

Наистина ли са постоянни физичните константи?

Променя ли се с времето природната машина?¹

Джон Бъроу, Джон Уеб

Някои неща не се променят никога. Физиците ги наричат природни константи. Величини като скоростта на светлината c , Нютоновата гравитационна константа G , както и масата на електрона m_e по предположение са едни и същи навсякъде из Вселената и във всеки момент от историята ѝ. Те образуват скелето, около което се изграждат физичните теории, те, също така, определят тъканта на нашата Вселена. Физиката непрекъснато напредва, правейки все по-точни измервания на техните стойности. Забележително е обаче, че никой до сега не е успял да предскаже или да обясни която и да е от константите. Физиците нямат идея защо при определен избор на системата единици константите имат тъкмо тези числени стойности, които дават измерванията. Така в SI $c = 299\,792\,458$; $G = 6,673 \cdot 10^{-11}$; а $m_e = 9,10938188 \cdot 10^{-31}$ – числа, които не следват никаква забележима тенденция. Единствената нишка, която свързва тези стойности е, че ако много от тях бяха дори малко по различни, сложни атомни структури като тези в живите същества не биха били възможни. Желанието да се обяснят константите е една от движещите сили зад усилията да се построи пълно и единно описание на природата, или “теория на всичко”. Физиците се надяваха, че такава теория би показала, че всяка от природните константи може да има само една възможна стойност. Зад видимия произвол в природата тя би разкрила един порядък, който лежи по-дълбоко.

През последните години обаче, статусът на константите стана, меко казано, по-неясен. Изследователите установиха, че най-добрият кандидат за теория на всичко – вариантът на теорията на струните, наречен М-теория, е самосъгласуван само в случай, че Вселената има повече от четири пространствени и времеви измерения – поне със седем повече. Едно следствие от това е, че константите, които наблюдаваме, фактически биха могли и да не са фундаментални. Те всъщност пребивават в едно многомерно пространство, а ние виждаме само техните триизмерни “сенки”.

Междувременно физиците разбраха също, че стойностите на много от константите може би са резултат просто от щастлива случайност, достигнати при случайни събития и процеси между елементарните частици през ранната история на Вселената. Действително, теорията на струните допуска огромен брой – 10^{500} – възможни “светове” с различни самосъгласувани съвкупности от закони и константи. Сега за сега изследователите нямат идея защо живеем в свят с такава комбинация от константи, каквато наблюдаваме. Продължаващите изследвания може да редуцират броя на логически възможните светове до един, но ние трябва да допускаме и разстройващата възможност познатата ни Вселена да е само една от многото – част от една множествена вселена, в чиито различни части се реализират различни решения на теорията, а нашите природни закони представляват просто една конкретна съвкупност от множеството възможни системи от локални закони.

При това положение единственото възможно обяснение за много от нашите числени константи би било, че те образуват рядка комбинация, която допуска еволюцията на съзнание. Нашата наблюдаема Вселена би могла да бъде един от множеството изолирани оазиси, който е заобиколен от безброй безжизнени светове – сюрреалистични места, в които властват различни природни сили и такива частици като електроните или структури като въглеродните атоми и ДНК-молекулите са невъзможни. И ако вие дръзнете да проникнете в такъв външен свят, ще престанете да съществувате.

По този начин с едната ръка теорията на струните дава, но с другата взема. Тя бе създадена отчасти с цел да обясни на пръв поглед произволните стойности на физични-

¹ Превод със съкр. от страницата на Scientific American, 15.01.2012 г.

те константи, и основните уравнения на теорията съдържат малък брой произволни параметри. Въпреки това, сега за сега теорията на струните не обяснява наблюдаваните стойности на константите.

Метър, на който може да се вярва

Всъщност, думата “константа” може да бъде заблуждаваща. Нашите константи може да се променят както с времето, така и да имат различни стойности в различните области на Вселената. Ако допълнителните пространствени измерения променят големината си, “константите” в нашето тримерно пространство биха се променяли заедно с тях. Ако можехме да погледнем достатъчно далеч в пространството, бихме могли да видим области, в които “константите” имат други стойности. Още от 30-те години на 20. век учените спекулират с твърдението, че константите може би не са константи. Теорията на струните направи тази идея правдоподобна и поради това търсенето на отклонения от константността става все по-важно.

Подобни експерименти представляват истинско предизвикателство. Първият проблем е, че самият лабораторен апарат може да е чувствителен към промените на константите. Размерите на атомите биха могли да растат, но ако и метърът, с който ги мерите, също става по дълъг, никога няма да можете да установите истината. Обикновено експериментаторите предполагат, че техните измервателни стандартни инструменти – метри, теглилки, часовници – са фиксирани, но те може да не се окажат такива, когато се проверяват константите. Експериментаторите трябва да се фокусират върху безразмерни константи, които са числа, независещи от избора на единиците. Пример за такова число е отношението на две маси, например отношението на масата на протона към масата на електрона.

Едно отношение от специален интерес комбинира скоростта на светлината c , електричния заряд на електрона e , константата на Планк h и т.нар. електрична проникваемост на вакуума ϵ_0 . Това прочуто отношение алфа ($\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 hc}$), наречено константа на

фината структура, е въведено за пръв път през 1916 г. от Арнолд Зомерфелд – пионер в прилагането на квантовата механика в електромагнетизма. Това отношение придава количествен характер на релятивистичните (c) и квантови (h) характерни черти на електромагнитните (e) взаимодействия на заредени частици във вакуум (ϵ_0). Чрез измерената стойност от $1/137,03599976$, или приблизително $1/137$, α придава на числото 137 статуса на легенда сред физиците (обикновено тъкмо 137 е комбинацията от цифри, която отваря ключалките на техните куфари²).

Ако α имаше друга стойност, всякакъв вид жизнено важни фактори в света около нас биха се променили. Ако например стойността α бе по-малка, плътността на твърдите вещества, изградени от атоми, би намаляла (пропорционално на α^3), молекулните връзки биха се разкъсвали при по-ниски температури (α^2), а броят на стабилните елементи в Периодичната таблица би нараснал ($1/\alpha$). Ако α бе твърде голямо, не биха съществували малки атомни ядра, тъй като електричното отблъскване между техните протони би превъзхождало силните ядрени сили, които би трябвало да ги държат заедно. Една стойност от 0,1 например би разцепила ядрото на въглерода.

Ядрените реакции в звездите са особено чувствителни към стойността на α . За да се осъществи термоядрен синтез, гравитацията на звездата трябва да повиши температурата достатъчно, така че ядрата да бъдат принудени да се сближават, въпреки взаимното им отблъскване. Ако α превишаваше 0,1, термоядреният синтез би бил невъзмо-

² Разказват, че в гардеробната на своя институт П.Л.Капица окачвал шубата си винаги на закачалка с номер 137, така че никога не забравял къде го е оставил. (Бел. прев.)

жен (освен ако и други параметри, като отношението между масите на електрона и протона, не се променят по подходящ начин). Едно едва 4-процентно изменение на α би променило енергетичните нива в ядрото на въглерода така, че синтезът на този елемент в звездите би бил забранен.

Ограничения от ядрените реакции

Втори експериментален проблем е, че измерването на промените на константите изисква много точен инструментариум, който остава стабилен достатъчно дълго време, за да регистрира някаква промяна. Дори атомните часовници (с тяхната прочута стабилност – бел. прев.) биха могли да регистрират промяна на константата на фината структура само в рамките на дни или най-много – на години. Ако например в рамките на три години α се промени с повече от четири части на 10^{15} , най-добрите часовници биха забелязали това. Нито един до сега не е успял. Това би могло да звучи като внушително потвърждение на постоянството на α , но в космически мащаби три години са само едно мигновение. Бавни, но съществени промени в течение на дългата история на Вселената биха могли да останат незабелязани.

За щастие, физиците откриха други начини за проверка. През 70-те години на 20. век учени от френската Комисия за ядрена енергия забелязват нещо особено по отношение изотопния състав на рудата от урановата мина в Окло, Габон: тя изглежда като отпадъчен продукт от ядрен реактор. Преди около два милиарда години Окло би трябвало да бъде място на природен реактор.

През 1976 г. Александър Сляктер от петербургския институт по ядрена физика в Русия и по-късно – от Харвардския университет, забеляза, че способността на един ядрен реактор да функционира зависи критично от точната стойност на енергията на едно конкретно ниво на ядрото на самария, което спомага за залавянето на неутронни. А тази енергия е много чувствителна към стойността на α . Така, ако константата на фината структура бе малко по-различна, не би могло да се осъществи верижна реакция. Щом обаче реакцията е протичала, това показва, че за последните два милиарда години константата не се е променила с повече от една част на 10^8 . (Физиците продължават да обсъждат точните количествени резултати заради неизбежните неопределености около условията във вътрешността на един естествен реактор.)

През 1962 г. Джеймс Е. Пийбл и Роберт Дике от университета в Принстън за пръв път приложиха подобни принципи към метеоритите: количествените съотношения между изотопите в тези древни скали, получени в резултат от радиоактивно разпадане, зависят от α . Най-чувствителните ограничения засягат бета-разпадането на рений в осмий. Според работата на Кейт Олив от университета на Минесота, Максим Поспелов от университета във Виктория, Британска Колумбия и техните колеги, по времето, когато са се формирали скалите, α е имала стойност, различаваща се с не повече от две части на 10^6 от настоящата си стойност. Този резултат е по-неточен отколкото данните от Окло, но в замяна на това той отива по-назад във времето – до възникването на Слънчевата система преди 4,6 милиарда години.

За да проверят за възможни промени в рамките на още по-големи времеви интервали, учените трябва да погледнат в небесата. На светлината от отдалечените астрономични източници са й необходими милиарди години, за да достигне нашите телескопи. Тя носи със себе си отпечатък както от законите и физичните константи за времето, когато е започнала пътешествията си, така и от веществото, срещнато по пътя към нас.

Използване на спектралните линии

За пръв път астрономията се намеси в историята с константите скоро след откриването на квазарите през 1968 г. Идеята бе проста. Квазарите бяха открити и иденти-

фицирани като бляскави източници на светлина, разположени на огромни разстояния от Земята. Тъй като пътят на светлината от квазара до нас е дълъг, той неизбежно пресича газовите крайнини на млади галактики. Този газ поглъща светлина от квазара с определени честоти, оставяйки върху спектъра на квазара специфичен “бар-код” от тесни линии.

Винаги, когато газ поглъща светлина, електрони в атомите прескачат от състояния с по-ниска енергия в състояния с по-висока енергия. Тези енергетични нива се определят от това, колко силно атомните ядра привличат електроните, което от своя страна зависи от големината на електромагнитната сила между тях и, следователно – от константата на фината структура. Ако константата е била различна по времето на поглъщане на светлината или в някои конкретни области на Вселената, през които преминава, тогава енергията, необходима за повдигане на електроните на по-високи нива, би се различавала от тази, която е необходима днес в лабораторните експерименти, в резултат на което дължините на вълните, поглънати в спектъра на квазара, биха били различни.

Начинът, по който се променя дължината на вълната, зависи силно от орбиталната конфигурация на електроните. За дадена промяна на α някои дължини на вълни намаляват, докато други нарастват.

Когато преди 11 години започвахме работа, опитите за измервания страдаха от две ограничения. Първо, лабораторните учени не бяха измервали дължините на вълните на съответните спектрални линии с достатъчна точност. По ирония на съдбата, учените знаеха повече за спектрите на квазарите, отдалечени на два милиарда светлинни години, отколкото за спектрите на образците тук на Земята. На нас ни бяха необходими лабораторни измервания с висока точност, с които да сравняваме спектрите на квазарите, така че ние убедихме експериментаторите да ги извършат. Началните измервания направиха Ан Торн и Жулиет Пикеринг от Империял колидж в Лондон, последвани от групи в Швеция и Германия.

Вторият проблем бе, че предишните наблюдатели бяха използвали т.нар. алкално дублетни абсорбционни линии – двойки абсорбционни линии, възникващи в един и същи газ, например въглерод или силиций. Те сравняваха разстоянието между тези линии в спектъра на квазара с лабораторно измереното разстояние. Този метод обаче не използва преимуществото от едно специфично явление: една промяна на α отнема не само разстоянието на енергетичните нива в атома до най-ниското енергетично ниво, т.е. до основното ниво, променя се и положението на самото основно ниво. Фактически този втори ефект е дори по-силен от първия. Като следствие от това, най-високата точност, която постигаха експериментаторите, бе само една част на 10^4 .

През 1999 г. един от нас (Уеб) и Виктор Фламбаум от университета на Нов южен Уелс в Австралия развиха метод, който позволява да се отчетат и двата ефекта. В резултат се получи пробив: чувствителността се увеличи 10 пъти. Нещо повече, методът позволява да се сравняват различни образци (например магнезий и желязо), което дава възможност за допълнителни кръстосани проверки. Използването на тази идея в практиката наложи прилагане на сложни числени пресмятания, за да се установи как наблюдаваните дължини на вълните зависят от α във всички различни видове атоми. Комбиниран със съвременни телескопи и детектори, новият подход позволи да проверим константността на α с безпрецедентна точност.

Промяна в мисленето

Когато се заловихме с този проект, ние очаквахме да установим, че стойността на константата на фината структура преди много време, е същата като днес, а нашият принос би бил просто в повишаване на точността. За наша изненада, първият резултат,

през 1999 г., показва малки, но статистически забележими разлики. Следващите данни потвърдиха това откритие. Основавайки се на 128 абсорбционни линии в спектрите на квазари, ние намерихме едно средно нарастване на α от почти шест части на милион за последните 6 до 12 милиарда години

Извънредните претенции изискват извънредно доказателство, така че нашите мисли се насочиха веднага към потенциалните слабости, които биха могли да бъдат свързани с данните или с методите за анализирането им. Тези неопределености може да се класифицират в две групи: систематични и случайни. По-лесно е да се разберат случайните, те тъкмо затова са и случайни. Те са различни за всяко отделно измерване, но приносите им би трябвало да се компенсират взаимно в една достатъчно голяма съвкупност от резултати. Систематичните неопределености, които не се елиминират при усредняване, се отчитат по-трудно. Експериментаторите в лабораториите могат да сменят своята апаратура, за да минимизират влиянието им, но астрономите не могат да сменят Вселената, така че са принудени да приемат, че всичките техни методи за събиране на данни имат неотстранимо отклонение. Така например във всяко наблюдение на галактиките ще преобладава приносът на ярките галактики, тъй като те се наблюдават най-лесно. Идентифицирането и неутрализирането на такива отклонения е едно постоянно предизвикателство.

Първото, което потърсихме, бе изкривяване на скалата с дължините на вълните, спрямо която се измерваха спектралните линии от квазарите. Такова изкривяване би могло евентуално да се появи, например, по време на обработката на данните от квазара от техния суров вид, получен с телескопа, към калибриран спектър. Въпреки че едно просто свиване или разтегляне на скалата на дължините на вълните не би могло да наподобява със съвършенство промяна на α , дори и несъвършеното наподобяване може да се окаже достатъчно за обясняване на нашите резултати. За да проверим влиянието на проблеми от този вид, ние заместихме калибрираните данни от квазар и ги анализирахме така, като че ли са начални данни. Експериментът изключи с голяма сигурност проситите грешки от изкривявания.

За повече от две години ние разгледахме едно след друго различни отклонения и след подробен анализ ги отхвърляхме като твърде малкия, за да окажат влияние. За сега сме открили само един потенциално сериозен източник на отклонения. Той е свързан с абсорбционните линии, породени от елемента магнезий. Всеки от трите стабилни изотопа на магнезия поглъща светлина с различни дължини на вълната, но трите дължини са много близки една до друга и спектроскопията на квазарите обикновено вижда трите линии като една. Основавайки се на лабораторните измервания на относителните количества на трите изотопа, учените правят заключения за приноса на всеки от тях. Ако в ранната Вселена тези количествени съотношения са били съществено различни от сегашните, тази разлика би могла да симулира промяна на α . През 2003 г. колективи, ръководени от Сергей Левшаков в Санкт Петербург и от Ралф Куаст в Хамбург, изследваха три нови системи квазари. През 2004 г. Хум Чанд в Индия, Патрик Петитджийн в Париж и Бастиен Арацил, също от Париж анализираха нови 23. Нито една от тези групи не откри промяна на α . Според Чанд, ако има промяна, тя трябва да е по-малка от една част на 10^6 за последните 6 до 10 милиарда години.

Как е възможно една далеч по-малка съвкупност от данни, сравними по качество с данните, които използвахме самите ние, да доведе до толкова строги ограничения? Това не е възможно. За нещастие, оказва се, че анализът на Чанд съдържа важни грешки и като следствие – горната граница за каквато и да е промяна на α се разхлабва.

В средата на 2010 г. ние завършихме анализа на голямо количество нови данни от Very Large Telescope (VLT) на Европейската южна обсерватория и получихме 153 нови измервания. Всички данни, които до тогава беше анализирала нашата група, бяха

от телескопите Кеск на Мауна Кеа в Хаваите. За новите данни от VLT всичко бе различно – телескопите, спектрографът, детекторите и софтуерът, използван в началните етапи на анализа на данните. По такъв начин данните от VLT осигуриха великолепна независима проверка на резултатите, получени с телескопите Кеск.

Ние мислехме, че е възможно новите данни да покажат липса на промяна на α или, че ще покажат същия ефект, както от данните от Кеск – че α изглежда по-малко при по-голямо червено отместване. Онова, което наистина открихме, бе наистина удивително и, ако е вярно, би революционизирало някои от нашите най-фундаментални представи във физиката.

Новите данни от VLT показаха, че при по-голямо червено отместване стойността на α е не по-малка, а по-голяма, по-голяма с точно толкова, с колкото бе по-малка при данните на Кеск. Как е възможно това? Нашата първа мисъл бе, че пред нас е доказателство за систематични проблеми в двете системи от данни. Съберете резултатите от Кеск с тези от VLT, и с добро приближение комбинираният резултат показва, че α не се променя с увеличаването на червеното отместване. Проблемът е решен. Въпреки всичко, константите действително са си константи.

Ако обаче обяснението е такова, то изисква два различни систематични ефекта, по един за всеки телескоп, така че двата ефекта да бъдат, независимо един от друг, с еднаква големина, но с противоположни знаци. Това не е възможно, макар че досега ние не успяваме да идентифицираме какво би могло да представлява тази непозната двойка систематични ефекти.

Ние обаче открихме и друга особеност. Данните от Кеск покриват в голямата си част небето в Северното полукълбо, толкова голяма, че позволява да търсим отговор на въпроса има ли за промените на α “привилегирована посока” в тази съвкупност от данни. Казано другояче: Възможно ли е α да се променя не с промяната на червеното отместване, а с посоката в небето? Един прост анализ разкрива една специална посока, която би могла да има подобно свойство. Изненадващото е, че когато се направи подобен анализ на данните от VLT, от него изскача същата посока. Телескопът VLT е в Чили и, средно взето, е насочен към съвсем различна част от Вселената, в сравнение с Кеск. Друго съвпадение? Възможно е, но с него вече съвпаденията стават две.

Какво става, когато обединим старите примери от Кеск с новите от VLT? Резултатът е твърде интересен: зависимостта от посоката става много значима. Да се получи подобен резултат случайно изглежда във висша степен невероятно. Ако резултатът е щастлива случайност, бихме могли да очакваме, че една подсъвкупност от данни би довела до друг резултат. Имайки предвид това, ние направихме проста проверка с итеративно намаляване на примерите, изваждайки едно по едно данните за различните квазари, за да видим колко данни трябва да елиминираме, преди да изчезне очевидната зависимост на α от посоката. Открихме, че трябва да отхвърлим половината от данните, преди вероятността за случайност да се редуцира до достатъчно ниско равнище. Може би това отново е въпрос на късмет. Въпреки усилените ни опити, обаче, ние все пак трябва да намерим сред данните комбинация от систематични ефекти, които биха могли да имитират пространствена зависимост. Изглежда, че α зависи от посоката – вероятно в цялата наблюдаема Вселена. Каквато и да е промяна с времето е по-незначителна и понастоящем е под нашата чувствителност за регистриране.

Промяна на законите

Ако се докаже правотата на нашите открития, последствията ще бъдат изключителни, макар че са само частично изследвани. До съвсем скоро всички опити да се прецени какво се случва с Вселената, ако константата на фината структура се променя, бяха незадоволителни. Те се свеждаха до не повече от приемането, че α става промен-

лива в същите формули, които са изведени при предположението, че α е константа. Това е съмнителна практика. Ако α се променя, то ефектите от това трябва да запазват енергията и импулса, и те трябва да влияят на гравитационното поле във Вселената. През 1982 г. Яков Бекенщайн от университета в Ерусалим пръв обобщи законите на електромагнетизма така, че да обхващат и случая на непостоянни константи. Неговата теория издига смисъла на α от едно обикновено число до т.нар. скаларно поле, една динамична съставна част на природата. Тази теория обаче не включва гравитацията. Преди 10 години единият от нас (Бъроу) с колеги от Импириъл колидж в Лондон я обобщи и в това отношение.

Тази теория прави привлекателно прости предсказания. Промени на α от порядъка на няколко части на милион би трябвало да имат напълно пренебрежимо влияние върху разширяването на Вселената. Това е така, защото в космически мащаби електромагнетизмът е много по-слаб от гравитацията. Но въпреки че промени на константата на фината структура не влияят забележимо на разширяването на Вселената, разширяването влияе на α . Промените на α се предизвикват от нарушаване на баланса между енергията на електричното поле и енергията на магнитното поле. В течение на първите десетки хиляди години от космическата история радиацията доминира над заредените частици и поддържа електричното и магнитното поле в равновесие. С разширяването на Вселената плътността на лъчението намалява и доминираща съставка на космоса става веществото. Електричната и магнитната енергии започват да се различават и α започва да расте много бавно, пропорционално на логаритъма от времето. Преди приблизително шест милиарда години тъмната енергия ускорява разширяването, затруднявайки разпространението в пространството на всички физични въздействия. Така α отново става приблизително константа.

Този предсказан модел бе съвместим с по-раншните ни данни от телескопите Кеск, които като че ли показваха, че зависимостта на α от червеното отместване може би е свързано със зависимост от времето. Новите данни от VLT предизвикаха голямо объркване. Ако данните от Кеск са верни, и ако и данните от VLT са също верни, дори и да има зависимост на α от времето, тя трябва да е малка в сравнение с промените в зависимост от посоката, които наблюдаваме понастоящем.

Алфа е само началото

Всяка теория, която си заслужава вниманието, не само обяснява наблюденията, тя трябва да прави нови предсказания. Гореизложената теория предполага, че поради промените на α телата падат различно. Галилей предсказа, че във вакуум телата падат по един и същ начин, независимо от какво вещество са направени – една идея, известна като слаб принцип на еквивалентността, който бе демонстриран, когато астронавтът Дейвид Скот от *Аполо 15* пусна едно перце и чук и видя, че те удариха лунната повърхност едновременно. Ако обаче α се променя, този принцип повече не е валиден. Промените пораждат сила, която действа на всички заредени частици. Колкото повече протони има един атом в ядрото си, толкова по силно ще му действа тази сила. Ако нашите наблюдения върху квазарите са коректни, тогава ускоренията на различните вещества ще се различават приблизително с една част на 10^{14} , което е около 100 пъти по-малко от това, което може да се наблюдава в лабораторията, но все пак е достатъчно голямо, за да се прояви в планираните космически мисии като например STEP (space-based test of the equivalence principle³).

И така, накъде води науката тази дейност, засягаща постоянството на α ? Ние сме в очакване на нови данни и нови анализи, които да потвърдят или отхвърлят, че α се

³ Космически базирана проверка на принципа за еквивалентност. (Бел.прев.)

променя в указаната степен. Учените са фокусирани върху α , а не върху останалите константи, просто защото ефектите от нейните промени се наблюдават по-лесно. Ако обаче α се окаже податлива на промени, другите константи също трябва да са променливи, което би направило вътрешните механизми на природата по-капризни, отколкото учените са подозирали.