

Различни ли са свойствата на антиматерията от тези на материята?

Стефан Плачков

От ученическите скамейки познаваме законите на Нютон. Вторият от тях гласи, че силата, действаща върху една система, е равна на масата на системата, умножена по ускорението. Легендата за ябълката, която пада от дървото заради земното ускорение, е отличен пример за този закон, неслучайно наречен оттогава Закон за всеобщото привличане. Наистина ли е всеобщо привличането? Откритието на великия учен се отнася за материята около нас, тази, която и той, и ние познаваме отлично. Но какво би станало ако ябълката на Нютон не се състои от материя, а от антиматерия? Няма ли анти-ябълката да тръгне нагоре вместо надолу?

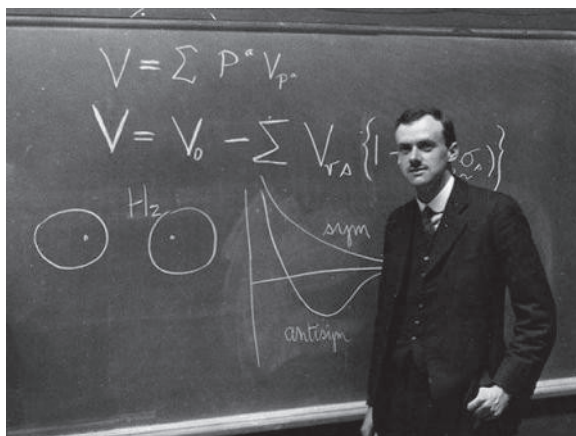
Въпросът може би изглежда прекалено предизвикателен. Възможно ли е едно тяло да „падне“ нагоре? Гравитацията може ли да се превърне в един вид „антигравитация“ ако законът на Нютон се приложи към антиматерията? Нито Нютон, нито по-късно Айнщайн и неговата Обща теория на относителността не правят разлика между материята и непознатата все още за тях антиматерия. И за двамата гениални физици действащата сила зависи само от масата на привличаното тяло. За окончателно доказателство, че антиматерията не променя посоката или мощността на силата е необходим експеримент, лесен за формулировка, но

изключително труден за изпълнение. Няколко научни колективи от Европейската организация за ядрени изследвания ЦЕРН (CERN) работят по тази тема. Най-първите резултати от тях бяха публикувани в края на миналата година. Но преди да стигнем до тях, да се върнем с близо век назад, до откриването на антиматерията.

Годината е 1927-а. На конгрес, организиран от индустриалеца Ернест Солве (Solvay) в Брюксел, се обсъждат основните принципи на новата теория за елементарните частици – квантовата механика. Тук трябва да отбележим, че познатите тогава елементарни частици са само три: *електрон*, *фотон* и *про-*

тон. Даже и *неутрон* е непознато понятие. Конгресът е дълго подготвяно научно събитие, в което участват най-добрите физици за епохата. От присъстващите 29 учени, 17 са получили или в следващите години ще получат Нобелова премия. Младият, 25-годишен физик от колежа Сейнт-Джон в Кембридж, Великобритания, Пол Ейдриън Морис Дирак (Paul Adrien Maurice Dirac, 1902 - 1984), въпреки че е един от създателите на квантовата механика не е напълно удовлетворен от нея. Тъй като теорията не е релативистична, тя остава валидна само за частици с малка скорост спрямо тази на светлината. С груги гуми, ако електронът в един атом се движи с висока, близка до тази на светлината скорост, изчисленията на квантовата механика стават неверни. Теорията е хубава, но не е прелестна. Талантливият млад учен решава да разработи това несъвършенство.

След няколко месеца интензивен и изморителен труд Дирак постига успех. Той се изразява в кратко, но изпълващо всички неговии очаквания уравнение („уравнение на Дирак“), което съчетава принципите на квантовата механика с тези на все още новата за тогава теория на относителността на Айнщайн. С две прочути статии, публикувани в началото на 1928 г., той обогатява квантова механика и я превръща в релативистична квантова теория. Гениален физик, но и даровит математик, Дирак твърди, че законите на физиката трябва да притежават математическа красота. Математически блестящото му уравнение се приема веднага като изключителен принос към науката. Неочаквано и за самия Дирак, уравнението



Пол Дирак на лекция по квантова механика. За двата, неочаквани от него, приноса на неговото уравнение (спин на елементарните частици и съществуването на позитрон), Дирак казва по-късно: „Моего уравнение се оказва по-интелигентно от мен.“

Снимка: American Institute of Physics

го възнаграждава с две големи изненади. Първата изненада е обяснението на неотдавна откритата квантова характеристика на елементарните частици, техният собствен ъглов момент наречен спин, както и неговата стойност! Втората изненада обаче се оказва трудна за интерпретация: вместо едно единствено решение уравнението предлага две.

След повече от две години колебания между различни хипотези и възможности, през май 1931 година Дирак стига до заключението, че само „нов вид частица, непозната от експерименталната физика, със същата маса като тази на електрона, но с положителен електрически заряд“ (вместо отрицателен за електрона) може да обясни това допълнително решение. Самият Дирак нарича тази нова частица „антиелектрон“. За епохата това заключение звучи като истинска революция, по две причини:

Първо, заради последствията от съществуване на такава частица, анализирани от самия Дирак през 1931 г. При евентуална среща на антиелектрон с

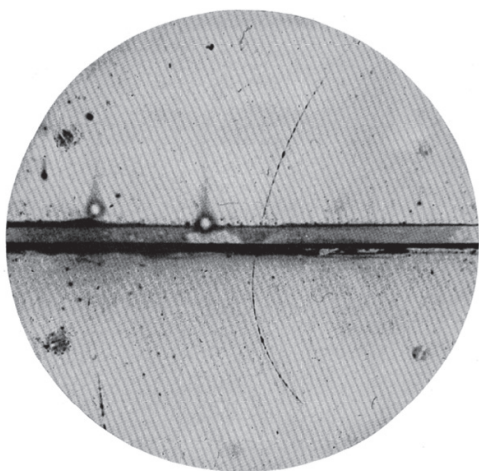


*В посветения за учени към на Уестминстърското абатство в Лондон се намират гробовете на велики личности – Исаак Нютон, Ернест Ръдърфорд, Джеймс Максвел или Чарлс Дарвин. Дирак е погребан в град Талахаси, Флорида, където е бил професор по физика в последните години от живота си. В негова чест, до гроба на Нютон е вградена паметна плоча с прочутото уравнение на Дирак.
Снимка: Wikimedia*

електрон двете частици взаимно се анихилират и се превръщат във фотон, който е без маса, но има енергия. Обратният процес, материализирането на фотон в две частици тогава също става възможен. За първи път Дирак изказва хипотезата, че материята може да бъде създадена от енергия, невероятно смело предположение за всички времена дотогава. Неслучайно гениални учени като Ернест Ръдърфорд, Нилс Бор или Волфганг Паули се отнасят скептично към тези нови идеи. Второ, по чисто математически път и без никакви експериментални факти се стига до заключение, което дълбоко променя представите за света. Дотогава математиката е само удобен език за описание на познатата природа. Как е възможно този език не само да описва природата, но и да предсказва непозната за нас реалност в нея?

Докато научно-философският спор в Европа продължава, в края на 1932 г. се получава известие от далечната Калифорния с предположаемото доказателство за реалното съществуване на антиелектрон. Изучавайки космическото излъчване с мъглинна камера, поставена в магнитно поле, американският физик Карл Дейвид Андерсон (Carl David Anderson, 1905 - 1991) открива частица с маса, сравнима с тази на електрона, но с положителен електрически товар. Откритието му не идва случайно. Няколко пъти вече Андерсон е забелязвал, че частици с маса, подобна на тази на електрон, се отклоняват от магнитното поле в обратна посока. Първата му хипотеза е, че вместо откъм небето това са електрони, които идват от обратна посока, откъм Земята. Дълги колебания, размисли и много допълнителни наблюдения са му били необходими, за да стигне до заключението, че странните следи с обратно отклонение са нова и непозната частица. От близо 1300 снимки на космически лъчи 15 се оказват на частици с положителен електрически заряд. Андерсон малко по малко се убеждава, че електрон с положителен заряд е единственото възможно обяснение. В началото на 1933 г. публикува статия със заглавие, което не подлежи на съмнение: „Положителният електрон“ („The Positive Electron“). За откритието на тази нова частица, наречена оттогава позитрон, в 1936 година Андерсон става лауреат на Нобелова награда.

Ако електронът има близък античастица, защо и протонът да няма? С аргументи за симетрии във физиката Дирак стига до положителен отговор на този въпрос. В статия през 1931 г. той предвижда и съществуването на антипротон със същата маса като на протона, но с отрицателен електрически заряд. В



Следа, оставена от позитрон в мъглинна камера, поставена в магнитно поле. Снимката е направена от Андерсон през 1931 г. и публикувана в началото на 1933 г. Хоризонталната линия е оловна плоча с дебелина 6 мм, която разделя камерата на две с цел определяне на посоката, в която се движи частицата. Идващият отгоре позитрон губи част от енергията си в оловото, поради което отклонението му в долната половина е по-силно. Снимка: Wikimedia

лекцията му пред Нобеловия комитет в края на 1933 г. той допълва тази хипотеза и предполага, че е възможно звезди в космоса да са изградени от позитрони и антипротони, свързани в антиатоми, тоест антиматерия. Мисълта му отива и по-надалеч: Дирак прогнозира, че ако има пълна и перфектна симетрия в природата между положителния и отрицателния електрически заряд, то тя е валидна за всички видове частици. Този закон се оказва напълно верен и до днес, въпреки че броят на елементарни частици е многократно увеличен.

Антипротонът е открит две десетилетия по-късно, през 1955 г. от Емилио Джино Сегре (Emilio Gino Segrè, 1905 – 1989) и Оуен Чембърлейн (Owen Chamberlain, 1920 – 2006) в новопостроения синхротрон за протони в Бъркли, Калифорния. За това откритие гвама-

та учени поделят Нобелова премия през 1959 година. Една година след антипротона е открит и близък на неутрона, антинеутрон. Въпреки че и неутронът и антинеутронът са електрически неутрални, те имат еднакъв, но противоположен „магнитен момент“, допълнителна величина, която показва колко силно е взаимодействието им с магнитно поле. Днес вече знаем, че както протонът, така и неутронът не са елементарни частици, а се състоят от елементарни кварки. Всеки кварк има своя античастица – антикварк. Така например в един неутрон има три основни кварки, докато антинеутронът се състои от съответните им три антикварки.

Като симетрични спрямо електричния им товар близнаци, античастиците имат същите свойства като обикновените частици: маса и време на живот. Така например и позитронът, и антипротонът са стабилни, тоест сами по себе си не се разпадат. Свързването на позитрон (електрически товар +) с антипротон (електрически товар –) би трябвало да създаде атом на антиводород, първа стъпка към антиматерията.

Материята около нас – всичко което ни заобикаля, леки и тежки елементи, инертни вещества, жива флора и фауна – всичко е изградено от само три основни частици: протони, неутрони и електрони. Свързването им в различни химически елементи и вещества е основата на невероятното разнообразие в природата. Съответните съставки на антиматерията – антиелектрон, антипротон и антинеутрон са също налице. Въпреки това, около нас не съществуват атоми на антиводород. Както Дирак предполага още през 1931 г., всеки път когато античастица взаимодейства с обикновена частица двете



Опростена схема, горе: на водород (електрон и протон) и долу: на антиводород (позитрон и антипротон), заедно със съставките на протон (кварки) и на антипротон (антикварки). Снимка: nuclear-power.net

взаимно се анихилират, тоест и двете изчезват. Масата им се превръща в енергия, която се излъчва под формата на високоенергийни фотони (гамма-лъчи) или евентуално на групи двойки частици с положителен и отрицателен заряд. Обратното взаимодействие също съществува. Енергията, пренасяна от фотоните, може да се превърне в двойка частици с противоположен електрически заряд. Създаването на двойка частица-античастица е част от всекидневния живот на физиците от десетки години. Все пак, въпреки че са близнаци, материята и антиматерията не могат да съществуват едновременно. Но тогава изниква въпрос: има ли някъде във Вселената антиматерия?

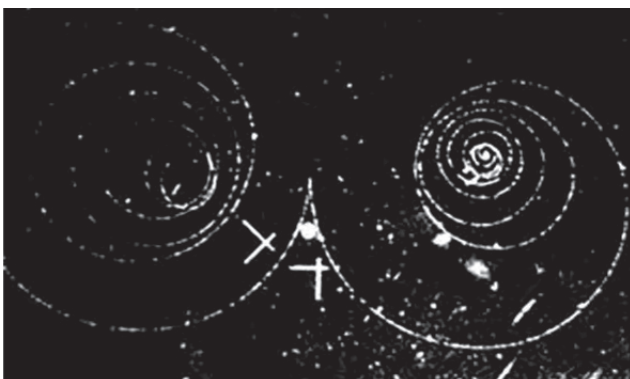
Отговорът е кратък: най-вероятно не. Земята, Слънцето, Млечният път и безбройните галактики около него са изградени само от материя. Всички наблюдения на астрономически обекти досега са съвместими с познатата на всички материя. Несъмнени доказателства за съществуване на анти-звезди или анти-галактики все още липсват. Изглежда, че цялата Вселена е сътворена от материя. Това заключение обаче противоречи както на законите за елементарните частици, така и на Стандартният модел за създаване на Вселената. Позната на всички като „Големия взрив“, тази теория предполага, че в Началото, или преди близо 14 милиарда години, Вселената е била електрически неутрална. Тази хипотеза означава, че в нея би трябвало да има еднакви количества материя и антиматерия. Това мистериозно противоречие между наблюденията и разбирането ни за еволюцията на Космоса е познато като Барionната асиметрия на Вселената.

Липсата на антиматерия е основен проблем във физиката от средата на миналия век. Един от първите учени които търсят отговор на тази енигма е известният съветски физик Андрей Сахаров (1921 – 1989). Той изказва хипотезата, че в най-ранните етапи от живота на Вселената материята и антиматерията са съществували в равни количества. Когато кварките се съединяват едни с други и съставят барионите (барион е общо понятие за тежки частици, като например протон или неутрон или по-тежки от тях) Сахаров стига до извод, че са необходими три условия („условия на Сахаров“), за да се произведе повече материя, отколкото антиматерия. Без да влизаме в подробности за тях, можем само да отбележим, че тези три условия предлагат

само частично обяснение за липсата на антиматерия. Има ли други обяснения? Да, разбира се. Едно от тях е, че още в началото на Големия взрив материята и антиматерията са се разделили и са образували две огледални Вселени, като анти-Вселената пътува обратно във времето спрямо нас. Това интелектуално привлекателно предположение обаче остава без възможност да бъде доказано. Друго обяснение е, че материята и антиматерията не се привличат, а се отблъскват. Ако тази хипотеза е вярна, антиматерията би трябвало

да се намира в далечни области на Вселената, което я прави практически невидима или поне трудно откриваема. Но за разлика от огледалните Вселени, посоката на гравитационното взаимодействие между материя и антиматерия може да бъде премерена в научна лаборатория.

Липсата на антиматерия не пречи тя да бъде предмет на изучаване в най-големите световни лаборатории. Съединяване на позитрони с антипротони за първи път бе успешно постигнато в ЦЕРН през 1995 г. Но за да могат своите свойства им да бъдат изучавани, така създадените атоми на антиводород не трябва да се докосват до материята, условие изключително трудно за постигане и изискващо минимална скорост на атомите (ниска температура) и извънредно висок вакуум, за да се избегне всякакъв контакт с материята. Чак през 2011 година учените успяват да запазят антиводород в продължение на около 17 минути.



Снимка на двойка електрон и позитрон, оставили следи в детектор на частици, наречен мехурчеста камера. Двойката е създадена от високоенергиен фотон, който слиза вертикално отгоре. Фотонът няма електрически товар и затова е невидим за камерата. Енергията на фотона се превръща в двойка електрон и позитрон. Преминавайки през камерата двете новообразувани частици постепенно намаляват скоростта си и поради силното магнитно поле в което се движат описват спирали в противоположна посока. Снимка: CERN

Отговор на въпроса за посоката, в която се притегля антиматерията – наголу както обикновената материя, или нагоре – беше даден чак в края на 2023 година, от научния колектив ALPHA (Antihydrogen Laser Physics Apparatus) от ЦЕРН. Теоретично принципът на експеримента е лесен: създават се атоми на антиматерия, оставят се свободно под влияние на земната гравитация и се наблюдава в каква посока се задвижват: нагоре или наголу. Практическото изпълнение изисква обаче няколко вида единствени в света сложни апаратури, комбинирани в прецизен технологически процес. Първата стъпка е произвеждането на позитрони. За това се използва радиоактивния елемент Натрий-22 (^{22}Na), който се разпада, изпускайки позитрон. След разпада позитроните се събират в йонен капан (капан на Пенинг), който ги предпазва от сблъскване със стените му. Втората стъпка е производство на антипротони чрез бомбардиране на мишена с протони от единия от уско-



Залата на експеримента ALPHA в ЦЕРН. Снимка: CERN

рителите на частици в ЦЕРН. След многократно намаляване на скоростта им, антипротоните също попадат в йонен капан. Третата стъпка или смесването на позитроните с антипротоните е най-сложна. Присъединявайки се, двете частици образуват електрически неутрални атоми, някои от които влизат в изключително мощна, построена за целта магнитна бутилка. Така всеки 4 часа учените успяват да „уловят“ около 100 атома на антиводород. Последният етап е свободното пускане на антиатомите и броене на аниhilациите им над бутилката и под бутилката.

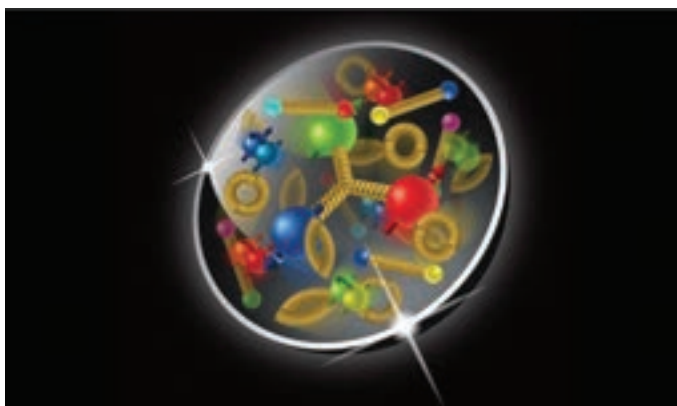
Резултатът е че, както и изглеждаше най-вероятно, материята и антиматерията се привличат. За щастие (или за жалост...) изненада няма. Общата теория на относителността на Айнщайн остава неопровержима. Последствие от нея е така нареченият „принцип на слабата еквивалентност“, който изисква всички маси да реагират еднакво на

гравитацията, независимо от тяхната вътрешна структура. С други думи, частицата и античастицата би трябвало да падат надолу независимо от това дали съдържат кварки или антикварки. Но ако спекулативно предположим, че резултатът беше обратен и че антиматерията е отблъсквана от материята, то това откритие би довело до революция във физиката.

Публикацията на колектива ALPHA не се задоволява само с измерване на посоката в която „пада“ антиматерията. Тя добавя и допълнителни мерки на размера на ускорението на антиматерията към Земята. От малките класове знаем, че земното притегляне се изразява със стойността на ускорението $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Според събраните данни ускорението на антиматерията излиза 75% от това на материята, но със стандартна грешка от 21%. С други думи двете стойности са съвместими. Стандартната грешка е още голя-

ма, но ALPHA, заедно с други два експеримента в ЦЕРН, трескаво работят за намаляването ѝ. Първият от тях, GBAR (Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest), съобщи през май 2023 г. за успех в синтезирането на антиводородни атоми. Вторият е AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy). Трите научни колектива използват различни методи за съставяне на антиводород. Учените прогнозираха, че допълнителните данни ще подобрят точността върху ускорението на антиматерията до една част от един милион!

Има ли наистина нужда от такава огромна точност? Може да се отговори със сигурно „да“ на този въпрос. Обяснението идва от същността на масата на композитните частици, които са протон и антипротон. Всеки протон е съставен от три елементарни кварки, но тези тривалентни кварки обясняват само 1% от неговата маса. Останалите 99% от масата на протона възникват от динамиката на взаимодействията на кварките между тях благодарение на носителите на ядрената сила, така наречените *глуони*. Чрез взаимодействие с квантовите полета глуоните придобиват енергия, част от която бълбука в „море“ от виртуални (съществуващи изключително кратко време) кварки и антикварки. Както и това море, така и глуоните, и енергията, необходима за свързването между тях, допринасят за масата на протона. На базата на това обяснение стои квантовата хромодинамика, теорията, описваща силното ядрено взаимодействие между кварки и глуони.



Изображение на съставките на протон. Големите точки представляват трите основни (валентни) кварки, докато малките точки изобразяват кварките и антикварките на морето. Пружините между тях са глуоните, които ги държат заедно. Структурата на антипротона е почти същата, с три валентни антикварки вместо кварки.

Снимка: Brookhaven National Laboratory

намика, теорията, описваща силното ядрено взаимодействие между кварки и глуони.

Както вече читателят се досеща от това обяснение, разликата между протон и антипротон се дължи само на валентните кварки. Както глуоните, така и „морските“ кварки имат еднакъв ефект върху масата на тези две частици – близнаци. Затова, ако има евентуално разлика в гравитацията между тях, тя би била прекалено малка, под 1% или даже още по-малка.

Експериментите с антиводород остават твърде трудни за реализиране и изискват време и усвояване на нови и сложни технологии. Въпреки това, има голяма вероятност получените резултати да потвърдят познатите досега закони, принципи и основни симетрии между материя и антиматерия. Разочарованието би било само привидно. Историята на физиката показва, че Природата понякога носи изненади. Само бъдещите резултати от ЦЕРН и други лаборатории в света биха потвърдили, че вече я познаваме добре. ■