

Гравитация¹ от Джордж Гамов

Алберт Айнщайн показа, че гравитацията може да се разглежда като геометрично свойство на пространство-времето. Неговата по-нататъшна надежда за свързване на гравитацията и електромагнетизма е все още неосъществена.

Във времената, когато цивилизованите хора вярвали, че Земята е плоска, те не са имали причина да разсъждават за някаква гравитация. Имало е *горе* и *долу*. Всички тела по естествен начин са се стремили надолу, да падат, и никому не минавало и през ум да пита *защо*. Представата за посоките абсолютно нагоре и абсолютно надолу се запазват и през Средновековието, когато все още се търсят доказателства за това, че Земята може би не е кълбовидна.

Първият светъл лъч, който прорязва мъглата на схоластичните идеи относно падането на телата, дължим на работите на Галилео Галилей. Доколкото свободното падане е твърде бързо, за да се поддаде по онова време на преки измервания, Галилео решава да го забави и да изучи движението на тела по наклонена равнина. Той се аргументира – и по негово време това е нов тип аргументация – че доколкото кълбо, лежащо върху хоризонтална равнина въобще не се движи, и доколкото кълбо, падащо успоредно на вертикална равнина се движи така, както ако равнината я няма, върху наклонена равнина едно кълбо би се търкаляло с някаква междинна скорост, зависеща от ъгъла на наклона. Търкаляйки топки по наклонени под различен ъгъл равнини, той наблюдава бързината на движение и изминатите за различни времеви интервали пътища, като измерва времето с воден часовник. Опитите му показват, че при всеки фиксиран наклон скоростта расте правопропорционално на времето (измервано от момента на пускане на топката), а изминатият път – правопропорционално на квадрата на това време. Галилео установява също така, че масивна желязна топка и много по-леката от него дървена топка се търкалят една до друга, ако се пуснат едновременно от еднаква височина и по една и съща наклонена равнина.

Като друг начин за забавяне на свободното падане той използва прости махала – тежести, окачени на тънки нишки. В случая стръмнината на дъгата, по която се движи тежестта, се контролира чрез промяна на дължината на нишката. Оказва се, че махала с еднаква дължина се люлеят с един и същ период, даже когато окачените на тях тежести са различни – резултат, който се съгласува с изводите от опитите с наклонени равнини. От всички тези наблюдения Галилео стига до заключението, че свободното падане на всички тела, леки или тежки, също² е еднакво. Тази идея пряко противоречи на възгледа на господстващата тогава философска школа на Аристотел, съгласно с който възглед тежките тела падат по-бързо от леките. Според прочутата легенда, която може да е, но може и да не е вярна, Галилео се качил на наклонената кула в Пиза и пуснал една лека и една тежка топка, които пред втрещените погледи на присъстващите там съвременни философи достигнали земята едновременно.

¹ Джордж Гамов е не само голям физик, но и голям майстор–популяризатор на физиката. През 1961 г. той написва тази статия за мартенския брой на списание *Scientific American*. Очевидно нейните достойнства са причина списанието да я публикува повторно сега, точно 50 години след първата ѝ поява. Въпреки че редица приведени в статията сведения (напр. за експерименталните проверки на общата теория на относителността, за търсенето на гравитационни вълни, за видовете взаимодействия, за масата на неутриното и пр.) за изтеклия половин век са остарели, статията запазва блестящите си качества като популяризация на идеите на Айнщайн относно общата теория на относителността. (Бел. прев.)

² Също – в смисъл както по наклонена равнина, така и при махалата. (Бел. прев.)

Нютоновият закон за гравитацията

Тези изследвания поставят основите на науката механика. Нейното здание бе сътворено от Исак Нютон, който се ражда в годината на смъртта на Галилей. Със своите закони за движение Нютон въвежда понятията *сила* и *инерчна маса*. Когато на телата е приложена сила, те променят или големината, или посоката на скоростта си, или – и двете. Тяхната инерчна маса се противопоставя на тези промени. Според Нютон, бързината на промяната на скоростта (ускорението) на едно тяло е право пропорционално на силата, която му действа, и е обратно пропорционално на неговата маса. Удвояването на силата удвоява ускорението; удвояването на масата намалява два пъти ускорението; ако се удвоят и силата, и масата, ускорението не се променя. В светлината на този закон заключението на Галилей относно свободното падане предполага един факт, който обикновено се приема за очевиден, но който всъщност е много странен, а именно: силата на тежестта на едно тяло (т.е. гравитационната сила, с която го привлича Земята) е строго пропорционална на неговата инерчна маса. В противен случай една желязна и една дървена топка с еднакви размери няма да падат еднакво бързо. Ако при падане двете тела имат еднакви ускорения, противопоставящата се на промяната на скоростта инерчна маса на желязната топка трябва да е точно толкова пъти по-голяма от инерчната маса на дървената топка, колкото пъти действащата надолу сила върху желязната топка е по-голяма от силата върху дървената топка. Тази пропорционалност далеч не е тривиална; всъщност, тя е валидна само за гравитацията, но не и за другите познати сили като например електричните и магнитните. Следователно, докато един електрон и един протон ще падат с еднакво ускорение в гравитационно поле, когато бъдат поставени в електрично поле, електронът ще се ускорява 1836 пъти по-бързо.

От своя анализ за падането на топки (или ябълки) към земята Нютон преминава към разглеждане на гравитацията в по-широк смисъл. Пътят на неговите мисли се демонстрира от едно много интересно обсъждане в неговите *Принципи*. Да предположим, казва той, че изстреляме един снаряд в хоризонтално направление от върха на планина, която се издига над атмосферата. Снарядът ще се движи по закривена траектория и ще падне на земята на известно разстояние от основите на планината. Колкото по-голяма е началната скорост на снаряда, толкова по-далеч от планината ще се приземява той. При достатъчно голяма начална скорост той ще стигне точката, диаметрално противоположна на планината; при още по-голяма скорост той никога няма да стигне земната повърхност, а ще продължи да обикаля около Земята подобно на малка Луна. Ако, казва Нютон, е възможно по този начин да се направи един изкуствен спътник, защо да не предположим, че движението на истинската Луна също представлява свободно падане? И ако Луната обикаля около Земята поради земното гравитационно привличане, не е ли логично да приемем, че и самата Земя се удържа върху орбитата си около Слънцето от слънчевата гравитация? Тогава не е ли това също вярно за всички други планети и техните спътници? Така се заражда идеята за всеобщото привличане, която има фундаментална важност и според която всички тела във Вселената се привличат едно друго със сили, определени от техните маси и взаимни разстояния.

За да установи точната връзка между силата, масите и разстоянието, Нютон тръгва от предположението, че щом силата между Земята и всяко тяло около нейната повърхност е пропорционална на инерчната маса на тялото, силата би трябвало да бъде пропорционална и на инерчната маса на Земята. Това веднага обяснява защо гравитационното привличане между тела с малки маси – например между две ябълки – никога не е наблюдавано. То е твърде слабо. Не обаче, докато половин век след смъртта на

Нютон друг британски гений, Хенри Кавендиш, не демонстрира експериментално съществуването на подобна сила.

След като постулира, че гравитационното привличане между две тела е пропорционално на произведението от техните маси, Нютон изследва зависимостта от разстоянието. Той сравнява силата, необходима да удържи Луната върху нейната орбита на разстояние 60 земни радиуса, със силата, действаща върху една ябълка, намираща се на разстояние само един земен радиус от центъра на Земята. Важното в случая е да се осъзнае, че огромната разлика между масите на двете тела³ не влияе върху валидността на сравнението. Фактически, ако поставим една ябълка на разстояние, равно на разстоянието до Луната, и ѝ придадем скорост, равна на лунната скорост, тя ще се движи около Земята по същия начин, както и Луната. Аналогично, ако едно дърво роди ябълка, чиято маса е колкото масата на Луната, когато се откъсне от клона, тя би падала толкова бързо, колкото и обикновената ябълка. Проведеният от Нютон математичен анализ показва, че гравитационната сила намалява с квадрата от разстоянието между привличащите се тела.

Сега вече Нютон може да запише формулата за гравитационната сила:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d^2},$$

където G е коефициент на пропорционалност – *гравитационната константа*. Тя е много малко число – ако масите се измерват в грамове, а разстоянието в сантиметри, G е приблизително равна на $0,00000066^4$. Това означава, че две теглилки с маси от по един грам, поставени на разстояние един сантиметър една от друга, ще се привличат взаимно със сила, малко по-голяма от шест стотици милионни от дина⁵, или около шест сто милиардни от теглото на един грам.

Чрез комбинация от закона за гравитацията и своите закони за движение Нютон е в състояние да изведе математически законите за движенията на планетите, открити от Йохан Кеплер. В последвалото забележителна епоха Нютон и последователите му обясняват движенията на небесните тела, включително и до най-малките детайли. Но природата на гравитационното взаимодействие и в частност причината за мистериозната пропорционалност между гравитационната маса и инерчната маса, остава напълно скрита за повече от 200 години.

Айнщайновият закон за гравитацията

Едва през 1914 г. Алберт Айнщайн повдигна завесата. Неговите идеи бяха продължение на развитата от него десетилетие по-рано специална теория на относителността. Тази теория почива върху постулата, че не е възможно чрез опити в едно затворена кабина да се отговори на въпроса дали кабината е неподвижна, или се движи праволинейно и равномерно. Следователно човек, поставен на мястото на автора, който пише тези редове в каюта на плаващия в спокойни води лайнер *Куин Елизабет*, не може да направи експеримент – механичен, оптичен или от какъвто и да е вид, който да му покаже дали наистина корабът се движи, или все още е в пристанището. Ако обаче се появи буря, положението се изменя коренно, отклоненията от равномерното движение стават твърде очевидни.

За да разглежда случая с неравномерните движения, Айнщайн си представя една лаборатория в космически кораб, който се намира далеч от всякакви големи гравитационни маси. Ако корабът е неподвижен, или се движи равномерно и праволинейно

³ Луната и ябълката. (Бел. прев.)

⁴ По времето, когато Гамов пише статията, използването на SI все още не е задължително. (Бел. прев.)

⁵ Дина е единица за сила в системата сантиметър-грам-секунда (CGS). Една дина е силата, която на тяло с маса 1 грам придава ускорение 1 cm/s^2 . (Бел. прев.)

спрямо далечните звезди, неговият екипаж и всички техни инструменти, които не са прикрепени към стените, ще плават свободно във вътрешността. Представата за *горе* и *долу* губи смисъл. Щом обаче ракетните двигатели се задействат и корабът получи ускорение, инструментите и хората ще се притиснат към стената, противоположна на посоката на ускорението. Тази стена ще стане под, противоположната стена ще стане таван и хората ще могат да стоят прави и да се движат наоколо по същия начин, както правят това по земята. Фактически, ако ускорението на кораба е равно на земното ускорение върху земната повърхност, екипажът може да повярва, че корабът все още стои на стартовата площадка.

Да предположим, че един от пътниците пусне едновременно две топки –желязна и дървена, които държи в ръцете си една до друга. Това, което “наистина” се случва, може да бъде описано така: докато пътникът държи топките в ръцете си, те участват в ускорително движение заедно с него и с целия кораб. Когато ги освободи, те вече не се ускоряват от ракетните двигатели. Сега топките ще се движат една до друга, всяка от тях със скоростта на кораба в момента на освобождаването им. Самият кораб обаче ще продължава да увеличава скоростта си, “подът” му бързо ще застигне двете сфери и ще ги удари едновременно.

За наблюдателя от кораба същият експеримент изглежда по друг начин. Той вижда, че топките падат и удрят “пода” едновременно. Спомняйки си опита на Галилео от наклонената кула в Пиза, наблюдателят ще бъде принуден да заключи, че неговата космическа лаборатория се намира в гравитационно поле.

И двете описания на наблюдаваното явление са правилни и еквивалентността на двете гледни точки е основата на Айнщайновата релятивистична теория на гравитацията. Този така наречен принцип на еквивалентност между наблюденията, проведени в една ускорено движеща се лаборатория и в едно “реално” гравитационно поле би било, обаче, тривиално, ако се отнасяше само за механичните явления. Дълбокото прозрение на Айнщайн е, че този принцип е всеобщ, т.е. – валиден също така за оптичните и другите електромагнитни явления.

Представете си светлинен лъч, който се разпространява в “хоризонтално” направление в ускорено движещата се космическа лаборатория. Неговият път може да се онагледни с помощта на набор вертикални флуоресциращи стъклени пластинки, разположени на равни разстояния една от друга. Отново това, което се случва е, че лъчът се разпространява праволинейно с постоянна скорост, докато стъклените пластинки се движат през него с постоянно нарастваща скорост. Лъчът изминава разстоянието между всеки две пластинки за едно и също време, но пластинките се отместват все по-далеч през време на всеки последващ интервал време. Следователно картината на флуоресциращите точки показва, че подът се приближава към лъча с нарастваща бързина. Ако наблюдателят от кораба прекара линия през светещите точки, тя ще му изглежда като парабола, огъната към пода. И доколкото той разглежда явленията, дължащи се на ускорението, като причинени от гравитация, той ще заключи, че светлинният лъч се закривява, когато се разпространява в гравитационно поле.

По такъв начин, заключава Айнщайн, ако принципът на еквивалентността е валиден за цялата физика, светлинните лъчи от далечните звезди, чиито път към Земята минава близо до Слънцето, трябва да се закривят към него. Това предсказание бе потвърдено по блестящ начин през 1919 г. от група британски астрономи, наблюдаващи от Африка пълно слънчево затъмнение. Със закриването на слънчевата светлина от лунния диск, звездите, намиращи се около слънчевия диск се виждали отместени с около 1,75 дъгови секунди встрани от Слънцето.

Релативистичната въртележка

Нека сега разгледаме друг тип ускорително движение – равномерното въртене. (Тяло, движещо се с постоянна по големина скорост по окръжност, се движи ускорително, защото е принудено да променя посоката на скоростта си.) Представете си сега въртележка – дискова платформа, около която има завеса, така че намиращите се върху въртележката хора не могат, поглеждайки околните предмети, да разберат, че тя се върти. Ако дискът се върти, наблюдателите ще чувстват действието на центробежната сила, която ги отблъсква към неговия ръб. Топка, поставена върху диска, ще се търкулне от центъра навън. Центробежната сила, действаща на всяко тяло върху въртележката, е пропорционална на неговата инерчна маса, така че в случая отново ефектът от ускорителното движение може да се разглежда като равностоеен на действието на гравитационно поле. Това обаче би било много специално гравитационно поле, съвсем различно от полето върху земната повърхност или върху което и да е друго кълбовидно тяло. Силата е насочена *навън* от центъра на системата, а не *към* него; и вместо да намалява с квадрата на разстоянието до центъра, тя расте право пропорционално на това разстояние. Нещо повече, полето притежава цилиндрична симетрия около оста на въртене, а не сферична симетрия около централната точка. Въпреки това, принципът на еквивалентността е в сила и полето може да бъде разглеждано като предизвикано от гравитационна маса, разпределена на големи разстояния навсякъде около оста на симетрия.

Как би се разпространявала светлината в такова поле? Да разгледаме източник на светлина, който изпраща лъчи във всички посоки и се намира в т. *A* от периферията на въртящ се диск. Нека наблюдаваме източника от т. *B*, която също се намира върху края на диска. Според основния закон на оптиката, светлината винаги се разпространява по най-краткия път. Кой, обаче, е най-краткият път между т. *A* и т. *B*? За измерване на разстоянието между двете точки наблюдателят използва един старомоден, но винаги безопасен начин: последователно наставя една до друга пръчки с дължини от по един метър по линията, съединяваща точките. Когато наблюдаваме експеримента отвън, ние си спомняме специалната теория на относителността, която учи, че движещите се пръчки скъсяват дължината си в посока на движението. Следователно установяваме, че ако експериментаторът нанася пръчките по протежение на “истинската” отсечка, свързваща т. *A* и т. *B*, те ще се скъсяват и за съединяването на двете точки ще са необходими по-голям брой пръчки, отколкото ако въртележката е неподвижна. Тук обаче възниква интересна гледна точка. Колкото по-близо до центъра на въртележката е една пръчка, толкова по-малка е линейната ѝ скорост и следователно – толкова по-малко е релативистичното ѝ скъсяване. Чрез закривяване на линията от еднометрови пръчки по посока към центъра, експериментаторът ще намали броя на пръчките, които са му необходими, за да стигне от т. *A* до т. *B*. Въпреки че “истинското” разстояние в този случай е малко по-дълго, това увеличение е компенсирано с излишък от намалението на дължината на всяка пръчка. Един светлинен лъч, следващ този по-кратък път, който в началото си е извит към центъра, а после се закривява навън, може да се разглежда като пречупен от въображаемото гравитационно поле, което е насочено радиално навън.

Преди да напуснем въртележката, нека направим още един експеримент. Върху платформата са поставени два еднакви часовника, единият близо до центъра, другият на ръба ѝ. Както в случая с пръчките, отново специалната теория на относителността предсказва разлика в тяхното поведение: външният часовник се движи по-бързо от вътрешния, защото освен скъсяване на дължините, движението предизвиква и забавяне на хода на часовниците. Следователно външният часовник ще върви по-бавно в сравнение с вътрешния. Сега наблюдателят, който интерпретира ефектите от ускорението като предизвикани от гравитационно поле, ще заключи, че часовникът, поставен в по-силно

гравитационно поле (т.е. в посоката, в която действа гравитационната сила) върви по-бавно.

Въпреки че не можем да се впускаме в детайли, доводите на Айнщайн показват, че същият ефект се очаква и в нормално гравитационно поле, като това на Земята. Тук полето е насочено надолу, така че на морското равнище часовникът върви по-бавно, отколкото на върха на планината. Забавянето се отнася еднакво до всички физични, химични и биологични процеси, така че една машинописка, която работи на първия етаж на Емпайър стейт билдинг⁶ ще старее по-бавно от близначката си, работеща на най-горния етаж. По-силните полета предизвикват по-голямо забавяне. Часовник на повърхността на Слънцето би вървял с 0,0001 процента по-бавно, отколкото на Земята.

Очевидно е, че ние не можем да поставим часовник на Слънцето, но можем да наблюдаваме бързината на трептенията в атомите, които са източник на различните линии в слънчевия спектър. Ако тези естествени часовници отмерват времето по-бавно, излъчената от тях светлина трябва да бъде отместена към по-ниските честоти, към червения край на спектъра. Това “гравитационно червено отместване” бе предсказано от Айнщайн. То наистина е наблюдавано за линиите в слънчевия спектър, но е толкова малко, че е почти на границата на точността, с която се правят наблюденията. Спектрите на много по-плътните звезди от типа бели джуджета, за които червеното отместване би трябвало да бъде 40 пъти по-голямо от това при Слънцето, са в много добро съгласие с теорията.

Астрономичното доказателство не е толкова убедително, колкото би могъл да бъде един експеримент, проведен в земна лаборатория. До преди няколко години обаче изглеждаше безнадеждно да се измери предсказаната нищожната разлика между часовници, намиращи се на различна височина в земното гравитационно поле. След това обаче Р. Л. Мьосбауер от Университета в Мюнхен откри начин за получаване на гама лъчи с много точно фиксирана честота и да измерва нищожно малки промени на тази честота⁷. Използвайки новата възможност, няколко изследователи показаха, че разликата в хода на два ядрени “часовника”, разположени в земното гравитационно поле с разлика във височините само няколко десетки метра, е измерима величина. В границите на експерименталната грешка измерената разлика се оказа точно колкото бе предсказана от Айнщайн. Ако е необходима и друга проверка на теорията, тя би могла да се получи като се сравнят показанията на часовник, намиращ се в изкуствен спътник на Земята с часовник, намиращ се на земната повърхност.

И така, виждаме, че в гравитационно поле часовниците вървят по-бавно, светлинните лъчи се закривяват в направление на полето, а правата линия не е най-краткият път между две точки. Обаче как бихме могли да дефинираме “права линия”, освен като траекторията на светлината във вакуум, или като най-краткият път между две точки? Идеята на Айнщайн е да се върнем към дефиницията. Вместо да казваме, че светлинните лъчи и най-кратките пътища са изкривени, той предложи да смятаме, че самото пространство (по-точно – пространство–времето) е изкривено. Трудно е да си представим криво тримерно пространство, да не говорим за изкривено четиримерно пространство–време, но определена идея какво означава това може да се получи от аналогията с двумерните повърхности. Евклидовата геометрия, която изучаваме в училище, се занимава с фигурите, които може да се начертаят върху равнина. Ако фигурите се начертаят върху криви повърхности, например върху сфера или върху повърхност с формата на седло, много от теоремите на Евклид няма да са валидни.

В частност, например, сумата от ъглите в един равнинен триъгълник е 180° . В триъгълник, начертан върху сфера тази сума е по-голяма от 180° , а в триъгълник, на-

⁶ Зданието в Ню Йорк, което някога със своите 320 метра бе най-високата постройка в света. (Бел. прев.)

⁷ Вж. "The Mössbauer Effect," от Серджо Де Бенедети; SCIENTIFIC AMERICAN, April, 1960.

чертан върху седловидна повърхност – по-малка от 180° . Наистина, от гледна точка на тримерното пространство страните на триъгълниците, начертани върху сфера или върху седловидна повърхност не са прави, но те са най-кратките пътища между точките, ако сме принудени да оставаме върху съответната повърхност. Математиците наричат подобни линии геодезични линии.

В тримерното пространство една геодезична линия по определение представлява траекторията, по която би се разпространявала светлината. Да разгледаме триъгълник, определен от три геодезични линии. Ако сборът от ъглите му е равен на 180° , казваме, че пространството е плоско. Ако сборът е повече от 180° , казваме, че пространството е подобно на сфера, или – че има положителна кривина; когато сборът е по-малък от 180° , казваме, че пространството е седловидно, или – че кривината му е отрицателна. Тъй като закривяването на светлината е към Слънцето, астрономи, разположени върху Земята, Марс и Венера, биха измерили сума на ъглите на триъгълника, образуван светлинни лъчи, свързващи трите планети, по-голяма от 180° . Така заключаваме, че кривината на пространството около Слънцето, е положителна. От друга страна, в гравитационно поле от вида на разгледаната по-горе въртележка, сумата от ъглите на в триъгълника би била по-малка от 180° – това е пример за пространство с отрицателна кривина.

Изложените аргументи представляват основата на Айнщайновата теория на гравитацията. От Нютоновата гледна точка Слънцето е източник на едно силово поле, което кара планетите да се движат вместо по прави линии – по закривени траектории. В картината на Айнщайн самото пространство е изкривено, а планетите се движат по най-кратките (геодезични) линии в това криво пространство. Тук ние говорим за геодезични линии в четиримерния пространствено-времеви континуум. Затова, разбира се, би било грешка да казваме, че самите орбити са геодезични линии в тримерното пространство.

Айнщайновата интерпретация на гравитацията като изкривеност на пространство – времето не води до същите резултати като класическата теория на Нютон. Ние вече споменахме за закривяването на светлинните лъчи. Релативистичната теория дава също малко по-различни резултати за движението на телата. например, тя обяснява разликата между пресметнатата според теорията на Нютон и наблюдавана скорост на завъртане на голямата ос на орбитата на Меркурий, разлика, която дълго време е една от мистериите на класическата небесна механика.

Гравитационни вълни

Нютоновият закон за гравитационното взаимодействие между масите е съвсем подобен на закона за електростатичното взаимодействие между зарядите, а Айнщайновата теория на гравитационното поле има много общи черти с теорията на Джеймс Клерк Максвел за електромагнитното поле. Затова е естествено да се очаква, че една трептяща маса ще създава гравитационни вълни, точно както един трептящ заряд излъчва електромагнитни вълни. В една прочута статия, публикувана през 1918 г., Айнщайн наистина получава решение на основното уравнение на общата теория на относителността, което представлява промени в гравитационното поле, които се разпространяват в пространството със скоростта на светлината. Ако съществуват, гравитационните вълни трябва да пренасят енергия. техният интензитет обаче, както и пренасяната енергия, са изключително малки. Например, Земята, при своето орбитално движение около Слънцето, трябва да излъчва мощност от около $0,001 \text{ W}$, което би предизвикало скъсяване на разстоянието ѝ до Слънцето с около милионна част от сантиметъра за милиард години!

До сега никой не е измислил начин за регистриране на толкова слаби вълни. В действителност, някои теоретици, между които и сър Артър Едингтън, предполагат, че гравитационните вълни въобще не са реални, а представляват математическа фикция,

която може да се избегне чрез подходящ избор на пространствено–времевите координати в уравненията. По-задълбоченият анализ обаче показва, че случаят не е такъв и гравитационните вълни, колкото и слаби да са, все пак са реални.

Дали гравитационните вълни са групирани в дискретни пакети енергия, или кванти, както електромагнитните вълни? Отговорът на този въпрос, който е толкова стар, колкото и квантовата теория, в края на краищата бе намерен от британския физик П. А. М. Дирак. Той успя да квантува уравнението на гравитационното поле и да покаже, че енергията на гравитационните кванти, на “гравитоните”, е равна на константата на Планк, h , умножена с тяхната честота – същият израз, който дава енергията на светлинните кванти, т.е. – фотоните. Спинът на гравитона обаче е два пъти по-голям от спина на фотона.

Поради малкия си интензитет гравитационните вълни нямат значение за небесната механика. Не биха ли могли обаче гравитоните да играят роля във физиката на елементарните частици? Тези най-малки градивни частици на веществото взаимодействат по различни начини, чрез излъчване и поглъщане на съответни “полеви кванти”. Така електромагнитните взаимодействия (например привличането между тела с противоположни по знак заряди) включва излъчване и поглъщане на фотони; по предположение гравитационните взаимодействия са свързани по подобен начин с гравитоните. През последните няколко години се изясни, че взаимодействията са няколко вида: (1) силни взаимодействия, които включват електромагнитните сили; (2) слаби взаимодействия, включващи бета-разпада на радиоактивните ядра, при които се излъчват електрон и неутрино; (3) гравитационни взаимодействия, които са неизмеримо по-слаби от онези, които наричаме “слаби”.

Силата на едно взаимодействие е свързана със скоростта, или с вероятността за излъчване/поглъщане на неговия квант. Например, на едно ядро са необходими около 10^{-12} s (милионна част от една милионната от секундата), за да излъчи фотон. За сравнение, за бета-разпада на неутрона са необходими около 12 минути, т.е. около 10^{14} пъти по-дълго време. Може да се пресметне, че времето, необходимо на едно ядро, за да излъчи гравитон, е 10^{60} s, или 10^{53} години! Следователно гравитационното взаимодействие е 10^{58} пъти по-слабо, отколкото слабото взаимодействие.

Да си спомним сега, че самите неутрино са частици с изключително малка вероятност за поглъщане, т.е. малка възможност за взаимодействие с другите видове частици⁸. Те нямат нито заряд, нито маса⁹. Още през 1933 г. Нилс Бор питаше: “Каква е разликата между неутрино и квантите на гравитационните вълни?”. При така нареченото слабо взаимодействие неутрино се излъчва винаги заедно с друга частица. А как стои въпросът с процеси, при които се излъчват само неутрино, например излъчване от едно възбудено ядро на двойка неутрино–антинеутрино? Никой не е регистрирал подобен процес, но той би могъл да се осъществи – вероятно в същия времеви мащаб, в който се осъществяват гравитационното взаимодействие. Една двойка неутрино би имала спин две – колкото е пресметнатата от Дирак стойност на спина на гравитона. Всичко това е, разбира се, абсолютна спекулация, но връзката между неутрино и гравитация представлява една интересна теоретична възможност.

Гравитация и електромагнетизъм

В лабораторния дневник на Майкъл Фарадей от 1849 г. фигурира следният запис: “Гравитация. Със сигурност тази сила трябва да може да се свърже експериментално с електричеството, магнетизма и другите сили, да се свърже с тях с реципрочно действие и еквивалентен ефект. Да се разгледа как да се сведе този въпрос до факти и

⁸ Вж. "The Neutrino," от Филип Морисън; SCIENTIFIC AMERICAN, January, 1956.

⁹ Не забравяйте кога е писана статията! (Бел. прев.)

опити.” Многобройните експерименти, които той предприема за разкриване на подобна връзка остават безрезултатни и той завършва тази част от дневника си с думите: “За сега моите опити завършват така. Резултатите са отрицателни. Те обаче не разклащат моето силно усещане за съществуването на връзка между гравитацията и електричеството, въпреки че те не дават доказателство за съществуване на подобна връзка.” Понататъшните експериментални усилия не са по-успешни.

Теоретична атака, целяща да обвърже електромагнитното поле с гравитационното поле, предприема Айнщайн. Успешно редуцирайки гравитацията до геометричните свойства на пространствено–времевия континуум, той бе убеден, че и електромагнитното поле трябва да допуска някаква чисто геометрична интерпретация. Теорията на “единното поле”, която израстваше от неговата увереност, обаче, напредва трудно и той умира, без да успее да създаде нещо толкова просто, елегантно и убедително, както неговата обща теория на относителността. Днес все по-малко и по-малко физици работят върху теорията на единното поле; мнозинството са убедени, че усилията за геометризация на електромагнитното поле са безполезни. Изглежда, поне на автора, че истинската връзка между гравитационните и електромагнитните сили трябва да се намери само след разбиране природата на елементарните частици – разбиране защо съществуват частици с точно определени, а не с други инерчни маси, и разбиране връзката между масите и електричните и магнитните свойства на частиците.

Като пример за един от основните въпроси в тази област да разгледаме отново относителната сила на гравитационните и електромагнитните взаимодействия. Вместо да сравняваме времената, необходими за излъчване на квант, нека сравним действителната големина на електростатичната и гравитационната сила между двойка частици със средно големи маси, да речем пи-мезони. Пресмятането показва, че отношението на електростатичната към гравитационната сила е равно на квадрата от заряда на електрона, разделен на квадрата от масата на частиците и гравитационната константа: $\frac{e^2}{M^2G}$.

За два р-мезона това отношение е 10^{40} . Всяка теория, която претендира да описва връзката между електромагнетизма и гравитацията, трябва да може да обясни това отношение. И трябва да отбележим, че отношението е безразмерно число, то не зависи от системата единици, използвана за измерване на физичните величини¹⁰. Такива безразмерни константи, които могат да се получат от чисто математични съображения, често се срещат в теоретичните формули, но обикновено те са числа от порядъка на единицата – напр. 2π , $5/3$ и др.п. Как обаче може по математичен път да се получи константа от порядъка на 10^{40} ? Преди 20 години Дирак направи интересното предположение, че всъщност числото 10^{40} не е константа, а променлива, която се изменя с времето и е свързана с възрастта на Вселената. Съгласно с еволюционната космология, според която началото си Вселената води от един “Голям взрив”¹¹, днес Вселената е на около $5 \cdot 10^9$ години, или 10^{17} s. Разбира се, както годината, така и секундата са произволни единици, а е желателно да работим с някакъв елементарен интервал време, който може да се получи от основните свойства на веществото и светлината. Един приемлив такъв интервал е времето, необходимо на светлината за измине разстояние, равно на радиуса на една елементарна частица. Доколкото всички частици имат радиуси от около $3 \cdot 10^{-13}$ cm, и тъй като скоростта на светлината е $3 \cdot 10^{10}$ cm/s, елементарната единица за време ще бъде равна на $3 \cdot 10^{-13}$, разделено на $3 \cdot 10^{10}$, или 10^{-23} s. За да изразим възрастта на Вселената с тази елементарна единица, разделяме възрастта в секунди – 10^{17} , с 10^{-23} и получаваме

¹⁰ В други системи формулата за пресмятане на отношението може да изглежда по друг начин, но числената стойност остава същата. (Бел. прев.)

¹¹ През 1961 г. терминът “Голям взрив” все още се е слагал в кавички. (Бел. прев.)

числото 10^{40} ! По такъв начин, казва Дирак, огромното отношение между електричната и гравитационната сила е характеристика на настоящата възраст на Вселената. Когато Вселената е била два пъти по-млада, отколкото сега, стойността на това отношение също е било два пъти по-малко от днешната си стойност. Доколкото има сериозни причини да смятаме, че елементарният електричен заряд не се променя с времето, Дирак заключава, че гравитационната константа трябва да намалява, и това намаление може да се свърже с разширението на Вселената и с непрекъснатото разреждане на веществото в нея.

Ако гравитационната константа наистина намалява, или, с други думи, ако гравитационната сила става по-слаба, тогава нашата Слънчева система би трябвало да се разширява заедно с Вселената. В предишните времена Земята би трябвало да бъде по-близо до Слънцето и, следователно, по-гореща, отколкото сега. Когато Дирак изказа тези идеи, се смяташе, че възрастта на Слънчевата система е около 3 милиарда години. Едуард Телер, днес от Университета на Калифорния, отбеляза, че при тези мащаби на времето, през кембрийската ера, когато в океаните е имало добре развити форми на живот, Земята би трябвало да бъде с 50 градуса по-гореща от точката на кипене на водата. Днес изглежда, че възрастта на Слънчевата система е 5 милиарда години или дори повече, в който случай кембрийските океани, макар и горещи, нямаше да се изпарят. По този начин възражението на Телер губи силата си, стига кембрийските растения и животни да са могли да живеят в много гореща вода.

Антигравитация

В един от своите романи Херберт Уелс описва британски изобретател, мистър Кейвъър, откривател на материал – кейвъърит, който е непрозрачен за гравитационната сила. Точно така, както лист от мед може да екранира едно тяло от действието на електричната сила, а железен лист може да го екранира магнитната сила, един лист от кейвъърит, поставен под едно тяло, го екранира от гравитационното привличане на Земята. Мистър Кейвъър построява голям кораб с щори от кейвъърит от всички страни. Една нощ, когато Луната е високо в небето, той влиза в кораба, спуска всички щори, обърнати към Земята и отваря тези към Луната. С прекъсването на земната гравитация и при наличието на привличане от страна на Луната, корабът се устремява в пространството и евентуално доставя мистър Кейвъър на нашия спътник.

Защо е невъзможно подобно изобретение? Или то наистина е възможно? Има голяма прилика между закона на Нютон за всеобщото привличане и законите, които управляват взаимодействията между електричните заряди и магнитните полюси. Ако е възможно да се екранират електричните и магнитните сили, защо да не може да се направи същото и с гравитационните? За да отговорим на този въпрос трябва да разгледаме механизма на електричното и на магнитното екраниране. Всеки атом или молекула във всяка тяло е система от положителни и отрицателно електрични заряди; в металните проводници има свободни електрони, които могат да се движат между възлите на кристалната решетка, образувана от положително заредените йони. Когато металът се постави в електрично поле, свободните електрони се насочват към едната стена на тялото, придават ѝ отрицателен заряд, а противоположната стена остава положително заредена. Тази поляризация създава едно допълнително електрично поле, чиято посока е противоположна на посоката на началното поле и двете полета се компенсират взаимно. По подобен начин магнитното екраниране зависи от факта, че атомите на магнитните материали представляват миниатюрни магнитчета, чиито северни и южни полюси се ориентират така, че създаденото от тях поле да бъде с посока, противоположна на посоката на външното магнитно поле. В този случай екраниращият ефект отново се дължи на поляризацията на атомните частици.

Гравитационна поляризация, която би направила възможно екранирането на гравитационните сили, изисква наличие на два вида частици: едни с положителни гравитационни маси, които се привличат от Земята, и други – с отрицателни гравитационни маси, които се отблъскват от нея. В природата количествата на положителните и на отрицателните електрични заряди, както и на северните и на южните магнитни полюси, са равни, но частици с отрицателни гравитационни маси все още не са открити, поне в структурата на обикновените атоми и молекули. Следователно обикновеното вещество не може да се поляризира гравитационно и не може да служи за екран на гравитацията.

Съществува обаче друг вид материя – антиматерия, която в много отношения е обратна на обикновената материя, включително нейните електрични и магнитни свойства. Възможно е античастиците да имат също и отрицателна маса. На пръв поглед може да изглежда лесно да се провери дали това е така. Трябва само да се пусне в хоризонтално направление сноп антинеутрони от един ускорител, и да се види дали в земното гравитационно поле те се отклоняват надолу или нагоре. На практика обаче подобен опит е невъзможен. Получените в ускорителите частици се движат със скорости, близки до скоростта на светлината. За километър път гравитацията би ги отклонила, независимо от това, дали нагоре или надолу, само с около 10^{-12} cm, колкото е диаметърът на едно атомно ядро. Нито пък е възможно те да бъдат забавени чрез удари с ядрата на някакъв “забавител”, както се забавят неутроните в атомните реактори. Ако античастиците се сблъскат със своите обикновени двойници, и двете частици изчезват чрез аниhilация. По такъв начин от експериментална гледна точка въпросът за знака на гравитационната маса на античастиците остава мъчително отворен.

От теоретична гледна точка този въпрос също е отворен, доколкото няма теория, която свързва гравитационното и електромагнитното взаимодействие. Ако един бъдещ експеримент покаже, че античастиците наистина имат отрицателна гравитационна маса, той ще нанесе смъртоносен удар на цялата релативистична теория на гравитацията, тъй като ще обори принципа на еквивалентността. Една античастица би могла да подскочи нагоре в едно реално гравитационно поле, но едва ли би могла да направи това в Айнщайновия ускорено движещ се космически кораб. Ако го стори, външният наблюдател би регистрирал, че тя се движи с два пъти по-голямо ускорение от ускорението на кораба, при това без да ѝ действа никаква сила. Откриването на антигравитация би ни принудило да избираме между закона на Нютон за инерцията и принципа на еквивалентност на Айнщайн. Авторът искрено се надява, че няма да ни се наложи да правим това.