

Физика на частиците без частици

С. Дж. Гейтс мл., У. Зиегел¹

Физиката на частиците е най-фундаменталната област на физиката поради факта, че нейна цел е да сведе огромното разнообразие и сложност на нашия свят до няколко прости математически закона. Съвсем до скоро като последни градивни елементи на материята бяха разглеждани точковите частици. Фундаменталните частици включват кварките, глюони, електрони, фотони, гравитони и много други. Един клас съставни частици представляват адроните, които се състоят от кварки, свързани посредством глюони. Към тях спадат протоните и неутроните, както и мезоните, които ги свързват, за да образуват атомните ядра. На следващото равнище на сложност се намират атомите, образувани от ядро и електрони, свързани помежду си с помощта на фотони. Накрая гравитоните свързват макроскопичните тела. Всички тези взаимодействия са включени успешно в рамките на квантовата механика, с изключение на гравитацията, тъй като нейното експериментално изследване е затруднено – тя е твърде слаба на микроскопичното равнище, представляващо областта на квантовата механика.

През последните две години се появи огромен интерес към възможността вместо точкови обекти други геометрични величини да играят фундаментална роля за нашето описание на природата. Следващият най-сложен геометричен обект е (крайна) крива, или струна. Най-простата струна е релативистичната струна, чиито маса и напрегнатост се описват с единствен параметър, отразяващ факта, че трептенията на струната се разпространяват със скоростта на светлината. Теорията на струните би могла да се окаже първото успешно обединение на квантовата механика и общата теория на относителността. Забележително е наличието на индикации, че това обединение по необходимост ще включи всички взаимодействия.

Първоначално теорията на струните бе създадена за описание само на адроните. Когато по абсцисата на една координатна система се нанасят квадратите от масите на частиците, а по ординатата – техните спинове (собствените им ъглови моменти), оказва се, че частиците с подобни свойства (като се изключат масата и спина) лежат върху една права, наречена “траектория на Редже”. Според квантовата механика, спинът може да взема само стойности, които са целочислено кратни на $\hbar$ (константата на Планк h , разделена на 2π) и за всяка от тези възможни стойности на спина върху траекторията има частица със съответната маса. Фактът, че адроните представляват свързани състояния, предполага съществуването на такива траектории, но обстоятелството, че те са прави линии дава възможност да разглеждаме тези свързани състояния като струна, състояща се от кварки, свързани чрез струна от поток глюони. Доколкото кварките и глюоните никога не са свободни, а в определен смисъл струните представляват най-простите описания, понякога е по-удобно адроните да се разглеждат пряко като фундаментални струни.

За нещастие, определени квантовомеханични изисквания за съгласуваност налагат познатите теории на струните да включват безмасови частици, докато всички познати адрони имат маси (и е невъзможно да сме пропуснали да открием безмасови адрони, ако те наистина съществуват). От

¹ Първоначално статията е публикувана през 1986 г. в Quotient, Университета на Мериленд. Поместваме превода ѝ като подходящо четиво за въвеждане в теорията на струните.

друга страна съществуват базмасови частици – например гравитони, фотони и глюони, и това навежда на мисълта теориите на струните да бъдат използвани за описание на тези фундаментални частици, включително кварките и глюоните, от които са съставени адроните. Първоначалната обосновка за разработване на струнни теории обаче, опираща се на възможността за описание на траекториите на Редже, не може да се приложи за тези фундаментални струни:

мащабът на масите в гравитацията, задаван с Планковата маса ($\sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$, където c е скоростта на светлината във вакуум, а G – гравитационната константа) е толкова по-голям (c един множител $\approx 10^{20}$) от този на адроните (масата на протона), че днешните ускорители не са способни да получат масивни частици, които лежат върху траекториите на Редже на тези фундаментални струни. За щастие, съществува друга причина за развитие на тези теории: същите квантово-механични изисквания за съвместимост, които не позволяват на теориите на струните да описват адроните, не позволяват и на не-струнните теории да опишат гравитацията. Това условие за “ренормируемост” е свързано с безкрайностите, които могат да възникнат, когато сумираме по всички възможни конфигурации от частици, обменяни при едно взаимодействие. Последователните струнни теории не съдържат подобни безкрайности и поради това са в състояние да опишат квантовата гравитация. Като страничен ефект от търсенето на теория на квантовата гравитация е откриването на теория, която обединява всички частици и сили: същите последователни струнни теории изискват съществуване не само на гравитон, но също така и на други видове безмасови частици, които биха могли да бъдат отъждествени с всички другипознати сили.

Преди да опишем по-подробно струната, първо ще направим преглед на частиците. В релятивистичните теории времето представлява една допълнителна координата. Пространството и времето се разглеждат съвместно като “пространство-време”, а векторите, наред с обикновените пространствени компоненти, имат и времева компонента. Класическата механика на релятивистичните частици може да се опише с помощта на величината действие S , която представлява собствената дължина на траекторията на частицата в четиримерното пространство-време: $S = -m \int \sqrt{(cdt)^2 - (d\vec{x})^2}$, където m е масата в покой на частицата. Класическата траектория на частицата представлява най-късия път между дадени начална и крайна точки в пространство-времето, съответстваща на минимум на действието, т. е. – на права линия. Казано най-общо, една крива линия през което и да е пространство може да се опише като всички координати на нейните точки с изключение на една се представят като функции на тази една координата (в нерелятивистичните теории, например, пространствените координати се описват като функции на времето). Един по-симетричен начин за описание на крива линия е да изразим всички координати на нейните точки чрез един единствен параметър, който има различни стойности за различните точки от кривата. За разлика от нерелятивистичната, в релятивистичната механика съществува допълнителното изискване формата на действието да бъде независима от избора на тази параметризация. В резултат на това, докато в нерелятивистичната теория квадратът на импулса е пропорционален на енергията, в релятивистичната теория квадратът на четириимпулса е константа, равна на квадрата от масата в покой. Това води до

познатата релятивистична връзка между времевата компонента на импулса (т. е. – енергията) и времевата му част:

$$p^2 = \frac{E^2}{c^2} - \vec{p}^2.$$

Точно както частицата, която е безразмерна точка в пространството, има едномерна траектория в пространство-времето, струната, която е едномерна крива в пространството, измита една двумерна повърхност в пространство-времето.

По аналогия с частицата, една релятивистична струна се описва с действие, което представлява площта на тази повърхност:

$$S = -T \int \sqrt{(dx \wedge dx)^2},$$

където T е напрегнатостта, а $\wedge$ означава пряко произведение – обобщението за пространство с произволен брой измерения на векторното произведение от тримерното пространство.

По такъв начин при зададени начална и крайна конфигурации една класическа струна измита повърхност с минимална площ. Координатите X на всяка точка от тази повърхност са функции на два параметра τ и σ : $X = X(\tau, \sigma)$. Условието формата на действието да не зависи от избора на тези параметри определя за всяка точка от струната приноса на тази точка към енергията на струната, изразен посредством приноса към пространствените компоненти на импулса и посредством модата на трептене на струната. Така квадратът на общия четиримерен импулс на струната зависи от възбудената в струната мода, така че различни моди съответстват на различни частици с различни маси в покой. По такъв начин за всяко τ , ако разложим при подходящи гранични условия $X(\sigma)$ в ред на Фурие (като σ взема стойности от 0 до π):

$$X(\sigma) = x + \sum_{n=1}^{\infty} x_n \cos n\sigma,$$

можем да интерпретираме “средната” стойност x като обикновена координата на една частица, а x_n са допълнителните степени на свобода, от които зависи масата в покой на частиците.

В действителност съществуват различни частици и струни и току що описаните са най-простите. И в двата случая е възможно да въведем нови физични степени на свобода (освен пространствено-времените координати), които също са функции на параметрите, описващи траекторията (повърхността). В случая на частица тези нови степени на свобода дават спина на частицата. В частност, определени избори въвеждат “суперсиметрия”, една симетрия, която свързва частиците с цял спин (бозоните) с частиците с полуцял спин (фермионите). Така например глюоните (със спин 1), фотоните (спин 1) и гравитоните (спин 2) са бозони, докато кварките (спин 1/2) и електроните (спин 1/2) са фермиони и са предложени суперсиметрични теории на частиците, които свързват всички тези частици.

Дори и най-простата струна вече описва частици със спин, тъй като собственият ъглов момент е резултат от въртенето на частите на струната около нейния център. Така обаче всички частици биха имали цял спин. Полуцял спин се въвежда чрез допълнителни степени на свобода.

Освен това в пространството струните могат да бъдат или отворени, или затворени криви, на което в пространство-времето съответстват повърхности като лист или като тръба. Докато отворените струни могат да описват безмасови

частици със спин, който не надминава 1, затворените струни винаги включват гравитон. Всички струнни теории включват затворени струни, но не всички включват отворени. Теорията на струните, която днес най-успешно описва наблюдаваните в природата частици и сили, е теория със затворени струни, в която трептенията, разпространяващи се по струната в посока, противоположна на посоката на движение на часовниковите стрелки, няма допълнителни степени на свобода, докато разпространяващите се в противоположна посока – имат. (Двете посоки са различни: ние можем да отбележим една от посоките със стрелка, която задава “ориентацията на струната.”) Такава струна се нарича “хетеротична”.

Въпреки че квантуването на частиците е пряко, условието за съвместимост на квантуването на струната води до едно твърде необикновено обстоятелство: оказва се, че за най-простата струна размерността на пространство-времето трябва да бъде 26, и 10 или 2 за онези с допълнителни степени на свобода. По различни причини (в частност заради отсъствие на фермиони и наличие на тахион – частица с имагинерна маса в покой, т. е. с отрицателен квадрат на масата), 26-мерната струна трябва да се отхвърли. Двумерният модел пък има твърде малко измерения. Въпреки че 10-мерните модели притежават твърде много измерения, този проблем може да се преодолее с един метод, наречен “компактификация”, при което 6-те излишни измерения се свиват на топка с толкова малки размери, че не може да се детектират със съвременните експериментални средства. Тази компактификация може да се използва и за решаване на един друг проблем: както бе отбелязано по-горе, естественият мащаб на масите на струните, които описват гравитацията е толкова голям, че единствените наблюдаеми днес частици са безмасовите. Следователно струната се нуждае от някакъв динамичен механизъм, чрез който да се генерира нов мащаб на масите. Компактификацията може да създаде такъв мащаб, ако формата, в която се свиват излишните 6 измерения, са достатъчно асиметрични, за да се опишат с повече от една характеристична дължина (която е обратно пропорционална на масата с множител $\hbar/c$). Нещо повече, тази асиметрия може да наруши друга симетрия на 10-мерната струна: всички познати квантово-съвместими струни, които включват фермиони, съдържат суперсиметрия, която не се наблюдава (или най-малкото е силно нарушена) в природата. (Алтернативно всички наблюдавани частици могат да бъдат съставени от безмасови суперсиметрични такива, с необходимата асиметрия, осигурена от механизма на свързване.)

По същия начин, по който една свободна струна може да се представи в пространство-времето чрез един лист (или тръба), взаимодействията струни може да се представят чрез повърхности с по-сложни топологии. Така например лист, който е започнал да се къса, представлява струна, разделяща се на две струни. Лист с дупка представлява струна, разделяща се на две струни, които впоследствие се съединяват. Тази ситуация е по-проста от съответната за частиците, където взаимодействията се описват чрез линии на взаимодействие по различни начини. В частност, действието за взаимодействащи струни все още се представя чрез площта на повърхността, където е фиксирана само топологията на повърхността.

Фактът, че действието за взаимодействащи струни не зависи от параметризацията на повърхността (както и в известен смисъл е независимо от локалния мащаб на дължините върху повърхността) може да се онагледява с факта, че всеки две повърхности, които могат да бъдат получени една от друга

чрез разтягане, могат да се разглеждат като еквивалентни. (Това разтягане трябва да се разглежда като промяна на избора на параметрите, с които се описва струната, а не като промяна на пространствено-временните координати, които са функции на тези координати.) Например, чрез подобно разтягане всяка дупка в повърхността може да се премести на всяко място от повърхността. Тази разтегливост понякога се нарича “дуалност” и се проявява даже при формализми, при които струната интерпретация на теорията не е очевидна. Например, точно както разпъването на повърхността на струната може да промени реда на взаимодействията, така и квантово-механичните амплитуди, описващи тези взаимодействия, могат да бъдат описани с помощта на частици, които взаимодействат в един или друг ред, без да се разглеждат и двете подреждания. (Това подреждане не е подреждане във времето, а по-скоро подреждане по отношение на това, как се пресичат мировите линии на частиците.)

В заключение виждаме, че теорията на струните може не само да осигури първата последователна теория на квантовата гравитация, както и пълно и реалистично обединение на гравитацията с всички останали частици и сили, но също така предлага напълно нов подход към тази най-фундаментална област на науката, която бе преди позната като физика на частиците.