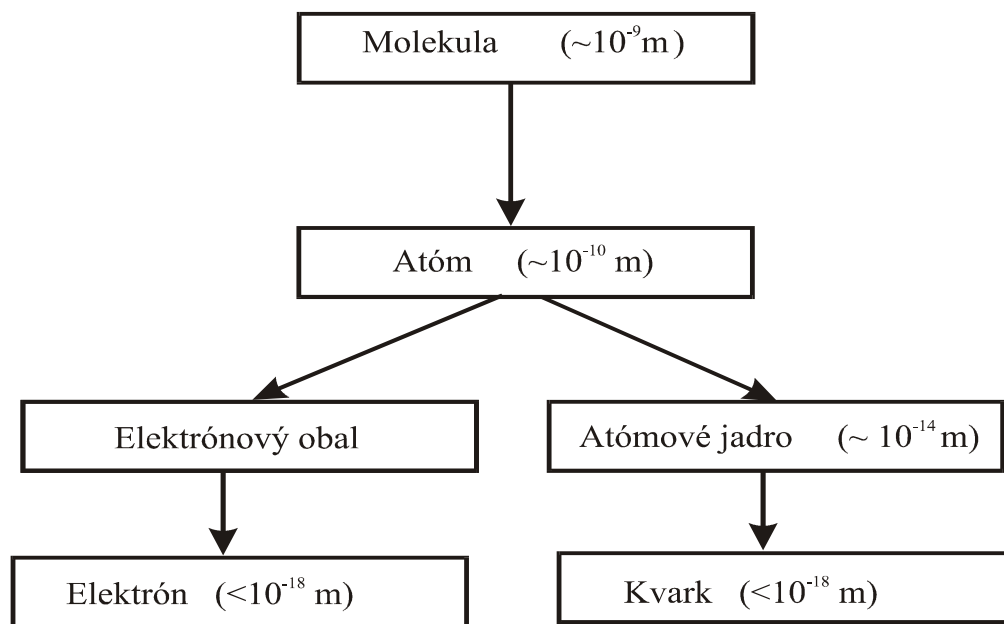


1.Úvod. Fyzický svet z hľadiska pohľadu súčasnej časticovej fyziky

Základným cieľom tejto prednášky je dať kvalitatívnu predstavu o obklopujúcom nás svete z hľadiska súčasnej fyziky elementárnych častíc (časticová fyzika). Základnou charakteristikou črtou obklopujúceho nás sveta je existencia diskrétnych štruktúr ako je molekula, atóm, atómové jadro a pod. Na kvalitatívnej úrovni si ukážeme aké sú základné stavebné častice fyzického sveta, aké sú základné sily pôsobiace medzi týmito časticami, ako aj akým spôsobom sa získava informácia o časticiach a ich interakciách.

Diskrétnosť štruktúry fyzického sveta môže byť charakterizovaná schémou, ktorá je ukázaná na obr.1. Ako je vidieť z obr. 1 najelementárnejšími komponentmi hmoty sú elektróny a kvarky. Elektróny sú elementmi elektrónového obalu atómového jadra a kvarky sú základnými komponentmi nukleónov, ktoré vytvárajú atómové jadro.



Obr. 1 Schéma diskkrétnej štruktúry fyzického sveta

V ďalšom si stručne povieme ako sa získava informácia o tých najelementárnejších časticiach a taktiež koľko typov elementárnych častíc poznáme, aké sú medzi nimi vzťahy a aké sily medzi nimi pôsobia.

1.2 Zdroj informácií o elementárnych časticiach.

Základným zdrojom informácií o elementárnych časticiach predstavuje štúdium časticových interakcií v experimentoch rôznych typov. Experimenty možno rozdeliť v zásade na tri základné typy:

- Experimenty na urýchľovačoch s protibežnými zväzkami (collider experiments)
Používané zväzky: pp , $p\bar{p}$, ep , e^-e^+
- Experimenty na urýchľovačoch s pevným terčom (fixed target experiments)
Zväzok - terč: pA , πA , KA ($A \equiv$ atómové jadro)
- Ne-urýchľovačové experimenty založené na detekcii kozmických častíc – neutrín a protónov vysokých energií. Tuje možno priradiť aj experimenty študujúce zriedkavé procesy ako je rozpad protónu či dvojitý dvojitý beta-rozpad.

Table 1: Parametre urýchľovača Large Hadron Collider (LHC), L je luminozita, τ je interval medzi zrážkami.

Incidentné častice:	energia	$L (10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$:	$\tau (\mu\text{s})$:
$p \rightarrow \leftarrow p$	7 TeV $\otimes$ 7 TeV	10^4	0.025
$Pb \rightarrow \leftarrow Pb$	574 TeV $\otimes$ 574 TeV	0.002	0.135
Obvod urýchľovača:		26.659 km	
Hlavné experimenty:		ATLAS (p-p)	
		CMS (p-p)	
		ALICE (Pb-Pb)	
		LHCb (p-p, B-fyzika)	

V súčasnosti hlavný zdroj informácií o časticiach predstavujú urýchľovače s protibežnými zväzkami, hoci pre určité procesy nadobúdajú veľký význam neurýchľovačové experimenty (neutrínové procesy) a stále sa ešte uplatňujú experimenty s pevným terčom. Prehľad základných vlastností súčasných urýchľovačov sú uvedené v tabuľke 1 a 2, kde sú uvedené parametre pripravovaného urýchľovača LHC (tab.1) a parametre súčasných resp. nedávno fungujúcich urýchľovačov (tab.2).

Table 2: Parametre súčasných urýchľovačov

urýchľovač	Zväzok	energia	$L (10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$
Tevatron (Fermilab)	$p \rightarrow \leftarrow p$	0.9-1 TeV $\otimes$ 0.9-1 TeV	10
LEP I (CERN) LEP II	$e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$	55 GeV $\otimes$ 55 GeV 100 GeV $\otimes$ 100 GeV	11
SLC (SLAC)	$e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$	50 GeV $\otimes$ 50 GeV	0.35
HERA (DESY)	$e \rightarrow \leftarrow p$	30 GeV $\otimes$ 820 GeV	16
KEKB (KEK)	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$	8 GeV $\otimes$ 3.5 GeV	10 000
PEP-II (SLAC)	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$	9 GeV $\otimes$ 3.1 GeV	3 000
DAΦNE (Frascati)	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$	0.51 GeV $\otimes$ 0.51 GeV	5($\rightarrow$ 50)

1.3 Štandardný model (SM)

Súčasná časticová fyzika sa opiera o koncepciu nazývanú Štandardný model, ktorá pozostáva z nasledovných častí:

- **Teória elektroslabých interakcií**

Je založená na symetrii Lagranžiánu $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ a vysvetľuje elektromagnetické javy a javy slabých interakcií (β -rozpady). Podľa tejto teórie elektromagnetické a slabé interakcie sú len rôzne prejavy jednej a tej istej univerzálnej elektro-slabej interakcie, ktorá je sprostredkovaná 4 vektorovými bozónmi: fotónom, $W^\pm$ bozónmi a Z-bozón. Tieto bozóny predstavujú kvantá silových polí tejto elektro-slabej interakcie.

- **Teória silných interakcií (QCD)**

Je založená na symetrii Lagranžiánu $SU(3)_C$ a vysvetľuje sily pôsobiace medzi kvarkami (komponenty nukleónov). Silná interakcia je sprostredkovaná 8 gluónmi, ktoré sebou predstavujú vektorové bozóny s nulovou hmotnosťou.

Treba povedať, že SM nezahŕňa gravitáciu, pretože gravitačná interakcia sa nedá „vtesnať“ do kvantového obrazu, ktorý platí pre elektro-slabú a silnú interakciu.

Prakticky to znamená, že neexistuje kvantová teória gravitácie.

V priebehu druhej polovice dvadsiateho storočia v časticových experimentoch boli objavené stovky nových „elementárnych“ častíc a rezonancií. V rámci SM sa všetky častice či rezonancie podarilo klasifikovať ako systémy zložené z malého počtu tzv. Fundamentálnych častíc, teda „skutočne“ elementárnych častíc.

Základné častice SM je možné rozdeliť do 3 základných sektorov častíc:

- **Fundamentálne fermióny** - sú to základné stavebné častice fyzického sveta, ktoré vytvárajú štruktúry ako je nukleón, atómové jadro, atóm, etc. Sú to fermióny, teda platí pre ne Pauliho princíp.
- **Kvantá silových polí (intermediálne častice)** – jedná sa o častice, ktoré sprostredkujú interakcie medzi časticami. Tieto častice sú vektorové bozóny, a teda neplatí pre nich Pauliho princíp.
- **Higsové častice.** V minimálnom SM je tento sektor tvorený 1 neutrálnym Higsovým bozónom. Tieto častice sú významné tým, že vytvárajú tzv. Higsov kondenzát, t.j. Higsove pole má nenulovú vákuovú hodnotu. Tento fakt je významný tým, že interakcia častíc s Higsovým poľom (presnejšie s Higsovým kondenzátom) dáva časticiam hmotnosť.

Existujú 3 pokolenia fundamentálnych fermiónov, pritom každé pokolenie pozostáva

Table 3: fundamentálne fermióny: 3 pokolenia kvarkov a leptónov

ELECTRIC CHARGE	QUARKS			LEPTONS			ELECTRIC CHARGE
							
+ 2/3	UP	CHARM	TOP	ELECTRON	MUON	TAU	-1
-1/3							0
	DOWN	STRANGE	BEAUTY	ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO	

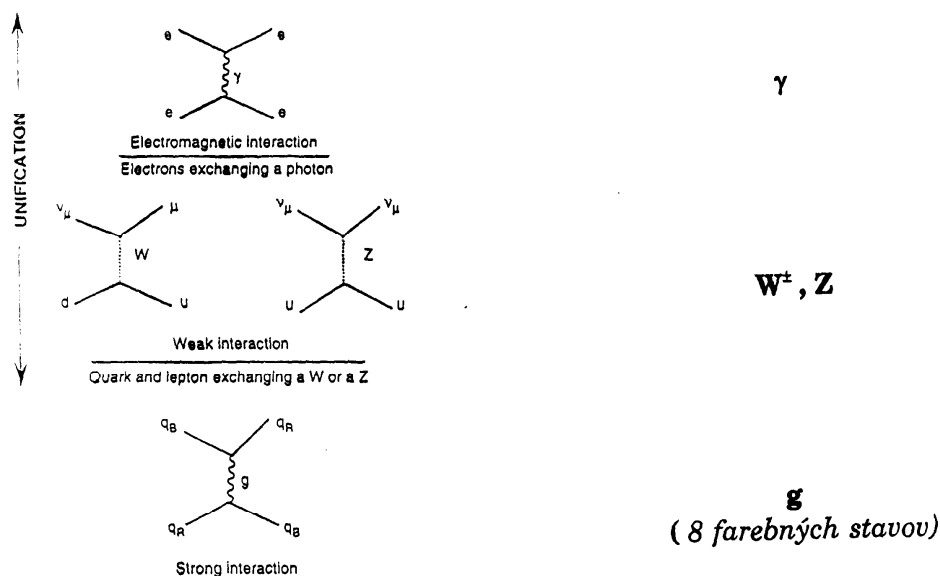
3 colours

z páru leptónov (neinteragujú silnou interakciou len elektroslabou) a páru kvarkov (môžu interagovať všetkými interakciami). Fundamentálne fermióny sú zosumarizované v tab 3. Treba podotknúť, že každej častici zodpovedá antičastica, ktorá má rovnakú hmotnosť ale

náboj opačného znamienka a opačné znamienko majú aj iné kvantové čísla ako je podivnosť, šarm a pod.

Pokiaľ ide o kvarky, ktoré ako jediné interagujú silnou interakciou, tak tieto sa môžu nachádzať v 3 nábojových stavoch, obvyčajne označovaných R, G a B (red, green a blue). Veľmi dôležitou charakteristikou silných interakcií je fakt, že v prírode sa voľne vyskytujú len tzv. biele stavy, t.j. kvarky ako farebné objekty sa voľne nevyskytujú. V prírode sa voľne vyskytujú len určité kvarkové kombinácie, a to **mezóny** (štruktúry $q\bar{q}$) a **baryóny** (štruktúry qqq). Medzi baryóny patria aj protóny (uud) a neutróny (udd), ktoré sú základnými komponentmi atómového jadra.

Druhý sektor fundamentálnych častíc tvoria tzv. intermediálne častice, ktoré sú kvantami výmenných síl. Ako je ukázané na Obr.2 fundamentálne fermióny pri



Obr. 2 Kvantá silových polí pre elektroslabú a silnú interakciu.

interakciách medzi sebou vymieňajú virtuálne intermediálne bozóny a v dôsledku toho menia svoj stav.

Je treba povedať, že všetky doteraz zmienené častice SM sú experimentálne potvrdené včítane kvarkov a gluónov, ktoré síce nemôžeme pozorovať priamo avšak bezpečne vieme o ich existencii prostredníctvom pozorovania jetov, t.j. prúdov častíc, na ktoré kvarky a gluóny hadronizujú.

Tretí sektor častíc SM by mal byť tvorený Higgsovými bozónmi. Ak sa v prírode realizuje tzv. minimálny SM, potom by mal v prírode existovať jeden neutrálny Higgsov bozón, ktorý však zatiaľ nebol objavený. Hľadanie Higgsovho bozónu je základnou úlohou súčasnej experimentálnej fyziky – bude to jedna z hlavných úloh v experimentoch na LHC a je to aj najdôležitejšia úloha záverečnej fázy experimentov na Tevatróne. Z doterajších priamych meraní (LEP II) vyplýva, že hmotnosť Higgsovho bozónu (M_H) musí byť väčšia ako $114.1 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL). Na druhej strane z precíznych elektroslabých meraní (LEP + Tevatrón) vyplýva aj horné ohraničenie na M_H , ktoré je $\approx 160 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL). Napriek tomu, že predpovede SM sú vo vinikajúcej zhode s experimentom, nájdenie Higgsovho bozónu je kritickým momentom pre SM, nakoľko Higgsov bozón hrá kľúčovú úlohu v spontánnom narušení symetrie SM ($(SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes SU(3)_c \rightarrow U(1)_Q \otimes SU(3)_c)$), ktorá v konečnom dôsledku vedie k hmotnostiam W a Z bozónov, kvarkov a leptónov.

1.4 Štandardný model jeho možnosti a nedostatky

Napriek tomu, že SM je vo vinikajúcej zhode s experimentom, mnohí ľudia nie sú s ním spokojní. Základné námietky proti SM je možné zhrnúť nasledovne:

- SM nezahŕňa jednu z fundamentálnych interakcií – gravitáciu.
- Nevysvetľuje hierarchiu hmotností častíc - častice daného pokolenia majú nižšiu hmotnosť ako častice nasledujúceho pokolenia.
- SM nevysvetľuje počet pokolení – to, že v rámci SM máme 3 pokolenia je výsledok experimentálnych meraní a nie teórie.
- SM má „príliš“ veľký počet parametrov – v minimálnej verzii, kde hmotnosti neutrín sú identicky rovné 0, má SM 18 parametrov, ak nepredpokladáme nulovú hmotnosť neutrín, potom má SM 25 parametrov.
- SM nevysvetľuje vyčerpávajúco jav narušenia CP symetrie, t.j. fakt, že proces a CP- združený proces bežia v niektorých prípadoch s rôznymi rýchlosťami.

V súvislosti s počtom pokolení je zaujímavé si všimnúť, že obklopujúci nás hmotný svet sa prakticky skladá z častíc prvého pokolenia (u, d, e, ν_e). Jedinou časticou druhého pokolenia, ktorú môžeme bezprostredne registrovať je mión vznikajúci pri interakcii

častíc kozmického žiarenia s jadrami atómov atmosféry. Dá sa ale povedať, že si „vieme“ svet bez miónu predstaviť.

Na otázku prečo existujú častice vyšších pokolení SM odpoveď nedáva, avšak jeho veľkým pozitívom je, že kardinálnym spôsobom zmenil náš pohľad nielen na bezprostredne nás obklopujúci materiálny svet, ale aj na vesmír ako celok. Predovšetkým umožnil nám pohľad na jeho rannú fázu. Práve pochopenie rannej fázy vesmíru poukazuje na úlohu častíc vyšších pokolení.

1.4 Kozmológia a elementárne častice

Podľa súčasných predstáv na počiatku nášho vesmíru bola singularita, t.j. nekonečne horúci a nekonečne hustý vesmír, pritom táto udalosť nastala pred cca 13.5 miliónmi rokov. Tento obraz sa získal tak, že sa zbral do úvahy súčasný stav rozpínajúceho sa vesmíru pomocou nám známych fyzikálnych zákonov sa urobila projekcia evolúcie vesmíru v čase dozadu. Schéma tejto evolúcie je ukázaná v tab.4. Nás budú zaujímať 3 základné momenty:

1. $t = 10^{-11}$ s, kedy teplota vesmíru bola $\sim 10^{15}$ K (energia častíc ~ 100 GeV), dôvod je ten, že súčasný experiment umožňuje študovať procesy, ktoré prebiehali v uvedenom momente evolúcie, kedy obsahom vesmíru boli: leptóny, kvarky, gluóny, fotóny, $W^{\pm}$, Z-bozóny.
2. Veľmi zaujímavým momentom evolúcie bol moment $t = 10^{-12}$ s, kedy teplota vesmíru bola $\sim 310^{15}$ K a túto fázu bude môcť študovať experimenty ATLAS a CMS na LHC. Vtedy došlo k 2 mimoriadne dôležitým z hľadiska vesmíru udalostiam:
 - a. Vytvoril sa tzv Higgsov kondenzát a častice nadobudli hmotnosť.
 - b. Vznikol nepatrný prebytok látky nad antilátkou v pomere $\sim 1:10^{10}$, vďaka ktorému vznikol materiálny svet. Predpokladá sa, že pri vzniku tohoto prebytku zohráva základnú úlohu narušenie CP symetrie. Z hľadiska SM narušenie CP symetrie sa dá realizovať za predpokladu, že existujú aspoň 3 pokolenia častíc.

3. $t = 10^{-5}$ s, kedy teplota vesmíru klesla na $\sim 10^{12}$ K (energia častíc ~ 200 MeV), kedy došlo ku „confinementu” kvarkov t.j. k formovanie hadrónov . Od toho momentu existujú voľne len “biele” objekty – táto fáza bude predmetom štúdia experimentu ALICE (urýchľovač LHC).

Table 4: schéma evolúcie rannej fázy vesmíru

čas (sec)	
0	$\Rightarrow$ Big Bang - nekonečne horúci a hustý vesmír (?) ($T \sim 15 \cdot 10^9$)
↓	$\Rightarrow$ Epocha kvantovej gravitácie (?)
10^{-43}	↓
10^{-34}	$\Rightarrow$ Epocha GUT
↓	$\Rightarrow$ Kozmická inflácia (?) (každých 10^{-34} sec sa vesmír zdvojnásobil)
10^{-32}	↓
	$\Rightarrow$ Kvarková epocha (farebný svet)
↓	$\Rightarrow$ Teplota $\sim 3 \cdot 10^{15}$ K (energia ~ 200 GeV):
	• Fázový prechod $\rightarrow$ Vznik Higgsovho kondenzátu $\rightarrow$ leptóny, kvarky, $W^{\pm}$, Z-bozóny nadobúdajú
	• Vznik prebytku látky nad antilátkou ($\sim 1:10^{10}$)
10^{-11}	↓
	$\Rightarrow$ Teplota $\sim 10^{15}$ K (energia ~ 100 GeV): $\leftarrow$ Súčasný experiment
	Obsah vesmíru: leptóny, kvarky, gluóny, $W^{\pm}$, Z-bozóny
10^{-5}	↓
	$\Rightarrow$ Teplota $\sim 10^{12}$ K (energia ~ 200 MeV):
	“Confinement” kvarkov $\rightarrow$ formovanie hadrónov $\rightarrow$ existujú len “biele” objekty .
1	↓
	$\Rightarrow$ Teplota $\sim 10^{10}$ K :
	Existujú len protóny, neutróny, elektróny, fotóny a neutrína
	Nukleosyntéza ľahkých jadier (D, He, Be, Li,...)
10^2	↓
	$\Rightarrow$ Koniec nukleosyntézy
↓	
.	

1.5 Základné úlohy fyziky na LHC

Ako sme sa už zmienili experimenty na LHC budú skúmať stavy látky, ktoré sa vyskytli v ranných fázach vesmíru. Cieľom experimentov na LHC bude preverovať fyziku SM a hľadať možné prejavy fyziky za SM.

Z hľadiska SM to bude objektom štúdia predovšetkým:

- **Pôvod mechanizmu spontanného narušenia symetrie v elektroslabom sektore**

Prakticky to znamená hľadanie Higgsovho bozónu a štúdium fyziky s tým spojenéj.

- **Fyzika top-kvarku**

LHC bude produkovať $\sim 10^7$ tt-párov/rok, to umožní detailné preštudovanie top-kvarkových procesov: účinné prierezy sú významným prostriedkom testovania QCD a rozpady top kvarku umožňujú testovať V-A character slabých procesov, nakoľko top-kvark sa rozpadá predtým než stihne hadronizovať (takže jeho spinové charakteristiky nie sú ovplyvnené hadrónizáciou).

- **B-fyzika**

Tu sa jedná predovšetkým o štúdium narušenia CP symetrie ($B^0 \rightarrow J/\psi + K_S^0$, $B^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, etc.), presné zmeranie B_s^0 – oscilácií - čo umožní priamo zmerať element V_{ts} matice CKM s veľkou presnosťou. Významnou bude aj spektrometria b-hadrónov.

Z hľadiska Fyziky “za” Štandardným modelom sa bude jednať hlavne o hľadanie prejavov tzv. nových teórií idúcich za SM, jedná sa predovšetkým o:

- o **Technicolour (QTD)**, táto teória umožňuje vysvetliť narušenie symetrie bez Higgsovho bozónu.
- o **GUT-teórie, teórie** založené na SU(5) resp. vyšších symetriách, ktoré umožňujú zjednotenie elektroslabých a silných interakcií.
- o **SuperSymetria**, predstavuje hlavného kandidáta na novú teóriu po SM. Jej prednosťou je, že zahrnuje gravitáciu. Významnou črtou je to, že každá častica má super-symetrického partnera - hľadanie super-symetrických partnerov je jedna z najdôležitejších úloh v experimentoch na LHC.

- o **Teória superstrún resp. M-teória**, známa ako kandidát na teóriu všetkého. Fundamentálny objekt v tejto teórii je superstruna existujúca v D - rozmernom časopriestore ($D=10$ resp $11, 26$), nadbytočné rozmery sú skompaktifikované, pritom kompaktifikácia vedie k diskretným hmotnostiam častíc.

Čo sa bude hľadať?

Medzi základné konkrétne úlohy bude patriť:

♣ Hľadanie „pravých“ W - a Z - bozónov

Ako je známe SM obsahuje symetriu $SU(2)_L$, ktorá znamená, že v slabých procesoch vyvolaných $W^\pm$ bozónmi sa zúčastňujú len ľavé komponenty časticových polí (častice s ľavou polarizáciou). Existujú však koncepcie, ktoré menia čisto ľavú symetriu na „ľavo-pravú“, t.j. robia zmenu $SU(2)_L \rightarrow SU(2)_L \otimes SU(2)_R$. Praktický to znamená, že existujú aj „pravé“ intermediálne bozóny W_R a Z_{LR} , na ktoré experiment dáva nasledovné ohraničenie: $m(W_R) > 406 \text{ GeV}$, $m(Z_{LR}) > 310 \text{ GeV}$.

♣ Kompozitnosť fundamentálnych fermiónov

Podľa SM fundamentálne fermióny (kvarky a leptóny) sú bodové častice. Súčasný experiment potvrdzuje ich bodovosť na úrovni $< \sim 10^{-18} \text{ m}$. Preskúmať či tzv. fundamentálne častice majú štruktúru je veľmi dôležité lebo eventuálna štruktúra by znamenala novú fyziku, teda fyziku za SM.

♣ SuSy častice

Teória Super Symetrie je najvážnejším kandidátom na novú teóriu, ktorá by mala nahradiť SM. Medzi jej hlavné prednosti patrí to, že zahrnuje aj gravitáciu. Táto teória predpokladá, že ku každej fundamentálnej častici existuje jej super-symetrický partner:

$\text{kvark} \Leftrightarrow \text{skvark}$, $\text{leptón} \Leftrightarrow \text{sleptón}$. Okrem toho táto teória predpokladá existenciu „bohatšieho“ Higgsovhého sektora, ktorý by mal obsahovať 5 častíc: $H^\pm$, H , h , A .

Hľadanie Higgsovho bozónu.

Je to asi najdôležitejšia úloha na experimentov na LHC.

V rámci SM bude H bozón hľadaný prostredníctvom jeho rozpadov (vid'. tab.5).

M_H int. (GeV)	$90 < m_H < 100$	$90 < m_H < 150$	$130 < m_H < 2m_Z$	$m_H > 2m_Z$	$m_H \leq 2m_Z$
rozpad	$H \rightarrow b\bar{b}$	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm, 2l^\pm 2\nu$	$H \rightarrow WW, ZZ \rightarrow l^\pm \nu 2 \text{ jets}, 2l^\pm 2 \text{ jets}$

Niektoré príklady rozpadov, ktoré budú použité pri hľadaní Higgsových bozónov za SM sú uvedené nižšie (prípady H bozónov v rámci MSSM):

$$A \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow e\mu + 2\nu + 2 \text{ jets}$$

$$H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu \rightarrow 2 \text{ jets} + l\text{-tag} + b\text{-tag}.$$