

ЛНС: една крачка по-близо до Големия взрив¹

Р. Ландуа, М. Рау

Когато преди 13 700 милиона години в Големия взрив възниква нашата Вселена, за по-малко от милиардна част от секундата огромно количество концентрирана енергия се трансформира във вещество. Температурите, плътностите и енергиите, за които става дума, са изключително големи. Според формулата на Айнщайн $E = mc^2$, за да се роди частица с маса m е необходимо съответното количество енергия (E), като скоростта на светлината c определя съотношението между масата и енергията. Така наличните скоро след Големия взрив високи енергии биха могли да доведат до раждането на частици с големи маси. Физиките предполагат, че именно в подобни хипотетични тежки частици може да се крият отговорите на въпросите за раждането и състава на Вселената, които все още са открити.

За да изследват тези теории, учените построиха Големия адронен колайдер (Large Hadron Collider – ЛНС). Ако определен тип частици може да се родят в най-големия ускорител в света – ЛНС, тогава, предполага се, че те са съществували и кратко след Големия взрив. В ЛНС ще се сблъскват частици, движещи се със скорости, близки до скоростта на светлината и ускорени до най-високите кинетични енергии, които са технически достижими днес. Тези енергии съответстват на енергиите, които според пресмятанията са съществували 10^{-12} s след Големия взрив. В резултат от ударите се очаква раждане на частици с маси, по-големи от постиганите в досегашните опити, което би позволило на физиките да проверят верността на своите идеи. Въпреки предположенията в медиите, обаче, енергията на ударите в ЛНС ще бъде около 10^{75} пъти по-малка от енергията на Големия взрив, така че страховете за предизвикване на някакъв “Малък взрив” са неоснователни.

“Тухличките” на веществото: Стандартният модел

От времето на гръцките философи хората са се чудили от какво е изграден нашият свят. Възможно ли е да се обясни невероятното разнообразие на природните обекти – скали, растения, животни (включително човека), облаци, мълнии, звезди, планети и много още – по някакъв прост начин? Теориите и откритията на физиките от последното столетие дадоха отговор на този въпрос: всичко във Вселената е изградено от малък брой “тухлички”, наречени частици на веществото, управлявани от четири фундаментални сили. Нашето най-добро разбиране за връзките между тях кристализира в стандартния модел за частиците и силите (вж. схемата²). Разработен в началото на 70-те години на 20. век, днес този модел представлява една добре проверена физична теория.

¹ Превод със съкращения от Science in school, **10**, 2008. Статията е подходяща за ученици от 10. и следващите класове.

² За четене надписите върху схемата използвайте зума.



Частичите на веществото са два вида: лептони и кварки. Всички те са точкови обекти (не по-големи от 10^{-19} m, което е една десетохилядна от размера на атомното ядро). Общо лептоните и кварките образуват съвкупност от 12 частици, разпределени в три поколения, всяко едно състоящо се от два лептона и два кварка. Основното поколение, включващо up-кварка и down-кварка (горния и долния кварк), електрона и неутриното (двата лептона), е достатъчно за обясняване нашия видим свят. Осемте частици в останалите две поколения не са стабилни и изглежда, че се различават от частиците в основното поколение само с по-големите си маси. Докато Нобеловата награда по физика за 2008 година бе присъдена за обясняване защо тези други частици биха могли да съществуват³, физиците все още се мъчат да разберат защо те са точно осем на брой.

“Комуникациите” между частиците на веществото се осъществяват по четири различни начина, чрез обмен на частици, наречени бозони, които са носители на взаимодействията (по един тип за всяко от четирите взаимодействия). Тях можем да си представяме като малки порции енергия със специфични свойства. Интензивността и обсегът на тези четири взаимодействия (фундаменталните сили) са отговорни за йерархичната структура на материята.

Три кварка се свързват заедно посредством близкодействащото *силно взаимодействие* и образуват адрони (частици, изградени от кварки) – протоните (два горни и един долен кварк) и неутроните (един горен и два долни кварка) – частиците, изграждащи атомните ядра. Горните кварки имат заряд $+2/3$, а долните $-1/3$, което обяснява защо протонът има положителен заряд, а неутронът е електронеутрален.

По какъв начин електроните се привличат към ядрото, за да образуват атом? Тъй като протоните имат положителен електричен заряд, а електроните – отрицателен електричен заряд, те се привличат взаимно посредством далекодействащото *електромагнитно взаимодействие*, което удържа леките електрони в орбита около

³ За подробности вж. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/press.html, а също така съответния превод в сп. Физика и на адрес <http://www.physica.hit.bg>.

тежкото ядро. Няколко атома може да се свържат в молекули, които представляват материалната основа на живота.

Доколкото всички тези частици притежават маса, те се привличат и *гравитационно*, но тази далекодействаща сила, третият тип взаимодействие, е толкова слаба (около 38 порядъка по-слаба от електромагнитната), че играе роля само, когато се привличат огромен брой частици. Комбинираното гравитационно привличане от всички протони и неутрони, които изграждат Земята представлява силата, която ви предпазва от отлитане в космическото пространство.

Накрая, съществува и *слаба сила* (всъщност, по-силна от гравитационната, но най-слаба измежду останалите три). Нейният радиус на действие е изключително малък, което позволява преобразуването на един кварк от един тип в друг тип, както и на един тип лептон в друг тип. Без тези преобразования не би била възможна радиоактивността, дължаща се на бета-разпада, при която един неутрон се превръща в протон, т.е. един долен кварк се превръща в горен кварк. Без този процес Слънцето не би могло да свети: звездите получават енергията, която излъчват, от процеси на ядрен синтез, при които протон се превръща в неутрон чрез преобразуване на горен кварк в долен кварк, с други думи – обратно на бета-разпада.

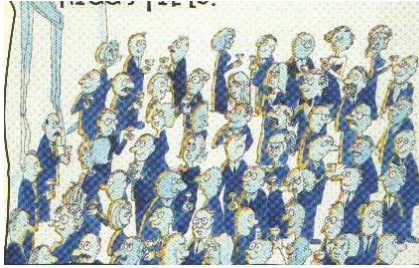
Въпреки че Стандартният модел служи на физиците добре като средство за разбиране на фундаменталните закони на природата, той не разказва цялата история. Известен брой въпроси остават без отговор и експериментите на ЛНС са насочени към решаване на някои от оставащите проблеми.

Проблемът “маса” – полето на Хигс

Един от отворените въпроси е следният: защо частиците (а следователно и веществото) имат маса? Ако частиците нямаха маса, във Вселената не би могла да съществува каквато и да е структура, тъй като всичко би се състояло от безмасови частици, движещи се със скоростта на светлината. Масата на частиците обаче предизвиква проблеми от математическо естество.

През 60-те години на 20. век бе изказана една идея за обединение на слабата сила и на електромагнитната сила в рамките на една мощна теория, която описва електричеството, магнетизма, светлината и някои видове радиоактивност като прояви на една обща сила, наречена (не неочаквано) електрослаба сила. Но за да заработи това обединение и математически, се изискваше носителите на тази сила да имат маса. Математически обаче не бе ясно как може да се придаде маса на тези частици. Така през 1964 г. физиците Питър Хигс, Робърт Браут и Франсоа Енглер предложиха едно възможно решение на тази гатанка. Те предполагат, че частиците придобиват маса чрез взаимодействие с едно невидимо силово поле, напечено поле на Хигс. Свързаните с него частици – носители, се наричат бозони на Хигс. Полето се разпростира в целия космос: всяка частица, която взаимодейства с него (това взаимодействие можем да си представяме като своеобразно триене), придобива маса. Колкото повече взаимодействат, толкова по-тежки стават частиците, докато частиците, които не могат да взаимодействат с полето на Хигс, остават безмасови (вж. петте картинки под общото заглавие “Механизмът на Хигс”).

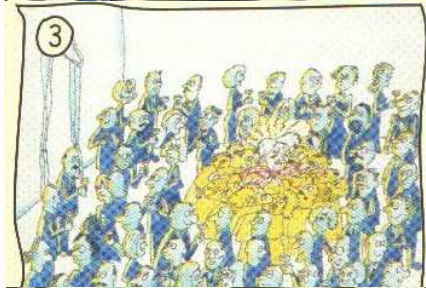
Механизмът на Хигс



1. За да разберете механизма на Хигс си представете зала, пълна с физици, които кротко си бърборят – това наподобява пространството, запълнено само с полето на Хигс



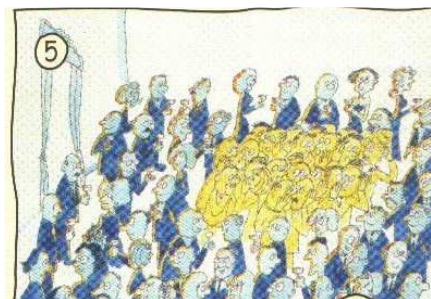
2. В залата влиза един много известен физик – например Алберт Айнщайн. Присъствието му предизвиква смущение сред физиците, почитателите му се скупчват около него, затруднявайки всяка негова крачка, докато пресича залата.



3. Това увеличава съпротивлението при неговото движение – с други думи той придобива маса, точно както придобива маса всяка частица, движеща се в полето на Хигс.



4. Ако някой пусне някакъв слух в залата ...



5. той предизвиква същия тип скупчвания, но този път между самите физици, които също се придвижват из залата. При тази аналогия тези скупчвания съответстват на частиците на Хигс.

Идеята осигури задоволителна комбинация от установените теории и наблюдаваните явления. Проблемът е, че никой никога не бе наблюдавал тайнствения бозон. Трудността за откриването му (ако той въобще съществува) следва от факта, че теорията не предсказва каква е неговата маса, така че остава да бъде търсен по метода на пробите и грешките.

Като използват удари между частици при високи енергии, физиците раждат нови частици и търсят измежду тях бозона на Хигс. Търсенето продължава през последните 30 години, като включва все по-големи и по-големи енергии, но търсенето на частицата е все още безуспешно – възможно поради това, че енергиите не са били достатъчно високи. Както изглежда, частиците на Хигс трябва да имат маса, поне 130 пъти по-голяма от масата на протоните. Учените вярват, че енергиите, които ще бъдат достигнати на LHC – седем пъти по-високи от достиганите до сега – ще бъдат достатъчни за регистриране бозоните на Хигс.

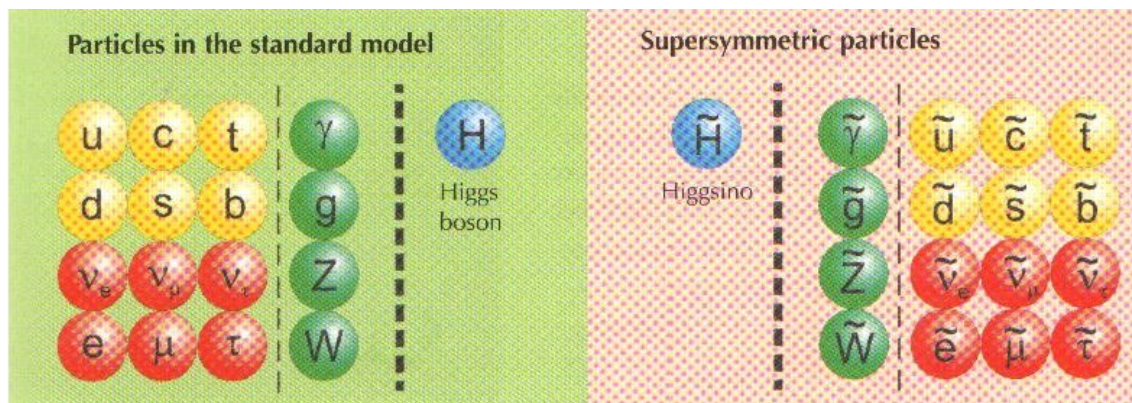
Два от експериментите на LHC, наречени ATLAS и CMS, ще търсят следи от разпадането на частиците на Хигс, за които се предполага, че са много нестабилни. Доказателството за съществуването им би било огромна крачка във физиката на частиците, тъй като ще придаде завършен вид на нашето разбиране за веществото. Ако обаче бозонът на Хигс не бъде открит, това би означавало, че той или е още по-тежък от това, което може да регистрира LHC, или просто, че той въобще не съществува. В последния случай може да се окаже, че е вярна една от предложените конкурентни теории. В противен случай теоретичната физика ще бъде изпратена обратно до черната дъска, за да измисля напълно нова теория за произхода на масата.

Тъмната страна на Вселената

Съществува и друг важен аспект на физиката на частиците, който не може да бъде обяснен от Стандартния модел: наблюденията показват, че всичко, което “виждаме” във Вселената (звезди, планети, прах) съставлява само някакви си 4 % от нейната маса и енергия (във форма на лъчения и вакуумни полета, такива като полето на Хигс). Голямата част от Вселената обаче е съставена от невидими субстанции, които не излъчват електромагнитна радиация, с други думи, които не можем да наблюдаваме с телескопи или подобни инструменти. Тези субстанции взаимодействат с “нормалното” вещество само посредством гравитацията, но не и с останалите три фундаментални сили. Следователно ние можем да ги открием само посредством техните гравитационни ефекти, което ги прави много трудни за изучаване. Тези мистериозни субстанции са известни като тъмно вещество и тъмна енергия.

Съвременните наблюдения предполагат, че тъмното вещество съставлява около 26 % от Вселената. Първият намек за неговото съществуване датира още от 1933 г., когато астрономичните наблюдения и пресмятанията на гравитационните ефекти разкриват, че би трябвало да има повече материя в и около галактиките, отколкото се наблюдават с телескопите. Сега изследователите вярват, че гравитационните ефекти от тъмното вещество се свеждат не само до по-бързо въртене на галактиките, отколкото би следвало да се очаква от техните наблюдавани маси, но също така че гравитационното поле на тъмното вещество отклонява светлината от обектите зад него (гравитационни лещи). Тези ефекти може да се измерват и може да се използват за определяне плътността на тъмното вещество, въпреки че не можем да го наблюдаваме пряко.

Но какво представлява тъмното вещество? Една идея е, че то може да се състои от *суперсиметрични частици* – един хипотетичен пълен набор от частици, партньори на всяка от дванадесетте частици, участващи в Стандартния модел (вж. схемата).



Представата за суперсиметрия постулира, че на всяка позната фундаментална частица на веществото, както и на частиците, носители на взаимодействията (напр. на електрона и на фотона – носителя на електромагнитната сила), съответства суперсиметричен партньор (в нашия пример – с-електрон и фотино). В един суперсиметричен свят те биха имали същите маси и заряди, като партньорите си в Стандартния модел, но техните вътрешни ъглови моменти (наречени спин и измервани в единицата константа на Планк), биха се различавали с $1/2$. Обикновено частиците на веществото имат спин $1/2$, а частиците, носители на взаимодействията имат спин 1 . Промяната на спина с $1/2$ би превърнала частиците на веществото в носители на взаимодействия и обратно.

Какво общо има обаче суперсиметрията с тъмното вещество? Ако теорията на суперсиметрията е вярна, тогава при Големия взрив би трябвало да се родят много суперсиметрични частици. Много от тях биха били нестабилни и биха се разпаднали, но най-леките суперсиметрични частици би следвало да бъдат стабилни. И тъкмо тези най-леки суперсиметрични частици биха могли да се мотаят из Вселената и да се групират в големи сфери от тъмна материя, за които си мислим че са служили като скелета за формиране на галактиките и на звездите в тях.

Нито една от тези суперсиметрични частици обаче до сега не е регистрирана – отново вероятно поради това, че масите им са твърде големи и се намират извън обсега на ускорителите, предхождащи ЛНС – както и с бозона на Хигс. Така, даже и да съществуват, дори и най-леките от тях трябва да са твърде тежки: вместо да имат масата на техните суперсиметрични партньори (както се предполагаше първоначално), те би трябвало да притежават много по-големи маси. Суперсиметрията се използва също като обяснение на други, много сложни загадки във физиката на частиците. Така, че ако някой от експериментите на ЛНС успее да регистрира и измери свойствата на тези частици, това би било значителен напредък в разбирането на за Вселената.

Загубеният анти-свят?

Ние вече казахме за веществото, за тъмното вещество и тъмната енергия. Но в ранната Вселена е имало нещо много повече: имаме силни основания да вярваме, че в една нищожна част от секундата след Големия взрив Вселената е била изпълнена с равни количества вещество и антивещество. Когато частиците се раждат от енергия, както при Големия взрив или при удари в ускорителите, те винаги се раждат заедно със своите антивеществени двойници. Щом една частица от антивещество срещне своя веществен двойник, те анихилират и в процеса на аниhilация преобразува тяхната маса отново в енергия. Така, при Големия взрив веществото и антивеществото би трябвало да се родят в равни количества, след което изцяло взаимно да се унищожат. Въпреки това, докато всичкото антивещество от Големия взрив е изчезнало, в края на процеса е останало известно количество вещество – това, от което днес се състоим ние. Как би могло да се осъществи това?

Антивеществото е като огледален образ на веществото. За всяка частица на веществото съществува частица антивещество със същата маса, но с обратни свойства: например отрицателно зареденият електрон притежава положително заредена античастица, наречена позитрон. Съществуването на антивещество бе постулирано през 1928 г. от физика Пол Дирак. Той разви теория, която комбинира квантовата механика и Айнщайновата специална теория на относителността и описва взаимодействията на електрони, движещи се със скорости, близки до скоростта на светлината. Оказва се, че изведеното от него основно уравнение притежава две решения, едно за електрона и второ, което описва частица със същата маса, но с положителен заряд (която днес ние познаваме като позитрон). През 1932 г. бе открито доказателство за правилността на тази идея – позитронът бе открит при изучаване на космичните лъчи. Тези лъчи се сблъскват при високи енергии с частиците в земната атмосфера: при тези удари и днес се раждат позитрони и антипротони.

За последните 50 години и повече получаването на античастици в лаборатории, подобни на ЦЕРН, се превърна в рутинна операция. Изследванията показаха, че с висока точност техните статични характеристики (маса, електричен заряд и магнитен момент) са наистина като на техните двойници при веществото. През 1995 г. ЦЕРН стана първата лаборатория, в която бяха изкуствено получени цели анти-атоми, съставени от антипротони и позитрони.

Ако количествата вещество и антивещество са били по начало равни, защо не са анихилирали напълно, преобразувайки се изцяло в лъчение? Фактът, че част от веществото е оцеляло, а антивеществото е изчезнало, предполага, че на ранните етапи е съществувал известен дисбаланс, водещ до нищожно преобладаване на количеството вещество спрямо количеството антивещество. Точно от този излишък са изградени звездите и галактиките – както и ние. Физиците днес се мъчат да разберат как би могъл да възникне този дисбаланс.

Един от експериментите на LHC (LHCb) е насочен към по-доброто разбиране на изчезването на антивеществото. За целта ще се изследва скоростта на разпадане на b -кварките, които принадлежат към третото поколение, и ще се сравни със скоростта на разпадане на анти- b кварките. Вече е известно, че тези скорости са различни, но се очаква, че по-детайлните измервания ще доведат до по-дълбоко вникване в механизмите на този дисбаланс.

Първичният бульон

За да отговорят на всички гореизброени въпроси, физиците ще осъществяват удари между протони в LHC. За част от годината обаче ще се ускоряват и удрят оловни йони, като резултатите ще се анализират от ALICE, четвъртият голям експеримент на LHC (освен ATLAS, CMS и LHCb).

Около 10^{-5} s след Големия взрив, на един “по-късен” етап в развитието на Вселената, когато тя се е охладила до “обикновените” 2000 милиарда градуса, кварките се оказват свързани в протони и неутрони, които по-късно формират атомните ядра (вж. схемата История на Вселената). Кварките се лепват заедно чрез глюони – частиците, носители на силното взаимодействие (вж. схемата на Стандартния модел). Благодарение на факта, че силите на привличане между кварките и глюоните растат с увеличаване на разстоянията между тях (противоположно на поведението на другите видове сили), не е възможно експериментално да се избият отделни кварки или глюони от протоните, от неутроните или от другите съставни частици, каквито са например мезоните. Физиците казват, че кварките и глюоните са *пленници* вътре в тези съставни частици.

Да предположим обаче, че *беше* възможно да обърнем процеса на пленяването им. Стандартният модел предсказва, че при много високи температури, комбинирани с огромни плътности, кварките и глюоните биха съществували в свободно в едно ново състояние на веществото, известно като кварк-глуонна плазма – един горещ и плътен “бульон” от кварки и глюони. Подобен преход би трябвало да се осъществи, когато температурата превиши 2000 милиарда градуса, около 100 000 пъти по-горещо, отколкото е в ядрото на Слънцето. За няколко милионни части от секундата, около 10^{-6} s след Големия взрив, температурата и плътността на Вселената са били наистина достатъчно високи, така че цялата Вселена е била в състояние на кварк-глуонна плазма. Експериментът ALICE ще пресъздаде тези условия в обем с размерите на атомното ядро, а детайлният анализ на получените следи ще провери съществуването на плазмата и ще изследва нейните характеристики.

