Veľké zjednotenie?

GUT, SUSY, MSSM a SUGRA

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Úvod

Snom fyzika, skúmajúceho mikrosvet je 'mať všetko pod kontrolou', teda vedieť, napr. prečo sú pozorované sily práve také, aké ich pozoruje, aká je štruktúra mikrosveta a pod. Inými slovami, jeho snom je mať 'teóriu všetkého', anglicky 'the Theory of Everything' (TOE) – viď Quark xx/00. Preto iste nebude pre čitateľa príliž veľkým prekvapením fakt, že nad TOE posledné roky svojho života strávili mnohí poprední fyzici tohto storočia, napr. nositelia Nobelovej ceny za fyziku W. Heisenberg, A. Einstein alebo z posledného obdobia prof. V.N. Gribov, asi jeden z posledných 'univerzálnych fyzikov'. Neuspeli, a to z rôznych príčin.

Bez nárokov ísť k detailom možno konštatovať, že hlavnou príčinou ich neúspechu bola 'nepripravenosť" vtedajšej fyziky na takúto nesmierne náročnú úlohu (otázne je, či to neplatí aj pre dnešok) . Napr. v čase, keď A. Einstein pracoval nad TOE, nikoho z fyzikov ani nenapadlo, že by mohla byť nejaká väzba medzi svetom fermiónov a bozónov. [1] Nech si čitateľ nemyslí, že k takémuto náhľadu neboli dôvody – tie boli silne podložené praktickou skúsenosťou: napr. pripustenie dynamickej väzby medzi svetom fermiónov a bozónov priamo vedie k otázke stability protónu, pričom dnešné experimenty potvrdzujú, že jeho stabilita je väčšia ako 10^{32} rokov!

'Grand Unified Theory' (GUT)

Vývoj však šiel ďalej. Začiatok cesty k tvorbe TOE je možné hľadať na začiatku šesťdesiatych rokov, keď vznikla idea o možnej súvislosti medzi (vtedy jedine známymi) dvomi nehmotnými časticami - medzi fotónom a neutrínom. Protón a neutrón sa voči silnej interakcii správajú rovnako, teda niet medzi nimi zásadný rozdiel. Preto pre popis silnej interakcie protónu alebo neutrónu sa môže použiť zjednodušenie - miesto týchto dvoch rôznych častíc stačí brať do úvahy len jednu - nukléon. Prípadné rozlíšenie medzi protónom a neutrónom zabezpečuje tzv. izospinové číslo, ktoré pre protón je rovné 1/2 a pre neutrón -1/2. Spomínaná súvislosť medzi fotónom a neutrínom mala mať rovnaký charakter. Tu sa vlastne položil základ myšlienky prepojenia zdanlivo 'neprepojiteľného'.

Dnes sa vo fyzike elementárnych častíc veľmi často skloňujú skratky SM, SUSY, GUT, MSSM, SYSYLR alebo SUGRA a pod.. Čo je to SM, teda Štandardný model, sme si povedali v Quarku xy/00. Skratky typu GUT, MSSM, SUSY a pod. predstavujú ďalšiu cestu smerom k TOE, samozrejme, až čas ukáže, či je tomu skutočne tak.

---

[1] Pripomeňme, že fermióny sú častice s poločíselným spinom, bozóny zas majú spin celočíselný. To predurčuje ich štatistické správanie sa, napr. pokiaľ bozóny môžu bez obmedzenia obsadiť základnú energetickú hladinu, fermiónom v tom bráni Pauliho vylučovací princíp a pod. To má v Prírode nemalé dôsledky. Viď tiež Quark 4/97.

Začnime s GUT. Skratka GUT pochádza z anglického 'the Grand Unified Theory', a predstavuje teórie, cieľom ktorých je zjednotenie slabej, silnej a elektromagnetickej interakcie. Tí z vás, čo čítali Quark xy/00 o SM, môžu namietnuť, že vlastne už SM zjednocuje tieto interakcie, takže, čo je cieľom GUT? Treba povedať, že v SM tieto tri interakcie vystupujú de facto *nezávisle*, svedkom čoho je napr. existencia troch väzbových konštánt (pre každú interakciu zvlášť). Cieľom GUT je ale mať takú teóriu, kde by bola *len jedna* väzbová konštanta, odpovedajúca jednej sile, závisiaca na energii. Tá by sa podľa toho, ako by energia klesala, 'rozštiepila' napr. na tri, popisujúce slabú, silnú a elektromagnetickú interakciu.

Vytvorenie GUT ale nie je vôbec jednoduché – majme na pamäti, že nová teória najskôr *musí* vedieť popísať všetko aspoň tak dobre ako teórie staré, v našom prípade ako SM, čo je ťažký oriešok. Navyše musí (inak by sme ju nepotrebovali) prísť 's niečim novým', teda musí mať prediktívnu silu.

Pomerne rýchlo vznikol prvý variant GUT, SU(5) model, ktorý navrhol Georgi a Glashow (opäť jeden z nositeľov Nobelovej ceny za fyziku), [2] ktorý prišiel s relatívne rozumnou predpoveďou hodnoty Weinbergovho uhla, ktorý v SM je parametrom (viaže medzi sebou hmotnosti $W^{\pm}$ a Z bozónu), ale mal potiaže 'zabránit" rozpadu protónu, resp. docieliť aspoň to, aby jeho rozpad bol slabší ako experimentálne pozorované hranice jeho stability, teda zmienených 10^{32} rokov. [3] Neúspech modelu SU(5) tkvel v tom, že nesprávne sformuloval symetriu medzi fermiónmi a bozónmi.

Konštrukcia GUT modelov je vo všeobecnosti podobná konštrukcii SM – využíva Higgsov mechanizmus a vlastnosti samointeragujúcich kalibračných polí, s požiadavkou platnosti lokálnej symetrie (viď Quark xy/00, kde takéto pole predstavuje pole Higgsovej častice).

'SUperSYmmetry' (SUSY) a 'Minimal Supersymmetric Standard Model' (MSSM)

Komplexnejším GUT modelom je MSSM model (z anglického 'the Minimal Supersymmetric Standard Model'), ktorý oproti SU(5) a jemu podobných modelov, zavádza požiadavku novej striknej symetrie, tzv. *supersymetrie* (SUSY). SUSY, zavedená začiatkom sedemdesiatych rokov Goľfandom, Likhtmanom, Akulovom, Volkovom, Wessom a Zuminom, ku každej fermiónovej SM častici (kvarkom a leptónom) priraďuje bozónovho superpartnera a ku každej bozónovej SM častici ($W^{\pm}$, Z bozón, fotón, higgs) priraďuje fermiónového superpartnera. Napr. superpartnerom elektrónu, ktorý má spin 1/2, je *selektrón* (z anglického 'scalar electron') so spinom nula, superpartnerom higgsa je *higgsíno*, superpartnerom fotónu je *sfotíno* a pod. [4] Cena za supersymetriu je ale nemalá, MSSM potrebuje pre svoju vnútornú konzistenciu nie jednu, ako SM, ale päť higgsových častíc (z toho dve so vzájomne opačným elektrickým nábojom a tri elektricky neutrálne). Vo svojich základoch teória predpokladá rovnaké hmotnosti partnerov a ich superpartnerov. Kedže sa ale zatiaľ nijaký superpartner nepozoroval (v energetickej oblasti cca 100 GeV nebol doteraz pozorovaný žiaden kandidát na superpartnera), Príroda musela symetriu medzi fermiónmi a bozónmi narušiť, to znamená, že nejakým spôsobom priradila superpartnerom podstatne väčšie hmotnosti ako ich SM partnerom, čo napr. MSSM rieši zavedením extra parametrov. A práve to je dôvod, prečo doteraz superpartnerov nepozorujeme - sú jednoducho priťažkí a naša urýchľovacia technika sa nateraz nedokáže dostať na takú hodnotu energie zrážky, pri ktorej by sa mohli vytvoriť.

Prečo sme teda ochotní veriť v MSSM? Dôvodov je viac. MSSM je minimálne rozšírenie SM, to znamená, že v nízkoenergetickom priblížení prechádza do SM, a teda plne reprodukuje výsledky

---

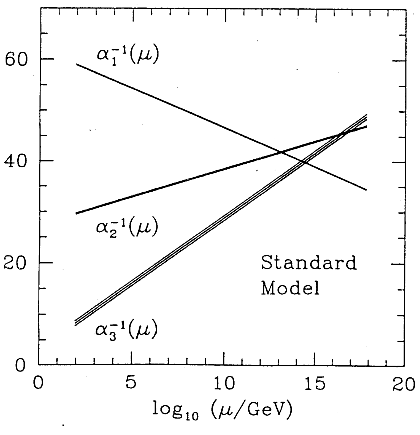
[2] Názov vychádza z Lieovej grupy SU(5), na základoch ktorej je model založený.

[3] SU(5) model predpovedal dobu života protónu medzi $1,6.10^{30} - 2,5.10^{28}$ rokmi. Hodnotu $\sin^2\Theta_W$, kde je Θ_W Weinbergov uhol model, predpovedal o niečo nižšiu ako dáva experiment.

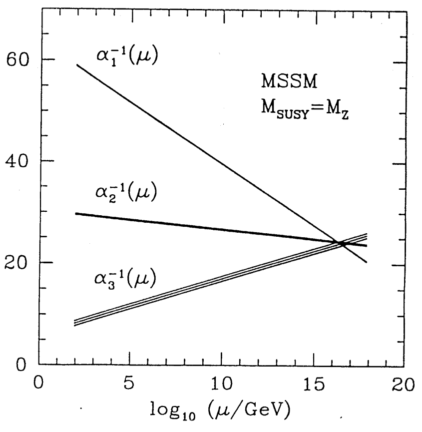
[4] Vzťah medzi partnermi a superpartnermi v SUSY má fermiónovy charakter, t.j. zmena poradia medzi objektami popisujúcimi partnere a superpartnere vedie k zmene znamienka. Pokiaľ by sme chceli SUSY vybudovať na základe bozónovej väzby, teda zmena poradia medzi objektami popisujúcimi partnere a superpartnere by nemala za následok zmenu znamienka, boli by sme značne ohraničení, napr. vedeli by sme popísať len rozptylové procesy smerom 'dopredu', teda v smere letu častice.

SM. MSSM rieši problém *hierarchie.* Čo sa pod týmto problémom skrýva? Pre jeho vysvetlenie najskôr nevyhnutná informácia:
Už sme naznačili, že očakávame, že pri veľmi veľkej energii bude v Prírode 'figurovat" len jedna interakcia, postupne, ako sa bude energia znižovať', nastane 'štiepenie' tejto sily – pri istej energii miesto pôvodnej sily budú napr. nové dve nezávislé – veríme, že jednou z nich bude sila gravitačná a druhou sila, z ktorej sa zas 'štiepením' napr. vytvorí sila silná, slabá a elektromagnetická. Dobre položenou otázkou je otázka týkajúca sa hodnôt energií, kedy k spomínanému štiepeniu síl dochádza. Všeobecne sa má za to, že 'štartovacou energiou' je tzv. *Planckova energia.* Ako sa sme dospeli k tomuto predpokladu? V Prírode existuje niekoľko univerzálnych veličín. Patrí k nim Newtonova gravitačná konštanta G, redukovaná Planckova konštanta $\hbar$ a rýchlosť svetla vo vákuu c. Ich kombináciou sa dá formálne skonštruovať Planckova energia $E_P = \sqrt{\hbar c^3/G} \sim 2,2.10^{19}$ GeV. Veríme, že E_P musí mať nejakú univerzálnu vlastnosť, kedže je vytvorená z univerzálnych konštánt – Planckova energia by mala byť maximálna možná energia, ktorá sa dá v princípe v Prírode skoncentrovať do objemu o rozmere l_P^3, kde $l_P = c\hbar/E_P \sim 10^{-33}$ cm je tzv. Planckova dĺžka. [5]

Štartujme tentoraz z energie nižšej ako je 100 GeV, teda z energetickej úrovni, ktorú dobre popisuje SM. Faktom je, že hodnoty väzbových konštánt silnej, slabej a elektromagnetickej interakcie závisia na energii. Pokiaľ väzbová konštanta silnej interakcie s rastom energie klesá (dokonca pri nekonečne veľkej energii jej hodnota je nulová, viď Quark 12/98), väzbové konštanty slabej a elektromagnetickej interakcie s rastom energie rastú. Na obr. 1 je znázornená extrapolácia týchto väzbových konštánt smerom k vysokým energiám. Ako vstupné hodnoty boli použité údaje získané zo súčasných experimentov na LEPII, Tevatrone a HERA. Vidíme, že smerom k vyšším energiám, sa konštanty síce k sebe približujú, ale jednoduchou extrapoláciu nijako nedocielime toho, aby sa stretli v jednom bode, teda pri nejakej jednej hodnote energie. Ak však predpokladáme platnosť SUSY, potom, ako obr. 2 demonštruje, sa situácia radikálne zmení. Vidíme, že hodnoty väzbových konštánt budú rovnaké pri energii $E_G \sim 2.10^{16}$ GeV. Energia E_G (z anglického 'grand unification scale') je teda 'štartovacou' energiou pre GUT modely, teda aj pre MSSM.



Obr 1: *Správanie sa väzbových konštánt silnej, slabej a elektromagnetickej interakcie bez predpokladu platnosti SUSY.*



Obr 2: *Správanie sa väzbových konštánt silnej, slabej a elektromagnetickej interakcie za predpokladu platnosti SUSY.*

Vráťme sa k problému hierarchie. V SM sa ukazuje, že hmotnosť higgsa je priamoúmerná hmotnosti kalibračných bozónov slabej interakcie, teda $W^{\pm}$ bozónom a Z bozónu. Z druhej strany, kedže MSSM pracuje na energetickej hladine E_G, ktorá je o štrnásť rádov vyššia ako je energetická hlad-

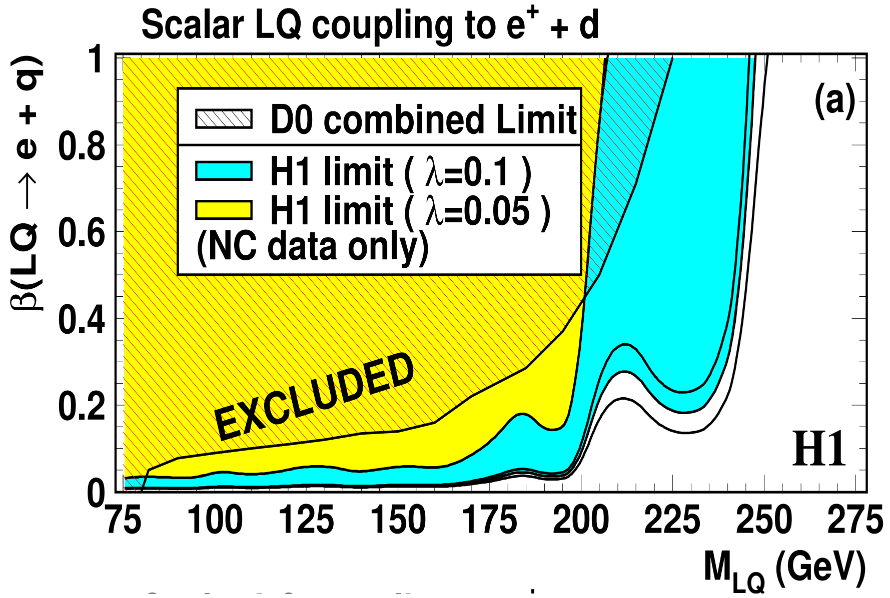
---

[5] Sám M. Planck sa tejto interpretácie nedožil. Hodnotu E_P považoval za čiste formálnu veličinu.

ina SM, už v prvom ráde poruchovej teórie radiačné korekcie k hmotnosti higgsa (ktoré pre veľké energie sú kvadraticky divergentné), a teda v konečnom dôsledku aj k $W^{\pm}$ a Z bozónom, budú podstatne väčšie ako hmotnosť higgsa, resp. $W^{\pm}$ a Z bozónov, čo vypovedá o nestabilite energetickej hladiny typickej pre slabú interakciu. Ak by sme chceli tento defekt teórie odstrániť, museli by sme vypracovať mechanizmus, ktorý by z energetickej hladiny E_G^2 (korekcie kvadraticky divergujú) do energetickej hladiny m_W^2 radiačné korekcie zredukoval na únosnú veľkosť - reč ide o mechanizme, ktorý musí preklenúť 34-rádov! Situácia je ešte horšia, ak do úvahy zoberieme radiačné korekcie vyšších rádov. Jednoducho povedané, v modeli musíme docieliť, aby radiačné korekcie boli, idúc od $m_{\mathrm{W}}^2 \sim 10^4$ GeV^2 do $m_{\mathrm{G}}^2 \sim 10^{32}$ GeV^2, malé bez ohľadu na veľkosť poruchového rádu. A práve to je problém hierarchie. Je zaujímavé, že tento problém fermiónom nehrozí, pretože radiačné korekcie k ich hmotnostiam m_{f} sú úmerné $\delta m_{\mathrm{f}} \sim \ln(E_{\mathrm{G}}^2/m_{\mathrm{f}}^2)$ (znamená to, že smerom k veľkým energiám logaritmicky divergujú), teda, aj pri energii E_G sú radiačné korekcie k hmotnostiam fermiónov relatívne malé. MSSM problém hierarchie (a teda aj stability elektroslabej energetickej škály) rieši zavedením superpartnerov. V tomto prípade radiačné korekcie sú úmerné rozdielu štvorcov hmotností partnerov a ich superpartnerov, ale keďže tieto sú rovnaké (korekcie sú uplatňované ešte pred 'spustením' mechanizmu spontátneho narušenia, ktoré naruší rovnosť hmotností partnerov a superpartnerov), radiačné korekcie sú nulové, resp. blízke k nule.

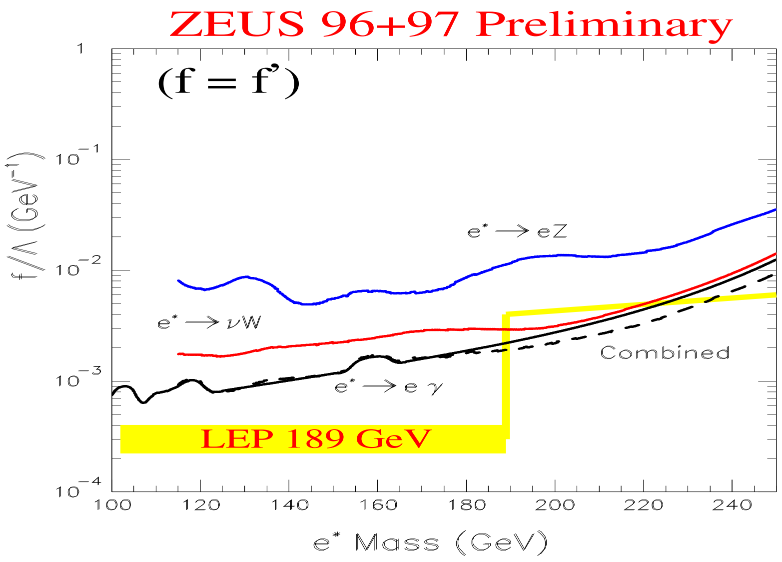
Ako vidieť, pokiaľ chceme skutočne unifikáciu síl na nejakej energetickej hladine, bez SUSY sa ťažko (aj keď je to v princípe možné) zaobídeme. Navyše SUSY pomocou lokálnej symetrie prirodzene zavádza gravitáciu ako nedieľnu časť unifikačných teórií.

V posledných rokoch príťažlivosť MSSM vzrástla, a to hlavne vďaka novým možnostiam overovania jeho predpovedí na súčasných svetových urýchľovačoch – na TEVATRONe vo FERMILABe, na LEP II v CERNe a na HERA v DESY. Jednou zo zaujímavých predpovedí GUT modelov je napr. existencia leptokvarkov (Quark 5/97, 8/98), častíc predstavujúcich spojivo medzi svetom fermiónov a bozónov, ktoré sa ale zatiaľ nepozorujú. Na obr. 3 je znázornená štúdia analýzy možnosti nájdenia jedného z leptokvarkov z H1 experimentu.



Obr. 3*:* H1 *experiment: Štúdia analýzy možnosti nájsť leptokvark vo fázovom priestore vydeleným urýchľovačom* HERA.

Obrázok predstavuje závislosť hmotnosti leptokvarku na relatívnej pravdepodobnosti rozpadu leptokvarku na elektrón a d kvark. Bielou vydelená oblasť označuje možnú hranicu existencie leptokvarku. Obr. 4 je dôkazom, že sa hľadajú aj superpartnery. Obrázok znázorňuje závislosť možnej hmotnosti excitovaného elektrónu na relatívnej energetickej škále, pri ktorej môže dôjsť k jeho rozpadu na rôzne módy, napr. ma elektrón a Z bozón, alebo neutríno a W bozón a pod..



Obr. 4: ZEUS *experiment: Štúdia analýzy možnosti nájsť exitovaný elektrón vo fázovom priestore vydeleným urýchľovačom* HERA.

MSSM má mnohé ďalšie pozitíva, vie napr. kvantovať elektrický náboj, chápe príčinu spontánneho narušenia elektroslabej symetrie,... V skutočnosti ale tieto jej prednosti poskytuje SUSY, čo možno ilustrovať napr. aj SUSY SU(5) modelom, teda SU(5) modelom, ktorý predpokladá SUSY symetriu, a ktorý dobu života protónu predpovedá na $4,5.10^{37\pm0,7}$ rokov, čo zatiaľ neodporuje dnešným pozorovaniam, ale čo je nateraz mimo našej potenciálnej experimentálnej verifikácie, ktorá je na úrovni cca 10^{34} rokov (experiment SuperKamiokande, viď Quark 12/99). Má však aj svoje nedostatky, k nim patrí napr. problém narušenia CP symetrie (viď Quark 12/99), problém stability najľahšieho superpartnera (ten sa obvykle označuje skratkou LSP, z anglického 'the lightest superpartner') a pod. Preto aj na GUT hladine popri MSSM vznikol celý rad ďalších modelov, napr. SUSYLR, ktoré sa snažia nedostatky MSSM odstrániť.
Otázny je aj spôsob narušenia SUSY. Dnes sa verí, že k jej narušeniu dochádza v tzv. '*skrytom*' sektore, [6] ktorý fyzikálne komunikuje s naším, *viditeľným* len cez tzv. '*komunikačný*' sektor, ktorý predstavuje buď gravitačná interakcia alebo kalibračný mechanizmus, či existencia kalibračných anomálií.

GUT teórie, predovšetkým MSSM, svoju popularitu umocňujú aj tým, že sú ideálnym prostriedkom pre rôzne teoretické špekulácie, napr. kedže predpovedajú širokú triedu nových častíc, poskytujú prijateľné vysvetlenie pre tzv. 'dark matter', teda pre 'temnú hmotu' (viď Quark 12/99), ktorej ideálnym kandidátom sú práve LSP častice, pre oscilácie neutrín (viď Quark 12/99), pre celkovú hustotu Vesmíru a pod.

'Gravity', 'Supergravity' (SUGRA) a 'String Theories'

---

[6] 'Skrytý' sektor neobsahuje hmotu alebo sily, ktoré popisuje SM, sektor, ktorý popisuje SM sa často označuje ako '*viditeľný*'.

GUT nepopisuje gravitačnú interakciu. Všeobecne, ak modely obsahujú supersymetriu, patria do triedy tzv. SUSY modelov, ktorej MSSM je časťou. Modely ašpirujúce na popis nám všetkých známych interakcií, teda slabej, elektromagnetickej, silnej a gravitačnej, môžu, ale aj nemusia obsahovať supersymetriu. Modely popisujúce gravitačnú interakciu, pokiaľ obsahujú SUSY, sa označujú anglickým termínom 'Supergravity' (SUGRA).

Priamym dôsledkom aplikácie SUSY na gravitáciu je požiadavka existencie superpartnera ku gravitónu, tzv. *gravitíno*, častice majúcej spin 3/2. Keďže gravitón má nulovú hmotnosť (ide o kalibračnú časticu, podobnú napr. gluónom alebo fotónu), symetria medzi gravitónom a gravitínom (rovnaká hmotnosť) je opäť narušená, takže očakávame, že gravitíno bude ťažké.

Existuje však široká trieda modelov, ktoré nepredpokladajú platnosť SUSY, no ukazuje sa, že v rámci nich je náš Svet oveľa ťažšie 'vysvetliteľný', navyše SUSY demonštruje istý typ matematickej elegancie, čo len umocňuje jej popularitu.

Ak konštrukcia GUT modelov je neľahká, o to ťažšia je konštrukcia modelov, ašpirujúcich na TOE, teda zahrňujúcich v sebe aj gravitáciu. Mám tu na mysli SUGRA, resp. *strunové* modely. Tieto modely pracujú na energetickej úrovni E_P, pričom si musia poradiť s istou výnimočnosťou gravitačnej interakcie, ktorá dynamicky ovplyvňuje topológiu časopriestoru. Aj keď GUT alebo SUGRA modely pracujú so značným množstvom voľných parametrov, nie sme