

Termenul de gaura neagra este de origine foarte recenta. El a fost inventat in 1969 de savantul american John Wheeler ca o descriere grafica a unei idei care are o vechime de cel putin doua sute de ani, intr-o vreme cand existau doua teorii asupra luminii: una, sustinuta de Newton, era ca lumina este formata din particule; cealalta era ca lumina este formata din unde. Stim acum ca ambele teorii sunt corecte. Prin dualismul unda/particula din mecanica cuantica lumina poate fi privita atat ca unda cat si ca particula. In cadrul teoriei care sustinea ca lumina este formata unde nu era clar modul in care ea ar trebui sa raspunda la gravitatie. Dar daca lumina este formata din particule, ar fi de asteptat ca acestea sa fie afectate de gravitatie in acelasi fel in care sunt afectate ghiulele de tun, rachetele si planetele. La inceput oamenii credeau ca particulele de lumina se deplaseaza cu viteza infinita, dar descoperirea lui Roemer ca lumina se deplaseaza cu viteza finita a aratat ca gravitatiea poate avea un efect important. John Michell, un membru in consiliul unui Colegiu din Cambridge, a scris, pe baza acestei ipoteze, in 1783, o lucrare in revista Philosophical Transactions a Societatii Regale din Londra, in care a aratat ca o stea care este suficient de masiva si compacta ar avea un camp gravitational atat de puternic incat lumina nu poate iesi: orice lumina emisa de suprafata stelei ar fi atrasa inapoi de atractia gravitationala a stelei inainte de a putea ajunge foarte departe. Michell sugera ca ar putea exista multe stele ca aceasta. Desi nu le-am putea vedea, pentru ca lumina lor nu ar ajunge la noi, totusi am putea sa simtim atractia lor gravitationala. Aceste obiecte sunt numite acum gauri negre pentru ca asta sunt: goluri negre in spatiu. O sugestie similara a fost facuta cativa ani mai tarziu de savantul francez marchizul de Laplace, aparent independent de Michell: Este destul de interesant ca Laplace a inclus-o numai in prima si a doua editie a cartii sale Sistemul lumii si a scos-o din editiile ulterioare; poate ca a hotarat ca era o idee aiurita. (De asemenea, teoria corpusculara a luminii nu a mai fost sustinuta in secolul al nouasprezecelea; pareca ca totul se putea explica prin teoria ondulatorie si, conform acesteia, nu era clar daca lumina era afectata de gravitatie.)

q8b10by

De fapt, nu este logic ca lumina sa fie tratata ca niste ghiulele in teoria gravitatiei a lui Newton, pentru ca viteza luminii este fixa. (O ghiulea lansata in sus de la pamant va fi incetinuta de gravitatie si in cele din urma se va opri si va cadea; totusi, un foton continua sa se deplaseze in sus cu viteza constanta. Atunci, cum poate gravitatiea newtoniana sa afecteze lumina?) O teorie consistenta privind modul in care gravitatiea afecteaza lumina nu a aparut pana cand Einstein n-a propus relativitatea generalizata, in 1915. Si chiar atunci a durat mult timp pana cand au fost intelese implicatiile teoriei pentru stelele masive.

Pentru a intelege modul in care se poate forma o gaura neagra, avem nevoie mai intai de intelegerea unui ciclu de viata a unei stele. O stea se formeaza atunci cand o cantitate mare de gaz (in majoritate hidrogen) incepe sa sufere un colaps in sine insusi, datorita atractiei sale gravitationale. Atunci cand ea se contracta, atomii gazului se ciocnesc intre ei din ce in ce mai des si cu viteze din ce in ce mai mari gazul se incalzeste. In cele din urma, gazul va fi atat de fierbinte incat atunci cand atomii de hidrogen se ciocnesc ei nu se mai departeaza unul de altul, ci fuzioneaza formand heliu. Caldura eliberata in aceasta reactie, care este ca o explozie controlata a unei bombe cu hidrogen, este aceea care face ca steaua sa straluceasca. Aceasta caldura suplimentara mareste si mai mult presiunea gazului pana ce este suficienta pentru a echilibra atractia gravitationala si gazul inceteaza sa se contracte. Este cam ca un balon exista un echilibru intre presiunea aerului din interior, care incearca sa produca umflarea balonului si tensiunea din cauciuc, care incearca sa micsoreze balonul. Stelele vor ramane stabile un timp indelungat in care caldura degajata de reactiile nucleare echilibreaza atractia gravitationala. In cele din urma insa steaua nu va mai avea hidrogen si alti combustibili nucleari. In mod paradoxal, cu cat stelele au mai mult combustibil la inceput, cu atat mai curand se termina. Aceasta se intampla deoarece cu cat o stea este mai masiva, cu atat trebuie sa fie mai fierbinte pentru a echilibra atractia sa gravitationala. si cu cat este mai fierbinte, cu atat mai repede se consuma combustibilul sau. Soarele nostru are probabil destul combustibil pentru inca cinci miliarde de ani, dar stelele mai masive pot sa-si epuizeze combustibilul doar intr-o suta de milioane de ani, mult mai putin decat varsta universului. Atunci cand o stea nu mai are combustibil, ea incepe sa se raceasca si astfel se contracta. Ce poate sa i se intample apoi a fost inteles pentru prima oara abia la sfarsitul anilor '20.

In 1928 un student indian, Subrahmanyan Chandrasekhar, a luat vaporul spre Anglia, pentru a studia la Cambridge cu astronomul britanic Sir Arthur Eddington, un expert in relativitatea generalizata. (Conform unor relatari, un ziarist i-a spus lui Eddington la inceputul anilor '20 ca a auzit ca ar fi numai trei oameni in lume care intelegeau relativitatea generalizata. Eddington a tacut un timp, apoi a replicat "Incerca sa ma gandesc cine este a treia persoana".) In timpul calatoriei din India, Chandrasekhar a calculat modul in care o stea mare putea exista si se putea mentine contra gravitatiei sale dupa ce si-a consumat tot combustibilul. Ideea era aceasta: atunci cand o stea se micsoreaza, particulele de materie ajung foarte

aproape una de alta si astfel, conform principiului de excluziune al lui Pauli, ele trebuie sa aiba viteze foarte diferite. Aceasta le face sa se indeparteze una de alta si tinde sa produca expansiunea stelei. Prin urmare, o stea se poate mentine la o raza constanta printr-un echilibru intre atractia gravitationala si respingerea care apare datorita principiului de excluziune, asa cum mai inainte gravitatia sa era echilibrata de caldura.

Chandrasekhar a realizat insa ca exista o limita pentru respingerea datorata principiului de excluziune. Teoria relativitatii limiteaza diferenta maxima intre vitezele particulelor de materie din stea la viteza luminii. Aceasta inseamna ca atunci cand o stea ajunge destul de densa, respingerea cauzata de principiul de excluziune ar fi mai mica decat atractia gravitationala. (Aceasta masa se numeste acum limita Chandrasekhar.) O descoperire similara a fost facuta aproape in acelasi timp de savantul rus Lev Davidovici Landau.

Aceasta a avut implicatii serioase pentru soarta finala a stelelor masive. Daca masa unei stele este mai mica decat limita Chandrasekhar, ea poate sa-si opreasca in cele din urma contractia si sa se stabilizeze la o stare finala posibila ca o "pitica alba" cu o raza de cateva mii de kilometri si o densitate de sute de tone pe centimetru cub. O pitica alba este sustinuta de repulsia, datorata principiului de excluziune, intre electronii materiei sale. Observam un numar mare din aceste stele pitice albe.

Una dintre primele descoperiri este o stea care se deplaseaza pe orbita in jurul lui Sirius, cea mai stralucitoare stea de pe cerul noptii.

Landau a aratat ca exista o alta stare finala posibila pentru o stea, tot cu masa limita de aproximativ o data sau de doua ori masa soarelui, dar mult mai mica chiar decat o pitica alba. Aceste stele ar fi sustinute de respingerea, datorata principiului de excluziune, dintre neutroni si protoni, nu intre electroni. Ele au fost numite, deci, stele neutronice. Ele ar avea o raza de numai aproximativ saizece kilometri si o densitate de sute de milioane de tone pe centimetru cub. In momentul cand au fost prezise prima oara, nu exista o modalitate de observare a stelelor neutronice. Ele nu au fost detectate, in realitate, decat mult mai tarziu.

Pe de alta parte, stelele cu masa peste limita Chandrasekhar au o mare problema atunci cand isi termina combustibilul. In unele cazuri ele pot exploda sau reusesc sa elimine destula materie pentru a-si reduce masa sub limita si deci sa evite colapsul gravitational catastrofal, dar era greu de crezut ca acest lucru se intampla intotdeauna, indiferent cit de mare era steaua. Cum ar fi stiut ea ca trebuie sa piarda din greutate? Si chiar daca fiecare stea reusea sa piarda destula masa pentru a evita colapsul, ce s-ar fi intamplat daca ati fi adaugat masa la o pitica alba sau la o stea neutronica astfel incat sa depaseasca limita? Ar fi suferit un colaps spre densitate infinita? Eddington a fost socat de aceasta implicatie si a refuzat sa creada rezultatul lui Chandrasekhar. Eddington credea ca pur si simplu nu era posibil ca o stea sa suferi un colaps catre un punct. Acesta a fost punctul de vedere al multor savanti; Einstein insusi a scris o lucrare in care pretindea ca stelele nu se vor restrange la dimensiunea zero: Ostilitatea celorlalti oameni de stiinta, in special a lui Eddington, fostul sau profesor si o autoritate de prima importanta in ceea ce priveste structura stelelor, l-a convins pe Chandrasekhar sa abandoneze aceasta directie de lucru si sa treaca la alte probleme de astronomie, cum este miscarea roiurilor de stele. Totusi, atunci cand i s-a decernat premiul Nobel in 1983, acesta a fost, in parte cel putin, pentru lucrarea sa de inceput asupra masei limita a stelelor reci.

Chandrasekhar a aratat ca principiul de excluziune putea sa nu opreasca colapsul unei stele mai masive deci limita Chandrasekhar, dar problema intelegerii a ceea ce i se intampla unei stele de acest fel, conform teoriei relativitatii generalizate, a fost rezolvata pentru prima oara de un tanar american, Robert Oppenheimer, in 1939. Rezultatul sau sugera insa ca nu ar fi existat consecinte observabile care sa poata fi detectate de telescoapele de atunci. Apoi a intervenit cel de-al doilea razboi mondial si Oppenheimer insusi a fost implicat in proiectul bombei atomice. Dupa razboi, problema colapsului gravitational a fost uitata deoarece majoritatea oamenilor de stiinta erau preocupati de ceea ce se intampla la scara atomului si nucleului sau. Totusi, in anii '60, interesul problemelor la scara mare ale astronomiei si cosmologiei a fost retremit de o crestere insemnata a numarului si domeniului de observatii astronomice, determinata de aplicarea tehnologiei moderne. Atunci lucrarea lui Oppenheimer a fost redescoperita si extinsa de mai multe persoane.

Imaginea pe care o avem acum din lucrarea lui Oppenheimer este urmatoarea: campul gravitational al stelei modifica traiectoriile razelor de lumina in spatiu timp fata de traiectoriile care ar fi fost daca steaua nu exista. Conurile de lumina care indica traiectoriile urmate in spatiu si timp de scanteierile de lumina emise de varfurile lor sunt curbate spre interior langa suprafata unei stele. Aceasta se poate vedea la curbarea luminii stelelor indepartate observata in timpul unei eclipse de soare. Cand steaua se contracta,

campul gravitacional la suprafata sa devine mai puternic si conurile de lumina se curbeaza si mai mult spre interior. Aceasta face si mai dificila iesirea luminii din stea si, pentru un observator aflat la distanta, lumina apare mai slaba si mai rosie. In cele din urma, cand steaua s-a micorat pana la o anumita raza critica, campul gravitacional la suprafata devine atat de puternic incat conurile de lumina sunt curbate spre interior asa de mult ca lumina nu mai poate iesi (fig. 6.1). Conform teoriei relativitatii, nimic nu se poate deplasa mai repede decat lumina. Astfel, daca lumina nu poate iesi, nu poate iesi nimic altceva; totul este atras de campul gravitacional. Exista deci un set de evenimente intr-o regiune a spatiu-timpului din care nu se poate iesi pentru a ajunge la un observator aflat la distanta. Aceasta regiune se numeste o gaura neagra. Limita sa se numeste orizontul evenimentului si el coincide cu traiectoriile razelor de lumina care nu au reusit sa iasa din gaura neagra.

Pentru a intelege ce ati vedea daca ati privi colapsul unei stele ce formeaza o gaura neagra, trebuie sa reamintim ca in teoria relativitatii nu exista timp absolut. Fiecare observator are propria sa masura a timpului. Timpul pentru cineva de pe stea va diferi de timpul pentru cineva aflat la distanta, datorita campului gravitacional al stelei. Sa presupunem ca un astronaut cutezator aflat pe suprafata unei stele care sufera un colaps, si care se prabuseste o data cu ea, trimite un semnal la fiecare secunda, conform ceasului sau, catre nava sa spatiala, aflata pe orbita in jurul stelei. La un moment dat indicat de ceasul sau, sa presupunem 11:00, steaua s-ar micora sub raza critica la care campul gravitacional devine atat de puternic incat nimic nu mai poate iesi si semnalele sale nu mai ajung la nava. Pe masura ce se apropie ora 11:00 camarazii sai, care privesc din nava, ar gasi ca intervalele dintre semnalele succesive emise de astronaut ar fi din ce in ce mai lungi, dar acest efect ar fi foarte mic inainte de 10:59:59. Ei ar trebui sa astepte doar foarte putin mai mult de o secunda intre semnalul astronautului de la ora 10:59:58 si cel trimis cand ceasul sau arata 10:59:59, dar ar trebui sa astepte pentru totdeauna semnalul de la 11:00. Undele de lumina emise de suprafata stelei intre 10:59:59 si 11:00, dupa ceasul astronautului, ar fi imprastiate pe o perioada infinita de timp, dupa cum se vede din nava spatiala. Intervalul de timp dintre sosirile undelor succesive la nava spatiala ar fi din ce in ce mai lung, astfel ca lumina stelei ar aparea din ce in ce mai rosie si din ce in ce mai slaba. In cele din urma, steaua ar fi atat de intunecata incat nu ar mai putea fi vazuta de pe nava spatiala; tot ce ramane este o gaura neagra in spatiu. Steaua ar continua insa sa exercite aceeasi forta gravitacionala asupra navei spatiale, care ar continua sa se deplaseze pe orbita in jurul gaurii negre.

Totusi, scenariul nu este in intregime realist datorita urmatoarei probleme. Gravitatia devine mai slaba pe masura ce va departati de stea, astfel incat forta gravitacionala asupra picioarelor cutezatorului nostru astronaut ar fi intotdeauna mai mare decat forta exercitata asupra capului sau. Aceasta diferenta intre forte l-ar intinde pe astronautul nostru ca pe niste spaghetti sau l-ar rupe inainte ca steaua sa se contracte la raza critica la care s-a format orizontul evenimentului! Totusi, credem ca exista obiecte mult mai mari in univers, cum sunt regiunile centrale ale galaxiilor, care pot suferi, de asemenea, un colaps gravitacional formand gauri negre; un astronaut aflat pe unul din acestea nu ar fi rupt inainte de a se forma gaura neagra. De fapt, el nu ar simti nimic special cand ar atinge raza critica si ar putea trece de punctul fara intoarcere fara sa-l observe. Totusi, doar in cateva ore, pe masura ce regiunea continua sa sufere colapsul, diferenta dintre fortele gravitacionale exercitate asupra capului sau si picioarelor sale ar deveni atat de mare incat, din nou, l-ar rupe in bucati.

Lucrarea pe care Roger Penrose si cu mine am facut-o intre 1965 si 1970 a aratat, conform teoriei relativitatii, ca intr-o gaura neagra trebuie sa fie o singularitate de densitate infinita si curbura infinita a spatiu-timpului. Aceasta este ca Big Bang-ul de la inceputul timpului, numai ca el ar fi un sfarsit al timpului pentru corpul care sufera colapsul si pentru astronaut. La aceasta singularitate legile stiintei si capacitatea noastra de a prezice viitorul nu ar mai functiona. Totusi, orice observator ramas in afara gaurii negre nu ar fi afectat de acest esec al predictibilitatii, deoarece nici lumina, nici orice alt semnal din singularitate nu l-ar putea ajunge. Acest fapt remarcabil l-a facut pe Roger Penrose sa propuna ipoteza cenzurii cosmice care poate fi parafrazata astfel: "Dumnezeu detesta o singularitate nuda." Cu alte cuvinte, singularitatile produse de colapsul gravitacional se produc numai in locuri ca gaurile negre, unde ele sunt decent ascunse de o privire exterioara orizontului evenimentului. Strict, aceasta se numeste ipoteza cenzurii cosmice slabe: ea protejeaza observatorii care raman in afara gaurii negre de consecintele esecului capacitatii de prezicere care se produce la singularitate, dar nu face nimic pentru bietul astronaut nefericit care cade in gaura.

Exista unele solutii ale ecuatiilor relativitatii generalizate in care este posibil ca astronautul nostru sa vada o singularitate nuda: el poate sa evite sa atinga singularitatea si in schimb sa cada printr-o "gaura de

vierme" si sa iasa in alta regiune a universului. Acesta ar oferi mari posibilitati de a calatori in spatiu si timp, dar din nefericire se pare ca aceste solutii sunt toate foarte instabile; cea mai mica perturbatie, cum ar fi prezenta unui astronaut, le poate modifica astfel incat astronautul nu ar putea vedea singularitatea pana nu ajunge la ea si timpul sau ajunge la sfarsit. Cu alte cuvinte, singularitatea s-ar gasi intotdeauna in viitorul sau si niciodata in trecutul sau. Versiunea tare a ipotezei cenzurii cosmice afirma ca intr-o solutie realista, singularitatile s-ar gasi intotdeauna ori in intregime in viitor (ca singularitatile colapsului gravitational), ori in intregime in trecut (ca Big Bang-ul). Este mare sa se spere ca este valabila o versiune a ipotezei cenzurii, deoarece in apropierea singularitatilor nude poate fi posibila calatoria in trecut. Desi acest lucru ar fi grozav pentru scriitorii de literatura stiintifico-fantastica, ar insemna ca nimeni nu ar mai avea o viata sigura: cineva poate intra in trecut si-si poate omori tatal sau mama inainte ca tu sa fii conceput!

Orizontul evenimentului, limita regiunii spatiu-timpului de unde nu se mai poate iesi, actioneaza ca o membrana intr-un singur sens in jurul gaurii negre: obiecte ca astronautii imprudenti pot cadea prin orizontul evenimentului in gaura neagra, dar din gaura neagra nu mai iese nimic prin orizontul evenimentului. (Amintim ca orizontul evenimentului este traiectoria in spatiu-timp a luminii care incearca sa iasa din gaura neagra, si ca nimic nu se poate deplasa mai repede decat lumina.) S-ar putea spune despre orizontul evenimentului ceea ce poetul Dante spunea despre intrarea in Infern: "Voi ce intrati aici, lasati orice speranta." Orice sau oricine cade prin orizontul evenimentului va ajunge curand la regiunea de densitate infinita si la sfarsitul timpului.

Relativitatea generalizata prezice ca obiectele grele in miscare determina emisia de unde gravitationale, unde ale curburi spatiale care se deplaseaza cu viteza luminii. Acestea sunt similare undelor de lumina, care sunt unde ale campului electromagnetic, dar sunt mult mai greu de detectat. Ca si lumina, ele transporta energia din obiectele care le emit. Ar fi deci de asteptat ca un sistem de obiecte masive sa ajunga in cele din urma intr-o stare stationara deoarece energia din orice miscare va fi transportata de emisia undelor gravitationale. (Este ca atunci cand cade un dop in apa: la inceput el se misca destul de mult in sus si in jos, dar deoarece undele duc cu ele energia sa, el va ajunge in cele din urma la o stare stationara.) De exemplu, miscarea pamantului pe orbita sa in jurul soarelui produce unde gravitationale. Ca efect al pierderii de energie, orbita pamantului se va modifica astfel incat treptat el ajunge din ce in ce mai aproape de soare; ciocnindu-se de el si ajungand intr-o stare stationara. Rata pierderii de energie este foarte mica, aproape destul sa puna in functiune un radiator electric. Aceasta inseamna ca vor fi necesari o mie de milioane de milioane de milioane de milioane de ani pana cand pamantul va cadea pe soare, astfel ca nu este necesar sa va ingrijorati acum! Modificarea orbitei pamantului este prea lenta pentru a fi observata, dar producerea acestui efect a fost observata in ultimii cativa ani in sistemul numit PSR 1913+16 (PSR inseamna "pulsar", un tip special de stea neutronica, ce emite impulsuri regulate de unde radio). Acest sistem contine doua stele neutronice care se misca pe orbita una in jurul celeilalte, si energia pe care o pierd prin emisia de unde gravitationale le face sa se deplaseze pe spirala una catre cealalta.

In timpul colapsului gravitational al unei stele cand se formeaza o gaura neagra, miscarile ar fi mult mai rapide, astfel ca energia este transportata cu o rata mult mai mare. Prin urmare; nu va dura mult pana cand ea va ajunge intr-o stare stationara. Cum ar arata aceasta stare finala? Se poate presupune ca ea ar depinde de toate caracteristicile complexe ale stelei din care s-a format nu numai de masa sa si de viteza de rotatie, dar si de diferite densitati ale diferitelor parti ale stelei si de miscarile complicate ale gazelor din stea. Si daca gaurile negre ar fi tot atat de variate ca si obiectele din care s-au format in urma colapsului, poate fi foarte greu sa se faca preziceri despre gaurile negre, in general.

Totusi, in 1967 studiul gaurilor negre a fost revolutionat de Werner Israel, un savant canadian (care s-a nascut in Berlin, a crescut in Africa de Sud si si-a luat doctoratul in Irlanda). Israel a aratat ca, in conformitate cu relativitatea generalizata, gaurile negre care nu se rotesc trebuie sa fie foarte simple; ele erau perfect sferice, dimensiunea lor depindea numai de masa lor si oricare doua gauri negre de acest fel avand aceeasi masa erau identice. De fapt, ele ar putea fi descrise de o solutie particulara a ecuatiilor lui Einstein care era cunoscuta inca din 1917, descoperita de Karl Schwarzschild la scurta vreme dupa descoperirea relativitatii generalizate. La inceput, multe persoane, printre care chiar Israel, au argumentat ca deoarece gaurile negre trebuie sa fie perfect sferice, o gaura neagra poate fi formata numai prin colapsul unui obiect perfect sferic. Orice stea reala care nu ar fi niciodata perfect sferica ar putea deci sa sufere un colaps formand doar o singularitate nuda.

A existat insa o interpretare diferita a rezultatului obtinut de Israel, care a fost sustinuta in special de Roger Penrose si John Wheeler. Ei sustineau ca miscarile rapide care au loc in timpul colapsului unei

stele ar însemna că unele gravitaționale pe care le emite ar face-o și mai sferică și în momentul în care ajunge la o stare staționară, ea ar fi precis sferică. Conform acestui punct de vedere, orice stea care nu se rotește, indiferent cât de complicată este forma sa și structura sa internă, ar sfârși după colapsul gravitațional ca o gaură neagră perfect sferică, a cărei dimensiune depinde numai de masa sa. Calculele ulterioare au confirmat acest punct de vedere și curând acesta a fost general adoptat.

Rezultatul lui Israel trata cazul gaurilor negre formate numai din corpuri care nu se rotesc. În 1963, Roy Kerr din Noua Zeelandă a descoperit un set de soluții ale ecuațiilor relativității generalizate care descriau gaurile negre rotitoare. Aceste gauri negre "Kerr" se rotesc cu viteză constantă, dimensiunea și forma lor depinzând numai de masa și viteza lor de rotație. Dacă rotația este zero, gaura neagră este perfect rotundă și soluția este identică cu soluția Schwarzschild. Dacă rotația este diferită de zero, gaura neagră se bombează spre exterior la ecuatorul său (la fel cum pământul sau soarele se bombează datorită rotației lor) și cu cât se rotește mai repede, cu atât se bombează mai mult. Astfel, pentru a extinde rezultatul lui Israel ca să includă corpurile rotitoare, s-a presupus că orice corp rotitor care suferă un colaps formând o gaură neagră ar ajunge în cele din urmă la o stare staționară descrisă de soluția Kerr. În 1970 un student în cercetare și coleg al meu de la Cambridge, Brandon Carter, a făcut primul pas în demonstrarea acestei ipoteze. El a arătat că, în cazul în care o gaură neagră rotitoare are o axă de simetrie, ca un titirez, dimensiunea și forma sa ar depinde numai de masa și viteza sa de rotație. Apoi, în 1971, eu am demonstrat că orice gaură neagră rotitoare staționară ar avea într-adevăr o asemenea axă de simetrie. În sfârșit, în 1973, David Robinson de la Kings College din Londra a utilizat rezultatele lui Carter și ale mele pentru a arăta că ipoteza fusese corectă: o asemenea gaură neagră trebuie într-adevăr să fie o soluție Kerr. Astfel, după colapsul gravitațional o gaură neagră trebuie să ajungă într-o stare în care ea poate fi rotitoare, dar nu pulsantă. Mai mult, dimensiunea și forma sa ar depinde numai de masa și viteza sa de rotație și nu de natura corpului care a suferit colapsul formând-o. Acest lucru a devenit cunoscut prin maxima "O gaură neagră nu are păr". Teorema "fără păr" este de mare importanță practică, deoarece restrânge foarte mult tipurile posibile de gauri negre. Prin urmare; se pot elabora modele detaliate de obiecte care pot conține gaurile negre, și prezicerile modelelor se pot compara cu observațiile. Aceasta mai înseamnă că atunci când se formează o gaură neagră se pierde o cantitate foarte mare de informații privind corpul care a suferit colapsul, deoarece după aceea putem măsura numai masa și viteza de rotație a corpului. Semnificația acestui fapt se va vedea în următorul capitol.

Gaurile negre reprezintă unul din foarte puținele cazuri din istoria științei în care teoria a fost elaborată foarte detaliat ca un model matematic, înainte de a exista vreo dovadă experimentală a corectitudinii sale. Într-adevăr, acesta era principalul argument al celor care erau împotriva gaurilor negre: cum ar putea cineva să creadă în existența unor obiecte pentru care singura dovadă o constituie calculele bazate pe teoria dubioasă a relativității generalizate? Totuși, în 1963, Maarten Schmidt, un astronom de la Observatorul Palomar din California, a măsurat deplasarea spre roșu a unui obiect ca o stea slabă în direcția sursei de unde radio numită 3C273 (adică, sursa numărul 273 din al treilea catalog Cambridge de surse radio). El a descoperit că aceasta era prea mare pentru a fi cauzată de un câmp gravitațional: dacă ar fi fost o deplasare spre roșu gravitațională, obiectul ar fi trebuit să fie atât de masiv și atât de aproape de noi încât el ar fi perturbat orbitele planetelor din sistemul solar. Aceasta a sugerat că deplasarea spre roșu era cauzată de expansiunea universului, care, la rândul său, înseamnă că obiectul era la foarte mare distanță. Și pentru a fi vizibil de la o distanță așa de mare, obiectul trebuie să fie foarte strălucitor, cu alte cuvinte să emită o cantitate uriasă de energie. Singurul mecanism care s-ar putea crede că ar produce cantități așa de mari de energie pare a fi colapsul gravitațional nu numai al unei singure stele, ci al întregii regiuni centrale a unei galaxii. Au fost descoperite mai multe "obiecte cvasistelare" similare, sau quasari, toate cu deplasări mari spre roșu. Dar ele sunt toate prea departe și deci prea greu de observat pentru a furniza dovezi sigure pentru gaurile negre.

Un sprijin suplimentar pentru existența gaurilor negre a apărut în 1967 o dată cu descoperirea de către o studentă de la Cambridge, Jocelyn Bell, a obiectelor din spațiu care emiteau impulsuri regulate de unde radio. La început Bell și conducătorul său științific, Anthony Hewish, au crezut că poate au luat contact cu civilizații extraterestre din galaxie! Într-adevăr, la seminarul în care au anunțat descoperirea, îmi amintesc că au numit primele patru surse găsite LGM I-4, LGM însemnând Micii omuleți verzi" (Little Green Men). În cele din urmă însă ei și toți ceilalți au ajuns la concluzia, mai puțin romantică, după care aceste obiecte care au primit denumirea de pulsari erau de fapt stele neutronice rotative care emiteau impulsuri de unde radio, datorită unei interacții complicate între câmpurile lor magnetice și materia înconjurătoare. Aceasta a reprezentat o veste proastă pentru scriitorii de western-uri spațiale, dar foarte promițătoare pentru puținii dintre noi care credeau în acel timp în gaurile negre: a fost prima dovadă pozitivă că stelele neutronice

existau. O stea neutronica are o raza de circa saispzezece kilometri, numai de cateva ori mai mare decat raza critica la care o stea devine o gaura neagra. Daca o stea poate suferi un colaps spre o dimensiune atat de mica, se poate astepta ca si alte stele sa poata suferi un colaps spre o dimensiune si mai mica si sa devina gauri negre.

Cum am putea spera sa detectam o gaura neagra daca prin definitie ea nu emite nici o lumina? Ar fi ca si cum am cautat o pisica neagra intr-o pivnita intunecata. Din fericire, exista o cale. Asa cum arata John Michell in lucrarea sa de pionierat din 1783, o gaura neagra isi exercita forta gravitationala asupra obiectelor din apropiere. Astronomii au observat multe sisteme in care doua stele se deplaseaza pe orbite una in jurul celeilalte, atrase una spre cealalta de gravitatie. Ei au mai observat sisteme in care exista doar o stea vizibila care se deplaseaza pe orbita in jurul unui companion nevazut. Desigur, nu se poate conchide imediat ca acest companion este o gaura neagra: poate fi pur si simplu o stea care este prea slaba pentru a fi vazuta. Totusi, unele dintre aceste sisteme, ca acela numit Cygnus X-1 sunt, de asemenea, surse puternice de raze X. Cea mai buna explicatie pentru acest fenomen este ca materia de la suprafata stelei vizibile a fost aruncata in afara. Cand ea cade catre companionul nevazut, are o miscare in spirala (asa cum se scurge apa dintr-o baie) si devine foarte fierbinte, emitand raze X. Pentru ca acest mecanism sa lucreze, obiectul nevazut trebuie sa fie foarte mic, ca o pitica alba, stea neutronica sau gaura neagra. Din orbita observata a stelei vizibile se poate determina masa cea mai mica posibila a obiectului nevazut. In cazul lui Cygnus X-1, aceasta era de sase ori masa soarelui, care, conform rezultatului lui Chandrasekhar este prea mare pentru ca obiectul nevazut sa fie o pitica alba. El are, de asemenea, o masa prea mare pentru a fi o stea neutronic. Prin urmare, se pare ca trebuie sa fie o gaura neagra.

Exista si alte modele care explica Cygnus X-1, care nu includ o gaura neagra, dar ele sunt cam fortate. O gaura neagra pare a fi singura explicatie naturala a observatiilor. In ciuda acestui fapt eu am facut pariu cu Kip Thorne de la Institutul de Tehnologie din California ca, de fapt, Cygnus X-1 nu contine o gaura neagra! Aceasta este ca o polita de asigurare pentru mine. Am lucrat foarte mult la gaurile negre si totul ar fi fost o pierdere daca ar fi reiesit ca gaurile negre nu exista. Dar, in acel caz, as avea consolarea ca am castigat pariul, care mi-ar aduce un abonament pe patru ani la revista Private Eye. Daca gaurile negre exista, Kip va obtine un abonament pe un an la Penthouse. In 1975, cand am facut pariul, eram 80% siguri ca Cygnus era o gaura neagra. Acum as spune ca suntem 95% siguri, dar pariul nu s-a terminat inca. De asemenea, avem acum dovada existentei catorva gauri negre in sisteme ca Cygnus X-1 din galaxia noastra si din doua galaxii invecinate numite Norii lui Magellan. Totusi, numarul gaurilor negre este aproape sigur mult mai mare; in lunga istorie a universului, multe stele trebuie sa-si fi ars tot combustibilul nuclear si sa fi suferit un colaps. Numarul gaurilor negre poate fi mult mai mare chiar decat numarul stelelor vizibile, care reprezinta circa o suta de miliarde numai in galaxia noastra. Atractia gravitationala suplimentara a unui numar atat de mare de gauri negre ar putea explica de ce galaxia noastra se roteste cu viteza pe care o are: masa stelelor vizibile este insuficienta pentru a explica aceasta. Avem, de asemenea, unele dovezi ca in centrul galaxiei noastre exista o gaura neagra mult mai mare, cu o masa de circa o suta de mii de ori mai mare decat aceea a soarelui. Stelele din galaxie care se apropie prea mult de aceasta gaura neagra vor fi sfaramate de diferenta dintre forte gravitationale de pe fetele apropiata si indepartata. Ramasitele lor si gazul aruncat de alte stele vor cadea spre gaura neagra. Ca si in cazul lui Cygnus X-1, gazul se va deplasa pe o spirala spre interior si se va incalzi, desi nu asa de mult ca in acel caz. El nu va ajunge destul de fierbinte pentru a emite raze X, dar ar putea explica sursa foarte compacta de unde radio si raze infrarosii care se observa in centrul galactic.

Se crede ca in centrul quasarelor exista gauri negre similare, dar si mai mari, cu mase de sute de milioane de ori mai mari decat masa soarelui. Materia care cade intr-o astfel de gaura neagra supermasiva ar reprezenta singura sursa de putere destul de mare pentru a explica enorma cantitate de energie pe care o emit aceste obiecte. Deplasarea in spirala a materiei in gaura neagra ar face ca aceasta sa se roteasca in aceeasi directie, determinand crearea unui camp magnetic asemanator cu cel al pamantului. Particule cu energie foarte inalta ar fi generate langa gaura neagra de materia care cade inaintea. Campul magnetic ar fi atat de puternic incat ar putea focaliza aceste particule in jeturi aruncate spre exterior de-a lungul axei de rotatie a gaurii negre, adica in directiile polilor sai nord si sud. Astfel de jeturi sunt observate intr-adevar in mai multe galaxii si quasari.

Se poate considera, de asemenea, cazul in care ar putea exista gauri negre cu mase mult mai mici decat cea a soarelui. Aceste gauri negre nu pot fi formate prin colaps gravitational, deoarece masele lor sunt sub masa limita Chandrasekhar: stelele cu masa atat de scazuta se pot sustine singure contra fortei de gravitatie chiar atunci cand si-au epuizat combustibilul nuclear. Gaurile negre cu masa scazuta se puteau

forma numai daca materia era comprimata la densitati enorme de presiuni exterioare foarte mari. Aceste conditii s-ar putea produce intr-o bomba cu hidrogen foarte mare: fizicianul John Wheeler a calculat odata ca daca cineva ar lua toata apa grea din toate oceanele lumii, ar putea construi o bomba cu hidrogen care ar comprima materia in centru atat de mult incat s-ar crea o gaura neagra. (Desigur, nu ar mai ramane nimeni sa o observe!) O posibilitate mai practica este ca astfel de gauri negre cu masa mica s-ar fi putut forma la presiunile si temperaturile inalte ale universului foarte timpuriu. Gaurile negre s-ar fi format numai daca universul timpuriu nu ar fi fost neted si uniform, deoarece numai o regiune mica ce era mai densa decat media putea fi comprimata astfel pentru a forma o gaura neagra. Dar noi stim ca trebuie sa fi existat unele neregularitati, deoarece altfel materia din univers ar mai fi inca si acum distribuita perfect uniform, in loc de a fi grupata in stele si galaxii.

Faptul ca neregularitatile necesare pentru explicarea stelelor si galaxiilor au dus sau nu la formarea unui numar semnificativ de gauri negre "primordiale" depinde evident de detalii ale conditiilor din universul timpuriu. Astfel, daca am putea determina cat de multe gauri negre primordiale exista acum, am invata o multime despre etapele foarte timpurii ale universului. Gaurile negre primordiale cu mase mai mari decat un miliard de tone (masa unui munte mare) ar putea fi detectate numai prin influenta lor gravitacionala asupra celeilalte materii, vizibile, sau asupra expansiunii universului. Totusi, asa cum vom vedea in urmatorul capitol, in realitate, gaurile negre nu sunt deloc negre: ele stralucesc ca un corp fierbinte si cu cat sunt mai mici cu atat stralucesc mai mult. Astfel, paradoxal, rezulta ca gaurile negre mai mici pot fi mai usor detectate decat cele mari!