LHC fyzika a experiment ATLAS

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

V úvodnej WWW [1] stránke popisu tzv. "Large Hadron Collider project (LHC)", čo v preklade znamená "projekt veľkého hadrónového urýchľovača protibežných zväzkov" sa doslovne píše:
LHC je urýchľovač, ktorý bude schopný urýchliť protóny do energie zrážky 14 TeV, čo nám umožní "znovuvytvoriť" také podmienky matérie, aké mal Vesmír v čase 10^{-12} *sekundy od svojho vzniku (teda po Big Bang-u), keď teplota dosiahla hodnotu* 10^{16} *stupňov.*
Zastavme sa najskôr nad históriou urýchľovačov v CERN-e, z ktorej bude jasnejšie, prečo sa rozhodlo o stavbe LHC práve tam.
Prvý urýchľovač protibežných zväzkov v CERN-e bol postavený v 1971 roku, šlo o tzv. "Intersecting Storage Rings" (ISR), urýchľujúci protóny do energií cca 63 GeV. V 1976 roku bol daný do prevádzky ďalší urýchľovač protibežných zväzkov, nesúci názov SPS (z anglického: "Super Proton Synchrotron"), urýchľujúci protóny a antiprotóny na energiu 400 GeV, ktorý bol pre fyziku elementárnych častíc zvlášť dôležitý, pretože v 1983 roku umožnil objav $W^{\pm}$ a Z^0 bozónov, a tým experimentálne potvrdiť správnosť teórie, zjednocujúcej elektromagnetickú a slabú interakciu. Posledným z tohto radu urýchľovačov, postavených v CERN-e, je tzv. "Large Electron-Positron Collider (LEP)", a to v roku 1989, ktorý urýchľuje elektróny a pozitróny na doposiaľ najväčšiu energiu, a to 45 GeV na zväzok. V roku 1996 CERN prikročil k poslednej modifikácii LEP-u, k LEPII, ktorá v podstate energiu zrážky zdvojnásobila. Čitateľ sa možno pozastaví nad dôvodom nemalých investícií do výstavby takýchto zariadení, ale pravda je taká, že dnes vlastne len vďaka nim vieme preniknúť do vzdialeností $\sim 10^{-17}$ cm. Napr. význam LEP-u spočíval v jeho schopnosti produkovať enormné (milióny) množstvo Z^0 bozónov [2] ,a tým prispel k riešeniu mnohých skutočne základných otázok, napr. vyriešením počtu neutrín (a antineutrín) na základe analýzy rozpadu Z^0 bozónu sa vyriešil aj problém počtu *generácií* (viď článok dr. J. Antoša z apríla 1997 v časopise Quark).
Charakteristiky LEP urýchľovača sú v mnohých smeroch impozantné, pre ilustráciu uveďme aspoň, že tunel, v ktorom dochádza k samotnému urýchľovaniu elektrónov a pozitrónov je dlhý 26,7 km. Je umiestnený na území Švajčiarska a Francúzska, tak ako to znázorňuje mapka na obr. 1 (jeho kruh je označený skratkou LHC). Na obr. 2 je ukázaný záber do tunelu a ako si môže čitateľ všimnúť, tunel bol vybudovaný veľkoryso, je v ňom teda "miesto" aj pre ďalšie magnety a ostatné nevyhnutné zariadenia, aby sa dal využiť aj pre ďalšie účely, napr. na urýchlenie iného druhu častíc, ako sú elektróny, resp. pozitróny. Práve tento aspekt patril k najrozhodujúcejším pri posudzovaní, akým smerom by sa mala celková koncepcia výstavby urýchľovačov v CERN-e uberať. Teda, rozhodovali

[1] Čoraz väčšiu popularitu medzi užívateľmi internetu si získava tzv. World-Wide Web projekt (označovaný skratkou WWW alebo Web či W3), ktorý je jedným (tak-povediac) z vedľajších produktov Európskeho centra pre výskum elementárnych častíc (CERN-u) - z anglického:"European Laboratory for Particle Physics", ktorého riadnym členom je aj Slovenská republika. Jeho neoddeliteľnou súčasťou je možnosť tzv. hypertexty, ktoré WWW s veľkou variabilitou produkuje, aj prezerať. Čitateľ majúci možnosť prístupu do internetu a súčasne majúci k dispozícii terminál (počítač s X-grafikou), môže k prezeraniu takýchto WWW stránok (textov) použiť napr. programy NETSCAPE, alebo MOSAIC, či REDBARON. Pokiaľ má k dispozícii len "obyčajný", bez X-grafiky, terminál, môže použiť na prezeranie WWW stránok (ich textov) program LYNX.

[2] LEP sa preto aj častokrát označuje ako Z^0–fabrika.

financie a snaha o čo najefektívnejšie využitie toho, čo bolo v CERN-e už postavené. V decembri 1994 Rada CERN-u schválila projekt LHC, teda projekt výstavby urýchľovača protibežných zväzkov protónov s energiou 7 TeV, s tým, že k prvým fyzikálne pozorovaným zrážkam pri energii 7 TeV na 7 TeV (teda energia zrážky je 14 TeV) by malo dôjsť v rokoch 2004-2005.
Čo viedlo Radu CERN-u k takémuto rozhodnutiu? V prvom rade to bola a je snáď najaktuálnejšia požiadavka fyziky elementárnych častíc, a tou je snaha experimentálne dokázať existenciu častice, zvanej Higgs, ktorú potrebuje Štandartný model (bližšie o Štandartnom modeli viď časopis Quark z mája 1997), zjednocujúci elektromagnetickú, slabú a silnú interakciu, t.j. model, v ktorom sa tieto tri interakcie prejavujú ako jedna sila. [3] Je samozrejmé, že LHC je preto navrhnuté tak, aby v prvom rade vyhovelo požiadavke experimentálneho overenia existencie Higgsovej častice, avšak je tiež prirodzené, že je pripravené aj na "prekvapenia", ktoré môže priniesť fyzika pri tak veľkej energii zrážky. Patrí už k samozrejmosti, že CERN sa snaží svoje investície do urýchľovacej techniky vložiť s maximálnym efektom. Tak napr. SPS, pôvodne slúžiaci výhradne na urýchlenie protónov (a neskôr antiprotónov), sa dnes používa aj na urýchľovanie ťažkých jadier (včítane olova) s dobre definovaným cieľom - v snahe objaviť signály o existencii ďalšieho skupenstva matérie, tzv. *kvark-gluónovej plazmy.* Preto LHC projekt *ráta* aj s touto cestou. Jeho parametre umožnia zrážky ťažkých iónov (olova) s energiou interakcie prevyšujúcou 1,15 TeV (2,76 TeV na nukleón a 7 TeV na jednotku elektrického náboja, pričom jednotkou elektrického náboja je náboj elektrónu), čo je tridsaťkrát viac ako poskytne najväčší urýchľovač ťažkých iónov - "Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)", ktorý sa stavia v Brookhavene v USA. Navyše *spoločná prevádzka LEP-u a LHC môže poskytnúť zrážky elektrónov, resp. pozitrónov s protónmi s energiou zrážky 1,5 TeV*, čo je päťkrát viac, ako dnes poskytuje zatiaľ jediný tohto typu urýchľovač HERA v DESY v Hamburgu.

Aké sú parametre LHC? Zastavme sa len pri niektorých. Jedným z nich je tzv. "bunch spacing", t.j. priestorová separácia zhlukov urýchľovaných protónov, ktorá vlastne určuje frekvenciu po sebe nasledujúcich protón-protónových zrážok, a teda aj kvalitu čítacej elektroniky detektorov, ktoré budú postavené na ceste zrážajúcich sa protónov. Hodnota priestorovej separácie v prípade LHC je 25 nanosekúnd, čo je skoro štyrikrát menšia ako napr. v prípade HERA urýchľovača! V praxi to znamená, že technológia potrebná na načítavanie a ďalšie spracovanie signálov pre LHC postavený detektor bude musieť častokrát "siahnuť" až na hranicu našich dnešných možností, napr. generátory kalibračných pulzov budú musieť mať pracovné "hrany" na úrovni 2-5 nanosekúnd! Nemálo problémov spôsobuje inžinierom aj vytvorenie nevyhnutného silného stabilného magnetického poľa, udržujúceho urýchľované protóny v zväzkovej trubici, hodnota ktorého bude 8,4 Tesla (je teda zrejmé, že toto pole bude realizované pomocou supravodivých magnetov). Ďalším, z pohľadu na kvalitu registrovaného signálu, nesmierne dôležitým parametrom bude hodnota tokov urýchľovaných častíc, a tým aj s ňom spätá svietivosť a hustota zhlukov ("bunchov") urýchľovaných častíc. Pre plánovanú svietivosť 10^{34} cm^{-2}s^{-1} a priemerný počet 10^{11} častíc v jednom zhluku, to znamená, že pri jednom akte zrážky dvoch proti sebe idúcich zhlukov protónov môže *súčasne* dôjsť k niekoľkým zrážkam, hovoríme, že dochádza k prekrytiu (anglicky "pile-up"). Na základe počítačových simulácií uskutočnená analýza ukazuje, že v priemere pri zrážke dvoch zhlukov proti sebe idúcich protónov môže dôjsť až k 22 súčasným protón-protónovým zrážkam! Čitateľovi je iste zrejmé, že takáto kumulovaná informácia málo hovorí o charaktere jednotlivej zrážky, a preto je nevyhnutné podniknúť všetko preto, aby sa v čo najväčšej miere eliminovala. Na prvý pohľad jednoduché riešenie, a to redukcia svietivosti, je nanešťastie neprijateľné, a síce preto, lebo ak by sa znížila svietivosť, znížila by sa aj pravdepodobnosť produkcie veľmi zriedkavých javov, a tým

[3] Ono to celkom pravda nie je, pretože, aj keď pripustíme platnosť Štandartného modelu, aj tak si tento "ponecháva oddelene" väzbové konštanty pre jednotlivé interakcie. K podobnej situácii dochádza aj napr. v elektroslabej teórii Weinberg-Glashow-Salama, kde *vždy* je väzbová konštanta elektromagnetickej interakcie oddelená od väzbovej konštanty slabej interakcie.

v energetickej škále, ktorú poskytne LHC, určite je aj očakávaná produkcia Higgsu. Tento handicap by sa síce dal odtrániť tak, že by sa zväčšilo obdobie naberania štatistiky, ale v tom prípade by nastali iné problémy, ktoré by súviseli s tým, že niektoré použité časti detektora by nevydržali radiačnú záťaž, ktorá je značná, čo by zas znamenalo ich výmenu, a teda ďalšie finančné náklady už aj tak drahého projektu.

Vráťme sa ešte k elektronike. Aby sme získali čo najlepšie priestorovo-časové charakteristiky protón-protónovej zrážky, a tým aj vedeli, že napr. skutočne došlo k produkcii Higgsu, je nutný zber informácie, pokiaľ je to možné, z čo najmenšej časovo-priestorovej oblasti. Napr. pre predstavu, základný subdetektor H1 detektora v Hamburgu má 45 000 takýchto čítacích "buniek" (kanálov), no len zadná časť detektora ATLAS ich bude mať dvakrát viac! Je samozrejmé, že predovšetkým z finančných dôvodov fyzici idú na kompromis, a to pokiaľ sa dá, zbierať kumulovanú informáciu, ktorú bude možné pri spracovaní zas "rozbiť" na informáciu zodpovedajúcu jednotlivým časovo-priestorovým bunkám - kanálom. Aj tu je však háčik, ktorý priveľmi pripomína problémy s už spomenutým prekrytím - neexistuje elektronika, ktorá by nemala svoj vlastný šum. Pokiaľ dochádza k sčítaniu veľkého počtu analógových signálov, dochádza súčasne aj k sčítaniu ich elektronického šumu. V konečnom dôsledku sa teda ľahko môže stať, že veľkosť samotného koncového elektronického šumu bude väčšia, ako má hodnotu nami hľadaný fyzikálny signál. Ako teda ďalej? Jedno z riešení je použitie elektroniky, ktorá by pracovala v podmienkach kvapalného argónu (tým by sa výrazne zmenšil elektronický šum), avšak aj tu by sme čoskoro došli k vyššie spomenutým problémom (napr. stačilo by sčítať signály z väčšieho počtu kanálov). Navyše otvorenou by zostala otázka trvanlivosti a stability takejto elektroniky, jej odolnosti voči radiačnej záťaži a pod. Čitateľ zrejme už pochopil, že fyzika na súčasných svetových urýchľovačoch je fyzikou spracovania analógových, či digitálnych signálov. Tie majú svoje rozdelenia, teda maximum a nejaký, s časom vymierajúci, chvost. Vyššie zmienené fyzike nepriateľské efekty (elektronický šum a prekrytie) sa v praxi na týchto rozdelniach poväčšine prejavia v posune maxima, a teda to, čo zostáva relatívne slabo ovplyvnené, sú ich chvosty. Preto sa o fyzike na LHC často hovorí aj ako o fyzike "chvostov". To len dokumentuje, nakoľko obtiažny bude nielen zber ale aj samotná analýza získaných experimentálnych údajov.

Na obr. 3 je schématicky znázornený LHC urýchľovač s navrhovanými detektormi. Ako vidieť, jedná sa o štyri detektory - o *Compact Muon Solenoid LHC experiment (CMS)*, o *A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)*, o *A Large Ion Collider Experiment (ALICE)* a o *Large Hadron Collider B - experiment (LHC-B)*. Zastavme sa na chvíľu pri každom z nich. Prvé dva, CMS a ATLAS, sú určené pre analýzu zrážok protónov s protónmi, ďalší, ALICE, je určený pre štúdium zrážok ťažkých iónov. Posledný, LHC-B, ako jediný pre LHC plánovaných experimentov, nebude využívať obidva proti sebe urýchlené zväzky protónov, ale len jeden, ktorý bude vyvedený na pevný, nepohyblivý terč. Základné fyzikálne motivácie prvých troch experimentov sme už povedali, LHC-B má slúžiť ako "*B-fabrika*", t.j. ako detektor plne venovaný štúdiu vlastností b kvarkov - častice, obsahujúce b kvark, podobne ako častice, obsahujúce s kvark, by mali vykazovať vo svete elementárnych častíc veľmi atraktívne vlastnosti, napr. regeneráciu a s ňou spätú osciláciu častíc a antičastíc a pod.

Domnievam sa, že je každému čitateľovi jasné, že zmienený projekt LHC a na ňom plánované experimenty (nosiace tie isté názvy ako pre LHC plánované detektory), patria k absolútnej svetovej špičke. Účasť v nich je preto aj "zrkadlom kvality" fyziky elementárnych častíc tej-ktorej krajiny. Preto je potešujúce, že Slovenská republika je účastníkom dvoch z nich - ATLAS-u a ALICE.

V ďalších riadkoch sa podrobnejšie pozastavme pri detektore ATLAS a cieľoch, ktoré v tomto experimente majú slovenskí fyzici. Najskôr dovoľte niekoľko štatistických ukazovateľov:

- dnes sa v experimente ATLAS zúčastňuje cca 1 700 fyzikov zo 144 ústavov z celého sveta, včítane napr. Kanady, USA, Čínskej republiky alebo Japonska. Tento počet ale zďaleka nie je konečný - o možnosť participovať v experimente ATLAS dnes žiada veľa pracovísk, no k získaniu členstva je treba prejsť čoraz väčšou a tvrdšou konkurenciou.

- za Slovenskú republiku v experimente ATLAS sa zúčastňujú dve pracoviská, a to Ústav experimentálnej fyziky SAV v Košiciach (ÚEF SAV) a Matematicko-fyzikálna fakulta Univerzity Komenského (MFF UK), Bratislava.

- cena detektora ATLAS je odhadnutá na cca 470 miliónov švajčiarskych frankov (CHF) (z roku 1995), pričom každé zúčastnené pracovisko je povinné zaplatiť na spoločné investície späté so stavbou detektora v priebehu ôsmych rokov 100 000,- CHF. Treba poznamenať, že v prípade Slovenska existuje výnimka - naše obidve participujúce pracoviská sa po právnej stránke chápu ako jedno, čím náš povinný príspevok je chápaný len ako príspevok jedného pracoviska. To je mimochodom tiež príklad skutočne nezištnej podpory ATLAS manažmentu, ktorý chápe neobyčajne ťažkú finančnú situáciu v oblasti štátnej podpory základného výskumu dnes u nás doma.

Na obr. 3 je schématické znázornenie detektora ATLAS, na obr. 4 je zas tá jeho časť, ktorá sa vo fyzike detektorov označuje pojmom *kalorimetria*. Ide v podstate o zariadenia, ktoré využívajú fakt, že elektricky nabité častice pri prechode prostredím strácajú svoju energiu vďaka interakcii s ním, pričom charakter tejto interakcie závisí na druhu samotnej častice, ktorá do daného zariadenia, kalorimetra, vnikla. Kalorimeter je teda zariadenie, ktoré práve na základe odlišnosti charakteru interakcie do neho vniklej častice, dokáže určiť nielen jej energiu, ale ak vieme, do ktorého miesta kalorimetra častica vnikla, vieme určiť aj jej hybnosť, a častokrát dokonca aj jej typ. Prečo dávame dôraz na "kalorimetriu" detektora ATLAS? Preto, lebo práve tu sa koncentrujú snahy slovenských fyzikov - pracovníci ÚEF SAV pracujú v skupine zodpovednej za návrh, realizáciu a chod zadnej časti kalorimetrie, ktorá je na obr. 4 označená pod heslom "hadrónový endcap kalorimeter", zatiaľ čo pracovníci MFF UK participujú pri návrhu, realizácii a budú zodpovední za prevádzku tzv. "hadrónového tile kalorimetra". Vôbec sa nejedná o nejaké malé úlohy! Obr. 3 predstavuje v skutočnosti zariadenie, ktoré má nielen impozantné rozmery - dĺžku cca 40 m, šírku cca 20 m a výšku cca 15 m, ale ide o komplex, ktorý je doslova "prepchatý" tou najmodernejšou detektorovou technikou.
Keď sme zas pri fyzike detektorov, zastavme sa ešte na chvíľu pri ďalších dvoch (ale to zďaleka neznamená, že ich nie je viac!) problémoch detekcie Higgsovho bozónu. Prvým z nich je problém *synchronizácie*. Čo sa má na mysli? Zabudnime na okamih, že máme problémy s veľkou frekvenciou po sebe idúcich protón-protónových zrážok. Faktom je, že rôzne typy detektorov, ktoré tvoria celý komplex detektora ATLAS, majú rôzny (aj z hľadiska trvania zberu signálu) pracovný režim. V praxi to znamená, že na to, aby sme vedeli zrekonštruovať zrážku v danom čase, musíme všetky subdetektory zosynchronizovať, t.j. ak napr. scintilačný detektor má mŕtvu dobu (čas, keď sa častica v detektore nedeteguje) cca 20 nanosekúnd a kalorimeter s kvapalným argónom (ide o aktívnu vrstvu slúžiacu na zber signálu medzi dvomi absorbčnými vrstvami - kalorimeter je teda zariadenie, ktoré sa skladá po sebe striedajúcej sa absorbčnej a aktívnej vrstvy) cca 200 mikrosekúnd, naša elektronika musí byť schopná informáciu z scintilačného detektora niekde "odkladať" po tú dobu, pokiaľ k nej nedôjde signál z kalorimetra, a až potom môže obidva signály priradiť k sebe, a tým plnohodnotnejšie popísať danú zrážku. Čitateľ aspoň čiastočne oboznámený s touto problematikou môže namietnuť (a bude mať pravdu), že v podobnej situácii sú vlastne všetky súdobé detektory. LHC prostredie však aj do problému synchronizácie vnáša nové prvky, jedným z nich je nami už spomenutá častá po sebe idúca opakovateľnosť zrážok. LHC podmienky teda žiadajú podstatne väčší priestor pre "odkladanie" si signálov z rýchlych detektorov. Prirátajte k tomu existenciu nemalého elektronického šumu a prekrytia... Ďalším prvkom, ktorý doteraz prakticky žiaden detektor nepotreboval, je branie do úvahy aj priestorovú polohu jednotlivých kanálov.

Čas 20 nanosekúnd odpovedá dráhe cca 20 cm, ktorú urazí signál v nami použitej elektronike, tento čas je ale zrovnateľný už so spomenutou frekvenciou po sebe idúcich zrážok. To znamená, že sme nútení si pamätať nielen signály z rôznych po sebe idúcich zrážok, ale musíme vedieť z ktorého miesta detektora pochádzajú, a potom brať do úvahy aj čas, ktorí potrebovali na to, aby sa do miesta "pamätania" dostali.
Druhý, nami avizovaný problém je problém *mŕtveho materiálu*. Čo máme na mysli? Zostaňme pri kalorimetrii. Pokiaľ vieme energiu a druh častice, ktorou prenikáme do kalorimetra, za podmienky, že nenastane nijaký energetický únik z kalorimetra (teda, že z neho, po strelení danej častice, žiadna nevyletí), vieme priradiť hodnotu nami nameraného signálu k energii do kalorimetra vniklej častice. Hovoríme, že vieme kalorimeter *kalibrovať*. Takto získaná kalibračná závislosť sa potom používa aj v prípade neznámej častice s neznámou energiou, teda priamo v experimente. Materiál kalorimetra je teda z pohľadu na nami kontrolované energetické straty danej častice "kalibrovaný", teda "pod kontrolou". Nanešťastie toto už nie je pravda napr. pre káble, ktoré sme nútení použiť pre vývod signálov z vnútra detektora alebo pre obal kryostatu, vnútri ktorého sú už spomenuté kalorimetre s kvapalným argónom. Je zrejmé, že čím väčšie bude množstvo nekalibrovaného (mŕtveho) materiálu, tým viac energie danej častice "unikne" našej pozornosti, a teda naša kalibračná závislosť bude menej presnejšia. Počítačové simulácie nám hovoria, že môže dokonca dôjsť k situácii, keď vďaka značnému množstvu mŕtveho materiálu (a ten je priamo úmerný rozmerom detektora) nebudeme schopní v rozumnej miere využiť sebalepšie detektory, umiestnené od istej vzdialenosti od centra detektora! Aj preto LHC podmienky generujú značné nároky nielen na elektronikov, ale aj na kryogeniku, od ktorej napr. sa požaduje z jednej strany mať čo najtenšie steny kryostatu (a z najľahšieho materiálu - hliníka), ale aj záruka ich niekoľkoročnej trvanlivosti.
Na obr. 5 je pre ilustráciu znázornená počítačová simulácia zrážky dvoch protónov pri LHC energii. Na obr. 6 je podobná simulácia, pri ktorej sa v zrážke dvoch protónov vytvorili dva priestorovo vydelené toky častíc, no už v samotnom priestore detektora ATLAS. Všimnite si to enormné množstvo častíc, prevažnú väčšinu ktorých, bude musieť analýza "rozdekódovať", aby vedela odpovedať na otázku, či v danej zrážke vznikol Higgs, alebo nie. Zaiste budete so mnou súhlasiť, že to nebude jednoduchá cesta ...

Čo dodať na záver? Práce na projekte LHC, tak ako aj na príprave detektora ATLAS (platí to aj pre detektory CMS a ALICE) sa rozbehli plným prúdom. Ako sme už spomenuli, práce musia byť dokončené do roku 2004, keď sa očakáva prvá fyzikálna interakcia protónov. Je asi tiež zrejmé, že je vlastne veľkým umením zladiť a zosynchronizovať prácu toľkých skupín ľudí, majúcich rôzne partikulárne ciele. Fyzika elementárnych častíc je skutočne doslova žiarivým príkladom toho, že keď "všetci chcú", aj taký gigantický projekt, akým výskum na LHC bezosporu je, sa dá zvládnuť. Dôkazom tohto faktu je aj úspešná existencia dnes bežiacich experimentov vo fyzike elementárnych častíc, napr. H1, ZEUS a HERMES experimentu v DESY Hamburg, či D0 a CDF na TEVATRON-e v USA. Aj to je jeden z nemalých výsledkov dnešnej fyziky elementárnych častíc.