

Тъмна енергия¹ Йън Морисън

Най-голямата заблуда на Айнщайн

Съвременната космология възниква от Айнщайновата обща теория на относителността (ОТО) – по същество, теория на гравитацията. Доколкото гравитацията е единствената сила с безкраен радиус на действие, която може да действа на електронеутрална материя, Айнщайн осъзнава, че Вселената като цяло трябва да се подчинява на нейните закони. Той Вярва, че Вселената е “статична”, непроменяща се с времето, и това го изправя пред един съществен проблем, защото гравитацията, като сила на привличане, по естествен път би довела до колапс в една точка на стационарните в пространството обекти. За да преодолее тази трудност, той приписва ненулева стойност на това, което нарича космологична константа Λ (лямбда). Тя представлява начин да се въведе антигравитация и притежава интересното свойство ефектите ѝ да нарастват с увеличаване на разстоянията. По такъв начин с помощта на една сила, която намалява, и друга, която расте с увеличаване на разстоянието, става възможно да се получи статично решение на уравненията на ОТО. По-късно Айнщайн осъзнава, че подобна ситуация е нестабилна и че статична Вселена е невъзможна. Той нарича това “най-голямата заблуда в моя живот”. Той би могъл да предскаже, че Вселената трябва или да се разширява, или да се свива. Както ще видим обаче, вероятно не е бил толкова далеч от истината, колкото е мислил.

Моделите на Вселената, основаващи се на Големия взрив

Руският метеоролог А. А. Фридман първи получава решения на уравненията на Айнщайн, свързани с модели, в които Вселената се разширява, започвайки от една точка, или още – сингулярност. На тях Фред Хойл дава името² модели на Големия взрив – предполагаше се, че това е пренебрежително название, самият Хойл не го е обичал. Във всички тези модели една голяма начална скорост на разширяването постепенно се забавя под действие на гравитационните сили. Ако плътността на материята във Вселената е над една критична стойност, гравитацията би била достатъчна да спре разширението и след това да предизвика колапс на Вселената в един “Голям срив” (това са т.нар. модели на затворена Вселена). В критичния случай, който е на границата между отворените и затворените вселени, след безкрайно дълго време скоростта на разширението би клонила към нула (това е т.нар. “плоска”, или “критична вселена”).

Моделите се различават по една константа Ω , която се дефинира като отношение между истинската плътност и критичната плътност. В затворените вселени пространството има положителна кривина: Ω е по-голямо от единица, сумата от ъглите в един гигантски триъгълник, чиито страни свързват купове от галактики, е повече от 180° и два пуснати паралелно един на друг светлинни лъча в края на краищата се пресичат. В отворените вселени пространството има отрицателна кривина; Ω е по-малко от единица, сумата от ъглите в гигантския триъгълник е по-малка от 180° , а два пуснати паралелно един на друг светлинни лъча се раздалечават. В критичния случай се казва, че пространството е “плоско”: Ω е равно на единица, сумата от ъглите в триъгълника е равна на 180° и два пуснати успоредно един на друг светлинни лъча си остават паралелни. Доколкото това е вярно само и извънредно големи мащаби, в околността на един масивен обект, например на една звезда или галактика, пространството има положителна кривина, ефектът от което ние наричаме гравитация.

¹ Превод от *Physics Education*, 2003. По въпроса вж. и други, по-съвременни материали.

² Чак през 1952 г. (Бел. прев.)

Разширението на Вселената

В края на 20-те години на 20. век Едуин Хъбл, използвайки 2,5-метровия телескоп на Маунт Уилсън, измери разстоянията до галактики, в които може да се наблюдават променливи звезди от типа цефеиди. Известно бе, че при цефеидите съществува строга зависимост в промяната на интензитета. Много от тях в относително близкия Малък Магеланов облак бяха изследвани от Хериета Люит, която откри връзка между техните светимост и период. По такъв начин, ако може да се измери периодът на някоя променлива звезда от типа цефеиди в някоя много отдалечена галактика, може да се намери и нейната светимост. Като се познават видимата звездна величина и светимостта на звездата, може да се пресметне разстоянието до нея.

Хъбл изследва също спектрите на тези цефеиди и открива, че като се изключат само най-близките, в спектрите на останалите се наблюдава червено отместване: като че ли галактиките се отдалечават от Земята. Използвайки простата формула за ефекта на Доплер при светлината, той пресмята видимата скорост на отдалечаване и комбинира резултатите с разстоянията, които е получил чрез светимостта на звездите. Така получава графика на “скоростта на отдалечаване” (в km/s) в зависимост от разстоянието (в Mpc). Неговата графика ясно показва, че колкото по-голямо е разстоянието, толкова по-голяма е и видимата скорост на раздалечаване. Графиката води пряко до закона на Хъбл, в който скоростта на раздалечаване и разстоянието са право пропорционални и свързани с константата на Хъбл H_0 . За нея той получава стойност $H_0 = 500 \text{ (km/s).(Mpc)}^{-1}$. Резултатите на Хъбл може да обясним, ако приемем, че наблюдаваме една разширяваща се Вселена, в която се разширява самото пространство. Ако направим простото предположение, че Вселената се е разширявала по същия начин по време на цялото си съществуване, би било възможно да се върнем назад във времето до момента, когато размерът на Вселената е бил нула – до нейното ачало, и, следователно да оценим нейната възраст, известна като Хъблова възраст на Вселената. Тя представлява просто $1/H_0$ и, като използваме оригиналната, получена от Хъбл стойност за H_0 , $500 \text{ (km/s).(Mpc)}^{-1}$, за възрастта на Вселената получаваме около 2 млрд. години (т.е. $2 \cdot 10^9$ г.). В действителност, във всички Фридманови модели истинската възраст на Вселената би трябвало да бъде по-малка от тази, тъй като в миналото Вселената би трябвало да се разширява по-бързо. В случая на плоска Вселена истинската възраст би трябвало да бъде $2/3$ от Хъбловата възраст, т.е. приблизително 1,3 млрд. години.

Проблемът с възрастта

Този резултат се превръща в очевиден проблем, след като се определя възрастта на Слънчевата система (около 4,5 млрд. години): как е възможно Слънчевата система да е по-стара от Вселената? Пресмятанятия на Хойл и други учени за еволюцията на звездите сочат, че някои от тях трябва да са още по-стари – от 10 до 12 млрд. години.

По време на затъмненията през Втората световна война Валтер Бааде използва 2,5 метровия телескоп, за да изследва звездите в галактиката Андромеда и открива, че фактически съществуват два типа цефеиди. Наблюдаваните от Хъбл са четири пъти по-бляскави от онези, които са използвани за калибровка на разстоянията. Така се оказва, че галактиките са два пъти по-далече, отколкото се предполагаше първоначално. В резултат стойността на константата на Хъбл се намали до $250 \text{ (km/s).(Mpc)}^{-1}$. Оставаша обаче още много проблеми около оценките на разстоянията, но постепенно наблюденията се уточняваха и в резултат оценката на константата на Хъбл бе намалена до около $70 \text{ (km/s).(Mpc)}^{-1}$. Това обаче все още съответства на Хъблова възраст на Вселената около 14 млрд. години – на “плоска” Вселена с възраст само около 10 млрд. години. Ние все пак подозираме, че Вселената е по-стара (и, ако това е така), ако

вярваме в съвременната стойност на константата на Хъбл, тогава в стандартните модели на Големия взрив все още съществува проблемът с възрастта ѝ.

Инфлация

Други проблеми около стандартните модели на Големия взрив възникват във връзка с идеята за “инфлация”, предложена за пръв път от Алан Гут и усъвършенствана от други учени. При този сценарий цялата видима Вселена първоначално би трябвало да се съдържа в обем с приблизителните размери на един протон. Приблизително 10^{-35} s след началото тази начален пространствен обем започва да се разширява експоненциално и увеличава размерите си поне 10^{60} пъти – до размера на сфера с размер около метър или повече. Това гигантско разширение на пространството би предизвикало геометрията му да стане “плоска” по същия начин, по който повърхността на един балон видимо става все по-плоска и по-плоска с разширяването му. (Следователно “плоската” Вселена се получава по един естествен начин.) Инфлацията би осигурила също така еднородност на цялата видима Вселена.

Големият взрив

Половината от гравитационната потенциална енергия, която възниква в този период на инфлация, се превръща в кинетична енергия, от която възникват почти равен брой частици и античастици, но все пак с малко превишение на броя на частиците (около една на няколко милиарда). Всички античастици анихилират със съответните им частици, оставяйки относително малък брой частици в морето от радиация. В огромната си част “барионното вещество” е било във форма на кварки, които приблизително една секунда след началото се групират по тройки в протони и неутрони. Образуват се приблизително равен брой протони и неутрони, но тъй като свободните неутрони са нестабилни, остават само онези от тях, които са свързани в хелиеви ядра, съдържащи два протона и два неутрона. По такъв начин няколко минути след началото, веществото във Вселената в голямата си част се състои от водородни ядра (протони), хелиеви ядра (алфа-частици) и електрони – по един електрон на всеки протон.

Космическият микровълнов фон

Пръв американският физик Джордж Гамов осъзнава, че лъчението (получено при аниhilацията на частиците и античастиците), свързано с горещия Голям взрив, би трябвало все още да се разпространява във Вселената. Това лъчение сега се нарича космически микровълнов фон (КМФ). Идейки първоначално под форма на високоенергетични гама-лъчи, с разширяването на Вселената лъчението става все понискоенергетично, така че приблизително 300 000 или 400 000 години след началото на Вселената максимумът на лъчението се оказва в диапазона на оптичните честоти. Дотогава типичната енергия на фотоните е била достатъчна, за да попречи на образуването на водородни и хелиеви атоми, така че Вселената е представлявала плазма от водородни и хелиеви ядра и от свободни електрони. Електроните са разсейвали фотоните и по такъв начин Вселената е била непрозрачна – както в мъгла водните капчици разсейват светлината.

Това интензивно взаимодействие между веществото и лъчението във Вселената води до две критични следствия: първо, спектърът на лъчението бе следвало да бъде като на абсолютно черно тяло, чиято температура съответства на температурата на Вселената – около 3000 K, и, второ, разпределението на ядрата и електроните, като се изключват най-крупните мащаби, би трябвало да има константна плътност. На второто следствие ние ще се върнем по-късно, а сега ще продължим с първото.

Към онзи момент, около 300 000 години след началото, типичната енергия на фотоните намалява достатъчно, за да позволи образуването на атоми. Тъй като не остават повече свободни електрони, които да разсейват светлината, Вселената става прозрачна. Казваме, че в този момент веществото и лъчението се разделят – той определя доколко можем да наблюдаваме Вселената назад във времето. Оттогава до сега Вселената се е разширила около 1000 пъти. Дължините на вълните на фотоните, които образуват КМФ, са се увеличили също 1000 пъти и сега би следвало да се намират в далечната инфрачервена област и в радиочестотния диапазон на спектъра – притежавайки обаче все още спектър на абсолютно черно тяло. Ефективната температура на абсолютно черно тяло със спектър като КМФ би намаляла също 1000 пъти и сега би трябвало да бъде около 3 К.

Откриването на КМФ

Радиоастрономите Арно Пензиас и Роберт Уилсън случайно откриха това фоново лъчение през 1963 г., но неопровержимото доказателство за неговия произход трябваше да чака до 1992 г., когато данните от спътника COBE (Cosmic Background Explorer) показаха, че фоновото лъчение притежава точно очаквания спектър на абсолютно черно тяло. Средната температура бе 2,725 К, но измерванията на COBE показваха статистически, че температурата на фона търпи малки промени. Оттогава наблюденията, правени от балони и от високопланински върхове, позволиха да се направят карти на така наречените “пулсации” в КМФ – температурни флуктуации на наблюдаваната температура от порядъка на 60 μ К.

Коя е причината за “пулсациите” в КМФ

Защо съществуват тези малки вариации? За да отговорим, трябва да кажем нещо за “тъмното вещество”. Въпреки че не е пряко наблюдавано, за неговото присъствие заключаваме от множество наблюдения. (Нека посочим поне един пример: ако галактиките бяха изградени само от нормално вещество, скоростта, с която звездите обикалят около ядрата им, би следвало да намалява към периферията им, докато в действителност тя остава относително постоянна във външните части на галактиките. Това може да се обясни само ако галактиката е потопена в среда от тъмно, невидимо вещество, чиято маса превишава няколко пъти масата на нормалното вещество в галактиката.)

Ако по времето, когато се разделят веществото и лъчението, е налице само обикновено вещество, процесът на гравитационния му колапс за формиране на звезди и галактики би могъл да започне едва тогава. Симулациите на този процес показват, че в този случай галактиките биха могли да се появят едва днес, а не преди няколко милиарда години. Ако обаче е налице тъмно вещество, което не взаимодейства с фотоните и чиято маса е няколко пъти по-голям от масата на обикновеното вещество, то последното би могло да започне да се концентрира по-отрано, образувайки източници на гравитация, способни да привличат гравитационно обикновеното вещество. Това намалява силно времето, необходимо за образуване на галактики.

По какъв начин тъмното вещество влияе на КМФ

Наличието на области с по-висока концентрация на тъмно вещество по времето на образуването на КМФ има един наблюдаем ефект: лъчението, напускащо такава област, трябва “да преодолее една гравитационна потенциална бариера”, което причинява червено отместване (гравитационно червено отместване). По такъв начин фотоните от КМФ, които напускат области с по-висока концентрация на тъмно вещество, имат по-големи дължини на вълните от онези, които напускат области с по-

малко тъмно вещество. И тъй като по-големите дължини на вълните съответстват на по-студени тела, ефективната температура на абсолютно черно тяло за фотони, идващи от области с по-голяма плътност на тъмното вещество, е по-ниска от тази за фотоните от областите от областите с по-рядко тъмно вещество. Ние може да наблюдаваме тези флукутации. Подобни наблюдения дават пряка информация за състоянието на Вселената 300 000 години след нейното начало: не е изненадващо, че те са толкова ценни за космолозите! Не само това: фотоните на КМФ са пътували през пространството милиарди години и би трябвало да са повлияни от неговата кривина. Възможно е да се симулират очакваните видове флукутации за случаите, когато пространството е с отрицателна кривина, с положителна кривина или е плоско. Тъкмо затова астрономите с толкова голямо желание картографират тези флукутации най-старателно. Това обаче не е лесна задача.

КМФ трябва да се наблюдава в областта на милиметровите радиовълни. За приемници, разположени на земната повърхност, подобни сигнали са маскирани от излъчването на водните пари в атмосферата. Ето защо експериментите се провеждат на големи височини – на балони (Maxima и Boomerang) или на високи сухи места като пустинята Атакама в Чили (4900 m) и на склоновете на Mount Teide в Тенерифе (експериментите CBI и VSA съответно). Друго много добро място, където бе разположен експериментът DASI, е Южният полюс, където е толкова студено, че водните пари в атмосферата са почти напълно замръзнали. Резултатите от тези наблюдения на малките температурни флукутации на КМФ потвърждават без изключение, че пространството е плоско: $\Omega = 1$.

Тъмна енергия

Фактът, че пространството в нашата Вселена е плоско, веднага определя нейната обща маса (и енергия). От наблюденията на въртенето на галактиките и изследванията на куповете от галактики е възможно да се оцени общата маса както на обикновеното, така и на тъмното вещество. Взети заедно, обикновеното и тъмното вещество не могат да обяснят защо Вселената е плоска; те представляват само около 30 % от онова, което е необходимо, за да бъде Ω равно на 1. Какво биха могли да представляват останалите 70 %? Ние вярваме, че това е някаква форма на “тъмна енергия” – енергия, получавана от вакуума, която е свързана с космологичната константа Λ от уравненията на Айнщайн. Един ефект от наличието ѝ е разширяването на пространството и следователно – раздалечаването на галактиките. Изглежда, че в началото, когато величината на пространството не е била много голяма, гравитацията е могла да забавя разширението на Вселената точно както във Фридмановите модели на Големия взрив, но заедно с разширяването на Вселената и увеличаването на обема на пространството ефектът от “тъмната енергия” – наличието на сили на отблъскване, надделява над гравитацията и сега предизвиква разширение на Вселената с все по-нарастваща скорост.

Ускоряващата се Вселена

Ние разполагаме с реални свидетелства за това ускоряващо се разширение от наблюденията, които позволиха графиката на Хъбл да бъде продължена до много по-големи разстояния. Наскоро стана възможно да се измерват разстоянията до галактики, които са твърде далече, за да може да се наблюдават цефеиди в тях. Едни от индивидуалните обекти с най-голяма светимост, които може да се наблюдават, са свръхновите от тип Ia – светимостта им е толкова голяма, че може да бъдат наблюдавани отвсякъде във Вселената. Ние вярваме, че тяхната светимост е една и съща, така че те могат да бъдат използвани като “стандартни свещи”. (Щом

светимостта им е еднаква, като пренебрегнем поглъщането на светлината от междузвездното пространство, ако блясъкът на една свръхнова е 1/100 от блясъка на друга, разстоянието до първата, в съответствие със закона за обратно пропорционалната зависимост от квадрата на разстоянието, ще бъде 10 пъти по-голямо от това до втората.) След като започнаха измерванията на свръхновите, стана ясно, че резултатите не са в съгласие с предсказанията на всички стандартни модели на Големия взрив, според които разширяването трябва да се забавя. Резултатите може да бъдат обяснени само ако се приеме, че понастоящем разширението на Вселената се ускорява – ефект, за който вярваме, че се дължи на “тъмната енергия”.

Модел на Вселената

Сега може да конструираме модел на Вселената, който се опира на следните факти:

1. Една достатъчно точна стойност на константата на Хъбл е около 70 (km/s)/(Mpc).
2. Наблюденията на свръхновите от типа Ia указват, че разширяването на пространството се ускорява.
3. Напречният разрез на Вселената, като например публикуваният през 2002 г. и обхващащ данни за повече от 220 000 галактики 2dF Galaxy Redshift Survey, който свидетелства за наличие на струпвания в разпределението на галактиките.
4. Картината на флукуациите на КМФ, от която съдим за много ранната Вселена и за кривината на пространството, през което е преминало това лъчение.
5. Наблюденията на определен брой гравитационни лещи, при които стояща на пътя на лъчите от един далечен квазар галактика деформира гравитационно околното пространство и формира няколко образа на квазара. Процентът на далечните квазари, от които се получават подобни образи, зависи от геометрията на пространството.

Всички тези резултати водят до един модел, в който нормалното вещество съставя едва около 4 %, тъмното вещество – приблизително 26 %, като оставащите около 70 % от общата маса на Вселената представляват форма на тъмната енергия. През следващите няколко години, с усъвършенстване на наблюденията върху КМФ, ще имаме много по-точни стойности на тези проценти. Изменението на размера на Вселената с времето в миналото и това, как тя ще се разширява даже още по-бързо в бъдеще показват, че истинската възраст на Вселената е близка до възрастта, определена от Хъбл, и стойността ѝ е около 13–14 млрд. години.

Бъдещето на Вселената

Приетата днес представа за ускорено разширяваща се Вселена има едно много интересно следствие. Досега си представяхме, че при забавящо се разширяване с остаряване на Вселената (и следователно с увеличаване на разстоянията, на които можем да провеждаме наблюдения) ще можем да наблюдаваме все повече и повече галактики. В една Вселена, чието ускорение се ускорява, е валидно точно обратното – да, с течение на времето ние виждаме все по-далеч и по-далеч, но това, което ще виждаме, ще става все по-малко и по-малко, тъй като разширяването отнася галактиките извън нашия хоризонт. Изглежда е добре, че живеем тъкмо сега!