Štandardný model - kríza vo fyzike mikrosveta?

Ako častice prišli k svojej hmotnosti? Higgsov mechanizmus, spontánne narušenie symetrie

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Úvod

Koniec dvadsiateho storočia je v znamení prípravy na odpoveď na otázku, akým spôsobom elementárne častice získali svoju hmotnosť. Mám na mysli hlavný cieľ LHC experimentov ATLAS a CMS (viď Quark 4/98) v CERN, Švajčiarsko. Dnes sú odborníci v tejto oblasti prakticky všetci za jedno v tom, že správna odpoveď tkvie v existencii Higgsovho bozónu, či bozónov. Toto tvrdenie má však jeden podstatný háčik - dodnes nikto Higgsovu (Higgsove) častice nevidel..., a práve tu je jadro odpovede, k akému účelu bude predovšetkým urýchľovač LHC slúžiť. Navyše si všimnite, píšem Higgsov bozón alebo Higgsove bozóny, teda ani v tomto nemáme ešte jasno.
Je kľudne možné, že na to, aby sme odstránili jednu záhadu (t.j. ako elementárne častice 'prišli' k svojej hmotnosti), zavedieme ďalšiu - môže sa stať, že Higgsovu časticu nenájdeme, a potom otázkou dňa bude veta 'prečo?'.
Prvým, kto sa seriózne začal zaoberať problémom hmotnosti elementárnych častíc bol J.Schwinger, nositeľ Nobelovej ceny za vklad do rozvoja kvantovej elektrodynamiky. Jeho model však požadoval existenciu fyzikálneho systému, ktorý mal jednak veľmi silnú väzbu a jednak v ňom existovali viazané stavy. K jeho dobru možno však pričítať fakt, že nepožadoval existenciu nijakých nových polí (a teda nových častíc).
Je nesporne zaujímavé, že značný pokrok pri lúštení problému hmotnosti elementárnych častíc sa dosiahol aplikáciou metodík dovtedy používaných v mnohočasticovej teórii tuhej fázy, hlavne v oblasti supravodivosti. V prácach, zaoberajúcich sa týmto problémom, čoraz viac začali rezonovať pojmy ako *spontánne narušenie symetrie*, či *Goldstonove častice* alebo *Higgsov*, presnejšie *Higgsov-Kibbleov mechanizmus*.
Domnievam sa, že aj keď je asi nemožné tieto pojmy dostatočne presne popísať bez matematického aparátu (ktorý je priveľmi zložitý), predsa len snáď bude pre čitateľa, neodborníka, cenné vedieť aspoň niečo z tejto 'kuchyne', a to aj za cenu niektorých mnou vedomých zjednodušení. Tým skôr, že na týchto pojmoch (a myšlienkach, ktoré sa pod nim skrývajú) je 'ukrytá' veľká časť dnešnej modernej fyziky mikrosveta.
Začneme najskôr pojmami symetrie a jej spontánneho narušenia.

Kalibračné symetrie v mikrosvete

Koniec 20.-teho storočia sa nesie pre fyziku elementárnych častíc v znamení symetrií. Dnes udávajú základný tón v úvahách o tvare fundamentálnych fyzikálnych zákonov. Je až s podivom, koľko informácie sa dá získať o danom objekte, pokiaľ vieme jeho symetrie, t.j. pokiaľ vieme, akými symetriami daný objekt disponuje. Už klasická fyzika disponovala tzv. Noetherovou teorémou, ktorá tvrdí, že pokiaľ je fyzikálny systém invariantný (nezávislý) od nejakej spojitej *globálnej symetrie*, tak je možné v rámci daného systému skonštrovať také fyzikálne veličiny, ktoré sa s časom zachovávajú, pričom počet týchto s časom sa zachovávajúcich fyzikálnych veličín (v klasickej fyzike sa tieto veličiny označujú pojmom 'zákony zachovania') je presne rovný počtu možných spojitých globálnych symetrií. Tu treba niekoľko slov na vysvetlenie, čo znamená spojitá globálna symetria. O spojitej globálnej symetrii hovoríme vtedy, ak nekonečne malá zmena riešenia pohybových rovníc (v prípade kvantovej teórie poľa zmena polí) voči zmene súradníc a času je úmerná hodnote pôvodného riešenia (poľa) s multiplikatívnym parametrom, nezávislým na súradniciach a času. Napr. pokiaľ je systém homogénny, t.j. riešenie pohybových rovníc je nezávislé na zmene priestorovej súradnice, zachováva sa hybnosť, pokiaľ ide o nezávislosť voči zmene časovej súradnici, zachováva sa energia. Obvykle sa tieto symetrie matematicky ukrývajú do jazyka grúp. Z tohto pohľadu pre klasickú fyziku je najzaujímavejšia Poincaréova grupa. Ak je fyzikálny systém invariantný voči tejto grupe (ide o transformácie Lorentza a o posunutie v priestore a v čase), potom sa zachováva energia, hybnosť a moment hybnosti daného systému. Silu predikcie analýzy fyzikálneho systému pomocou symetrií dokazuje práve analýza Poincaréovej grupy. Ona nielenže poskytla už spomenuté zákony zachovania energie, hybnosti a momentu hybnosti, ale, a to je skutočne prekvapujúce, predpovedala existenciu zákona zachovania, ktorý z jednej strany nebol spätý s dynamikou pohybu, zo strany druhej jeho vlastnosti odpovedali momentu hybnosti. Šlo o spin, fenomén v klasickej fyzike neznámy (o ktorom ale dnes vieme, že sa formálne správa ako moment hybnosti v kvantovej mechanike).

V dnešných úvahách o tvare fundamentálnych fyzikálnych zákonov popri globálnych symetriách, oveľa dôležitejšiu úlohu zohrávajú tzv. *lokálne symetrie.* Tie sa od globálnych líšia v tom, že v definícii globálnej symetrie vystupujúci multiplikatívny parameter je závislý na súradniciach a času. Tu už sa jedná skutočne o silnú požiadavku, ktorú obvyklé formulácie pohybových rovníc známe z klasickej fyziky alebo kvantovej mechaniky, či kvantovej teórie poľa, nespĺňajú. Zmeňme však prioritu, t.j. *vždy požadujme platnosť spojitej lokálnej symetrie.* Táto požiadavka nás núti k modifikácii pohybových rovníc, pričom obvykle, majúc na mysli základný aparát fyziky mikrosveta, a tým je kvantová teória poľa, vedie k zavedeniu nových polí, ktoré majú nové vlastnosti - napr. dokážu medzi sebou navzájom interagovať. [1] V konkrétnych realizáciách tohto prístupu tieto nové polia (presnejšie fluktuácie týchto polí) priraďujeme k novým časticiam, tak napr. v kvantovej chromodynamike dospievame ku gluónom, časticiam, ktoré na rozdiel od fotónov, sú schopné priamo navzájom na seba pôsobiť pomocou výmeny farebného náboja. [2] Spojité globálne alebo lokálne symetrie, zavedené vyššie uvedeným spôsobom, sa obvykle vo fyzike mikrosveta označujú pojmom *kalibračné symetrie.* Toto označenie priamo plynie z ich vlastností. Pozastavme sa pri kvantovej elektrodynamike, ktorej rovnice sú invariantné voči globálnej kalibračnej symetrii. Vieme, že v prírode existujúci fotón je nehmotný, a preto jeho spin sa môže usporiadať len dvomi spôsobmi (svetlo je buď pravotočivo alebo ľavotočivo polarizované). Avšak je výhodné písať formulácie pohybových rovníc elektrodynamiky tak, že umelo dovoľujeme, aby existoval aj fotón, ktorý by mal napr. spin orientovaný v smere jeho letu (pozdĺžne polarizovaný fotón). To sa deje vhodným

[1] Zmena fázy poľa pri požiadavke platnosti lokálnej symetrie nezávisle od bodu (v priestore a čase) k bodu, keďže signál sa šíri s konečnou rýchlosťou a pretože existujú časti priestoru, ktoré vzájomne o sebe 'nič nevedia', narušuje pôvodnú kovariantnosť rovníc. Aby predsa len rovnice boli opäť v kovariantnom tvare, musíme k nim pridať nové častice, ktoré evidentne pôvodný popis zmenia, pretože musia interagovať s pôvodnými poliami častíc.

[2] Aj fotóny môžu medzi sebou vzájomne interagovať, ale jedná sa o interakciu sprostredkovanú - najskôr musia prejsť do elektrón-pozitrónových párov, a až tie medzi sebou budú interagovať výmenou virtuálnych fotónov.

výberom parametra (nezávislého na súradniciach) pri nekonečne malej zmene poľa popisujúceho riešenie pohybových rovníc. Táto cesta nám značne uľahčuje výpočty. Samozrejme, v konečnom výsledku sa existencia 'falošného', nefyzikálneho fotónu nijako neprejaví. Je tiež zrejmé, že existuje nekonečne veľa možností výberu spomenutého parametra. Výberom jednej konkrétnej možnosti naše rovnice 'kalibrujeme', nastavíme na náš výber. Pri konkrétnych výpočtoch častokrát závisí ich úspešné riešenie na 'šťastnom' výbere kalibrácie. Tak tomu je aj v prípade kvantovej chromodynamiky, kde napr. pokiaľ chceme dokázať niektoré všeobecné vlastnosti jej pohybových rovníc, je výhodné, podľa Fadejeva a Popova, zaviesť pojem nefyzikálnych 'duchov'. Teda ešte raz podtrhujem, konečný fyzikálny výsledok (predpoveď) tej-ktorej formulácie kvantovej teórie poľa nezávisí na výberu kalibrácie.

Spontánne narušenie symetrie v mikrosvete

Pokročme však ďalej. Existujú dva dôvody, prečo spontánne narušenie symetrie (o ktorom bude v ďalšom reč) bolo použité modernou fyzikou pre stavbu modelov popisujúcich základné interakcie. Prvým je naša viera, že základné zákony Prírody obsahujú vysoký stupeň symetrií, a nami pozorované asymetrie sú len dôsledkom toho, že symetrické rovnice kvantovej teórie poľa majú aj nesymetrické riešenia, t.j. riešenia, ktoré tieto symetrie narušujú. Spontánne narušenie symetrie umožňuje teda symetrickým teóriam popísať pozorovanú asymetriu. Myšlienka spontánneho narušenia symetrie bola najskôr sformulovaná vo fyzike tuhej fázy. Zoberme si kus feromagnetického materiálu. Interakcia elementárnych magnetických momentov elektrónov vo vnútri feromagnetika má globálnu rotačnú symetriu, t.j. jej výsledok nezávisí na tom, ako systém v priestore pootočíme. Na strane druhej, pri veľmi nízkej teplote celkový magnetický moment feromagnetika (ide o vektorový súčet elementárnych magnetických momentov elektrónov vo vnútri feromagnetika) nie je nulový a má nejaký určitý smer, teda narušuje priestorovú rotačnú symetriu systému. Pokiaľ stavu feromagnetika pri veľmi nízkej teplote budeme hovoriť, že je základným, potom tento stav narušuje priestorovú rotačnú symetriu. Všimnime si, že výber orientácie celkového magnetického momentu feromagnetika v základnom stave je ľubovoľný (spontánny), ak však je už daný, určuje charakter narušenia rotačnej symetrie.
Veľmi podobná je aj situácia z nášho bežného života: predstavme si, že ideme stolovať. Na stole, popri hlavnom jedle je aj šalát, a to v malej miske vedľa hlavného taniera. Pokiaľ čo len jeden z prísediacich za stolom sa dotkne šalátovej misky, automaticky rozhodne, komu ktorá šalátová miska bude patriť. Výber misky prísediacim za stolom dovtedy existujúcu pravo-ľavú symetriu medzi šalátovými miskami naruší.
Vráťme sa však do mikrosveta, teda k teórii poľa. Tu sa tomuto javu hovorí 'Nambu-Goldstonova realizácia symetrie'. Základným stavom, ktorý (analogicky ako pri feromagnetiku) narušuje symetriu riešenia kvantového poľa je stav s najnižšou možnou energiou, teda stav vákua. Jeho konkrétna realizácia opäť môže byť ľubovoľná (majúca nekonečne veľa možností). Technicky sa mechanizmus spontánneho narušenia globálnej symetrie dosiahne teda výberom jednej konkrétnej hodnoty vákua. Ak sa začneme zaujímať o malé fluktuácie poľa v blízkosti takto nami vybratého vákua, v rovniciach sa nám objavia zrazu nehmotné častice, pričom vznikne toľko nehmotných častíc, o koľko stupňov sa pôvodná symetria naruší. To si ako prvý všimol Goldston, a preto tieto častice nesú jeho meno. Teda, spontánne narušenie globálnej symetrie *vždy* vedie k vzniku nehmotných, *Goldstonovych častíc*.
My ale v prírode pozorujeme častice hlavne s nenulovou hmotnosťou. Čo sa bude diať, ak použijeme mechanizmus spontánneho narušenia symetrie na kvantovú teóriu s lokálnou symetriou?

Higgsov mechanizmus

Postupujeme rovnako, ako v prípade spontánneho narušenia symetrie kvantovej teórie poľa s globálnou symetriou, teda z nekonečne veľa možných stavov vákua, vyberáme jedno, s konkrétnou hodnotou. Avšak je tu podstatný rozdiel - požiadavka platnosti lokálnej kalibračnej symetrie do rovníc poľa zavádza nové, nehmotné vektorové polia, a to v prípade poľa s globálnou symetriou nebolo potrebné. Opäť analyzujme, čo sa stane, keď nastanú malé fluktuácie poľa v blízkosti takto nami vybraného vákua. Dá sa ukázať, že pri šikovnom výbere kalibrácie, dostaneme taký tvar rovníc (tento výber je vždy možný), pri ktorých už spomenuté nehmotné vektorové polia nebudú nehmotnými, ale získajú nejakú nenulovú hmotnosť. Ide o tzv. *Higgsov mechanizmus*, ktorý po prvý raz nezávisle na sebe popísali Higgs a Kibble v polovici šesťdesiatych rokoch. Na prvý pohľad to iste čitateľovi 'zaváňa' alchýmiou, ale niečo podobného sa vedelo už oveľa skôr, a to pri popise správania sa iónov napr. s kladným elektrickým nábojom, ktoré boli ponorené do roztoku záporne nabitých iónov. Mám na mysli Debyeov efekt, kde v slabom elektrostatickom poli vzniká silná väzba medzi iónmi rozdielneho znamienka elektrického poľa, čo sa navonok javí ako vznik objektu s nenulovou hmotnosťou. To naozaj neudivuje, pretože si možno predstaviť situáciu, keď okolo iónu s kladným znamienkom elektrického náboja sa začnú koncentrovať opačne nabité ióny, takže topologicky vznikne nový lokálny neutrálny objekt.

Zoberme si ešte jeden príklad z oblasti supravodivosti: v supravodiči vznikajú tzv. Cooperove páry elektrónov, čo má za následok vypudzovanie elektromagnetického poľa zo supravodiča, alebo ekvivalentne preniknutie elektromagnetického poľa len na konečnú dĺžku, čo ale znamená, že Coulombov zákon spojený s nehmotným fotónom sa reviduje, závislosť $\sim \frac{1}{r}$ sa mení na $\sim \frac{1}{r}exp(r/r_0)$, kde r_0 predstavuje charakteristickú dĺžku prieniku a $1/r_0 \sim m_{eff}$, kde m_{eff} je efektívna hmotnosť fotónov.

Vyššie uvedené pojmy a idey, ktoré k nim viedli, predstavujú jeden zo základov dnešného ponímania mikrosveta, základným modelom ktorého je tzv. *Štandardný model.*

Štandardný model

Štandardný model je 'zlepenec' dvoch navzájom nezávisle vytvorených teórií, a to kvantovej chromodynamiky, popisujúcu silnú interakciu (viď Quark 12/98) a elektroslabej, tzv. Weinbergovej-Salamovej-Glashowovej teórie, ktorá zjednocuje elektromagnetickú a slabú interakciu. Vzhľadom k tomu, že istá informácia o kvantovej chromodynamike už v Quarku publikovaná bola, zastavme sa trochu bližšie pri elektroslabej teórii.

Začnime históriou slabej interakcie. Tá bola prvý raz teoreticky popísaná E. Fermim v roku 1934. Išlo o teóriu veľmi podobnú kvantovej elektrodynamike, ktorá po objave narušenia C a P parity (viď Quark 8/99) bola mierne upravená tak, aby vyhovovala experimentálnym poznatkom. Aj keď bola schopná v prvom priblížení popísať β- rozpad, jej veľkou chybou bolo, že nebola renormalizovateľná. [3] V prírode pozorujeme istú asymetriu vo výskyte neutrín, ak kritériom selekcie neutrína

[3] Kvantová teória poľa môže alebo nemusí byť *renormalizovateľná.* Čo to znamená? Prakticky všetky výpočty v ľubovoľnom variante kvantovej teórie poľa sa uskutočňujú poruchovým spôsobom, t.j. výpočet je rozložený na nekonečne veľa príspevkov, ktoré sa vzájomne líšia hodnotou parametra, podľa ktorého je konečný výsledok rozložený do poruchového radu. Obvykle týmto parametrom je väzbová konštanta interakcie. Samozrejme, súčet všetkých príspevkov je rovný výsledku, ktorý by sme dostali, ak by sme výpočet uskutočnili priamo, teda neporuchovou cestou. To ale obvykle nevieme, navyše sme v stave spočítať len niekoľko prvých príspevkov zo spomenutého radu. Tu je ukrytá aj odpoveď zmysluplnosti metódy poruchového výpočtu - táto metóda nemá praktický význam, pokiaľ by príspevky vyšších rádov (príspevky, pri ktorých je väzbová konštanta umocnená faktorom n, kde n je prirodzené číslo) boli zrovnateľné s príspevkami z nižších rádov (príspevky, pri ktorých je väzbová konštanta umocnená faktorom m, kde m je prirodzené číslo, no menšie ako n), teda pokiaľ by väzbová konštanta interakcie priveľmi neklesala s rastom mocniny. Napr. v prípade kvantovej elektrodynamiky väzbová konštanta má pri nízkych energiách hodnotu $\sim \frac{1}{137}$, teda neudivuje, že poruchové výpočty dobre zodpovedajú experimentálnym údajom už pri nízkych energiách, pre silnú interakciu hodnota väzbovej konštanty pri nízkych energiách je ale pomerne veľká, a preto výpočty kvantovej chromodynamiky sú zmysluplné len pri vysokých energiách. Ukazuje sa však, že vyššie spomenuté príspevky z poruchového radu sú nekonečne veľké sami o sebe. Ak ich počet s rastom mocniny n väzbovej konštanty v poruchovom rade nerastie, hovoríme, že teória je renormalizovateľná, v opačnom prípade sa jedná o *nerenormalizovateľnú* teóriu. Naštastie dnes vieme, ako sa vysporiadať s nekonečnami v renormalizovateľných teóriách, preto ich

bude priemet jeho spinu na smer jeho letu (hovoríme o helicite), potom doposiaľ nikto nepozoroval existenciu neutrína, helicita ktorého by bola pravotočivá, t.j. neexistuje neutríno, ktorého smer letu by bol totožný s priemetom jeho spinu. Aby som celú vec viac priblížil, vždy by ste spoznali, či sa 'pozeráte' na neutríno, alebo na jeho 'obraz' v zrkadle. Nuž a tento fakt zohral rozhodujúcu úlohu pri výbere najjednoduchšieho variantu kalibračnej elektroslabej teórie. Teória elektroslabej interakcie rešpektuje požiadavku platnosti lokálnej kalibračnej symetrie, čoho dôsledkom je zavedenie nových nehmotných vektorových polí, ktoré odpovedajú trom nositeľom slabej interakcie - $W^{\pm}$ a Z bozónom a jednému nositeľovi elektromagnetickej interakcie - fotónu. 'Zhmotnenie' $W^{\pm}$ a Z bozónov sa dociеľuje už spomenutým Higgsovym mechanizmom. Zjednodušene, najjednoduchší variant elektroslabej teórie, majúc na zreteli len časť odpovedajúcu slabej interakcii, 'štartuje' s existenciou nejakého skalárneho poľa, ku ktorému požiadavka platnosti lokálnej symetrie 'priradí' tri Goldstonove bozóny, ktoré sa vďaka Higgsovmu mechanizmu zhmotnia. Toto skalárne pole odpovedá nejakej hmotnej častici (elektricky neutrálnej so spinom 0, teda skaláru), ktorá dostala názov podľa mechanizmu, ktorý si jej existenciu vynútil - ide o *Higgsov bozón*. Teda v Štandardnom modeli, čo je najjednoduchší variant realizácie elektroslabej interakcie, vystupuje *len* jedna Higgsova častica. Existuje množstvo rôznych zložitejších modelov, kde vystupuje viac Higgsových bozónov, napr. veľmi populárny je model MSSM ('the Minimal Supersymmetric Standard Model'), kde je päť Higgsovych častíc,...

Čitateľ si môže položiť nasledujúcu otázku: prečo vývoj nepokračoval cestou, ktorú pôvodne naznačil Schwinger, ktorý na zavedenie hmotnosti nepotreboval novú, resp. nové častice? Navyše si všimnime, že už samotný spôsob zavedenia Higgsovho bozónu v Štandardnom modeli prakticky *veľmi vágne viaže* vlastnosti Higgsovej častice s našim svetom, pre ktorý sú určujúce vlastnosti $W^{\pm}$ a Z bozónu, fotónu, leptónov a kvarkov! Odpoveďou sú napr. hneď dva argumenty:

1. Štandardný model predpovedal existenciu *neutrálneho* slabého toku, čoho starý Fermiho model nebol schopný, pričom existenciu tohto toku má 'na svedomí' neutrálny Z bozón.

2. V čase vzniku Štandardného modelu, t.j. v roku 1970, boli známe len tri kvarky, a to u, d a s a dve 'generácie' leptónov (t.j. dvojice elektrón, elektrónové neutríno a mión s miónovým neutrínom). Šlo teda o asymetriu medzi kvarkami a leptónmi. Štandardný model predpovedal existenciu ďalšieho tzv. 'charm' c kvarku, ktorý bol v 1974 aj experimentálne objavený.

V prospech Štandardného modelu môžeme ďalej pokračovať:

1. správne predpovedá, že Z bozón je ťažší ako $W^{\pm}$ bozóny;

2. predpovedané $W^{\pm}$ a Z bozóny sa experimentálne našli;

3. ak zafixujeme voľné parametre v Štandardnom modeli k známym experimentálnym konštantám (k väzbovej konštante elektromagnetickej interakcii, k Fermiho konštante slabej interakcie a k experimentálne určenej hmotnosti Z bozónu), sme schopní správne predpovedať hmotnosť $W^{\pm}$ bozónov;

4. *Higgsov mechanizmus v rámci Štandardného modelu nám nielenže dovoľuje zhmotniť $W^{\pm}$ a Z bozóny, ale nám hovorí, akým spôsobom získali hmotnosť ostatné fundamentálne častice (leptóny a kvarky) - deje sa tak na základe väzby Yukawu medzi Higgsovym bozónom a danou, pôvodne nehmotnou, časticou (napr. leptónom, či kvarkom)!* Teda ponúka prijateľné vysvetlenie, akým spôsobom častice získali svoju hmotnosť.

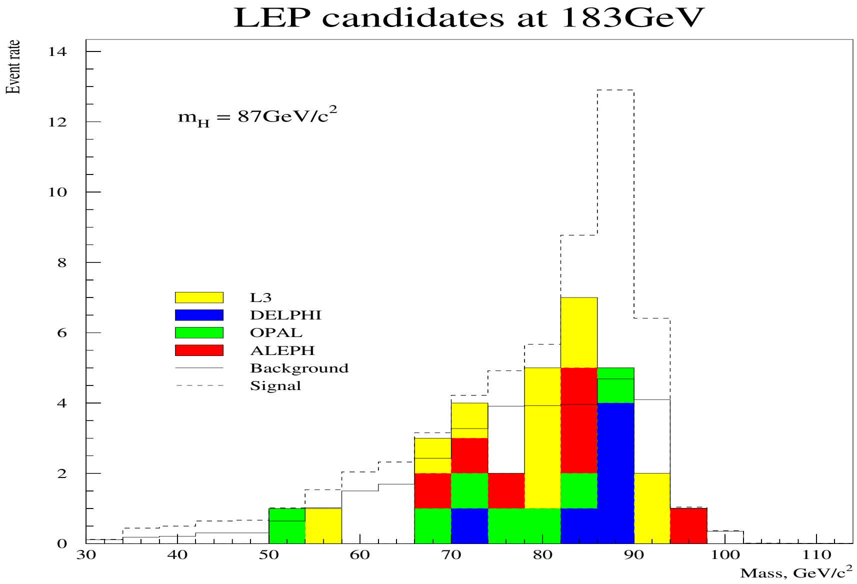
akceptujeme ako vhodné modely pre popis Prírody, nerenormalizovateľné teórie odmietame ako neakceptovateľné. Jednoducho nevieme, čo si s takými teóriami počať.

Dá sa ukázať ešte viac, napr. Štandardný model je renormalizovateľný len vtedy, pokiaľ má protón opačný elektrický náboj ako elektrón. Požaduje takú koreláciu medzi elektrickými nábojmi elektrónu, u a d kvarkami, ktorá zaručuje elektrickú neutralitu atómu vodíka. Za predpokladu platnosti dnešnej konštrukcie kvantovej chromodynamiky, požaduje napr. správne tretinové hodnoty elektrického náboja kvarkov, správnu hodnotu elektrického náboja elektrónu a elektrónového neutrína. Môžme jednoducho ďalej pokračovať. A aby sme to mali ešte zložitejšie, dnes prakticky neexistujú experimentálne fakty, ktoré by boli v nejakom ostrom protiklade s predpoveďou Štandartného modelu, máme len pár indikácií o možnom nesúlade experimentu so Štandardným modelom (viď napr. Quark 5/97, 8/98 a 12/98). Tento fakt sa často vykladá ako kríza vo fyzike elementárnych častíc - tam, kde niet protirečení medzi teóriou a experimentom, niet ani potreby nových myšlienok.
A predsa len, jedným z najslabších miest v Štandardnom modeli je nutnosť existencie Higgsovej častice, a preto sa k tomuto problému vráťme.

Higgsov bozón a jeho spätosť s našim svetom

Priamemu objavu top, t, kvarku predchádzala dlhodobá podrobná analýza experimentálnych údajov z LEP urýchľovača v CERN. Aj keď výsledky z LEPu nikdy t kvark priamo 'nevideli', analýzou e^+e^- zrážok sa prišlo k záveru nielenže o nevyhnutnosti existencie top kvarku, ale bolo možné určiť nepriamo aj jeho hmotnosť! Spomenutá analýza bola založená na 'skrytom' vplyve top kvarku na analyzované procesy. [4] Takto získaný výsledok sa veľmi nelíši od výsledku CDF a D0 experimentov na urýchľovači TEVATRON v USA, ktoré hmotnosť top kvarku určili priamym meraním (viď Quark 4/97). Preto je na mieste otázka, či nie je možné v prípade Higgsovho bozónu postupovať rovnako. Odpoveď znie, bohužiaľ, nie. Na príčine sú opäť špecifiká Štandardného modelu.
Higgsov bozón je jedinou časticou, ktorá nateraz v Štandardnom modeli chýba. Jeho interakcia s kalibračnými bozónmi $W^{\pm}$, Z a fotónom je fixovaná požiadavkou kalibračnej invariantnosti Štandardného modelu. To platí bez výnimky.
Aj keď vo všeobecnosti v teóriách so spontánne narušenou symetriou hmotnosť častice nie je nijako skorelovaná s väzbovou konštantou charakterizujúcu jej 'samointerakciu' (mám na mysli interakciu poľa so sebou samým - gluóny z kvantovej chromodynamiky sú typickým príkladom samointeragujúcich častíc), Štandardný model je výnimkou - tu v prípade Higgsovej častici vystupuje rovnaký parameter. To znamená, že hmotnosť Higgsovho bozónu je plne daná veľkosťou intenzity jeho interakcie so sebou samým.
Predpokladajme, že hodnota tejto intenzity je veľká, t.j. hmotnosť Higgsovho bozónu je veľká. Potom, aj keď by sme mali očakávať veľké radiačné korekcie, vďaka skrytej symetrii, ktorú potenciál Higgsovho poľa má, nie je to tak - vplyv Higgsovho bozónu na nami pozorované procesy (mám na mysli procesy, energia zrážky ktorých je nižšia ako bude v prípade urýchľovača LHC) nebude prakticky žiaden (radiačné príspevky od Higgsovho bozónu vďaka spomenutej skrytej symetrii sa prakticky vzájomne vykompenzujú a budú len rádu typu $\sim ln(\frac{m_H^2}{m_Z^2})$, kde m_H, resp. m_Z je hmotnosť Higgsovho bozónu, resp. Z bozónu). Obr. 1 predstavuje analýzu údajov z roku 1997 z experimentov OPAL, ALEPH, L3 a DELPHI uskutočnených na LEP II (ide o upravený urýchľovač LEP, energia zrážky ktorého je dvojnásobkom pôvodnej). Pri energii zrážky $\sqrt{s} = 183$ GeV, čiarkovanou krivkou

[4] Mám na mysli tzv. *radiačné korekcie.* V kvantovej teórii poľa existujú 'holé' a 'obalené' objekty. Napr. v prírode pozorovaný elektrón je 'obalený', pretože okolo neho, pôvodne 'holého', sa vytvára mrak virtuálnych elektrón-pozitrónových párov, prítomnosť ktorých čiastočne modifikuje jednak elektrický náboj a jednak hmotnosť 'holého' elektrónu. Podobná situácia je aj s kvarkami - okolo 'holého' kvarku sa dá spočítať pravdepodobnosť miery zastúpenia toho-ktorého virtuálneho páru pozostávajúceho z jedného zo šiestych kvarkov a antikvarkov, teda aj z top a anti-top kvarku. Na rozdiel od kvantovej elektrodynamiky, v Štandardnom modeli čím je hmotnosť top kvarku väčšia, tým väčšie sú aj radiačné efekty.



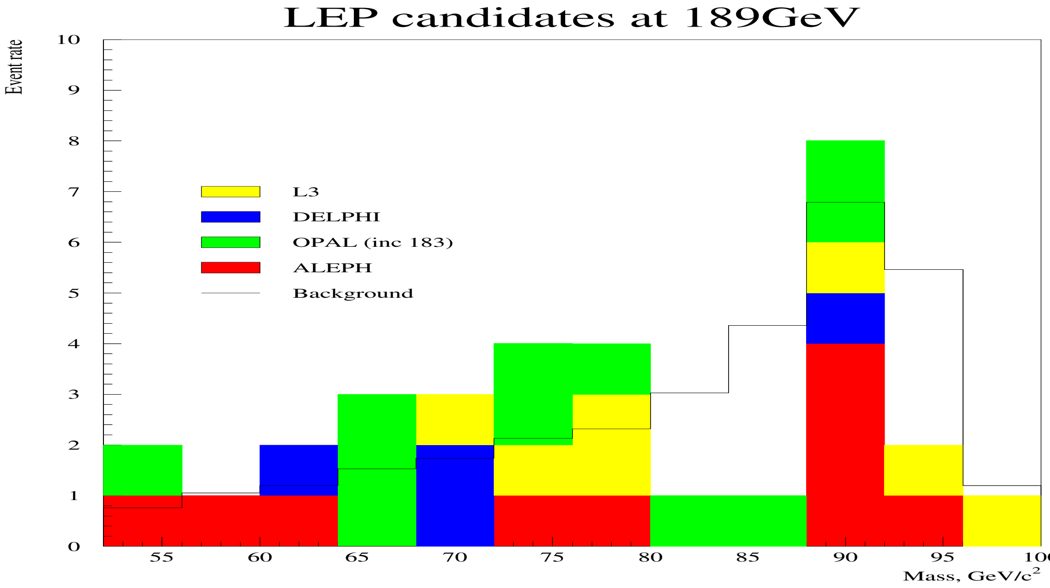
Obr. 1: *Pozorované hmotnostné rozdelenie kandidátov na Higgsov bozón zo štyroch LEP experimentov pre* $\sqrt{s} = 183$ GeV*. Údaje sú z roku 1997.*

je znázornený signál od očakávaného Higgsovho bozónu, plnou čiarou je znázornené pozadie. Je vidieť, že k správnej interpretácii výsledkov Higgsov bozón nie je nutný. Trošku iná je už situácia z analýzy údajov z roku 1998, kde pri energii zrážky $\sqrt{s} = 189$ GeV už, ako to demonštruje obr. 2, nie je ideálny súhlas medzi očakávaným pozadím a experimentálnymi údajmi. Na obr. 3 je výsledok súčasnej analýzy údajov z LEP II, podľa ktorej spodná hranica na hmotnosť Higgsovho bozónu je väčšia ako 90 GeV. Z druhej strany, horná hranica pre jeho hmotnosť je $m_H < 280$ GeV.
Vidíme, že na základe dnešných experimentálnych údajov odhadnúť hmotnosť Higgsovho bozónu je prakticky nemožné. A čo teória? Ani v nej nie je situácia ružová. Pre demonštráciu uvediem niekoľko málo argumentov, vďaka ktorým skutočne len veľmi približne vieme hranice v ktorých sa pohybuje hmotnosť Higssovho bozónu.

1. Vďaka tomu, že Štandardný model je kalibračne invariantný a vďaka požiadavke na platnosť podmienky unitarity, [5] dá sa ukázať, že maximálna hmotnosť Higgsovho bozónu by nemala byť väčšia ako 700 GeV. Táto úvaha je však založená na poruchovom prístupe, teda za podmienky malosti väzbovej konštanty interakcie Higgsovej častice so sebou samou, a preto pokiaľ by predsa len hmotnosť Higgsovho bozónu bola väčšia, nevedeli by sme teoreticky spočítať napr. rozptyl $W + Z \to W + Z$ a navyše, boli by sme nútení aplikovať na výpočty neporuchový počet, čo dnes ale nevieme... Nádejou, že to tak nie je, sú výpočty pomocou dnes jedinej nepruchovej metódy, a tou je tzv. mriežková formulácia kvantovej teórie poľa, orientovaná na výpočty pomocou počítačov, ktoré naznačujú stabilitu hodnoty 700 GeV.

2. Ohraničenie na hornú hodnotu hmotnosti Higgsovho bozónu vyplýva aj z požiadavky na stabilitu nášho Vesmíru. Pokiaľ by napr. Higgsov bozón bol ťažší od istej hodnoty hmotnosti top kvarku, neexistoval by stav s najnižšou energiou a Vesmír by nemohol byť stabilným.

[5] Predpokladajme, že vždy vieme, že k zrážke napr. dvoch častíc dôjde. V procese zrážky sa môžu realizovať rôzne koncové stavy, t.j. vzniká istá trieda možností ich realizácie. Každá takáto možnosť má istú pravdepodobnosť, ktorá hovorí, že ak k procesu zrážky dôjde, potom sa daná možnosť bude realizovať s touto pravdepodobnosťou. Je zrejmé, že súčet všetkých možných pravdepodobností realizácie všetkých možných procesov musí byť rovný istote, že k zrážke došlo, teda je rovný jednej, a to je podmienka unitarity.



Obr. 2: *Pozorované hmotnostné rozdelenie kandidátov na Higgsov bozón zo štyroch LEP experimentov pre* $\sqrt{s} = 189$ GeV*. Údaje sú z roku 1998.*

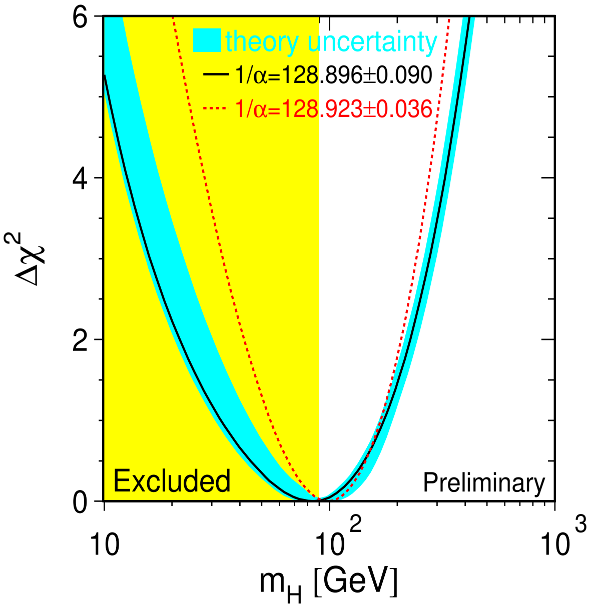
Mimochodom táto podmienka hovorí, že ani hodnota hmotnosti top kvarku nie ľubovoľná...

3. Dnes najpresnejšie teoretické ohraničenie na hmotnosť Higgsovho bozónu dáva analýza správania sa väzbovej konštanty interakcie Higgsovho bozónu so sebou samým. Tá, za predpokladu, že do energie 10^{15} GeV neplatí iná fyzika okrem fyziky obsiahnutej v Štandardnom modeli, by sa mala pohybovať v hraniciach medzi 170 GeV $< m_H <$ 190 GeV. Prečo práve 10^{15} GeV? Ide o energetickú hranicu, o ktorej veríme, že pri nej nie je rozdiel medzi silnou, slabou a elektromagnetickou interakciu, tieto interakcie sa pri tejto energii správajú ako jedna sila. Na obr. 4 je znázornená očakávaná závislosť hmotnosti Higgsovho bozónu v závislosti na hodnote energetickej hranice.

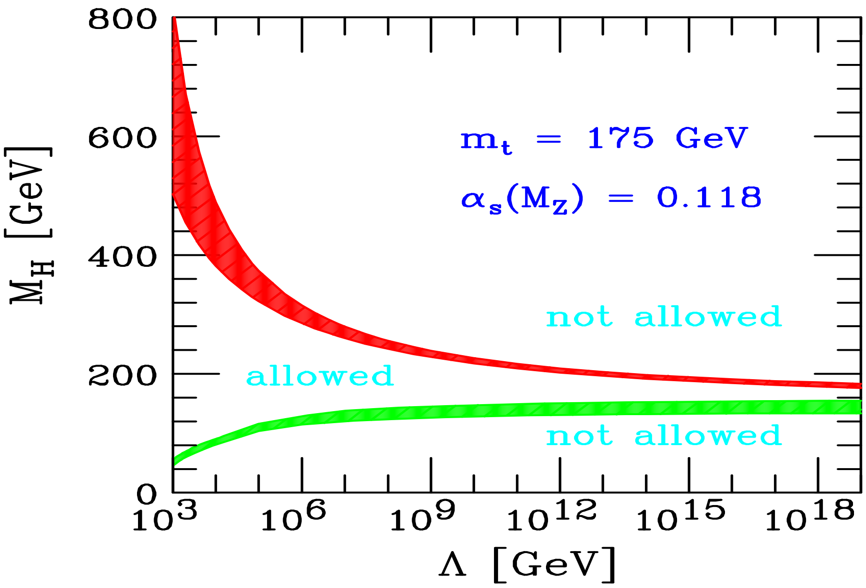
Dnes najpresnejší odhad hodnoty hmotnosti Higgsovej častice je $m_H = 159,1^{+144}_{-83}$ GeV.

Ako ďalej?

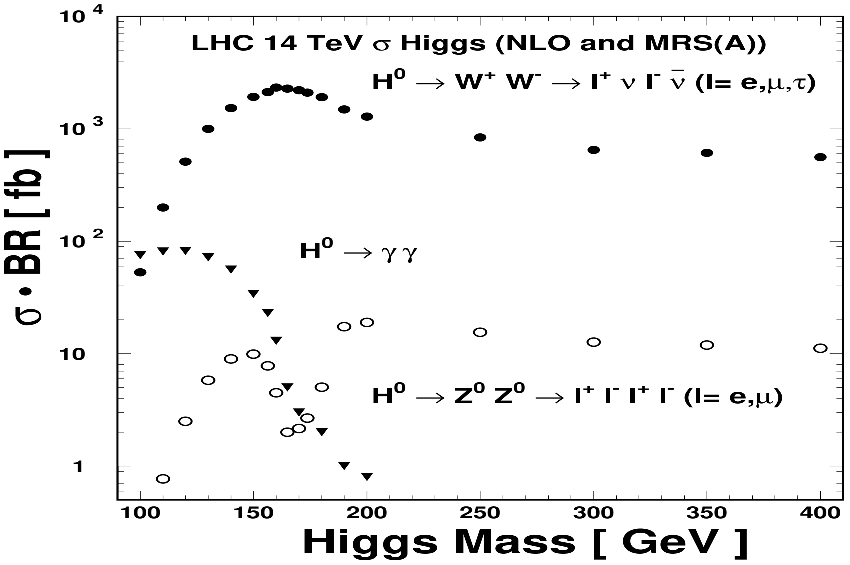
Som presvedčený, že čitateľ, pokiaľ sa dokázal 'prelúskat" k týmto riadkom, pochopil, že dnes máme k dispozícii neobyčajne silný aparát, Štandardný model, s neobyčajne silnou prediktívnou silou. Chýba nám len experimentálny dôkaz existencie Higgsovho bozónu. Ten nateraz nie sme schopní získať z dnešných experimentov, preto staviame na urýchľovači LHC v CERN nové detektory - ATLAS a CMS. Ale budú schopné nám poskytnúť nami požadovanú informáciu? Na obr. 5 je ukázané rozdelenie závislosti očakávanej pravdepodobnosti počtu prípadov na hmotnosti Higgsovej častice. Bez snahy ísť do podrobností už z obr. 5 vidieť, že veríme, že signál pochádzajúci z Higgsovho bozónu budeme vedieť 'vystopovat" z tých prípadov, v koncovom stave ktorých sa nachádzajú elektricky nabité leptóny. Či sa tak stane, ukáže až rok 2005, kedy sa prvý raz očakávajú prvé experimentálne údaje z LHC.



Obr. 3: *Výsledok zrovnávacej analýzy Štandartného modelu a experimentálnych údajov z LEP II.*



Obr. 4: *Priestor medzi dvomi krivkami ukazuje povolenú hodnotu hmotnosti Higgsovo bozónu.*



Obr. 5: *Závislosť očakávaných pravdepodobností počtu prípadov v závislosti na hmotnosti Higgsovej častice.*