

Квантови черни дупки¹

Б. Кар, Ст. Джидингс

Откак преди около 80 години физиците изобретиха ускорителите на частици, те ги използват за такива екзотични цели като разбиване на атоми, преобразуване на химични елементи, получаване на антиматерия и създаване на частици, които преди това не са наблюдавани в природата. За щастие обаче, те скоро ще могат да приемат едно предизвикателство, което ще направи тези постижения да изглеждат банални. Ускорителите може да произведат най-мистериозните обекти във Вселената: черните дупки. Когато човек мисли за черна дупка, той обикновено си представя масивно чудовище, което е в състояние да поглъща не само космически кораби, но дори и цели звезди. Черните дупки, които би могло да се получат с ускорителите – вероятно не по-рано от 2007 г., когато ще заработи големият адронен колайдер (ЛНС) в ЦЕРН край Женева, са далечни братовчеди на подобни астрофизични бегемот. Те ще бъдат микроскопични, сравними по размери с елементарните частици. Те няма да могат да свалят звезди, да властват над галактики или да представляват заплаха за нашата планета, макар че в известен смисъл техните свойства биха били дори по-драматични. Заради квантовите ефекти те биха се изпарявали кратко време след своето раждане, карайки детекторите на частици да светят като коледни елхи. По този начин те биха могли да ни дадат указания за това как са преплетени заедно пространството и времето и дали съществуват невидими за нас други техни измерения.

В своята съвременна форма понятието черна дупка се появява като следствие от общата теория на относителността на Айнщайн. Тя предсказва, че ако веществото е остатъчно компресирано, гравитацията му става толкова силна, че нищо не може да напусне заетата от него пространствена област. Границата на тази област е хоризонтът на събитията на черната дупка: телата могат да падат в нея, но нищо не може да я напусне. В най-простия случай, когато пространството няма скрити измерения, или пък тези измерения са по-малки, отколкото дупката, нейният размер е право пропорционален на масата ѝ. Ако свиеете Слънцето така, че радиусът му да стане 3 километра, т. е. около четири милионни от сегашния му размер, то би станало черна дупка. За да сполети същата съдба и Земята, ще трябва да я свиеете, докато радиусът ѝ стане 9 милиметра, около милиардна част от сегашния ѝ размер. Следователно, колкото е по-малка дупката, толкова по-голяма степен на компресия се изисква за създаването ѝ. Плътността, до която трябва да се свие веществото е обратно пропорционална на квадрата от масата. За дупка с масата на Слънцето плътността е около 10^{19} kg/m^3 , което е повече от плътността на атомните ядра. Подобна плътност е приблизително най-високата, която може да се достигне чрез гравитационен колапс в днешната Вселена. Тяло, което е с по-малка маса от Слънцето, се съпротивлява на колапса, понеже то се стабилизира от квантовите сили на отблъскване, които действат между субатомните частици. Масите на най-леките кандидати за черни дупки, които наблюдаваме, са около шест пъти по-големи от масата на Слънцето.

Звездният колапс обаче не е единственият начин за образуване на черни дупки. В началото на 70-те години на 20. век Стивън Хокинг от Университета в Кеймбридж и един от нас (Кар) изследвахме механизма на създаване на черни дупки в ранната Вселена. Те се наричат “първични” черни дупки. С разширяването на Вселената средната плътност на веществото намалява; следователно в миналото плътността е била много по-голяма и през първите микросекунди след Големия взрив е надминавала равнището на плътността в атомните ядра. Познатите физични закони допускат плътности на веществото най-много до т. нар. Планкова стойност от 10^{97} kg/m^3 – плътността, при която гравитацията става толкова силна, че квантово-механичните флуктуации биха разрушили структурата на пространство-

¹ Съкр. превод от Scientific American.

времето. Подобна плътност би била достатъчна за раждане на черни дупки с размер от само 10^{-35} m (величина, известна като Планкова дължина) и маса от 10^{-8} kg (Планкова маса).

Според традиционното описание на гравитацията, това е възможно най-леката черна дупка. Тя е много по-масивна, но и много по-малка по размер от една елементарна частица. С намаляването на плътността на Вселената биха могли да се образуват все по-тежки първични черни дупки. Всяка, чиято маса е под 10^{12} kg, би била по-малка от протона, но над тази маса дупките биха били с големината на обикновените физични обекти. Онези от тях, които са образувани през епохата, когато плътността е била колкото плътността на атомните ядра, биха имали маса, сравнима със слънчевата и следователно биха били макроскопични.

Големите плътности в ранната Вселена са необходимо, но не и достатъчно условие за създаване на първични черни дупки. За да може една област да спре да се разширява и да колапсира, плътността ѝ би трябвало да бъде по-голяма от средната, така че за образуването на черни дупки са необходими също така флуктуации на плътността. Астрономите знаят, че подобни флуктуации са съществували, поне в големи мащаби, тъй като в противния случай структури като галактиките и куповете от галактики никога не биха възникнали. За да се образуват първични черни дупки, тези флуктуации би трябвало да бъдат по-силни в малки мащаби, отколкото в големи мащаби, което е възможно, но не и неизбежно. Дори в отсъствие на флуктуации, дупките биха могли да се образуват спонтанно по време на различните космологични фазови преходи – например, когато Вселената приключва своя ранен етап на ускорено разширение, познат като инфлация, или през епохата на ядрената плътност, когато такива частици като протоните кондензират от “супата”, образувана от съставлящите ги кварки. По същество, космолозите могат да получат важни ограничения върху моделите на ранната Вселена от факта, че първичните черни дупки не съдържат твърде голяма част от материята.

Осъзнаването на факта, че черните дупки могат да бъдат малки, подтикна Хокинг да разгледа възможните квантови ефекти и през 1974 г. той стигна до своето прочуто заключение, че черните дупки не само поглъщат частици, но могат и да ги излъчват. Той предсказа, че една дупка излъчва топлинно подобно на разгорени въглища, с температура, обратно пропорционална на нейната маса. За дупка, чиято маса е като слънчевата, температурата е от порядъка на милионна част от келвина, което е абсолютно пренебрежимо в днешната Вселена. Но за една черна дупка с маса 10^{12} kg, колкото е масата на една планина например, тази температура е 10^{12} келвина – достатъчна за излъчване както на безмасови частици, подобни на фотоните, така и на масивни частици като електроните и позитроните.

Тъй като излъчването носи енергия, тенденцията е масата на дупката да намалява. Така черната дупка се оказва във висша степен нестабилна. Заедно със свиването ѝ тя става все по-гореща, излъчва частици с все по-големи енергии и се свива все по-бързо и по-бързо. Когато масата на дупката намалее до примерно 10^6 kg, играта приключва: за секунди тя експлодира и освобождава енергия, колкото милион-мегатонна ядрена бомба. Общото време, за което една черна дупка се изпарява, е пропорционално на третата степен от нейната първоначална маса. За дупка с маса, равна на масата на Слънцето, времето на живот е ненаблюдаемо дълго – 10^{64} години. За дупка с маса 10^{12} kg това време е 10^{10} години – приблизително колкото е възрастта на Вселената. Следователно, всяка първична черна дупка с подобна маса би приключвала изпарението си и би избухвала тъкмо сега. По-малките черни дупки трябва да са се изпарили в предишните космологични епохи.

Работата на Хокинг представлява изключителен концептуален напредък, тъй като свързва три преди това коренно различни области от физиката: общата теория на относителността (ОТО), квантовата теория и термодинамиката. Същевременно тя е също стъпка към създаване на пълна квантова теория на гравитацията. Дори първичните черни дупки и никога да не са се образували, мисълта за тях доведе до забележителни физични

прозрения. По такъв начин се оказва, че може да бъде полезно изучаването и на нещо, което не е съществувало.

В частност, откритието на Хокинг разкри един фундаментален парадокс, който показва ясно защо е толкова трудно да се съгласуват ОТО и квантовата теория. Според ОТО информацията за онова, което пада върху черната дупка, е загубена завинаги. Ако дупката обаче се изпарява, какво става с информацията, която се съдържа в нея? Хокинг прави предположението, че черната дупка се изпарява напълно, унищожавайки информацията – в противоречие с догмите на квантовата механика. Унищожаването на информацията противоречи на закона за запазване на енергията, което прави този сценарий неприемлив. Една алтернатива – че след черната дупка остават някакви остатъци, е също толкова неприятна. За да може в тези остатъци да бъде закодирана цялата информация, съдържаща се в онова, което е паднало в черната дупка, те би трябвало да бъдат безкраен брой различни типове. Физичните закони предсказват, че вероятността за създаване на една частица е пропорционална на броя на типовете от тази частица. Следователно остатъците от черната дупка би трябвало да възникват с безкрайно голяма вероятност; дори такъв всекидневен процес като използването на микровълновата печка би трябвало да ги генерира. При това положение природата би била катастрофално нестабилна. Третата възможност е да се наруши локалността – т. е. представата, че, пространствено разделени събития могат да си влияят, само ако светлината има достатъчно време, за да стигне от едната точка до другата. Тази главоблъсканица представлява предизвикателство за теоретичите и до ден днешен.

Напредъкът във физиката обикновено изисква някакво упътване от страна на опита, поради което въпросите, повдигнати от микроскопичните черни дупки мотивира усилията за тяхното експериментално търсене. Една възможност би било астрономите да открият първични черни дупки с начална маса от 10^{12} kg, които избухват понастоящем. Голямата част от масата на тези дупки би се превърнала в гама лъчи. През 1976 г. Хокинг и Дан Пейдж от Калтех схванаха, че наблюденията на гама фона поставят строги ограничения за горната граница на броя на тези дупки. Те не биха могли например да представляват значителна част от тъмната материя във Вселената и техните експлозии рядко биха протичали достатъчно близо до нас, за да можем да ги наблюдаваме. В средата на 90-те години на 20. век обаче Дейвид Клайн от университета на Калифорния в Лос Анджелис и колегите му предположиха, че най-кратките взривове от гама лъчи може да се дължат на експлозии на първични черни дупки. Въпреки че по-дълготрайните взривове по начало се свързват с експлодиращи или сливащи се звезди, кратковременните събития може да имат друго обяснение. Бъдещите наблюдения ще дадат отговор на въпроса, но възможността чрез астрономически наблюдения да се изследват крайните стадии от изпарението на черните дупки си остава все още неосъществена.

Една още по-възбуждаща възможност е получаването на черни дупки с помощта на ускорителите на частици. Когато става дума за получаване на снопове с големи плътности, никой ускорител не може да надмине Големия адронен колайдер (LHC) и Теватрона в Националната лаборатория Ферми край Чикаго. Тези ускорители придават на субатомните частици (например протони) скорости, извънредно близки до скоростта на светлината във вакуум. При тези условия частиците притежават колосална кинетична енергия. В LHC например енергията на един протон ще достига примерно 7 TeV. В съответствие с прочутата формула на Айнщайн тази енергия е еквивалентна на маса 10^{-23} kg, т. е. 7000 пъти масата на самия протон. Когато се сблъскат две подобни частици, тяхната енергия се концентрира в нищожно малка пространствена област. Може да се предположи, че макар и рядко, удрящите се частици ще се окажат достатъчно близо, за да образуват черна дупка.

Всъщност този аргумент има следния проблем: една маса от 10^{-23} kg е заплашително под Планковата стойност от 10^{-8} kg, която конвенционалната теория на гравитацията дава за възможно най-леката черна дупка. Тази долна граница е следствие от принципа за

неопределеност в квантовата механика. Поради това, че частиците се държат и като вълни, те са размазани в област, чиито размери намаляват с нарастването на енергията – при енергиите на ЛНС около 10^{-19} m. Следователно това е най-малката област, в която може да се локализира енергията на частицата. Това позволява да се достигне плътност 10^{34} kg/m³, която е огромна, но все пак не е достатъчно голяма за образуване на дупка. За да бъде една частица едновременно и с достатъчно голяма енергия, и достатъчно компактна, за да образува черна дупка, тя трябва да притежава Планковата енергия, която е 10^{15} пъти по-голяма от енергиите на ЛНС. Въпреки че ускорителите биха могли да създадат обекти, математически свързани с черните дупки (а според някои теоретици те вече са го направили), самите дупки изглеждат недостижими.

През последното десетилетие обаче физиците осъзнаха, че стандартните оценки за необходимостта от Планкова плътност би могло да се окажат твърде високи. Теорията на струните, един от водещите съперници на квантовата теория на гравитацията, предсказва, че пространството притежава повече измерения от познатите ни три. За разлика от другите сили, гравитацията би трябвало да се разпространява и в тези измерения и един резултат от това е, че тя трябва да расте изключително бързо при малките разстояния. В тримерното пространство гравитационната сила нараства четири пъти, когато намалите разстоянието между частиците два пъти. При същата промяна на разстоянието в деветмерно пространство обаче тя би станала 256 пъти по-силна. Този ефект би могъл да бъде много съществен, ако допълнителните измерения на пространството са достатъчно големи и тези въпроси бяха изследвани широко през последните пет години. Съществуват също така други конфигурации от допълнителни измерения, известни като изкривени компактификации, които имат същия усилващ гравитацията ефект и ако теорията на струните е коректна, може да се окаже по-вероятно да се реализират именно те.

Увеличена сила на гравитацията означава, че може би истинският мащаб на енергиите, при който става сблъсък между законите на гравитацията и квантовата механика (и при които може да се правят черни дупки) е много по-ниско от традиционно възприетата стойност. Въпреки че за сега няма експериментална поддръжка на тази възможност, идеята хвърля светлина върху много теоретични загадки. И ако тя е вярна, плътността, необходима за създаването на черна дупка би могла да бъде достижима за ЛНС.

Теоретичното изследване на възможността за създаване на черни дупки в процесите на разсейване при високи енергии води началото си от работата на Роджър Пенроуз от университета в Оксфорд в средата на 70-те години на миналия век и на Питър Дийт и Филип Пейн от Кеймбридж в началото на 90-те. Разкритата възможност за съществуване на големи допълнителни измерения вдъхна нов живот на тези изследвания. Грубите оценки показват, че при най-оптимистичните сценарии за най-ниската стойност на Планковия мащаб черни дупки би могло да се създават по една всяка секунда. Физиците наричат ускорителите, които произвеждат частици с подобна скорост “фабрики”, така че ЛНС би могъл да се окаже фабрика за черни дупки.

Изпаряването на тези дупки би оставила много ясен отпечатък в детекторите. При типичните удари между ускорените частици се получава умерен брой високоенергетични частици, но разпадането на една черна дупка е нещо различно. Според работата на Хокинг, тя излъчва голям брой частици във всички посоки и с много високи енергии. Продуктите от разпада включват всички видове частици, които се срещат в природата. Оттогава няколко групи проведоха изследвания с нарастваща точност, за да установят белезите, които биха съпътствали получаването на черни дупки.

На някои перспективата да се правят черни дупки на Земята може да изглежда като глупост. От къде бихме могли да бъдем сигурни, че те ще се разпаднат по безопасен начин, както предсказва Хокинг, вместо да продължат да нарастват, поглъщайки евентуално цялата планета? На пръв поглед това изглежда сериозно безпокойство, особено ако някои детайли в

първоначалните аргументи на Хокинг се окажат некоректни – специално твърдението, че в черните дупки информацията се унищожават. Оказва се обаче, че от общи квантовомеханични съображения следва, че микроскопичните черни дупки не могат да бъдат стабилни и следователно са безопасни. Концентрации на енергия, каквито наблюдаваме в елементарните частици, са стабилни само ако законите за запазване забраняват тяхното разпадане. Примерите в това отношение включват запазването на електричния заряд и на барионното число (което, докато не се окаже нарушено, гарантира стабилността на протоните). Не съществува подобен закон, който да гарантира стабилността на една малка черна дупка. В квантовата теория всичко, което не е изрично забранено, задължително се случва, така че малките черни дупки ще се разпаднат бързо, в съответствие с втория закон на термодинамиката. Наистина, едно експериментално съображение потвърждава, че фабриките за черни дупки няма да представляват опасност. Удари при високите енергии, като тези при LHC, вече са ставали – например в ранната Вселена и дори сега, когато високоенергетични космични лъчи навлизат в атмосферата. Така, ако процесите при енергиите на LHC могат да доведат до създаване на черни дупки, природата вече отдавна ги е създавала безопасно точно над главите ни. Оценка показват, че най-високо енергетичните космични лъчи – протони или по-тежки атомни ядра с енергии около 10^9 TeV, биха могли да създават в атмосферата до 100 черни дупки на година. Освен това според други теоретици ударите на космичните неутрини в атмосферата биха могли да бъдат даже още по-продуктивни. Ако това е действително така, съвременните обсерватории за космични лъчи биха могли да регистрират до няколко дупки годишно. Тези наблюдения обаче няма да премахнат необходимостта от експериментите на ускорителите, които биха могли да създават дупки по-бързо, в по-големи количества и при условия, които може да се контролират.

Създаването на черни дупки би открило изцяло нова област във физиката. Самото тяхно наличие би било доказателство за съществуването на скрити измерения на пространството и чрез наблюдаване на техните свойства физиците ще могат да започнат изучаване на свойствата на тези измерения. Така например с увеличаване на масата на произведените от ускорителите черни дупки, последните биха се пъхали все по-далеч в допълнителните измерения и биха станали сравними по размер с едно или няколко от тях, с което би се постигнала значителна промяна на зависимостта на температурата на дупката от нейната маса. Аналогично, ако една черна дупка стане достатъчно голяма, за да пресече една паралелна тримерна вселена в допълнителните измерения, нейните разпадни свойства биха се променили със скок.

Получаването на черни дупки в ускорителите би сложило също така край на един от историческите въпроси, пред които е изправено човечеството: разбирането на материята в още по-малки мащаби. През последното столетие физиците преместиха границите на най-малките обекти – от пращинки към атоми, след това към протони и неутрони и накрая към кварки. Ако те успеят да създадат черни дупки, те ще достигнат Планковия мащаб, който се смята за най-късото имащо смисъл разстояние, граничното разстояние, под което вече понятията пространство и дължина вероятно престават да съществуват. Всеки опит чрез удари на частици при още по-високи енергии да се изследва възможното съществуване на по-къси разстояния, неизбежно би довел до създаване на черни дупки. Ударите при високи енергии вместо да раздробяват веществото на все по-малки части, ще доведат просто до създаване на все по-големи черни дупки. По такъв начин появата на черни дупки ще затвори една област на науката. На нейно място обаче ще се появи нова област – онази, в която се изучава “географията” на допълнителните пространствени измерения.