

## ИМАТ ЛИ СУПЕРСТРУНИТЕ АЛТЕРНАТИВА?

Иван Тодоров\*

*В памет на Димитър Стоянов*

През 60-те години на (вече миналия) 20<sup>и</sup> век имаше отлив от главното направление на теоретичната физика от десетилетия - квантовата теория на полето. Работата на Фадеев и Попов, която щеше да вдъхне живот на неабеловите калибровъчни теории, не беше намерила още широк отклик, когато младият италиански физик Венециано предложи своя “дуален резонансен модел” за описание на силните взаимодействия. (Митко Стоянов беше между първите, които разкриха  $SL(2, R)$ -симетрията на модела и се увлякоха в изследване на възникващите красиви математични структури.) Изясни се, че формулата на Венециано се възпроизвежда ако разгледаме адроните, т.е. силно взаимодействащите частици, като резонансни трептения на микроскопична струна. Колкото повече се задълбочаваше изследването на модела, толкова по-странен и отвлечен изглеждаше той. Оказа се, че теорията може да се формулира непротиворечиво само в многомерно пространство – 26-мерно за обикновената (бозонна) струна, 10-мерно за суперструната. През 1974 г. Джоел Шерк (от Париж) и Джон Шварц (от Калифорния) показаха, че в спектъра на струната присъства частица със свойствата на гравитона (безмасова, със спин 2) и стигнаха до извода, че суперструнната теория с необходимост включва всички взаимодействия, дори най-слабото в микромащаби – гравитационното. За обяснение на многомерието, както в струнните теории, така и в 11-мерната супергравитация, изучавана по същото време, бяха възродени идеите на Теодор Калуца (1885 - 1954) и Оскар Клайн (1894 - 1977) от 20-те години, според които “излишните” измерения се “свиват” в окръжности, сфери и други компактни многообразия с нищожно малки размери, които не се наблюдават пряко, но са отговорни за появата на различни товари (като електричния) и на вътрешни симетрии на елементарните частици. Успехът на стандартния модел за силните и електро-слаби взаимодействия през 70-те години остави на заден план тези спекулации. Интересът към тях се възроди – и стана неудържим – след работите на Майкъл Грин и Джон Шварц от 1982 - 83 г., които

---

\* академик, ИЯИЯЕ, БАН

подказваха, че малко на брой суперструнни модели предлагат квантова теория на гравитацията, свободна от разходимости и включваща всички полета и взаимодействия.

## 1. ЗА И ПРОТИВ

Суперструнната теория доминира от 20 години математичната физика, тя е централна тема на работни семинари и конференции, обект е на лекции, обзори, дори на популярни радиопредавания и книги [1, 2, 3]. Освен ентузиазъм тя предизвиква и критики – заради прекалената ѝ спекулативност и липса на опитно проверяеми резултати. Думите на Файнман (1918 - 1988), казани в интервю пред BBC ([2] с. 192 - 210) не са възторжени:

*Не ми харесва, че за всичко, което не се съгласува с опита, се измисля някакво хлъзгаво обяснение “Все пак може да е вярно.” Теорията изисква, например, 10-мерно пространство-време. Е, може би има начин да се свият 6 от измеренията. Да, това формално е възможно, но защо не 7? [...] Фактът, че теорията може да не се съгласува с опита, се заобикаля, той не дава нищо. [...] Не е вярно, че няма експерименти, които да ни ръководят. Имаме около две дузини странни числа, свързани с масите. Защо, например, отношението на масите на мюона и електрона е 206? [...] Има голям брой вече събрани опитни факти, за които не ни е стигнало въображение да намерим теоретично обяснение. [...] Това е проблемът на теоретичната физика, а тези суперструнни теории въобще не се опитват да го разглеждат.*

Въпреки големия брой работи по суперструни и постигнатия напредък през изминалите от тогава години, възраженията на Файнман запазват своя смисъл и днес.

Ентузиастите на теорията, от своя страна, също звучат убедително.

Едуард Уитен, идеолог на суперструнния модел, казва пред BBC ([2] с. 91-106):

*Физиката на 20-и век има два основни стълба: единият е общата теория на относителността, т.е. айнщайновата теория на гравитацията, другият е квантовата механика, която описва всички микроскопични явления. [...] Основният проблем на съвременната*

*физика се състои в това, че тези два стълба са несъвместими един с друг. [...] Най-важното, което трябва да помним за струнните теории, е, че те се стремят да преодолеят основната трудност, която стои пред физиката от десетилетия насам: несъвместимостта между теорията на гравитацията и квантовата механика. [...] Историята ни учи, че съгласуването на теории, които си противоречат, е много добър път за постигане на фундаментален напредък. [...] Специалната теория на относителността на Айнщайн бе породена от желанието да се съчетаят ... максвеловата теория на електричеството и нютоновата механика. Общата теория на относителността възникна като резултат от усилието на Айнщайн да съчетае собствената си специална теория с нютоновата гравитация. Накрая, квантовата теория на полето дойде като резултат от усилието да се съвмести нерелативистичната квантова механика със специалната теория на относителността.*

Стивън Хокинг [3] аргументира, че създаването на квантова теория на гравитацията е необходимо не само за да съчетаем “двата стълба на съвременната теоретична физика”, за които говори Уитен. То се налага и за да можем да разберем миналото на нашата вселена. Съгласно общата теория на относителността и наблюдаваното отдалечаване на видимите галактики, преди около 15 милиарда години Вселената е била свита в една точка, т.е. решенията на уравненията на гравитацията, продължени назад във времето, имат особеност. По-правилно е да кажем, че още преди да достигнем (назад в миналото) “големия взрив”, ще се сблъскаме с такава голяма плътност на материята, при която нито гравитацията, нито квантовите ефекти, могат да се пренебрегнат: за да можем да кажем какво е ставало в този ранен етап от развитието на Вселената, ни е необходимо да знаем какво представлява квантовата гравитация.

## **2. ТРИ РАЗМЕРНИ ВЕЛИЧИНИ И ТРИ ПАРАМЕТЪРА НА ДЕФОРМАЦИЯ**

Аргумент в полза на търсенето на “квантова гравитация”, изказван от повече от един “математик-физик”<sup>1</sup> (М. Флато, Л. Фадеев и др.), дава и възгледът, според който новите физични теории на 20<sup>и</sup> век могат да се разглеждат като *деформации* на класичната нерелативистична физика. Групата от размерности във физиката има три образуващи<sup>2</sup>: време, дължина и маса. Фундаменталните константи:

скоростта на светлината  $c$  (или по-добре нейната реципрочна,  $1/c$ , която играе ролята на “малък параметър”), константата на Планк  $\hbar$ , квантът на действието, и  $G$ , нютоновата константа на всемирното привличане, позволяват да се въведат естествените *единици на Планк* за маса, дължина и време:

$$M^2 = \hbar c / G \sim (10^{-5} \text{ g})^2, \quad L = \hbar (Mc)^{-1} \sim 10^{-33} \text{ cm}, \quad T = L/c \sim 10^{-43} \text{ s} \quad (1)$$

Ако оставим  $1/c$  да клони към нула в специалните лоренцови трансформации, които запазват законите на релативистичната механика, ще получим нерелативистично преобразование на Галилей. Така групата на симетрия на специалната теория на относителността може да се разглежда като деформация (с параметър  $1/c^2$ ) на групата на симетрия на механиката на Нютон. Аналогично квантовата механика може да се разглежда като деформация на класичната механика с параметър  $\hbar$ . Това е кратка и в същото време точна формулировка на прословутия принцип за съответствието. И в двата случая една изродена алгебрична структура се превръща в *стабилна* (която не променя своя тип при по-нататъшни деформации). Включването на гравитацията в теорията на относителността води до нова деформация с параметър  $G$ : този път геометрията на плоското пространство-време (на Минковски) се деформира в (стабилната спрямо деформации) псевдориманова геометрия. Всъщност общата теория на относителността съдържа още по-дълбока промяна, която трудно се възприема: *самото пространство-време със своята геометрия (и топология) се превръща в динамична променлива*. Физичните явления не се развиват в дадено отнапред “фоново” пространство; движението на материалните тела и геометрията (например кривината) се определят взаимно и заедно еволюират.

Съчетаването на различни деформации се оказва не просто. Голяма част от 20<sup>и</sup> век бе посветена на опити да се построи релативистична квантова механика, с други думи, да се вземат под внимание два от параметрите,  $\hbar$  и  $1/c$  (без да се отчита гравитацията, т.е. при  $G = 0$ ). Тъй като условието за причинност в специалната теория на относителността предполага близкодействие, то ни налага да работим с теория на полето – система с безброй много степени на свобода. Квантуването на такава система е трудна задача: математически строга, нетривиална (взаимодействаща) квантова

теория на полето в 4-мерно пространство-време не е построена и до днес. Както казва английският математик М. Атия, когато физиците не могат да решат дадена задача, те се хващат със следващата, по-трудна. В случая това е едновременното разглеждане на трите деформации – съчетаването на квантовата механика с общата теория на относителността. Тази задача има с какво да възбуди въображението. След като физиката се характеризира с три размерни константи, то най-общата три-параметрична деформация би довела до “стабилна” – в известен смисъл окончателна – фундаментална теория.

### 3. СТРУННИ МОДЕЛИ, ПРИМКОВА КВАНТОВА ГРАВИТАЦИЯ И Р. ПЕНРОУЗ

За щастие суперструнните модели не са единственото направление, което се опитва да обедини квантовата теория и гравитацията. Наред с него се развива и на порядък по-малко популярният опит за създаване на *примкова квантова гравитация* (развивана от Аштекар [6], Смолин [7], Ровели, автор на полемичния диалог [8], и др.). Свои, независими от тези два подхода, идеи застъпва Роджър Пенроуз [9, 10] (известен с полученото от него, заедно с Хокинг, доказателство, че решението на уравненията на общата теория на относителността, отнасящо се за Вселената като цяло, непременно има особеност по времето – точка на “големия взрив”). Наличието на различни гледни точки помага да разберем по-обективно проблемите и надеждите на този героичен опит за обединяване на двете връхни постижения на физиката на 20<sup>ти</sup> век (и да не приемаме за чиста монета рекламата на едно от направленията).

Безспорна заслуга на суперструнния подход е установяването на тясна връзка със съвременната математика (виж например [11 и 12]). Живи, централни области на математиката, като алгебричната геометрия и топология (включително теория на възлите), теория на представянията (на безкрайномерни алгебри на Ли и на вертексни алгебри), днес са тясно преплетени с проблеми от физиката, преди всичко от струнните модели и квантовата теория на полето. Нещо повече, физиката води до нови открития в чистата математика (като тъй наречената “огледална симетрия” за многообразието на Калаби-Яо, за която става дума например в статиите на Арнолд, Манин и Яо [12]). Това тясно взаимодействие е несъмнено плодотворно и за двете науки.

Особена роля през последното десетилетие играят така наречените *дуалности*, свързващи различните 10-мерни суперструнни

модели помежду им и с 11-мерната супергравитация. (Идеята е по-стара и може да се открие в зародиш в съответствието между високо- и нискотемпературни развития в статистически модели, открито още през 40-е години.) Те дават основание да се говори за единна “М-теория”, за която различните струнни модели се явяват гранични случаи при различни режими. Те също подсказват съотношения между квантово-полеви теории и по този начин дават интуиция за възможно тяхно непertурбативно поведение. За съжаление тези връзки не позволяват да се съкрати съществено броят на възможните 4-мерни теории, получавани от суперструнните модели с въвеждане на “вакуумни състояния”, съответстващи на различни компактификации на 6 от 10-е измерения. Един от авторитетите в тази област дори разглежда възможността изобщо да няма начин да се определи “истинско вакуумно състояние” и предлага вместо това да се изучава статистиката на възможните вакууми [13]. И досега не е ясно дали някое от множеството възможни вакуумни състояния води до реалистична физика при реално достъпни енергии. Не е известна нито една струнна теория, в която да не присъства безмасово скаларно поле (каквото няма в природата). Известните непротиворечиви суперструнни фонове обикновено имат и други нефизични черти – ненарушена суперсиметрия, отсъствие на положителна космологична константа ([7] с. 37 и с. 48).

Основна претенция на струнните теории е, че те пораждат пертурбативен ред, всеки член от който е краен (не съдържа обичайните за наивната квантова гравитация разходимости). Всяко събираемо в пертурбативния ред за затворени струни съответства на компактна риманова повърхност, която може да се разглежда като сфера с дръжки и се определя от своя *род* (броя на дръжките). Именно замената на диаграмите на Файнман (съставени от линии, които се пресичат в точки), с риманови повърхнини, в които не се срещат “точкови взаимодействия”, поражда очакването, че струнните теории ще са свободни от разходимости. Тази наивна представа не се оправдава буквално: за отстраняване на разходимостите (даже за повърхнини от род 1) се налага използването на *суперсиметрия* (симетрия между бозони и фермиони, никаква следа от която не е детектирана в природата). Нещо повече, даже с използване на суперсиметрията на моделите, отсъствието на разходимости не е доказано за род по-голям от 2 (този факт често се замълчава: измежду 15 общи обзора по суперструни, само в препринта на Маршаков от декември 2002 г. се отбелязва, че не е ясно дали суперструнните

амплитуди са еднозначно определени и крайни за род по голям от 2 – виж [7] с. 53).

Пенроуз [9] не е склонен да приеме две основни черти на струнната теория: използвания вариант на суперсиметрията и многомерието. Той изтъква, че размерността 4 на пространство-времето е привилегирована поради връзката между спинорното представяне и комплексната структура при тази размерност. Можем да добавим, че едва ли е случайно, че само при размерност 4 действието на калибровъчно поле е конформно-инвариантно. Тази теоретична отделеност на размерността на физическото пространство остава неизползвана в суперструнните модели, които се формулират в 10-мерно пространство-време.

Съществена черта на общата теория на относителността като теория на пространство-времето и гравитацията е, че тя не предполага и не се нуждае от предварително въвеждане на “фоново пространство”. Суперструнната теория (както и нейното обобщение, “М-теорията” – каквото и да значи това) все още няма подобна фоново-независима формулировка. Тук, както се подчертава в [7 и 8], примковата теория на квантовата гравитация има предимство. Пенроуз, който в случая играе ролята на неутрален наблюдател, намира (в [9]) примковите променливи за привлекателни и изразява надеждата, че понятието за пространствено-времева метрика може да се изведе от по-примитивни комбинаторни идеи. От друга страна, той отбелязва като слабост на примковия подход използването на представяне с препълнена система от примкови състояния. Както признават и авторите на подхода [7 и 8], той има засега също трудности във възпроизвеждане на нискоенергетичната граница на теорията, а не е и единствен (допустими са различни форми на хамилтоновата връзка).

#### **4. ПОСОКАТА НА ВРЕМЕТО. ЗАКЛЮЧИТЕЛНИ БЕЛЕЖКИ**

Еволюцията на Вселената, така както днес я разбираме, ни изправя пред загадка: как да разберем изключително ниската ентропия (малка вероятност) на началното състояние? Както желанието ни да обясним втория закон на термодинамиката чрез еволюцията на Вселената, така и преките наблюдения показват, че ранната вселена, близо до началната сингуларност (големия взрив) е била необикновено еднородна. Напротив, крайните сингуларности, възникващи например при черните дупки, изглеждат съвсем типични. Това говори, че квантовата гравитация трябва да е *асиметрична във времето*. Тъй като

нито общата теория на относителността, нито квантовата теория, притежават подобна асиметрия, това подсказва, че трябва да се търси нещо истински ново. Пенроуз [9] предлага промяна в квантовата механика, при която “редукцията на вектора на състоянието” (съпровождана в традиционната интерпретация процеса на измерване) да се разглежда като обективно явление. Тези проблеми практически не се засягат в модните подходи към квантовата гравитация. Въпросът за асиметрията във времето не се решава и от модната инфлационна теория, която предсказва още, че пространствената геометрия на видимата вселена трябва да е, като цяло, плоска, докато наблюденията през последните години сочат, че имаме по-скоро работа с хиперболична пространствена геометрия (с отрицателна кривина).

\* \* \*

Бързите съвременни комуникации (Интернет и електронна поща) водят, както отбелязва и Пенроуз [10], до нарастващ гнет на модата над физическите теории: неподкрепени от опита спекулации, като идеята за суперсиметрия, или за допълнителни пространствени измерения, както и споменатата вече инфлационна хипотеза, се представят като съществена част от “стандартната теория на всичко”. Млади хора, желаещи да се занимават с фундаментални въпроси на теорията, трудно могат да намерят работа, ако не следват от близо модата. Това се отнася дори до онези, които приемат, че е назрял моментът за създаване на квантова гравитация: ако вярваме на диалога [8] дори най-добрите студенти от второто по популярност направление, подхода на примките, срещат подобни трудности. От друга страна, трябва да е ясно, че квантовата гравитация не изчерпва интересните въпроси на съвременната физика, въпроси, свързани с красива и дълбока математика. Преди всичко проблемите – и богатството – на квантовата теория на полето съвсем не са изчерпани. Тук можем да споменем например работите от последните години (на Алан Кон и Дирк Краймер), които свързват гледаната с недоверие процедура за отстраняване на разходимостите с живи области от съвременната математика, като алгебри на Хопф, с проблема на Риман-Хилберт, с теорията на Галоа. Методи на квантовата теория на полето се прилагат и към проблеми от статистичната физика, например теорията на фазовите преходи (включително геометрични критични



явления като перколация, случайни конформни изображения – свързани с красива математика).

---

Ще цитираме отново интервюто на Файнман за суперструните: *Човек може да прави всичко, което му харесва. Опасното е, че всички правят едно и също!* ([1] с. 196). Още по-хубаво го е казал той десетилетия по-рано, при получаване на Нобеловата награда (1965 г.):

Много е важно да не следваме всички една и съща мода... Трябва да се увеличава разнообразието ... и единственият начин това да стане е да помоля вас, малкото способни, да поемете риск с целия си живот, риск никой да не чуе вече за вас, да се задълбае в дивото отвъд, да се опитате да го разберете.

1. Този термин съответства на възникналата напоследък гранична група, която е по-склонна от традиционните физици-теоретици да разглежда проблемите от математична гледна точка.

2. Тук ние си служим със строгия език на математика [4]. Възгледът, че има точно три размерни константи е традиционен, но не общоприет - виж провокиращия размисъл триалог [5], където този възглед е застъпен само от Окун.

### Литература

1. P. C. W. Davies, J. Brown, *Superstrings, A Theory of Everything?* Cambridge University Press, 1988.

2. B. Greene, *The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W. W. Norton & Company, N.Y. 1999.

3. S. W. Hawking, *The Theory of Everything*, New Millennium Press, 2002; български превод: *Теорията на всичко*, Прометей, София 2003 (Лекции 5-7).

4. Yu. I. Manin, *Strings*, The Mathematical Intelligencer, **11:2** (1989) 59-65.

5. M. J. Duff, L. B. Okun, G. Veneziano, *Dialogue on the number of fundamental constants*, arXiv:physics/0110060, CERN-TH/2001-277.

6. A. Ashtekar, *New Perspectives in Canonical Gravity*, Advanced Studies in Astrophysics and Cosmology, Vol. 6, World Scientific, Singapore 1991.

7. L. Smolin, *How far are we from the quantum theory of gravity?* arXiv:hep-th/0303185.
8. C. Rovelli, *A dialog on quantum gravity*, arXiv:hep-th/0310077.
9. R. Penrose, *Mathematical physics of the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> Century*, in: [12] pp. 219-234; български превод: Светът на физиката, XXV, кн. 2 (2002) 103-111.
10. R. Penrose, *How computers help – and hurt – scientific research*, Convergence, Winter 1999; български превод: Светът на физиката, XXIII, кн. 3 (2000) с. 272-274.
11. *Quantum Fields and Strings: A Course for Mathematicians*, Vol. 1, 2, P. Deligne, ... , E. Witten (eds.), AMS, Institute for Advanced Study, 1999.
12. *Mathematics: Frontiers and Perspectives*, V. Arnold, M. Atiyah, P. Lax, B. Mazur (eds.), AMS, International Mathematical Union, 2000; see, in particular, Yu. I. Manin, *Mathematics as profession and vocation*, pp. 153-159; R. Penrose [9]; C. Vafa, *On the future of mathematics/physics interaction*, pp. 321-328; E. Witten, *Magic, mystery, and matrix*, pp. 343-352; S.-T. Yau, *Review of geometry and analysis*, pp. 353-401; V. I. Arnold, *Polymathematics: Is mathematics a single science or a set of arts?* pp. 403-416.
13. M. R. Douglas, *The statistics of string/M theory vacua*, arXiv:hep-th/0303194.

