Štruktúra protónu

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice ako jediné pracovisko subjadrovej fyziky na Slovensku je riadnym členom H1 kolaborácie, cieľom ktorej je analýza elektrón (pozitrón)-protónových zrážok pri doposiaľ najväčšej energii, ktorú poskytuje v Hamburgu postavený urýchľovač HERA. Tento rok bude tomu práve desať rokov, ako naše pracovisko vstúpilo do tohto svetového experimentu. Z môjho pohľadu je to dobrý dôvod na istú rekapituláciu výsledkov, ktoré sme aj my v rámci tejto spolupráce dosiahli, a to nielen v čiste odbornej ale aj vo vedecko-populárnej forme. Predkladaný článok je prvým z troch, v ktorých by som rád našu verejnosť, ktorá má blízko k prírodnym vedám, oboznámil s dnešnou predstavou štrukrúry protónu, fotónu a takého bizardného objektu, akým je pomerón.

Dnes, keď uplynulo zhruba tridsať rokov od objavu subštruktúry protónov, a to na základe rozptylu elektrónov na protónoch pri energiách od 4,5 do 19,5 GeV [1] v Stanfordovom Lineárnom Centre (SLAC) a v Massachusettskom Ústave Technológie (MIT) v USA, zdalo by sa, že štruktúra protónu už nie je pre nás zahalená rúškom tajomstva. Zdanie však klame. Dnešné experimenty prichádzajú s nečakanými informáciami, ktoré napriek nám už známym faktom o správaní sa častíc, ktoré tvoria protón - kvarkoch a gluónoch (o kvarkoch viď marcové číslo Quark), nevieme uspokojivo vysvetliť. Ide napr. o narušenie tzv. izospinovej symetrie [2] ľahkého morského poľa kvarkov - doteraz sme mali za to, že dva najľahšie antikvarky – $\bar{u}$, $\bar{d}$ sú v protóne zastúpené v rovnakom počte. K tomuto predpokladu nás viedla dnes všeobecne prijatá predstava o štruktúre protónu, ktorá protón v prvom priblížení znázorňuje ako väzbu troch kvarkov - dvoch u a jedného d kvarku, ktoré sú "obalené" mrakom kvark-antikvarkových párov, tvoriacich tzv. morské pole, pričom tieto tri kvarky sú spoločne viazané pomocou gluónov. Zmienené experimentálne fakty hovoria, že počet $\bar{u}$ antikvarkov je zhruba dvakrát menší ako počet $\bar{d}$ antikvarkov.

Existujú ale aj ďalšie kvarky (sú uvedené podľa ich narastajúcej hmotnosti) - tzv. s, c, b a nedávno objavený t kvark a k ním odpovedajúce antikvarky (líšiace sa predovšetkým opačným znamienkom elektrického náboja). Naše poznatky o štruktúre protónu hovoria, že tieto by sa v protóne mali vyskytovať len vo vyššie zmienenom mraku kvark-antikvarkových párov. Na rozdiel od u, resp. d kvarkov tieto kvarky sú nepomerne ťažšie, a preto neudivuje, že ich výskyt je v protóne silne potlačený - napr. počet $\bar{s}$ antikvarkov je zhruba dvakrát menší ako počet $\bar{u}$ antikvarkov. Problematickejšia je už odpoveď na zastúpenie ešte ťažších kvarkov, resp. antikvarkov.

Priamym dôsledkom slávnej Einsteinovej rovnice medzi celkovou energiou prislúchajúcou danej

---

[1] V subjadrovej fyzike obvykle používame pre ňu špecifické jednotky. Tak napr. 1 MeV zodpovedá $1,78 \cdot 10^{-30}$kg, resp. $1,6 \cdot 10^{-13}$J, 1 GeV = 10^3MeV, atď.

[2] Dominantnou zo štyroch nám známych interakcií, gravitačnej, elektromagnetickej, slabej a silnej, v prípade kvarkov a antikvarkov je interakcia silná. Kvarky, resp. antikvarky blízkej hmotnosti, aj keď s rôznym elektrickým nábojom, sa voči silnej interakcii správajú rovnako. Teda silná interakcia nerozlišuje o aký typ kvarku sa v tomto prípade jedná, t.j. nastáva istá symetria medzi dvomi kvarkami blízkej hmotnosti. O tejto symetrii hovoríme ako o izospinovej. Preto napr. $\bar{u}$ a $\bar{d}$ antikvarky, resp. u a d kvarky tvoria voči silnej interakcii izospinový pár - dublet.

časticí a jej hmotnosťou je ekvivalentnosť medzi týmito dvoma veličinami. V praxi to znamená, že časť z celkovej hmotnosti častice môže prejsť vo forme energie na jej väzbu s inou časticou. Pokiaľ je väzba medzi danými časticami zvlášť silná, môže sa stať, že v spoločnej štruktúre (napr. v jadre) má daná štruktúra (jadro) menšiu celkovú hmotnosť ako je súčet hmotností častíc, ktoré ju (ho) tvoria. Rozdiel medzi týmito dvomi hmotnosťami je "ukrytý" vo forme väzbovej energie danej štruktúry (jadra). Preto neudivuje, že protón tvoria jednak už spomenuté dva u a jeden d kvark s hmotnosťami cca 200 až 300 MeV (v jednotkách MeV je hmotnosť protónu 938,27 MeV) ale aj kvark-antikvarkové páry, ktoré tvoria opäť aj u a d kvarky a ich antikvarky. To nám len signalizuje, že väzbová energia protónu je neobyčajne veľká a súčasne naznačuje, že jeho štruktúra je veľmi zložitá.

Ďalšou typickou charakteristikou vzťahujúcou sa ku štruktúre protónu je jej "*dynamičnosť*". Čo si pod tým predstavujeme? Heisenbergove relácie neurčitosti, tvoriace jeden z pilierov kvantovej mechaniky, je si možné predstaviť v úlohe fotografa, ktorého cieľom je zachytiť skokana na diaľku v okamihu jeho skoku. Pokiaľ by fotograf chcel mať ostrý obraz skokana, pozadie obklopujúce skokana bude na fotografii rozmazané, a naopak, pokiaľ by chcel fotograf mať ostré pozadie, obraz skokana bude rozmazaný. Nech už fotograf nastaví časovú clonu akokoľvek, nikdy nedocieli, aby na jeho snímke bol skokan a pozadie za ním súčasne dokonale ostré. Zmienené relácie neurčitosti hovoria, že fotograf v princípe svoju úlohu splniť nemôže. V prípade protónu aplikácia daných relácií umožňuje narušiť vo fyzike doposiaľ neotrasiteľný zákon zachovania energie, a to po tú dobu, počas ktorej, zjednodušene povedané, nie sme schopní experimentálne preveriť jeho platnosť, teda za veľmi krátky čas (rádovo 10^{-24} sekundy). Jedná sa práve už o niekoľkokrát zmienené kvark-antikvarkové páry, ktorých počet v protóne nie je pevný, ale sa s časom dynamicky mení - čím je čas na ich existenciu menší, tým je možnosť narušenia zákona zachovania energie väčšia, a preto je aj pravdepodobnejšie, že sa vytvorí nielen väčší počet kvark-antikvarkových párov pozostávajúcich z ľahkých u a d kvarkov a antikvarkov, ale vzniknú aj páry pozostávajúce z ťažkých kvarkov a antikvarkov (napr. z s a c kvarku).

Zatiaľ sme úmyslene nespomenuli gluóny, ktoré tiež majú mnoho spoločného so štruktúrou protónu. Ich úloha nespočíva len v sprostredkovaní väzby medzi dvomi u a jedným d kvarkom (to znamená, že zjednodušene povedané predstavujú istý typ lepidla medzi kvarkami) , ale vo forme gluón-gluónových párov prispievajú k celkovej štruktúre protónu. Samozrejme po uplynutí času, počas ktorého dochádza ku vzniku kvark-antikvarkových a gluón-gluónových párov, tieto sa transformujú do väzbovej energie protónu tak, že nedochádza k zmene jeho základných charakteristík, napr. k zmene jeho elektrického náboja. O to viac udivuje už zmienená skutočnosť, že $\bar{d}$–antikvarkov sa rodí zhruba dvakrát viac ako $\bar{u}$–antikvarkov, aj keď, ako sme už naznačili, z pohľadu silnej interakcie, ktorá je za tieto procesy zodpovedná, nie je rozdiel medzi týmito antikvarkami.

Aby bol obraz úplný, pripomeňme, opäť v súlade s ďalším z pilierov kvantovej mechaniky, ktorá ako jediná adekvátne popisuje svet elementárnych častíc, že pri popise štruktúry protónu máme do činenia s jej *štatistickou podstatou*. Znamená to, že nami získané výsledky majú štatistický charakter, a teda pokiaľ hovoríme o štruktúre protónu, máme pre väčšinu jeho charakteristík na mysli ich stredné hodnoty.

Toľko úvodom, ktorý, ako dúfam, dáva tušiť, prečo je veľmi ťažko nájsť odpoveď na otázku, aká je vlastne vnútorná štrutúra protónu. Cesta k doterajším poznatkom bola veľmi tŕnistá a finančne náročná. Vedci, analyzujúci vnútro protónu (o veľkosti cca 10^{-15} cm) používajú všeobecne dobre známu metodiku, pomocou ktorej už v dobe občianskej vojny Sever-Juh v USA colníci v žokoch bavlny odhaľovali ukryté zbrane: po výstreloch do žokov, ak guľka narazila v bavlne napr. na pušku, odrazila sa na veľký uhol, pričom smer jej letu sa určil pomocou plachty, ktorá bola umiestnená za žokami s bavlnou. Colníci sa tak dozvedeli o obsahu žoku bez toho, že by ho rozobrali, teda sprostredkovane, pomocou odrazenej strely. Takýto experiment označujeme ako *rozptylový*. V prípade analýzy vnútornej štruktúry protónu, strelu, ktorá vletí do žoku bavlny (predstavujúcom teraz protón) v praxi predstavujú buď elektricky nabité elektróny a pozitróny alebo elektricky neutrálne neutrína a antineutrína. Pokiaľ napr. elektrón, ak vletí do protónu, narazí na objekt o väčšej hustote ako má zvyšok jeho vnútrajška, odrazí sa na veľký uhol, hodnota ktorého je priamo úmerná hustote a veľkosti daného objektu. Z tohto dôvodu je teda nevyhnutné vytvoriť také experimentálne zariadenia, ktoré sú schopné plniť funkciu plachty, ktorú colníci umiestňovali za žoky bavlny. Neudivuje, že obsah získanej informácie týkajúcej sa vnútra protónu závisí na kvalite strely, teda na jej rýchlosti a jej type - obsahovo iná informácia sa napr. získa, ak použijeme ako strelu neutríno, iná, ak použijeme elektrón. Proces samozrejme nie je až tak jednoduchý, pri takomto experimente musíme počítať aj s efektom, ktorý je dobre známy hráčom biliardu: ak sa zrazia dve rovnako ťažké gule, pričom, jedna z nich stála a druhá do nej vrazila istou silou, nastáva aj prípad, že si gule svoje úlohy vymenia, t.j. nalietajúca gula zostane stáť, pričom jej kinetická energia prejde do pôvodne stojacej gule. Navyše môže dôjsť aj k takej výmene energie medzi protónom a elektrónom, že elektrón po zrážke bude mať energiu väčšiu ako ju mal pred zrážkou, t.j. časť energie protónu prejde vo forme kinetickej energie do elektrónu. Situáciu ešte komplikuje fakt, že tak, ako po streľbe do terča, môže nastať situácia, keď dôjde aspoň k čiastočnému poškodeniu terča, t.j. môžu sa objaviť v jeho okolí jeho zlomky. To isté nastáva pri našom rozptylovom experimente elektrónu s protónom. Vidíme, že analýza rozptylových experimentov nie je jednoduchá, hlavne keď si predstavíte, že vašou úlohou je zistiť, na akom objekte v protóne sa elektrón rozptýlil.

V 1992 roku v nemeckom národnom labolatóriu DESY (Deutsches Elektrone-SYnchrotron) v Hamburgu bol daný do prevádzky doposiaľ najväčší urýchľovač protibežných zväzkov elektrónov a pozitrónov s protónmi (v cene cca 1,3 miliardy DM), ktorý dostal názov HERA (z anglického: the Hadron-Electron Ring Accelerator facility). Z pohľadu na nami spomenutý príklad s bavlnou sa jedná o pušku, z ktorej sa do žokov strieľalo. Je zrejmé, že čím je väčšia rýchlosť strely, tým je pravdepodobnejšie, že strela vnikne hlbšie do terča. Platí to v plnej miere aj pre urýchľovač, ktorý v sústave, v ktorej je protón v kľude (na HERA sa urýchľuje na energiu 820 GeV) a pohybuje sa len elektrón (na HERA urýchľuje na energiu cca 30 GeV), urýchli elektrón na neuveriteľnú energiu cca 45 000 GeV.

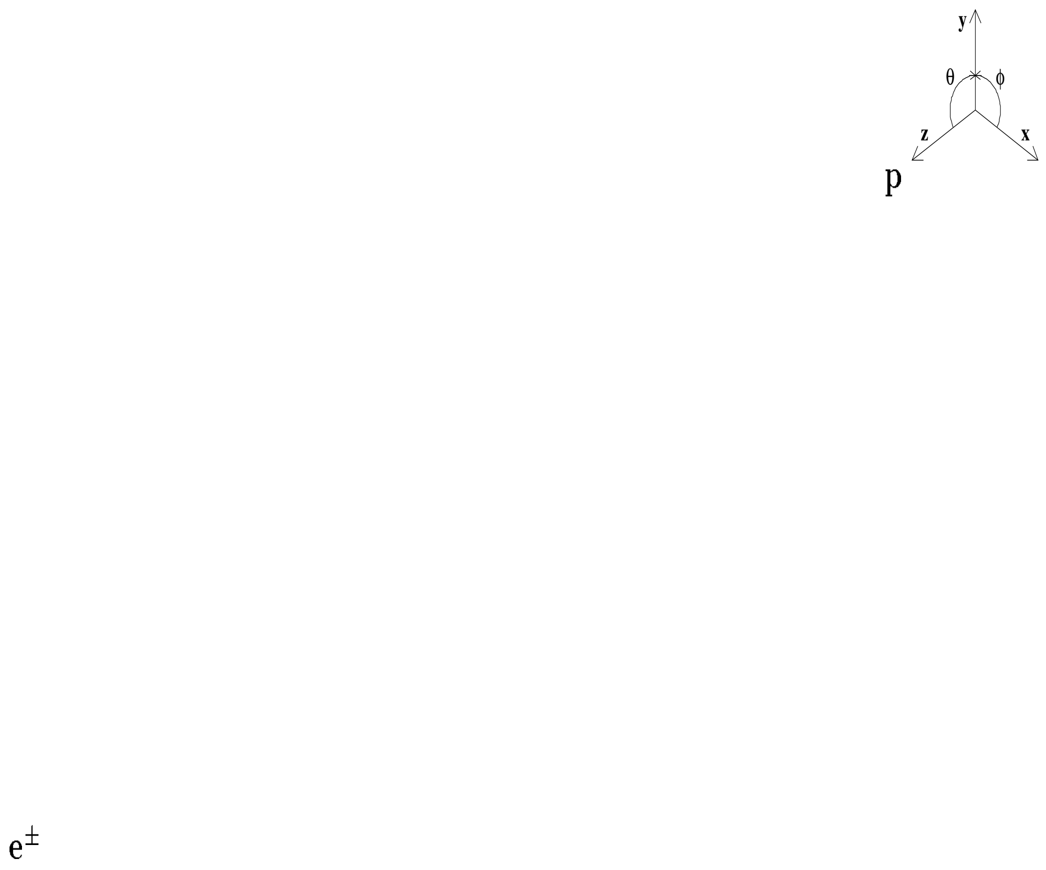
Je samozrejmé, že snahou fyzikov je získať čo najúplnejšiu informáciu, a preto ani veľmi neudivuje, že dnes vlastne všetky detektory, postavené na veľkých urýchľovačov sú si svojou funkciou, rozmermi ale aj cenou blízke. Na obr. 1 je schématicky znázornený H1 detektor. Pre zaujímavosť: H1 detektor má rozmery $10 \times 10 \times 12$ m^3, váhu cca 4 500 ton a cenu asi 150 miliónov DM. Detektor sníma prakticky všetky častice, ktoré následkom zrážky elektrónu s protónom vznikli (výnimku predstavuje len úzke "okno" okolo zväzkových trubíc o veľkosti 6 stupňov). Z technického hľadiska ide o neobyčajne zložité zariadenie, ktoré musí byť schopné spracovávať informáciu už v čase medzi dvomi zrážkami (a to je 96 nanosekúnd!), ktorý je určený technickou konštrukciou urýchľovača. Výstup z neho je preto v tvare elektronických (digitálnych) signálov, ktoré ale veľmi nepomôžu predstaviť si, ako vlastne zrážka elektrónu s protónom prebehla. K tomuto účelu bola vyvinutá zložitá počítačová grafická aplikácia. Na obr. 2 je znázornená pomocou tejto grafiky zrážka elektrónu s protónom. Čiary vychádzajúce zo stredu detektora (zobrazeného v pozdĺžnom smere) predstavujú stopy, ktoré v jednotlivých častiach zanechali elektricky nabité častice.

Akým konkrétnym spôsobom získavame informáciu o vnútri protónu bolo dostatočne jasne vysvetlené v predchádzajúcich riadkoch. Je zrejmé, že na popis nami popísaného experimentu

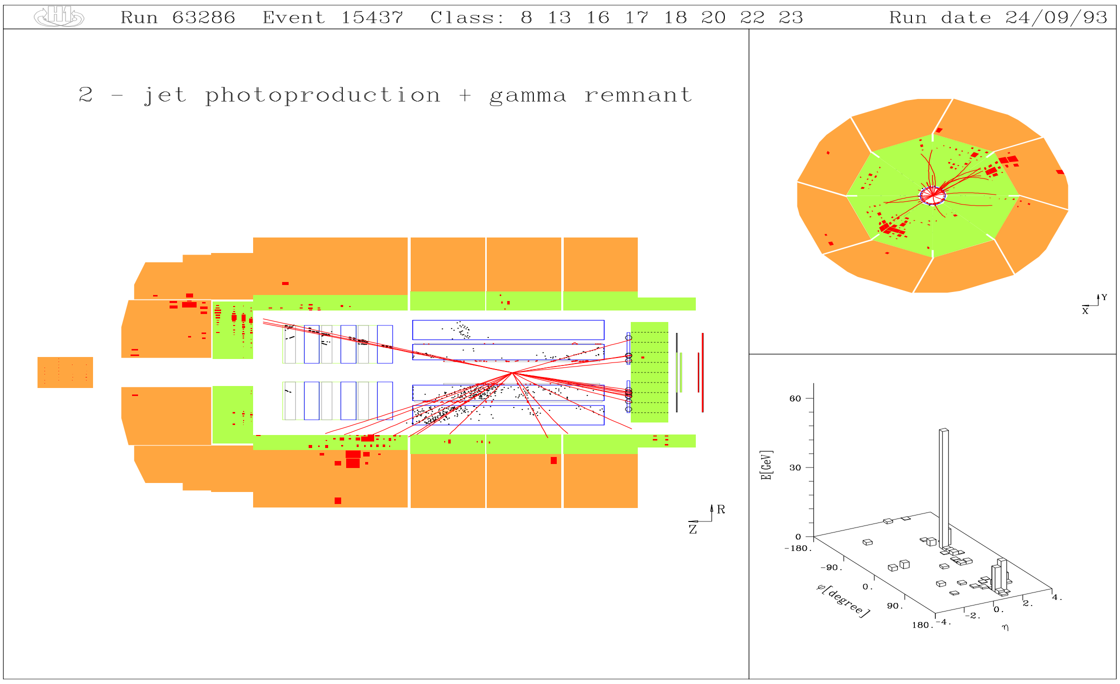
potrebujeme vedieť uhol rozptylu (t.j. nakoľko sa elektrón odchýli od svojho pôvodného smeru) a jeho energiu po zrážke. Ide teda o dve nezávislé veličiny, pomocou ktorých je úplne (v prvom priblížení) popísaný náš rozptylový experiment. V ďalšom je len vecou matematickej ekvilibristiky a istého fyzikálneho cítenia tieto dve charakteristiky previesť do iných dvojíc, ktoré z rôznych dôvodov sú pre popis nás zaujímajúcich efektov vhodnejšie.
Čo nám vlastne hovorí, aká je vnútorná štruktúra protónu? V prvom rade je to *štruktúrna funkcia protónu*, funkcia popisujúca vnútro protónu pomocou už spomenutých dvoch charakteristík. Jej fyzikálny zmysel spočíva v tom, že predstavuje pravdepodobnosť rozdelenia kvarkov a antikvarkov v protóne. Znamená to, že pokiaľ vyberieme z nášho experimentu rozptýlený elektrón o danej energii a daného smeru letu, vieme povedať (na štatistickej úrovni), aká bola energia zhlukov (kvarkov, antikvarkov a gluónov, ktorým v ďalšom budeme hovoriť *partóny*) v protóne. Nevieme síce na ktorom type partónu došlo k rozptylu s elektrónom (to sa v prípade rozptylu elektrónu na protóne pokiaľ sa ohraničíme len na charakteristiky rozptýleného elektrónu v princípe určiť nedá), ale aj takáto informácia je veľmi dôležitá, pretože nám hovorí, aké je energetické spektrum partónov v protóne, a teda dovoľuje nám vyriešiť problém vzniku a zániku napr. kvark-antikvarkových párov, o ktorých už bola reč.

Zatiaľ sa zdanlivo stále vyhýbame gluónom. V súlade s kvantovou chromodynamikou, dnes považovanov za jedinú adekvátnu teóriu silnej interakcie, vieme, že gluóny v protóne musia existovať. Predpokladajme, že protón sa skladá len z kvarkov, antikvarkov a gluónov. Pokiaľ poznáme charakteristiky protónu ako celku (t.j. objektu zloženého len z partónov) a ak vieme charakteristiky kvarkov a antikvarkov, vieme aj charakteristiky gluónov. Napr. na základe toho, že súčet hybností všetkých zložiek, z ktorých sa protón skladá sa musí rovnať hybnosti protónu, pri známom súčte hybností všetkých kvarkov a antikvarkov, vieme aj akú časť z celkovej hybnosti protónu gluóny unášajú, a tá nie je vôbec malá, ale predstavuje až 50 % z celkovej hybnosti protónu!
K lepšiemu pochopeniu toho, čo sa pri elektrón-protónovom experimente odohráva, sa musíme ešte zamyslieť nad tým, ako jeho štruktúra bude reagovať na energiu, ktorú jej odovzdá nalietavajúci elektrón. Intuitívne je zrejmé, že čím bude táto energia väčšia, tým viac bude "vnútro" protónu priehľadnejšie - môžeme povedať, že veľkosť odovzdanej energie bude zodpovedať veľkosti "zväčšenia lupy", ktorou daný objekt študujeme. Čo sa reálne ale bude vo vnútri protónu diať, keď od elektrónu získa nejakú energiu? Na túto otázku vieme odpovedať opäť vďaka kvantovej chromodynamike. V súlade s ňou, partóny, po prijatí energie, podliehajú tzv. *evolučným procesom.* Znamená to, že ak má partón danú energiu, vieme predpovedať, s akou pravdepodobnosťou prejde v iný typ partónu. Bez toho, aby som šiel s výkladom hlbšie, poznamenávam, že dnes poznáme v princípe dva mechanizmy, podľa ktorých sa tento proces môže riadiť. Treba poznamenať, že experimentálne potvrdenie existencie obidvoch mechanizmov bolo možné len vďaka existencii HERA, a je krásnym príkladom testu kvantovej chromodynamiky. Nuž, čo vlastne teória predpovedá a experimenty na HERA potvrdzujú?
Čím je energia, ktorú elektrón odovzdá protónu väčšia, tým je pravdepodobnejšie, že zrážka elektrónu prebehla na gluóne. Teoreticky, pokiaľ by veľkosť odovzdanej energie asymptoticky rástla, elektrón v protóne by "stretol" len a len gluóny, ktorých počet by ale bol v konečnom dôsledku konečný, čo je zas dané zákonom zachovania energie.

Čo dodať záverom? Dúfam, že sa mi aspoň čiastočne podarilo načrtnúť štruktúru protónu. Samozrejme som zďaleka nespomenul všetko, čo o tejto štruktúre vieme. Existuje aj možnosť uskutočniť rozptylový experiment s polarizovanými elektrónmi (elektrónmi, spin ktorých je usmernený do jednej roviny). Pretože v takomto usporiadaní pracujeme s ďalšou charakteristikou, ktorá sa pri rozptyle mení, registráciou tejto zmeny sme schopní "snímať" bohatšiu informáciu o vnútornej štruktúre protónu. Opäť, ako to obvykle býva, polarizované experimenty priniesli aj ďalšie, nové otvorené otázky. Najznámejšou z nich je "záhada", ktorá sa týka spinu protónu - ten by mal byť výsledkom vektorového súčtu spinov partónov, ktoré protón tvoria - v praxi to však na prvý pohľad tak nevyzerá...



Obr. 0.2: H1 *detektor. Uvedené postavy reálne odzrkadľujú rozmery detektora.*



Obr. 0.3: *Prípad zaregistrovaný* H1 *detektorom.*