetlosnih godina (odgovarajuća energija veze je $\epsilon \approx Gm_N^2/a \approx 6 \cdot 10^{-71}$ eV). Takav "atom" teško je i zamisliti, a kamoli detektovati.

Do sada smo razmatrali moguće kvantne efekte gravitacije kao klasičnog polja. Šta se može reći o efektima prave kvantne gravitacije? Svetlosni talas kao klasična pojava poznat je od kad čovečanstvo postoji, ali je tek početkom ovog veka eksperimentalno utvrđeno postojanje kvanta elektromagnetnog polja - fotona. Gravitaciona sila je takodje poznata odavno, ali klasični gravitacioni talasi još uvek nisu detektovani sa sigurnošću. Krajem 60-tih godina američki fizičar John Weber je objavio da je uspeo da detektuje gravitacione talase, koji su nastali iz jakih zvezdanih izvora u Vasioni, ali njegov rezultat niko drugi nije uspeo da ponovo dobije, tako da se ne smatra dovoljno pouzdanim. U toku su pripreme da se kroz nekoliko godina izvrše pouzdana merenja gravitacionih talasa iz satelita. Pošto su kvantni aspekti gravitacionih talasa mnogo, mnogo puta slabiji, jasno je da su oni danas, kao i u nekoj razumno dalekoj budućnosti, jako daleko od mogućnosti detekcije.

Energije na kojima se, u okviru teorija velikog ujedinjenja, predviđa stupanje na scenu kvantne gravitacije su reda veličine 10^{19} GeV. Današnje energije u laboratorijskim eksperimentima fizike elementarnih čestica iznose oko 10^3 GeV. Čak su i energije čestica koje se sreću u kosmičkim zracima manje bar za 12 redova veličine (10^{12}) od Planck-ove energije. Izgleda da će skala energije kvantne gravitacije biti nedostupna za istraživanje još veoma

dugo. Ipak, treba imati na umu da se naše znanje povećava nelinearno, pa se nakon izvesnog vremena mogu uočiti mogućnosti o kojima se danas ne može ni sanjati.

Jedini efekat kvantne gravitacije, koji se danas može nazreti, je indirektan: uslovi konzistencije jedinstvene teorije gravitacije i drugih interakcija mogu biti takvi da samo postojanje gravitacije utiče na oblik teorije u sektoru ostalih interakcija.

Šta je to kvantna gravitacija ?

Možda na prvi pogled izgleda čudno postaviti ovakvo pitanje. Zar se kvantizacija gravitacije ne može jednoznačno definisati po analogiji sa kvantnim teorijama drugih interakcija? Da odgovor nije tako jednostavan, videće se iz naredne diskusije.

Šta je to što se kvantizira pri kvantizaciji gravitacije: je li to metrika prostor-vremena $g_{\mu\nu}$ (i torzija, i druge geometrijske karakteristike), ili je to sam prostor-vreme, ili nešto treće? Ako se kvantizira metrika izolovanog sistema, onda to najviše podseća na standardnu kvantnu teoriju polja (KTP). U KTP postoje komutacione relacije između dinamičkih varijabli, koje su definisane na bazi postojanja fiksnog svetlosnog konusa u svakoj tački prostor-vremena. Šta biva sa ovom strukturom ako uočimo da je svetlosni konus određen metrikom, koju smatramo kvantnom varijablom? Dovoljno jasnog odgovora nema. S druge strane, ako je dinamička varijabla trogeometrija prostor-vremena, onda bi u svakom trenutku vremena postojala samo amplituda verovatnoće za realizaciju različitih trogeometrija. Ova ideja potiče od A. Wheeler-a, no ona je ostala nedoradjena jer nije pronadjena tehnika kojom bi se ona konkretnije realizovala.

Da li se pri kvantizaciji gravitacije menja struktura prostor-vremena? Postoje mišljenja da se na rastojanjima Planck-ove dužine (10^{-33} cm) moraju dogoditi radikalne promene u našem shvata-

nju strukture prostor-vremena, koje mogu imati uticaja na razumevanje celokupne fizičke realnosti. Možda je, na primer, prostor-vreme neka vrsta rešetke, čije ekscitacije generišu metriku i zakrivljenost (možda i torziju). U tom slučaju, klasična teorija gravitacije u kontinuumu bi mogla biti neka vrsta efektivne teorije.

Koja se sve polja materije kvantiziraju zajedno sa gravitacijom? U prvoj fazi najviše je bilo pokušaja da se samo gravitaciono polje kvantizira. Zatim, u supergravitaciji se bira samo izvestan broj polja materije, što osigurava da se postigne konačnost teorije bar do izvesnog stepena.

Može li procedura kvantizacije gravitacije da se proširi na celu Vasionu? Pri ovakvim generalizacijama treba biti veoma oprezan. Teorija klasične gravitacije, kao što je OTR, daje izvanredno privlačnu i fizički zasnovanu mogućnost istraživanja strukture Vasiona kao celine, što je dugo bilo predmet ljudske mašte i nagađanja. Kvantna mehanika je, s druge strane, uspešna teorija mikroprocesa. No za njenu interpretaciju je potrebno da pored kvantnog sistema postoji i takozvani spoljašnji posmatrač. Ko igra ulogu posmatrača ako celu Vasionu posmatramo kao kvantni objekat? Zadovoljavajući odgovor nije nađen. Tvrdnja da fizički objekat kao što je Vasiona prevazilazi oblast važenja kvantne mehanike izgleda dosta uverljiva jer: a) takav objekat je jedinstven, pa se merenje ne može izvršiti više puta pod istim uslovima; b) merenje nema s čim da se izvrši, ukoliko Vasiona obuhvata sve postojeće objekte.

Ovakva razmišljanja mogu izazvati dosta konfuzije u našim glavama. Možda se odgovor na bar neka od ovih pitanja može naći u pojedinim konkretnim pristupima rešavanju postavljenog problema.

Spin, kuplovanje i masa gravitona u kvantnoj teoriji polja

Ako gravitaciju posmatramo kao standardnu KTP, onda gravitaciona sila nastaje izmenom čestice koju nazivamo graviton. Analogna situacija postoji u elektrodinamici, gde se Coulomb-ova sila između dva električna naboja objašnjava izmenom fotona. Teorija mora objasniti neke dobro poznate fakte o gravitaciji:

- 1^o dugomet gravitacione sile, zakon r^{-2} i privlačnosti;
- 2^o jednakost inercijalne i gravitacione mase;
- 3^o skretanje svetlosti pri prolasku pored Sunca, gravitacioni crveni pomak, precesija perihela Merkura i vremensko zakašnjenje radarskog ehoa od planeta (standardni testovi klasične teorije gravitacije).

Pokazaćemo da u najprostijoj teoriji polja koja ove činjenice objašnjava, graviton ima spin 2 i masu 0.

Sila dugomet koja deluje po zakonu r^{-2} se u teoriji polja opisuje izmenom čestice mase 0. Mada je eksperimentalno često nemoguće isključiti mogućnost jako male ali konačne mase, mi ćemo prepostaviti, zbog jednostavnosti, da je masa gravitona tačno jednaka 0.

Da bismo utvrdili spin gravitona ispitaćemo različite mogućnosti i videti koje su od njih u skladu sa eksperimentalnim činjenicama koje smo naveli.

Ako je graviton fermion, tj. ima poluceo spin ($1/2, 3/2, \dots$) onda gravitacija ne može nastati izmenom samo jednog gravitona. U tom slučaju bi čestica koja emituje ili prima virtuelni graviton polucelog spina menjala svoj spin od celog na poluceo, i obratno. Time bi interagujuće čestice menjale svoju prirodu, ne bi ostajale iste u toku gravitacione interakcije. Ako pokušamo sa izmenom dva fermiona, onda se ne može dobiti zakon r^{-2} . Ako nastavimo dalje, pa uvedemo 3-čestične sile, tako da jedan virtuelni (izmenjeni) fermion pri izmeni interaguje i sa nekim trećim objektom, koji se nalazi daleko od prvih dva, onda se zakon r^{-2} može

dobiti ali situacija postaje dosta komplikovana.

Ograničimo se zato na bozone spina 0, 1, 2, 3, ... Kako medju njima odabrati pogodne kandidate za prenos gravitacione interakcije? To se može uraditi koristeći gradijentnu invarijantnost teorije sa česticom mase 0 i tzv. niskoenergetske teoreme (S. Weinberg). Posmatrajmo proces u kome učestvuje N čestica. Kvantnomehanička amplituda ovog procesa zadovoljava uslov gradijentne invarijantnosti. Posmatrajmo sada drugi proces, koji se od prvog razlikuje time što jedna od spoljašnjih čestica izračuje bozon mase 0 i impulsa k , koji je odgovoran za interakciju dalekog dometa. Ako posmatramo granični slučaj $k \rightarrow 0$, tada uslov gradijentne invarijantnosti amplitude daje sledeći rezultat:

a) u slučaju kad je bezmaseni bozon foton spina 1, a konstanta interakcije e_α ($\alpha = 1, 2, \dots, N$), dobija se uslov

$$\sum_{\alpha} e_{\alpha} = 0,$$

koji označava zakon konzervacije naelektrisanja;

b) ako je bezmaseni bozon spina 2, a konstanta interakcije λ_α , onda se dobija da mora biti

$$\lambda_{\alpha} = \lambda \quad \text{za svako } \alpha .$$

Izgleda prirodno da se ova bezmasena čestica identifikuje sa gravitonom. Pošto je gravitaciona masa proporcionalna inertoj masi, sa konstantom proporcionalnosti λ_α , to rezultat $\lambda_\alpha = \lambda$ označava važenje principa ekvivalencije.

Za polja višeg spina $s = 3, 4, \dots$ uslov gradijentne invarijantnosti pri $k \rightarrow 0$ ne može biti zadovoljen. Zato ova polja ne mogu generisati statičke sile velikog dometa ($k \rightarrow 0!$), pa otpadaju kao kandidati za graviton.

Poznato je u KTP da je statička sila izmedju čestica iste vrste privlačna u slučaju kad nastaje izmenom čestice parnog spina, a odbojna kad se izmenjuje čestica neparnog spina (u elektrodinamici, izmena fotona spina 1 uzrokuje odbijanje dva istoimena

naboja). To je osnovni razlog za odbacivanje mogućnosti da čestica spina 1 prenosi gravitacionu silu.

U skalarnoj teoriji se može dobiti zakon r^{-2} i crveni pomak; za skretanje svetlosnog signala i za zakašnjenje radarskog eha dobija se vrednost 0, dok se za precesiju perihela dobija 1/3 Einstein-ovog rezultata. Skalarna teorija, dakle, ne zadovoljava.

Preostaje da graviton bude spina 2 i mase 0, što je u skladu sa svim eksperimentalnim zahtevima.

Interesantno je da se teorija čestice spina 2 i mase $m \neq 0$ u limesu $m \rightarrow 0$ ne poklapa sa teorijom čestice spina 2 i mase 0 (Veltman, van Dam): masivan graviton, u limesu $m \rightarrow 0$, daje za skretanje svetlosti pored Sunca 3/4 vrednosti koju predviđa teorija sa bezmasenim gravitonom.

Polazeći od teorije spina 2 i mase 0 u ravnom prostoru, uz pretpostavku nelinearnosti gravitacione interakcije, uslovi konzistentnosti nas dovode do Einstein-ove OTR, kao što smo ranije pokazali.

Hamilton-ova formulacija i kanonska kvantizacija

Pri analizi fizičke strukture OTR, ili Poincare gradijentno invarijantne teorije gravitacije, ili neke druge klasične teorije, potrebno je medju generalisanim koordinatama sistema pronaći one koje nose fizičku informaciju o sistemu. Ovo se sistematski može uraditi, kao što je pokazao Dirac, prelazom na Hamilton-ovu formulaciju teorije za sisteme sa vezama (veze su relacije medju dinamičkim variablama koje ne sadrže vremenske izvode). Veze se pojavljuju kao posledica toga što nisu sve dinamičke veličine fizički relevantne, što je, dalje, posledica gradijentne invarijantnosti teorije (ili, geometrijski rečeno, invarijantnosti u odnosu na koordinantne transformacije). U elektrodinamici, koja je jednostavan primer gradijentno invarijantne teorije, od četiri kom-

ponente potencijala A_μ samo su dve komponente fizički važne, dok se ostale dve mogu eliminisati izborom gradijentnog uslova. Među komponentama polja $F_{\mu\nu}$, koje predstavljaju kanonske impulse koji odgovaraju koordinatama A_μ , postoje veze (npr. zakon Coulomb-a $\text{div } \vec{E} = \rho$ je veza). Ove veze dalje smanjuju broj nezavisnih kanonskih varijabli. Kad se u teoriji nadju sve veze, onda se konstruišu tzv. Dirac-ove zagrade, koje zamenjuju Poisson-ove zagrade u slučaju teorije sa vezama. Time je Hamilton-ova formulacija klasične teorije završena. Odgovarajuća kvantna teorija se pravi na sledeći način:

- a) Dirac-ove zagrade prelaze u odgovarajuće komutatore;
- b) neke od veza (tzv. veze prve klase) služe da, kao dopunski uslovi, definišu fizička stanja u Hilbert-ovom prostoru;
- c) preostale veze (veze druge klase) se mogu koristiti kao operatorski identiteti, pomoću kojih se neke nefizičke variable mogu eliminisati iz teorije.

Ako ovu proceduru uspešno dovedemo do kraja, onda imamo sve elemente jedne kvantne teorije, koju treba još eksplicitno rešiti da bi se dobila kompletna dinamička informacija. Nažalost, ovo rešavanje u slučaju gravitacionog polja je tako komplikovano da ono obično predstavlja nepremostivu prepreku za dobijanje kompletne slike fizičkog sadržaja teorije (osim ako se ne radi perturbaciono). No čak i bez ovog zadnjeg koraka, Hamiltonova formulacija kvantne teorije gravitacije predstavlja značajan korak u razumevanju njene fizičke strukture.

Kovarijantna kvantizacija

Ovaj metod je veoma sličan onome što se obično radi u standardnim kvantnim teorijama polja. Ilustrovaćemo postupak na primeru OTR, a slično se može raditi i u drugim slučajevima.

Metriku razdvajamo na deo koji odgovara ravnom prostoru i perturbaciju,

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \kappa h_{\mu\nu}, \quad \kappa^2 = 16\pi G.$$

Lagranžijan se, nakon ove smene, razvija po stepenima od κ : deo nezavistan od κ predstavlja slobodan Lagranžijan, ostatak predstavlja interakciju. Računanje najnižih procesa nije predstavljalo nikakav problem od samog početka razvoja ove metode. Računanje procesa koji uključuju tipično kvantne korekcije - petlje, vodilo je u prvim pokušajima (Feynman, 60-te godine) do problema unitarnosti: nisu svi nefizički stepeni slobode bili eliminisani iz teorije. Isti problem se javlja i kod Yang-Mills-ovih teorija. Korektan rezultat je dobijen tek nakon uvođenja određenih korekcija pri računanju petlji. U opštem slučaju ovaj je problem rešen tek nekoliko godina kasnije (Fadeev, Popov) korišćenjem metoda funkcionalnog integrala. Time je uspešno završen prvi korak u konstrukciji kvantne teorije gravitacije.

Ne, to nije kraj priče, sada nastaje drugi veliki problem: uklanjanje divergencija koje se javljaju pri računjanju kvantnih korekcija (petlji). Kad se posmatra OTR i materija, onda se divergencije na nivou jedne petlje ne mogu ukloniti, nisu renormalizabilne, jer se ne mogu absorbovati u fizičke parametre klasičnog Lagranžijana. Čista gravitacija je konačna na nivou jedne petlje, a na nivou od dve petlje se još uvek ne zna.

Ukoliko se u perturbacionom metodu ne nađe neki način regularizacije beskonačnosti, metod gubi smisao. U poslednje vreme su razvijene specijalne tehnike rada sa nepolinomijalnim Lagranžijanima, koje možda mogu da regularizuju i OTR. Za sada, problem ostaje otvoren.

Supergravitacija

Poznato je u KTP da petlje bozona i fermiona daju doprinose suprotnih znakova. Postoji mogućnost da se u teoriji koja na pogodan način uključuje i bozone i fermione, beskonačni doprinosi bozons-

kih i fermionskih petlji ponište. To se upravo i događa, bar u izvesnoj meri, u supergravitaciji.

Globalna supersimetrija je grupa transformacija koja osim Poincare-ovih sadrži i medjusobne transformacije bozona i fermiona. Struktura grupe je takva da dve Fermi-Bose rotacije vode na translaciju u prostor-vremenu. Supersimetrični multiplieti čestica sadrže i bozone i fermione. Supersimetrija otkriva jedinstvenu mogućnost netrivialnog ujedinjenje unutrašnjih i prostorno-vremenskih simetrija, ukoliko bozonska i fermionska polja nose kvantne oznake neke unutrašnje grupe. Simetrija ovog tipa se naziva raširena supersimetrija.

Supersimetrija može biti kako globalna tako i lokalna. Pošto lokalizacija Poincare-ove grupe vodi na U_4 teoriju gravitacije, očekujemo da će se i pri lokalizaciji supersimetrije pojaviti gravitacija. To se i događa, i otuda naziv supergravitacija. Supergravitacija se može dobiti i na drugi, ekvivalentan način: ako se u teoriju gravitacije uvede Fermi-Bose simetrija. Pored gravitacije postoji još jedno gradijentno polje, koje je povezano sa postojanjem Fermi-Bose simetrije i ima spin $3/2$: gravitino. Broj gravitina se obično obeležava sa N . Prosta supergravitacija sadrži jedan graviton i jedan gravitino, $N = 1$. Maksimalno raširena supergravitacija, koja ne sadrži čestice spina većeg od 2, je tipa $N = 8$.

Supergravitacija je, zbog potiranja beskonačnog doprinosa bozonskih i fermionskih petlji, konačna ne samo na nivou jedne, već i na nivou dve petlje. Šta se događa na nivou tri petlje nije do kraja sigurno.

Supergravitacija predstavlja izvanredno privlačnu ideju superujedinjenje, no ona je još uvek daleko od kompletne teorije, jer mnogi problemi još nisu rešeni.

* * *

Pomenute metode kvantizacije gravitacije ne iscrpljuju listu svih postojećih pokušaja. Račun tvistora (R. Penrose) predstavlja suštinski različit put u odnosu na standardne teorije. Radi se i kovarijantna metoda sa razvojem ne oko metrike ravnog prostora, već oko neke druge zadane metrike. Tu je, zatim, semiklasičan pristup, u kome se gravitacija tretira klasično, a tenzor energije-impulsa kvantne materije se uzima usrednjen po nekom kvantnom stanju. Treba pomenuti i pokušaje da se dimenziona gravitaciona konstanta generiše spontanom narušenjem simetrije. Takvi metodi imaju, po analogiji sa neabelovim gradijentnim teorijama, veće šanse da daju renormalizabilne teorije.

III GRAVITACIONI SINGULARITETI

U OTR se singulariteti pojavljuju kako kod lokalizovanih fizičkih sistema (crne rupe), tako i u kosmologiji (velika eksplozija). Singularitet se može grubo okarakterisati kao beskonačan porast gustine materije u nekim delovima prostor-vremena, koji je praćen beskonačnim zakrivljenjem prostor-vremena. Obe ove oblasti, i kosmologija i crne rupe, zaslužuju posebno i veoma detaljno izučavanje. Ja ću se u ovom izlaganju na njima zadržati samo u onoj meri u kojoj oni osvetljavaju unutrašnju ograničenost OTR, i služe kao putokaz za nalaženje novih, konzistentnijih prilaza teoriji gravitacije.

Newton-ova teorija gravitacije naišla je na niz problema pri pokušaju objašnjenja strukture Vasiona. Prvi pokušaji izgradnje relativističke kosmologije potiču iz 1917 godine, kada je Einstein formulisao statički model Vasiona, uz uvođenje kosmološkog člana u osnovne jednačine OTR. Otkriće širenja Vasiona (Hubble), preko pomeranja spektralnih linija ka crvenom delu spektra u spektrima dalekih galaksija, bitno je izmenilo situaciju u korist nestacionarnog modela (Fridman). Fridman-ov model se zasniva na

Einstein-ovim jednačinama bez kosmološkog člana, postojanju jedinstvenog, kosmičkog vremena i homogenosti i izotropnosti raspodele materije u prostoru.

Čitav niz podataka ide u prilog modelu Fridman-a. No, on ima singularnost na konačnoj vremenskoj udaljenosti u prošlosti (velika eksplozija). Izvesno vreme to fizičare nije zabrinjavalo, jer se smatralo da su uzrok te pojave uprošćene pretpostavke modela (homogenost i izotropnost, jednačine stanja materije kao za idealni fluid, itd.). Medjutim, teoreme Hawking-a i Penrose-a (kraj 60-tih godina) pokazuju da singulariteti, uz važenje nekih dosta prirodnih pretpostavki, slede iz Einstein-ovih jednačina. Tako postaje jasno da se singulariteti mogu izbeći ili modifikacijom klasične OTR ili kvantizacijom gravitacije. S obzirom da se nalazimo u oblasti koja je siromašna u eksperimentalnim podacima, treba imati na umu da odsustvo singulariteta može biti ključni uslov konzistentnosti svake nove teorije.

Teoreme Hawking-a i Penrose-a se odnose i na egzistenciju lokalnih singulariteta u OTR, koji neizbežno nastaju pri gravitacionom kolapsu zvezda koje su istrošile svoju nuklearnu energiju i imaju masu veću od oko tri mase Sunca. Nakon odredjenog kritičnog stadijuma sva se materija zvezde za konačno sopstveno vreme susreće u jednoj tački: gustina postaje beskonačna, kao i krivina. Priroda crne rupe se može najjednostavnije objasniti razmatranjem geometrije tačkaste mase (Schwarzchild-ova geometrija). Na rastojanju $r_g = 2MG/c^2$ od mase obrazuje se kritična sfera: svako telo koje se nadje na rastojanju manjem od r_g ne može više da se vrati, i za konačno sopstveno vreme ono pada u tačku $r = 0$.

Kosmološki singulariteti u prošlosti označavaju postojanje nekog trenutka vremena, pre koga ništa, pa ni samo vreme, nije imalo smisla, nije postojalo. Singularnost crne rupe se odnosi na budućnost, i znači da za onog posmatrača koji je uhvaćen u crnu rupu postoji jedan trenutak u budućnosti kad se završava ne samo njegov život, nego i vreme prestaje da postoji. Klasična OTR preds-

kazuje svoj sopstveni krah!

Crna rupa teorijski nastaje kao neizbežan korak u evoluciji "hladne" zvezde dovoljno velike mase. Na osnovu poznavanja evolucije zvezda može se reći da bi crne rupe trebalo da nastaju u dovoljnom broju da se mogu i uočiti posmatranjem. No posmatranja nisu bila jako uspešna. Istina, postoje veoma uverljivi kandidati za crnu rupu, čije ponašanje ne protivreči hipotezi o crnoj rupi. Ipak, treba reći da postoje i alternativna objašnjenja posmatranih pojava.

Sigurno je da u blizini singulariteta gustine materije postaju tako velike da je nužno uzeti u obzir i kvantne efekte. Mogu li oni da uklone singularitete, ili je za to potrebna modifikacija klasične teorije, nije jasno.

Pomenimo na kraju da danas postoje modeli bez kosmološkog singulariteta unutar Poincaré gradijentno invarijantne teorije gravitacije. Oni se od Fridman-ovog modela razlikuju bitno samo u maloj oblasti oko velike eksplozije, gde je gustina materije jako velika ali više nije beskonačna. Ova činjenica ide u prilog gradijentno invarijantnih teorija gravitacije.

* * *

Gravitacija je najslabija interakcija, sa relativno malo eksperimentalnih podataka koji bi mogli da pomognu u traženju puteva za uspešnije formulisanje konzistentne teorije gravitacije. Pa ipak, ako se usvoji ideja o jedinstvenom opisivanju svih interakcija, gravitacioni fenomeni mogu jako mnogo da utiču na razumevanje celokupne fizičke realnosti, uključujući i prostor-vreme.

LITERATURA:

1. A. Einstein, Sobranie nauchnih trudov - tom I, pod redakciei I.E. Tamma, Ya.A. Smorodinskogo, B.G. Kuznecova, idz. "Nauka", Moskva, 1965.
2. S. Weinberg: Gravitation and Cosmology, John Willey and Sons, New York, 1972.
3. L.D. Landau, E.M. Lifshitz: Teorija polja, izd. "Nauka", Moskwa, 1973.
4. D.W. Sciama: The physical foundations of general relativity, Doubleday and Comp., New York, 1969.
5. Ch.W. Misner, K.S. Thorn, J.A. Wheeler: Gravitation, W.H. Freeman and Comp., San Francisko, 1973.
6. R.P. Feynman: Lectures on gravitation, CALTECH, 1962-63.
7. C.J. Isham, ICTP/79-80/36.
8. S.W. Hawking, W. Israel, UFN 133, vip. 1 (1981) 139.
9. V.L. Ginzburg, UFN 134, vip. 3 (1981) 469.
10. P.van Nieuwenhuizen, ITP-SB-79-61.
11. M.J. Duff, IC/73/70.