

Luboš Motl

Snění o kvantové gravitaci aneb stručné dějiny M-teorie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 48 (2003), No. 4, 277--287

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141189>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2003

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Snění o kvantové gravitaci aneb stručné dějiny M-teorie

Luboš Motl, Cambridge

Moderní teoretická fyzika stojí na dvou pilířích. Jedním z nich je Einsteinova *obecná teorie relativity*, která vysvětluje gravitační sílu a vesmír na nejdelších měřítkách v řeči elegantně se zakřivujícího prostoru a času. Druhým je *standardní model částicové fyziky*, což je fenomenálně úspěšná teorie popisující mikrosvět, tedy elementární částice (kvarky, leptony a kalibrační bosony) a síly mezi nimi (elektromagnetickou, silnou a slabou). Standardní model je příkladem *kvantové teorie pole*, tedy teorie respektující jak principy kvantové mechaniky, tak postuláty speciální teorie relativity. Pokusy o spojení *obecné* teorie relativity s kvantovou teorií pole do smysluplného celku však vedou k mnoha potížím koncepčního i technického rázu. Fyzici sice dokázali odvodit řadu závěrů o světě, v němž platí jak zákony kvantové fyziky, tak zákony obecné relativity — Stephen Hawking například dokázal už v 70. letech spočítat, že černé díry musejí vyzařovat tepelné záření — úplná teorie, schopná alespoň v principu předpovídat gravitační interakce částic s libovolně vysokou energií, však fyzikům dlouho unikala. Jedním z pokusů o utišení zášti panující mezi teorií „velkého“ a teorií „malého“ je takzvaná *smyčková kvantová gravitace*. Tento „kanonický“ přístup ke kvantování gravitace by si zasloužil samostatný článek. V následujících odstavcích se budeme věnovat jen přístupu, který si dodnes uchoval dominantní postavení: *teorii strun* a jejímu modernímu výhonku zvanému *M-teorie*.

Duální modely a fyzika v rytmu Reggeho

Všechno začalo v roce 1968, kdy si 26letý čerstvý doktor Gabriele Veneziano, výzkumný asistent v Evropském centru jaderného výzkumu (CERN), posvětil na jisté delikátní rysy silně interagujících částic. Zatímco povahu elektromagnetické a slabé síly už fyzici chápali poměrně dobře, chování silně interakce zůstávalo zahaleno tajemstvím a katalog silně interagujících částic připomínal zoologickou zahradu. Experimenty například ukázaly, že nejlhčí silně interagující částice se spinem J má hmotnost, která leží na takzvané Reggeho trajektorii: kvadrát hmotnosti je přibližně lineární funkcí J , tedy $J = \alpha(m^2) = \alpha_0 + \alpha' m^2$. Účinný průřez konkrétní reakce elementárních částic lze snadno spočítat z komplexního čísla zvaného *amplituda*. Veneziano navrhl amplitudu

Dr. LUBOŠ MOTL (1973), Jefferson Physical Laboratory, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA, e-mail: motl@feynman.harvard.edu

pro reakci $\pi + \omega \rightarrow \pi + \pi$. Použil Eulerovu beta-funkci, definovanou už v 18. století:

$$(1) \quad A(s, t) = \beta B(-\alpha(s), -\alpha(t)), \quad B(x, y) = \frac{\Gamma(x)\Gamma(y)}{\Gamma(x+y)},$$

kde $\Gamma(x)$ je zobecněný faktoriál, $\Gamma(x) = (x-1)!$. Proměnné s, t definoval Mandelstam jako kvadráty součtů 4-hybností částic reagujících (p_1, p_2) a částic vytvořených (p_3, p_4),

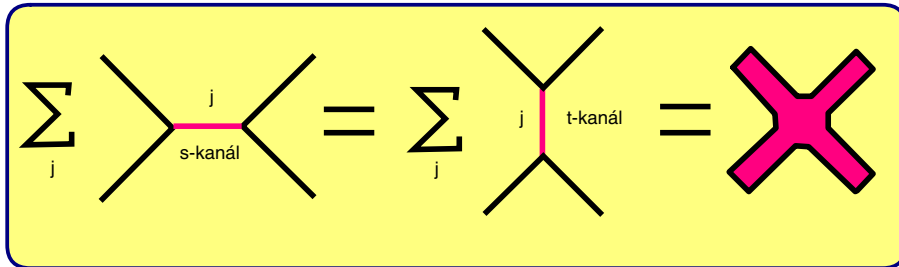
$$(2) \quad s = (p_1 + p_2)^2, \quad t = (p_3 + p_4)^2.$$

Konstanta β ovlivňuje amplitudu triviálně. Zajímavější je funkce $B(x, y)$, kterou lze přepsat mnoha způsoby, například takto:

$$(3) \quad B(-\alpha(s), -\alpha(t)) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_n(t)}{n - \alpha(s)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_n(s)}{n - \alpha(t)},$$

$$(4) \quad R_n(t) = \frac{(\alpha(t) + 1)(\alpha(t) + 2) \cdots (\alpha(t) + n)}{n!}.$$

První suma v rovnici (3) obsahuje póly, jen pokud ji vnímáme jako funkci s , zatímco druhá suma obsahuje pouze póly v proměnné t . Přesto jsou si tyto dva výrazy rovny. Pro druhou rovnost v rovnici (3) se vžil název *dualita* a řada fyziků začala studovat modely, v nichž se s podobnými rovnostmi setkáme, takzvané *duální modely*. Strunoví teoretici slovem *dualita* rádi označují vztah mezi dvěma matematickými konstrukcemi, které se na první pohled jeví zcela odlišně, a přesto jsou ekvivalentní. Dualit je dnes známa dlouhá řada, a tak rovnost v (3) dnes nazýváme *světloplošnou dualitou*. Proč právě takto?



Obr. 1. Dva druhy Feynmanových diagramů (s, t -kanály) lze přepsat jako Feynmanův diagram pro strunu (vpravo), a proto jsou si rovny.

Netrvalo totiž dlouho a fyzici Nambu, Nielsen a Susskind si nezávisle uvědomili, že Feynmanovy diagramy popisující Venezianovu amplitudu lze sjednotit do jednoho diagramu, v němž jsou čtyři interagující částice reprezentovány jako *otevřené struny*, tedy objekty topologicky ekvivalentní úsečce (viz obr. 1), a podobnou strunu si tyto částice „vymění“. Struna může vibrovat různými způsoby; struna v určitém druhu vibrace se při nízkém rozlišení chová jako bodová částice konkrétního typu a s libovolně velkým spinem: struna vibrující jedním způsobem se bude jevit jako foton, struna

vibrující jiným způsobem bude nerozlišitelná od elektronu. Rovnost (3) byla vysvětlena tím, že jednorozměrné spojující se světočáry bodových, nularozměrných částic jsou ve skutečnosti jen nemotorným přepisem dvourozměrných historií jednorozměrných strun: dvourozměrný diagram v pravé části obrázku 1 lze rozvést dvěma způsoby (s, t -kanály) do řeči bodových částic. Dvourozměrnou varietu, kterou pohybující se struna vykreslí v časoprostoru, nazýváme v analogii se slovem světočára *světoplechou*. Fyzici pracující na duálních modelech se tak dovtípili, že studují teorii jednorozměrných objektů, tedy *strun*! Podobně jako je akce S_0 pro relativistickou částici úměrná vlastnímu času neboli délce její světočáry, akce pro strunu S_1 je úměrná ploše příslušné dvourozměrné světoplechy:

$$(5) \quad S_0 = -m_0 \int dl, \quad S_1 = -T \int d^2\xi \sqrt{h}.$$

Koeficient m_0 je *klidová hmotnost* částice a T je analogicky *napětí* struny, tedy v podstatě hmotnost struny na jednotku délky; T souvisí s dříve zmíněnou konstantou α' (Reggeho sklon) vztahem $T = 1/(2\pi\alpha')$. Souřadnice l je vlastním časem částice a dvě souřadnice ξ analogicky parametrizují světoplechu, přičemž h je dvourozměrná metrika na světopleše. Akci S_1 v (5) lze přepsat tak, aby definovala dvourozměrnou *konformní teorii pole*. To je označení pro teorii, která je nejen invariantní vůči všem transformacím souřadnic, ale i vůči libovolnému přeškálování metrického tenzoru, které může záviset na poloze. Lokální fyzika může záviset jen na úhlech. Konformní symetrie hraje důležitou úlohu, například garantuje, že vypočtené pravděpodobnosti jsou vždycky kladné. Teoretici si brzy uvědomili, že konformní symetrii lze dokázat, manipulujeme-li s operátory jako s klasickými objekty, ovšem kvantové efekty mohou symetrii narušit. Kvantové efekty zodpovědné za narušení symetrií, které existují v klasické limitě, se nazývají *anomálie*. Fyzici si brzy uvědomili, že smrtonosná *konformní anomálie* se vruší pouze v případě, že má časoprostor 26 rozměrů! Pouze tato dimenze časoprostoru garantuje, že teorie dává smysl.

Dočasný pád teorie strun na začátku 70. let

Na duálních modelech pracovaly desítky fyziků několik let. Virasoro a Shapiro například rozšířili strunový popis částic na částice reprezentované *uzavřenými strunami*, které jsou topologicky ekvivalentní kružnici. Souběžně s tím začínalo být zřejmé, že duální modely sice jisté rysy silných interakcí vystihují dobře, jiné aspekty ovšem popisují chybně. Prvním očividným paradoxem byl počet rozměrů 26, který zásadně převyšoval očekávaný počet dimenzí 4. Tento nedostatek bylo možné vyřešit hypotézou o *svinutí* neboli *kompaktifikaci* přebytečných dimenzí do tvaru malých kompaktních variet. Náš vesmír může být kartézským součinem čtyřrozměrného časoprostoru a variety „skrytých dimenzí“, pokud je tato varieta dostatečně miniaturní, konkrétně menší než 10^{-18} metru, což je nejmenší vzdálenost, kterou dnes dokážeme rozlišit. Myšlenka dodatečných prostorových rozměrů pochází už z 20. let, kdy ji fyzici Kaluza

a Klein užili ke zkonstruování jednotné teorie gravitace a elektromagnetismu, ale teprve s příchodem teorie strun se skryté rozměry staly nezbytností.

Zdánlivě chybná dimenze ovšem nebyla jediným problémem. Teorie strun předpovídala rychlý pokles účinných průřezů reakcí částic s velmi vysokými energiemi. Toto chování dnes chápeme jako velkou přednost teorie strun. Experimenty ovšem ukázaly, že účinné průřezy reakcí skutečných hadronů tak rychle s energií neklesají. Kromě toho lidé v první polovině 70. let zkonstruovali *kvantovou chromodynamiku* (QCD), která silné interakce interpretuje v řeči *kvarků* a *gluonů*, které na sebe působí prostřednictvím náboje zvaného *barva* (řecky *chromos*). Úspěch QCD při popisu silných interakcí byl hlavním faktorem, který odsunul duální modely na smetiště dějin. Nikoliv ovšem navždy.

Samotářské přípravy na revoluci

Počet fyziků, kteří pracovali na teorii strun, se v polovině sedmdesátých let zúžil z mnoha desítek, ne-li stovek, na několik jednotlivců. Jednotlivců, kteří věřili, že důmyslná matematická struktura této teorie musí skrývat klíč k poznání čehosi velmi důležitého. Byla to teorie strun, z níž se západní svět dozvěděl o existenci *supersymetrie*. Pierre Ramond se v roce 1971 snažil zakomponovat fermiony do rámce duálních modelů a objevil při tom novou symetrii mezi bosony a fermiony, takzvanou supersymetrii. Supersymetrie předpovídá ke každému bosonu superpartnera, jímž je fermion, a naopak. Tuto symetrii lze považovat za rozšíření Lorentzovy a translační symetrie časoprostoru a je možné ji vysvětlit v řeči abstraktních *antikomutujících* souřadnic časoprostoru, tedy souřadnic splňujících

$$(6) \quad \theta_1\theta_2 = -\theta_2\theta_1$$

a transformujících se jako spinor. Nově vytvořená mutace původní teorie strun, konkrétně supersymetrická teorie strun neboli *teorie superstrun*, vedla ke snížení požadovaného počtu rozměrů časoprostoru z $D = 26$ na $D = 10$ a neobsahovala takzvaný *tachyon*. Tachyon je problematická částice s negativním kvadrátem hmotnosti, která se z naivního pohledu musí pohybovat nadsvětelnou rychlostí (*tachos* v řečtině označuje rychlost) a která signalizovala nestabilitu vakua původní, 26rozměrné *bosonové teorie strun*. Věnujeme mu ještě odstavec na konci článku.

Dva hrdinové těžkých let teorie strun Joël Scherk a John Schwarz si kromě toho uvědomovali, že teorie strun předpovídá existenci nehmotných částic se spinem $j = 2$ (krát \hbar), o kterých nebylo v experimentech s hadrony ani vidu, ani slechu. Dokázali ale navíc spočítat, že tyto částice interagují stejným způsobem jako *gravitony*, což jsou kvanta gravitačních vln neboli částice odpovědné za přenos gravitační síly. Vyrukovali proto v roce 1974 s radikální vizí, že teorie strun není nástrojem pro popis silných interakcí, ale že bychom měli s teorií strun studovat otázky *kvantové gravitace*. Takový návrh znamenal, že se velikost hypotetických strun (úměrná $\sqrt{\alpha'}$ nebo $1/\sqrt{T}$) v myslí fyziků zmenšila o 20 řádů — z 10^{-15} metru na 10^{-35} metru. Teorie strun ovšem

selhala v prvním, jednodušším úkolu popsat silné interakce, a tak fyzici článek Scherka a Schwarze, navrhuující mnohem ambicióznější uplatnění teorie strun, ignorovali.

Hrstka věrných ovšem pokračovala ve výzkumu. Tito pánové zjistili, že nahrazení bodového gravitonu uzavřenou strunou „zahradí“ prostor na krátkých vzdálenostech dostatečně na to, aby bylo možné spojit gravitaci s kvantovou mechanikou. Také vyšlo na povrch, že teorie superstrun předpovídá supersymetrii i v časoprostoru. Na druhé straně se ovšem koncem sedmdesátých let objevily náznaky toho, že teorii strun trápí *gravitační anomálie*, tedy kvantové efekty, které by znehodnotily obecnou kovarianci v časoprostoru. Tím by způsobily, že je teorie strun inkonzistentní. Řádka fyziků, mezi něž se zařadil i mladý Edward Witten, který dnes patří mezi největší žijící fyziky, ovšem ukázala, že zásluhou překvapivých, skoro bychom řekli zázračných numerických identit mezi čísly v řádu mnoha tisíců se anomálie v určitých odrůdách teorie strun přesně vykompenzují. Bohužel šlo o teorie, které neobsahovaly žádné kalibrační bosony, a neměly proto kapacitu vysvětlit všechny známé fyzikální jevy.

První superstrunová revoluce (1984–1985)

Jiné odrůdy teorie strun, které kalibrační bosony předpovídaly, se i nadále zdály být anomálními: obecně trpěly anomáliemi gravitačními, kalibračními i smíšenými. V roce 1984 ovšem Angličan Michael Green spolu s Američanem Johnem Schwarzem doplnili jistě přehlédnuté „detaily“ ve výpočtech z minulosti a ukázali, že se *všechny anomálie zázračně vyruší i v teorii typu I* (která obsahuje i otevřené struny a s nimi kalibrační bosony), *pokud je $SO(32)$ kalibrační grupa*. Také dokázali spočítat, že další přijatelnou grupou je $E_8 \times E_8$, přímý součin dvou kopií největší známé „vyňaté“ Lieovy grupy. Protože byl jejich článek dostatečně jednoduchý, aby ho mohla řada lidí pochopit, ale zároveň dostatečně netriviální, aby všichni chápali, že nejde o náhodu, nad níž lze mávnout rukou, fyzici začali po stovkách opouštět své projekty a vést na nové, superstrunové frontě odvěkou válku lidstva za pochopení nejzákladnějších pravd o kosmu.

Pro léta 1984–1985 se vžil název *první superstrunová revoluce*. Za tu dobu byly o teorii strun napsány dva tisíce článků a řada fyziků poměrně rozumně věřila tomu, že zbývá jen několik měsíců a poslední otazníky týkající se vlastností elementárních částic budou zodpovězeny. Ačkoliv došlo k ohromnému pokroku, definitivní *teorie všeho* nalezena nebyla a euforie se ukázala, jako už poněkolkáté v historii fyziky, přehnaná.

Jakmile se usadil prach, bylo jasné, že existuje pět odrůd teorie superstrun: teorie typu I, IIA, IIB a dvě *heterotické teorie* s kalibračními grupami $E_8 \times E_8$ (typ HE) a $SO(32)$ (typ HO). Heterotická teorie strun je jakýmsi hybridem původní 26rozměrné teorie strun se supersymetrickou 10rozměrnou teorií; *heterosis* v řečtině označuje schopnost získat křížením jedince s přednostmi od obou rodičů. Heterotická teorie typu HE se šesti rozměry svinutými na speciální varietu, takzvanou Calabiovu-Yauovu varietu, obsahovala všechny částice a interakce standardního modelu a navíc ještě

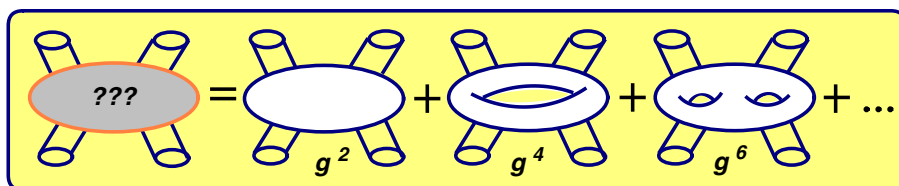
gravitaci. Lidé dlouho věřili, že právě tato teorie je jediným možným ztělesněním fyziky standardního modelu kompatibilním s existencí gravitace.

Druhá superstrunová revoluce (1995–1997)

Jedním z nedostatků naší znalosti teorie strun v 80. letech bylo, že fyzikální veličiny jsme dokázali počítat pouze jako součty jednotlivých Feynmanových diagramů. Těmi jsou v případě teorie strun dvou rozměrné světoplochy, jak jsme již uvedli, a topologie diagramu — tedy počet „děr“ v světoploše (viz obr. 2) — určuje mocninu vazebné konstanty. Takový výpočet vede k takzvané poruchové teorii: fyzikální veličiny $A^{(i)}$ se počítají jako Taylorovy rozvoje ve vazebné konstantě g :

$$(7) \quad A^{(i)} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^{(i)} g^n.$$

Některé „neporuchové“ funkce, například $\exp(-1/g^2)$, ovšem tímto způsobem vyjádřit nelze (Taylorovy koeficienty vyjdou nulové, ačkoliv funkce nulová není), a tak poruchový rozvoj přehlédne členy podobného typu. Takové příspěvky však mohou být důležité — zvláště když je vazebná konstanta g srovnatelná s číslem 1 nebo větší — a způsobují, že naše neúplné chápání teorie neumožňuje zodpovědět řadu důležitých otázek s dostatečnou přesností.



Obr. 2. Amplituda elastického rozptylu dvou uzavřených strun jako mocninový rozvoj ve vazebné konstantě.

Fyzici začali neporuchovou fyziku chápat až v polovině devadesátých let, a to hlavně zásluhou supersymetrie. Existence supersymetrie zaručuje, že se příspěvky fermionů a bosonů v mnoha případech vyruší, a umožňuje dokázat, že jisté veličiny lze přesně spočítat posčítáním relativně nízkého počtu členů, a proto nám dovoluje získat exaktní odpovědi na mnoho otázek při libovolné hodnotě vazebné konstanty. Jakmile fyzici srovnali hodnoty různých veličin v teorii typu I při vysoké vazebné konstantě g , zjistili, že se přesně shodují s výsledky teorie typu HO s nízkou vazebnou konstantou $1/g$. Teorie typu I a HO vypadají odlišně, pokud jsou vazebné konstanty g v obou teoriích nízké, ale studiem fyziky při vysoké hodnotě g zjistíme, že jsou tyto teorie ekvivalentní. Takové ekvivalenci, zahrnující převrácení vazebné konstanty, říkáme *S-dualita*. Teorie typu I a HO jsou S-duální, zatímco teorie typu IIB je S-duální sama k sobě: fyzikální experimenty nejsou s to rozlišit, zda je vazebná konstanta mnohem menší než jedna, nebo naopak mnohem větší než jedna.

Fyzici kromě toho našli další ekvivalence mezi napohled různými teoriemi. Například teorie typu IIA a IIB jsou vzájemně *T-duální*, což znamená, že fyzika teorie typu IIA s jednou souřadnicí svinutou na kružnici o poloměru R je totožná s fyzikou teorie typu IIB svinuté na kružnici o poloměru l_{struna}^2/R , kde l_{struna} je konstanta určující typickou délkou struny. Analogicky jsou T-duální teorie typu HO a HE. Duality představují způsob, jak proces v jedné teorii strun přinterpretovat jako proces mezi duálními objekty v duální teorii strun. Takovým „překladem“ lze často zásadně zjednodušit výpočty. Ukázalo se, že duálními objekty ke strunám mohou být objekty s libovolným počtem p prostorových rozměrů, takzvané *p-brány*. Zvláště jedna pod množina *p-brán*, takzvané *Dirichletovy brány* neboli *D-brány*, definované vlastností, že na nich mohou končit struny, a spojené zejména se jménem Joe Polchinského, sehrála v druhé superstrunové revoluci nezastupitelnou úlohu. Učebnice fyziky v 22. století pravděpodobně vysvětlí, že teorii kvantové gravitace nazýváme z historických důvodů *teorie strun*, ačkoliv musíme rozmanité další objekty s odlišným počtem dimenzí považovat za objekty se strunami rovnoprávné.

M-teorie a 11rozměrná supergravitace

S-dualita vysvětluje chování teorií typu I, HO a IIB při silné vazbě. Co se ale děje při velké hodnotě g se zbývajícími dvěma teoriemi, konkrétně teorií typu IIA a HE? Odpověď je překvapivá: s tím, jak hodnota g roste, se začíná vytvářet nová, jedenáctá dimenze, která má tvar kružnice v případě teorie typu IIA, jak vysvětlil Edward Witten v březnu 1995, a tvar úsečky s dvěma konci v případě teorie typu HE, jak vysvětlil v říjnu téhož roku Petr Hořava s Edwardem Wittenem. Ve případě teorie HE má jedenácti-rozměrný svět dvě „Hořavovy-Wittenovy hranice“ a na každé z nich lze najít kalibrační teorii s grupou E_8 .

Limitou obou desetirozměrných teorií při nekonečné hodnotě g je tedy jedenácti-rozměrná teorie! Teorie superstrun, která se zdála být uvězněna do 10rozměrného časoprostoru, tak odkrývá novou, dosud přehlíženou jedenáctou dimenzi! Její poloměr je

$$(8) \quad R = g^{2/3} G^{1/9},$$

kde g je vazebná konstanta příslušné teorie strun a G je Newtonova konstanta v 11rozměrném časoprostoru. Výpočty v 80. letech byly poruchové, tedy platné jen pro velmi malou hodnotu g , a proto přehlédly jedenáctou dimenzi, která je podle (8) při malém g nekonečně krátká.

Nikdo nedokázal přesně říci, jak definovat onu jedenácti-rozměrnou **magickou** a **mýtickou matku** všech teorií (přinejmenším teorií strun). Fyzici jen dokázali za pomoci supersymetrie dokázat, že tuto teorii lze aproximovat na dlouhých vzdálenostech *jedenácti-rozměrnou supergravitací* a že v této teorii lze místo strun nalézt dvourozměrné **membrány**. Neznalost toho, co tato **majestátní** teorie skrývá, nezabránila fyzikům v tom, aby ji pojmenovali *M-teorie*. Mnozí věřili, že pochopením této

jedenácti-rozměrné teorie budeme moci odhalit všechny záhady celé teorie strun. Spolu s tím, jak se dařilo poodhalovat závoj tajemna z M-teorie, se vyjasňovalo, že 11-rozměrná M-teorie je jen další možnou, byť důležitou limitou teorie strun. V říjnu 1996 se fyzikům Tomu Banksovi, Willy Fischlerovi, Stevu Shenkerovi a Lenny Susskindovi povedlo definovat M-teorii v řeči poměrně jednoduchého maticového kvantověmechanického modelu. Na odvození teorie strun samotné z *M(aticové)* teorie (slovo „matice“ je dalším ospravedlněním písmena M) jsem měl to štěstí se podílet.

Jedenácti-rozměrná supergravitační teorie, objevená už na konci 70. let, má akci, zobecňující Einsteinovu obecnou teorii relativity

$$(9) \quad S_{11} = \frac{1}{2\kappa_{11}^2} \int d^{11}x \left[\sqrt{-G} \left(R - \frac{|F_4|^2}{2} \right) - \frac{A_3 \wedge F_4 \wedge F_4}{6} + \dots \right],$$

kde tečky označují členy obsahující fermionová pole, R je skalární křivost a $F_4 = dA_3$ je 4-forma zobecňující intenzitu elektromagnetického pole. Tato akce je v jistém smyslu nejsymetričtější možná teorie pole. Neobsahuje ovšem struny, bez kterých je supergravitace s kvantovou mechanikou stejně neslučitelná jako původní Einsteinova obecná teorie relativity, a tak se řada strunových teoretiků dívala na kolegy studující 11-rozměrnou supergravitaci skrz prsty. O to více byli překvapeni, když se v roce 1995 ukázalo, že tito lidé ve skutečnosti studovali velmi důležitý limitní případ teorie strun! Rok 1995 tak znamenal pro teoretickou fyziku rok velké syntézy: nejen že se ukázalo, že jsou všechny odrůdy teorie superstrun spojeny do jednoho celku, ale navíc se komunita strunových teoretiků sjednotila s obdivovateli supergravitačních teorií.

Holografie, černé díry a AdS/CFT korespondence

Vraťme se trochu do minulosti, konkrétně na začátek 70. let. Tehdy se Jacobu Bekensteinovi a Stephenu Hawkingovi podařilo přijít na kloub termodynamickým vlastnostem černých děr. Bekenstein si uvědomil, že černé díry musejí mít nenulovou entropii, jinak by bylo možné „uklidit“ nepořádek do černé díry a snížit tak v rozporu s druhou větou termodynamickou celkovou entropii vesmíru. Navíc vyjádřil domněnku, že je entropie černé díry přímo úměrná dvourozměrné ploše jejího horizontu událostí. Hawking zpočátku Bekensteinovým spekulacím nevěřil, ale v roce 1974 spočítal něco skutečně úžasného: černé díry nejsou úplně černé, ale vyzařují Planckovo tepelné záření odpovídající teplotě, která je přímo úměrná gravitačnímu zrychlení na horizontu událostí! Vypočítanou teplotu mohl Hawking dosadit do termodynamických zákonů a odvodit tak, že černá díra musí také mít — v souladu s Bekensteinovou intuicí — entropii rovnou

$$(10) \quad S = \frac{A_{\text{horizont}}}{4l_{\text{Planck}}^2} k_{\text{Boltzmann}},$$

kde A_{horizont} je plocha horizontu událostí a $l_{\text{Planck}} = \sqrt{G\hbar c^{-3}}$ je takzvaná Planckova délka — vzdálenost přibližně 10^{-35} metru, na které začínají kvantové efekty výrazně

ovlivňovat gravitační sílu. Zanedlouho se ukázalo, že entropie černé díry (10) je maximální entropií, kterou lze „vměstnat“ do daného objemu. To je překvapivý závěr, protože zkušenosti s plyny a dalšími obvyklými materiály nás vedou k víře, že entropie roste lineárně s objemem. V kvantové gravitaci ovšem roste přímo úměrně k povrchu. Do zvoleného objemu je tedy možné zakódovat mnohem méně informace, než bychom si mysleli. Přibližně lze tento fakt vysvětlit tak, že příliš mnoho „paměťových čipů“ v daném objemu by vedlo ke gravitačnímu kolapsu a k vytvoření černé díry, jejíž horizont událostí by se do předem vymezeného objemu nevešel.

Podobný řetězec úvah vedl fyziky Gerarda 't Hoofta a Lennyho Susskinda v roce 1994 k zformulování principu, který se díky podobnosti hologramům v optice nazývá *holografickým principem*:

V každé kvantové teorii obsahující gravitaci lze informaci o systému uvnitř objemu V zakódovat na povrch ∂V tohoto objemu, přičemž hustota informace nepřesahuje jeden bit na Planckovu plochu.

Entropie je termodynamický pojem, ovšem termodynamiku lze mikroskopicky vysvětlit jazykem statistické fyziky jako logaritmus počtu mikrostavů, případně logaritmus objemu fázového prostoru (který je v obvyklých jednotkách třeba vynásobit Boltzmannovou konstantou). Jaké mikrostavy ale odpovídají černé díře? Jak správně spočítat objem fázového prostoru? Fyzici usilovali o odpověď dvacet let, ale přesvědčivý výpočet předložil až Andrew Strominger a Cumrun Vafa v lednu 1996. Podařilo se jim zkonstruovat černou díru z různých typů p -brán, nových objektů objevených v teorii strun, a výpočetními metodami teorie strun dokázali vzorec (10) pro entropii černé díry — přinejmenším pro třídu extrémních a téměř extrémních černých děr v teorii strun. Fakt, že teorie strun vede pokaždé i ke správnému koeficientu $1/4$, vypadá jako zázrak. Odvození termodynamických vlastností černých děr z teorie strun přesvědčilo mnohé nerozhodnuté fyziky, že teorie strun je na správné cestě k pochopení kvantových aspektů gravitace.

Argentinský fyzik Juan Maldacena dokázal vysvětlit řadu „zázraků“, které se objevily při strunovém studiu černých děr, pomocí ještě dalekosáhlejší domněnky, takzvané *AdS/CFT* [čti ej-dý-es-sí-ef-tý] *korespondence*. Maldacena v listopadu 1997 přišel s hypotézou, že čtyřrozměrná kalibrační teorie popisující velké množství p -brán při nízkých energiích je *ekvivalentní* gravitační fyzice *pětirozměrné* geometrie v blízkosti horizontu těchto p -brán. Touto geometrií je pětirozměrný anti de Sitterův prostor, AdS_5 , a čtyřrozměrná teorie má konformní symetrii, je to tedy konformní teorie pole (CFT). Maldacenaova domněnka představovala dosud nejkonkrétnější realizaci holografického principu: k pochopení d -rozměrné fyziky obsahující gravitaci stačí použít $(d - 1)$ -rozměrnou teorii bez gravitace, definovanou na hranici d -rozměrného prostoru. Maldacenaovo tvrzení bylo ověřeno a zobecněno v tisících článků a umožnilo fyzikům lépe pochopit řadu otázek týkajících se chování kalibračních teorií při velké hodnotě vazebné konstanty, včetně otázky, proč jsou kvarky v QCD uvězněny. Fyzici dnes tedy mohou ukázat, že i původní motivace pro teorii strun — studium silných interakcí, o němž jsme mluvili na začátku tohoto článku — měla svoje opodstatnění.

Postrevoluční současnost a budoucnost

Ačkoliv jsou dnes fyzici novými výsledky vzrušeni o něco méně než v „revolučních“ dobách, vývoj se nezastavil ani po roce 1998. Část poznatků nashromážděných za posledních pět let shrneme v heslech:

- **Velké dodatečné dimenze.** Částicovní teoretici — zvláště ti, kteří mají blíže k experimentům a kterým se říká *fenomenologové* — v několika tisících článků studovali vzrušující návrh Nimy Arkani-Hamedy, Gia Dvaliho a Savase Dimopoulou, kteří v roce 1998 ukázali, že skryté rozměry v reálném světě mohou být mnohem větší, než si všichni mysleli — dokonce desítky mikrometrů velké, pokud jsou všechny částice standardního modelu „přilepeny“ k vhodné p -bráně. Ještě větší rozruch vyvolaly články Lisy Randallové a Ramana Sundruma, kteří v roce 1999 předvedli modely, v nichž dodatečné dimenze mohou být dokonce nekonečně velké. Jsou-li zakřiveny do tvaru anti de Sitterova prostoru, fyzici žijící na p -bráně ponořené v pětirozměrném prostoru mohou dojít k chybnému závěru, že je jejich vesmír čtyřrozměrný.
- **Osud tachyonů.** O vakuu ve vesmíru většinou uvažujeme tak, že je to bod v konfiguračním prostoru, kde potenciální energie nabývá minima. Potenciální energie jako funkce *tachyonového* skalárního pole ovšem nabývá ve studovaném vesmíru *maxima* a způsobuje, že je vakuum nestabilní podobně jako vajíčko stojící na špičce. Zatímco ještě na začátku 90. let považovali fyzici existenci tachyonu za smrtelnou nemoc — v našem vesmíru například tachyony existovat nemohou, protože by vesmír rychle přivedly k záhubě — výpočty odstartované článkem indického fyzika Ashoke Sena dokázaly, že v mnoha případech existuje i minimum potenciální energie jako funkce tachyonu, které lze navíc smysluplně interpretovat. Tachyony pocházející z otevřených strun například mají minimum odpovídající úplné destrukci D-brán, na kterých struny končily. Výzkum pramenící ze Senových poznatků vedl k začlenění dalších matematických oborů, například K-teorie, pod deštník teorie strun.
- **Kosmologie.** Rokem 1998 začala éra precizní kosmologie. Fyzici zjistili, že rozpínání vesmíru se nezpomaluje, ale naopak zrychluje, což naznačuje, že v našem vesmíru existuje kladná kosmologická konstanta. Té podle nových měření — nejpřesnější poskytla sonda WMAP v únoru 2003 — odpovídá asi 70 procent hmotnosti vesmíru. Strunovní teoretici napsali stovky článků, v nichž se snažili z teorie strun získat nové poznatky o velkém třesku, o vesmírné inflaci, o de Sitterově prostoru a obecněji o kosmologii a o časoprostorech závislých na čase. Je třeba říct, že výsledky jsou ve srovnání s pilíři superstrunových revolucí nepřesvědčivé.
- **Nové realizace standardního modelu.** Zatímco $E_8 \times E_8$ heterotické struny na Calabiově-Yauově varietě byly ještě na počátku 90. let chápány jako jediné řešení, jak z teorie strun odvodit standardní model a obecnou relativitu, dnes známe několik dalších formalismů, které dokážou totéž. Všem slůvkům nemusíte rozumět, ale jde konkrétně o *F-teorii* na osmírozměrné Calabiově-Yauově varietě (F-teorie, objev

Cumruna Vafy, je 12rozměrná abstraktní teorie příbuzná teorii strun typu IIB), o M-teorii na sedmírozměrné varietě s holonomií G_2 a o modely s protínajícími se p -bránami. Výzkum naznačuje, že velké množství řešení teorie strun, předpovídající vesmíry s různými vlastnostmi, je pravděpodobně třeba brát vážně. Teorie strun tedy nejspíše nebude moci předpovědět hodnoty fyzikálních konstant (například hmotnosti elementárních částic) jednoznačně a fyzici si možná budou muset osvojit způsob myšlení obsažený v antropickém principu. Pro mnohé by takový vývoj byl jistě zklamáním.

- **Studium pp-vln.** V anti de Sitterově prostoru se lze soustředit na okolí jisté světlu-podobné trajektorie a limitním procesem získat nové řešení obecné teorie relativity, takzvanou pp-vlnu. Berenstein, Maldacena a Nastase v roce 2002 odstartovali intenzivní výzkum pp-vln v teorii strun, když ukázali, že AdS/CFT korespondence v limitě pp-vln umožňuje odvodit, že duální konformní teorie pole popisuje nejen gravitaci, ale i uzavřené struny oscilující složitějším způsobem, jejichž existence z teorie strun plyne.
- **Topologické struny, staré maticové modely a twistory.** Značné pozornosti se v současné době těší i topologická teorie strun, takzvané staré maticové modely a jejich souvislost s teorií strun v dvourozměrném časoprostoru. Edward Witten navíc v prosinci 2003 vzkřísil starou myšlenku twistorů, pocházející od Rogera Penrose, podle které lze body v časoprostoru interpretovat jako křivky v abstraktním *twistorovém* prostoru, tedy v projektivním prostoru komutujících spinorů. Witten přisoudil twistorovému prostoru roli časoprostoru, na němž je definována jistá topologická odrůda teorie strun, ze které pak dokázal spočítat amplitudy rozptylu pro jisté fyzikálně zajímavé kalibrační teorie příbuzné kvantové chromodynamice.

Uvidíme, kam se bude teorie strun a M-teorie ubírat v následujících letech. V roce 2007 by měl být spuštěn nový urychlovač LHC v Ženevě. Není vyloučeno, že potvrdí existenci supersymetrie. Mohl by ale dokonce potvrdit radikálnější předpovědi velkých skrytých dimenzí. A možná dojde ještě o něco dříve k teoretickému průlomu, který by fyzikům umožnil *předpovídat* výsledky experimentů na LHC.

L i t e r a t u r a

- [1] GREENE, B.: *Elegantní vesmír*. Mladá fronta 2001. Populárněvědecká kniha o teoretické fyzice a teorii strun zvláště.
- [2] POLCHINSKI, J.: *String Theory*. Dva svazky, Cambridge University Press 1999. Moderní učebnice teorie strun.
- [3] GREEN, M., SCHWARZ, J., WITTEN, E.: *Superstring Theory*. Dva svazky, Cambridge University Press 1987. Klasická učebnice teorie strun.
- [4] MOTL, L.: *Holografický princip*. Vesmír 11/1998.
- [5] Internetový archiv <http://www.arxiv.org/>: Kategorie „high-energy physics–theory“ přináší denně asi 10 nových článků týkajících se přímo či nepřímo teorie strun.
- [6] Články dostupné na webu <http://lumo.matfyz.cz/struny>