

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Formánek

Mezinárodní spolupráce v subnukleární fyzice - program H1 v DESY Hamburk

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 36 (1991), No. 5, 277--288

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139662>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1991

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Mezinárodní spolupráce v subnukleární fyzice — program H1 v DESY Hamburk

Jiří Formánek, Praha

1. Úvod

Když jsem o prázdninách před pěti lety (1985) sepisoval úvahu [1] o urychlovačích a colliderech, zamýšlel jsem se ovšem i nad tím, co to vše bude znamenat pro další osud československé subnukleární fyziky. Závěry, ke kterým jsem dospěl byly natolik chmurné, že jsem je raději do článku nezařadil. (Myslím, že myšlenku přímé účasti československých institucí na experimentech využívajících urychlovačových komplexů shrnutých v [1] — Tab. I by v té době převážná většina těch, kteří alespoň trochu znali reálné poměry, zřejmě označila za naprosto iluzorní. Bez konfrontace s experimentálními daty je však jakákoli fyzika odsouzena k degeneraci. Je potom vůbec morální pokoušet se pracovat v subnukleární fyzice, která si za svůj cíl neklade nic jiného než rozvoj poznání? . . .)

O necelý rok později však dochází k prvním sondážím možnosti spolupráce na programu H1 (na collideru HERA v DESY Hamburk), a když článek [1] v r. 1987 vychází, věnuje se již značná část subnukleárních fyziků v Praze (ve Fyzikálním ústavu ČSAV a Nukleárním centru UK) a v Košicích (v Ústavu experimentální fyziky SAV) úkolům, které mají zajistit naši účast na tomto programu. Uvědomíme-li si, že samozřejmým předpokladem plnoprávné účasti na jakémkoli programu tohoto typu je nezanedbatelný podíl na hardware, že cena detektoru H1 je kolem 10^8 DM a že my jsme pro tento účel neměli k dispozici ani jedinou marku, nelze se příliš divit, že leckdo dosažení účasti považoval za bláhový sen a nešetřil předpovědmi o tom, jak vše skončí fiaskem. Díky entuziasmu, obětavosti, pracovitosti a vynalézavosti těch, kteří nechtěli promarnit ojedinělou šanci zapojit československou subjadernou fyziku do špičkového programu, se však přesto podařilo vytvořit vklad, který nám v něm zajišťuje plnoprávné postavení.¹⁾ Tento vklad představují vysokonapěťové a čtecí elektrody hadronového a elektromagnetického kalorimetru. Jde o téměř deset tisíc elektrod o celkové ploše několik tisíc čtverečných metrů z materiálu Cuprexit SEB. Tyto elektrody připomínají velké tištěné spoje s mnohdy značně komplikovaným motivem tvořeným izolačními

¹⁾ Po právní stránce se toto postavení opírá zejména o dohodu mezi ČSAV a DESY Hamburk, uzavřenou v r. 1988. Program H1 je zahrnut též do dohod mezi ČSAV a DFG a mezi Univerzitou Karlovou a Univerzitou Hamburk.

pruhy. Celková délka těchto pruhů se počítá ve stovkách kilometrů. Elektrody byly vyráběny jednak přímo na výše uvedených pracovištích, jednak za podstatného přispění těchto pracovišť v TESLE Přelouč.²⁾ Všechny již byly nejen vyrobeny, proměřeny³⁾ a otestovány, ale i v dohodnutých termínech dodány dalším institucím, kde se z nich postupně vytvářely větší celky. Dnes již jsou všechny instalovány v kryostatech kalorimetru detektoru H1, jehož kompletace v severní hale DESY Hamburk se blíží ke konci. Již brzy zde sehrají podstatnou roli při získávání informací z dosud neprobádaných fyzikálních oblastí, do nichž přístup otevře collider HERA. Jako výraz ocenění československého přínosu bylo v r. 1989 rozhodnuto uskutečnit příští výjezdní pracovní poradu programu H1 v Praze. Ve dnech 5.–8. 9. 1990 se na ni sjely téměř dvě stovky účastníků. Již proto snad stojí za to přiblížit program H1 i naší širší veřejnosti. Pokusím se o to v následujících řádcích. Ti, kdo by se hlouběji zajímali o fyzikální, metodickou či technickou problematiku s programem H1 související, naleznou mnoho cenných informací např. v [3], [4], [5].

2. Několik slov o DESY A HERA

DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) bylo založeno 18. 12. 1959 jako výzkumné zařízení pro západoněmecké vysoké školy.⁴⁾ Brzy se z něho stala jedna ze světově nejvýznamnějších laboratoří subnukleární fyziky. Metodicky se orientovala především na využívání vysokoenergetických elektronů a pozitronů. V r. 1964 uvádí do provozu synchrotron DESY, poskytující 6 GeV-ové elektrony, za ním v r. 1973 následuje collider DORIS (DOPel RIng — Speicheranlage), umožňující studovat srážky e^+e^- při těžiškové energii $\sqrt{s} = 11$ GeV. Spuštěním e^+e^- collideru PETRA (Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage) s energií $\sqrt{s} = 47$ GeV se DESY v r. 1978 dostává do světového čela.⁵⁾

Kruhové urychlovače e^\pm jsou zdrojem intenzivního synchrotronového záření. V DESY byla již od r. 1964 věnována velká pozornost jeho využití. Dnes HASYLAB (Hamburk SYNchrotron radiation LABoratory) využívá DORIS jako zdroj synchrotronového záření pro potřeby nejrůznějších oblastí základního výzkumu i technické praxe.

Ke kvalitativnímu posunu výzkumného zaměření DESY dochází v dubnu 1984, kdy zde počíná výstavba collideru HERA (Hadro-Electron-Ring-Anlage), který umožní realizovat srážky elektronů s protony při energiích dosahujících 30 GeV, resp. 820 GeV.⁶⁾ V něm elektrony obíhají po přibližně kruhové dráze ve vakuové trubici o délce cca

²⁾ Naši pracovníci vnesli do produkce také řadu originálních prvků. Blíže viz [2].

³⁾ U řady parametrů byly požadavky podstatně přísnější než čs. normy.

⁴⁾ V současnosti má 1 300 zaměstnanců. Roční rozpočet cca 230·10⁶ DM je z 90 % kryt federální vládou a 10 % přispívá Hamburk. V letech 1984–90 vedle toho obdrželo DESY dalších 950·10⁶ DM. Na těchto prostředcích, výhradně určených na vybudování HERA, se vedle federální vlády (72 %) a Hamburku (13 %) podílí i zahraničí (15 %).

⁵⁾ Teprve v r. 1986 je předstížena Japonci. Dnes rekordních energií srážek e^+e^- $\sqrt{s} = 100$ GeV se dosahuje na LEP v CERN.

⁶⁾ Pokud bychom takovéto srážky, při téže těžiškové energii ($\sqrt{s} \simeq 314$ GeV) chtěli studovat ozařováním pevného terče, museli bychom elektrony urychlit na 52 TeV. Postavit odpovídající urychlovač na základě dnes zvládnutých či dosud jen studovaných postupů je zcela vyloučeno.

6,3 km. V separátní trubici nad nimi se v opačném směru pohybují protony. Pouze na čtyřech místech se tyto prstence prolínají. V těchto interakčních oblastech lze oba svazky přesně vystředovat proti sobě tak, aby mohlo dojít k výše zmíněným vysokonegetickým srážkám elektronů s protony. Jak často k těmto srážkám skutečně dojde, o tom rozhoduje luminozita. Pro HERA by měla mít hodnotu⁷⁾

$$L \simeq 1,5 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

Přitom bude v elektronové (protonové) trubici 210 shluků částic, z nichž každý vyplňuje prostor o tvaru válce s délkou 0,8 cm (7,5 cm), jehož eliptická základna má horizontální, resp. vertikální poloosu 280 μm (265 μm) a 37 μm (84 μm). V každém z těchto shluků bude $3,48 \cdot 10^{10}$ elektronů, resp. 10^{11} protonů. Shluky budou rovnoměrně rozděleny po celém obvodu prstence, tj. vzdálenost mezi nimi bude cca 28,8 m. Uvážíme-li, že každá z částic se pohybuje rychlostí velice blízké světelné, vidíme, že k setkání e a p shluků bude docházet každých 96 ns.

Pomocí konvenčních elektromagnetů je prakticky nemožné dosáhnout magnetického pole schopného udržet 820 GeV-ové protony v prstenci pouhých 6,3 km dlouhém. Dráha protonu na HERA je proto ohýbána 422 supravodivými dipólovými magnety, z nichž každý je 9 m dlouhý a vytváří pole 4,68 T. Doplnuje je ještě 224 kvadrupólůvých, 1,8 m dlouhých supravodivých magnetů.⁸⁾

Magnety elektronového prstence jsou na HERA ovšem nesupravodivé. Hlavním faktorem limitujícím dosažitelnou energii zde totiž není dosažitelné magnetické pole, ale schopnost kompenzovat ztráty energie elektronového svazku způsobené synchrotronovým zářením. Elektrony získávají svoji energii od vysokofrekvenčního pole (499,7 MHz) v dutinových rezonátorech.⁹⁾ Z celkového výkonu 8 MW dodávaného šesti vysílací je však značná část pohlcována stěnami rezonátorů. Aby se tyto tepelné ztráty podstatně redukovaly, bude ještě letos urychlovačový systém doplněn supravodivými dutinovými rezonátory. Teprve po jejich instalaci bude možno v elektronovém svazku dosáhnout energie 30 GeV. Celkový výkon radiofrekvenčního systému nezbytný k udržování elektronového svazku na této energii činí 13 MW!

Synchrotronové záření značně komplikuje práce subjaderných fyziků na takových zařízeních, jako je HERA. Přesto má dobrou příležitost zlepšit si pověst i u nich. Díky němu se totiž svazek elektronů postupně stává polarizovaným. Teoreticky¹⁰⁾ by tato polarizace mohla na HERA za několik desítek minut dosáhnout 90%. Polarizovaný svazek je nástrojem k získání bohatších informací. Nejmarkantnější je to vidět u slabých interakcí, kde na základě standardního modelu očekáváme, že se podstatně jinak

⁷⁾ Srov. odhad (14) v [1] – pro HERA je $s \simeq 0,1$ (TeV)².

⁸⁾ Všechny tyto magnety je nutno udržovat na heliové teplotě $\sim 4,5$ K. Proto je dnes v DESY největší kapacita zkapalnění He v Evropě – v chladicím systému cirkuluje ~ 13 tun He!

⁹⁾ Pro úplnost uvedme, že elektrony předtím, než se dostanou do HERA, projdou celou soustavou urychlovačů, kde postupně roste jejich energie až na 14 GeV. V HERA jsou pak nejprve dále urychlovány až do energie 30 GeV a teprve potom na této energii dlouhodobě udržovány, tj. HERA nejprve slouží jako urychlovač a potom jako skladovací prstenec (storage ring) elektronů. Podobně tomu je i u protonů, které do HERA vstupují s energií 40 GeV.

¹⁰⁾ Prakticky dosažitelná hodnota bude ovšem vzhledem k různým geometrickým odchylkám a jiným depolarizačním faktorům nižší a zřejmě nepřesáhne 80%.

projevují u částic se spinem orientovaným ve směru jejich letu než u částic se spinem orientovaným opačně. Synchrotronové záření ovšem „zdarma poskytuje“ pouze polarizaci příčnou (tj. převládá orientace spinu ve směru kolmém na svazek), proto se pro HERA konstruuje také magnetický „natáčeč spinu“ elektronů.

Pro úplnost ještě dodejme, že na HERA bude možné místo elektronů využívat i pozitrony a v principu bude možno také protony nahradit těžšími jádry — zejména deuterony a α -částicemi.

Celá HERA je budována 10–25 m pod zemským povrchem v tunelu o průměru 5,2 m, který v interakčních oblastech prochází velkými halami (půdorys cca 25 m \times 43 m, výška 15 m), které jsou vlastně součástmi mnohopodlažních podzemních budov. Ve dvou z nich se již dokončují komplety mohutných detekčních systémů jediných dvou doposud schválených experimentálních programů H1 a ZEUS. Dříve než si naznačíme, co v rámci nich bude možno studovat, zdůrazněme, že HERA bude zřejmě dlouho jediným $e - p$ colliderem na světě. Z dnešního pohledu (srov. Tab. I. v [1]) může přicházet v úvahu pouze ještě realizace $e - p$ verze collideru LHC, avšak ne dříve než koncem devadesátých let.¹¹⁾

3. Fyzika na HERA

Ze zákona o zachování leptonového (elektronového) čísla plyne, že všechny procesy, které mohou proběhnout v důsledku srážky elektronu s protonem lze rozdělit do dvou základních skupin: tzv. NC (neutral current) případy

$$(1) \quad e + p \rightarrow e + X$$

a CC (charged current) případy

$$(2) \quad e + p \rightarrow \nu + X,$$

tj. případy, kdy v koncovém stavu je elektron, resp. neutrino a libovolné další částice (shrnuté pod symbol X). Jestliže se při jejich analýze nestaráme o to, co v jednotlivých případech reprezentoval symbol X , říkáme, že studujeme **inkluzivní procesy**. Nejdetálnější informací, kterou o inkluzivních procesech (1) nebo (2) při zadané energii \sqrt{s} lze podat, je udání jejich frekvence v závislosti na hybnosti leptonu v koncovém stavu.¹²⁾ Ze symetrie úlohy je zřejmé, že tato frekvence může záviset pouze na dvou nezávislých kinematických proměnných, za které lze zvolit např. energii E' koncového leptonu a úhel Θ , který svírá jeho hybnost se směrem primárního svazku protonů. Jinými slovy řečeno, všechnu informaci, kterou možno získat studiem inkluzivních procesů (1), (2) lze vyjádřit udáním závislosti jejich účinných průřezů na s , Θ , E' . Místo

¹¹⁾ Původně uvažovaná $e - p$ verze TRISTAN (v KEK Japonsko) by pokrývala menší kinematickou oblast než HERA. K její realizaci proto zřejmě vůbec nedojde.

¹²⁾ Pro zjednodušení zde odhlížíme od polarizačních charakteristik. Naše závěry jsou bezprostředně použitelné v případech, kdy primární svazky jsou nepolarizované a orientaci spinu leptonu v koncovém stavu nezjišťujeme.

nezávislých proměnných E', Θ (jejichž hodnoty závisí na zvolené souřadné soustavě) se dnes běžněji užívají invariantní proměnné

$$(3) \quad x \equiv \frac{Q^2}{2(P \cdot q)}, \quad Q^2 \equiv -q^2, \quad y \equiv \frac{(P \cdot q)}{(P \cdot p)},$$

kde

$$(4) \quad q = p - p'$$

je „přenos hybnosti“ a P, p, p' , označují postupně čtyřhybnost protonu a elektronu v počátečním stavu, resp. leptonu ve stavu koncovém. Při dané celkové energii proměnné (3) ovšem nezávislé nejsou, neboť

$$(5) \quad Q^2 = 2xy(P \cdot p)$$

a

$$(6) \quad 2(P \cdot p) = s - M^2 - m^2,$$

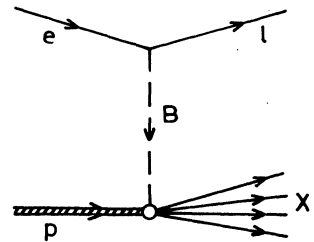
kde M, m jsou hmotnosti protonu a elektronu.¹³⁾

Jak bohatou informací můžeme získat studiem srážek v tom kterém experimentu samozřejmě značnou měrou závisí na tom, jakou kinematickou oblast nám příslušné experimentální zařízení dovoluje vyšetřovat. Čtenáři se snadno přesvědčí, že intervalem kinematicky přípustných hodnot proměnné x je $(0,1)$. Totéž platí o proměnné y a proměnná Q^2 může nabývat všech nezáporných hodnot až do Q_0^2 , kde (pro $s \gg M^2$)

$$(7) \quad Q_0^2 \simeq s.$$

O srážkách, při nichž $Q^2 \gg M^2$, mluvíme jako o **hluboce nepružných** (DIS=Deep Inelastic Scatteing). Pro HERA je $Q_0^2 \simeq 10^5 \text{ GeV}^2$.

Leptony se neúčastní silných interakcí, mohou však vysílat a pohlcovat intermediální bosony (B) odpovědné za interakce elektroslabé. Pravděpodobnost, že k vyslání nebo k pohlcení takového bosonu dojde, je úměrná konstantě jemné struktury $\alpha \simeq 1/137$. Dominujícím mechanismem inkluzivního procesu (1), resp. (2) by tedy měla být výměna neutrálních, resp. nabitých intermediálních bosonů mezi elektronem a protonem znázorněná Feynmanovým diagramem na obr. 1.



Obr. 1

Z požadavků invariance vyplývá, že odpovídající inkluzivní účinný průřez NC procesů (1)¹⁴⁾ lze zapsat jako

$$(8) \quad \frac{d\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \left[y^2 x F_1 + (1-y)F_2 + y\left(1 - \frac{y}{2}\right)F_3 \right],$$

¹³⁾ Používáme zde jednotek $\hbar = c = 1$, jak je obvyklé v publikacích o subnukleární fyzice pro dospělé.

¹⁴⁾ Zcela analogické tvrzení platí i o CC procesech (2).

kde neurčenými zůstávají pouze tři **strukturní funkce** $F_j(x, Q^2)$. V nich je skryta informace o struktuře protonu a dynamice reprezentované dolním vrcholem na obr. 1.

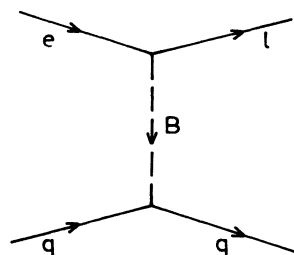
Již první data o DIS získaná v SLAC (Stanford Linear Accelerator Center — California USA) na přelomu 60. a 70. let vyvolala velké vzrušení. Na základě prostých rozměrových úvah totiž snadno dospějeme k závěru, že pokud by procesu, charakterizovanému dolním vrcholem obr. 1 odpovídala absorpce objektem „poloměru“ r , měla by se velikost strukturních funkcí podstatně zmenšit při nárůstu Q^2 o

$$(9) \quad \Delta Q^2 \simeq \frac{6}{r^2}.$$

Protože elektromagnetický poloměr protonu je řádu 1fm, byl očekáván podstatný pokles strukturních funkcí již při nárůstu Q^2 o několik desetin $(\text{GeV})^2$. Výše zmíněná data však nepřipouštěla žádnou podstatnou změnu strukturních funkcí ani při přírůstcích Q^2 o dva řády větších. Znamená to, že elementární procesy zodpovědné za dynamiku odpovídající dolnímu vrcholu v obr. 1 musejí probíhat na objektech mnohem menších než proton.

Pro $r^2 \rightarrow 0$ očekáváme, že strukturní funkce budou na Q^2 (prakticky)¹⁵⁾ nezávislé (tzv. Bjorkenův scaling). Tak tomu je ve Feynmanem navrženém **partonovém** modelu. Podle něho elementárním procesem zodpovědným za dolní vrchol obr. 1 je pružný rozptyl bodové částice (**partonu**) vyvolaný absorpcí B . To je kinematically možné právě tehdy, kdy čtyřhybnost příslušného partonu¹⁶⁾ je xP . Inkluzivní účinný průřez procesů (1) je pak dán součtem nekoherentních příspěvků od jednotlivých partonů.

Výše zmíněné elementární procesy vystihuje Feynmanův diagram na obr. 2.¹⁷⁾ Odpovídající amplitudy ovšem závisí na tom, jak partony interagují s B (tj. na tom, co je přiřazeno dolnímu vrcholu v obr. 2). Ukázalo se, že vynikajícího souhlasu s daty se dosáhne právě tehdy, když partony identifikujeme s kvarky (a antikvarky), jejichž elektroslabé interakce jsou popsány modelem GSW (Glashow — Salam — Weinberg, srov. [6]).¹⁸⁾ K tomu, abychom na základě znalostí účinných průřezů elementárních srážek elektronů s partony mohli předpovědět inkluzivní účinné průřezy studovaných procesů, potřebujeme samozřejmě ještě znát také to, s jakou pravděpodobností bude nahodile vybraný parton kvarkem (antikvarkem) dané „vůně“ (u, d, s, \dots) nést právě x -tý díl čtyřhybnosti protonu. Jinými slovy řečeno, z měření inkluzivních účinných průřezů získáme informaci o rozdělovacích funkcích q_f, \bar{q}_f kvarků a antikvarků.¹⁹⁾



Obr. 2

¹⁵⁾ Pro zjednodušení zde odhlížíme od slabé Q^2 -závislosti vyvolané rozdílností propagátoru Z^0 od propagátoru fotonového.

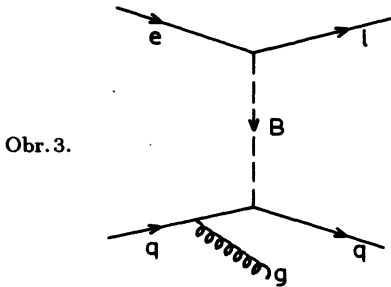
¹⁶⁾ Jeho klidovou hmotnost opět zanedbáváme.

¹⁷⁾ Teprve po „tvrdé srážce“, znázorněné na obr. 2, dojde v důsledku „měkké interakce“ rozptýleného partonu se zbývajícími partony k „hadronizací“, tj. vzniku částic zahrnutých pod symbol X v (1). Jak a k jaké hadronizaci dojde již však pravděpodobnost tvrdé srážky ovlivnit nemůže. Inkluzivní účinný průřez tedy na dynamice hadronizace nezávisí.

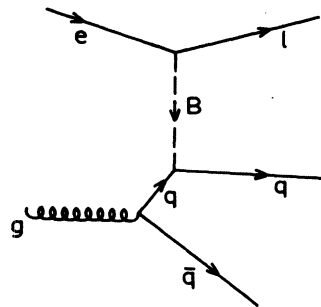
¹⁸⁾ Právě to ve skutečnosti dnes je nejsilnějším argumentem ve prospěch existence kvarků.

¹⁹⁾ V protonu s čtyřhybností P udává $q_f(x) dx$ počet kvarků vůně (flavour) f , jejichž čtyřhybnost leží v intervalu $(xP, (x + dx)P)$. $\bar{q}_f(x)$ má obdobný význam pro antikvarky.

Odtud pak mj. zjistíme, že jen polovina impulsu protonu je nesena jeho kvarky a antikvarky. Tento zdánlivě záhadný fakt však svědčí pouze o tom, že vedle kvarků a antikvarků jsou v protonu ještě partony, které nejsou schopny absorbovat intermediální bosony. Jejich existenci skutečně očekáváme. Podle současných našich představ (reprezentovaných kvantovou chromodynamikou — QCD) je totiž silná interakce mezi kvarky zprostředkována výměnou gluonů. Gluony přitom s intermediálními bosony skutečně (bezprostředně) neinteragují. Výše uvedený fakt tedy nepřímou hovoří ve prospěch QCD. Ideální by bylo, kdybychom rozdělovací funkce partonů dokázali v rámci QCD předpovědět. Tento cíl je však prozatím v nedohlednu. Dobře víme, že takovou úlohu poruchově řešit nelze a neporuchově ji dosud řešit neumíme. Přesto však data o DIS mohou poskytnout cennou prověrku QCD. Díky interakci mezi kvarky totiž mohou k inkluzivním procesům přispívat na partonové úrovni i další mechanismy. Tak v diagramu na obr. 3 vidíme, že kvark dříve než pohltí intermediální boson B , může vyzářit gluon. Podobně z obr. 4 vidíme, že kvark, který absorbuje B , může být ve skutečnosti produktem rozpadu gluonu na kvark-antikvarkový pár.



Obr. 3.



Obr. 4

Již z těchto jednoduchých příkladů je zřejmé, že QCD vede k opravám předpovědi partonového modelu, které se projeví jednak v narušení scalingu (tj. QCD předpovídá netriviální závislost strukturních funkcí na Q^2 – srov. s pozn. 15), jednak v závislosti strukturních funkcí na rozdělení gluonů. Ukazuje se, že v poměrně velké kinematické oblasti lze tyto opravy efektivně započítat tak, že připustíme, aby rozdělovací funkce vystupující ve strukturních funkcích spočtených v rámci partonového modelu závisely na Q^2 . Přitom tato Q^2 závislost je determinována evolučními rovnicemi plynoucími z QCD. K jejich řešení je třeba znát rozdělovací funkce při jediné hodnotě Q^2 . Tedy proměřením Q^2 -závislosti strukturních funkcí můžeme testovat QCD.

Již dnes existující experimentální data jasně svědčí o tom, že scaling skutečně narušen je, a to tak, jak očekáváme v rámci QCD. Strukturní funkce se však s růstem Q^2 mění jen velice pomalu, a tak HERA (která poskytne data pro Q^2 o 2 řády vyšší než dřívější experimenty) umožní testovat předpovědi QCD na kvalitativně vyšší úrovni.²⁰⁾

²⁰⁾ Realita je samozřejmě vždy střídmejší než ideál. Ve skutečnosti bude na HERA možno (při pevné hodnotě x) získat data pro Q^2 z intervalu, jehož horní mez je pouze o cca jeden řád větší než mez dolní. Přitom tato dolní mez cca o jeden řád převyšuje maximální hodnoty Q^2 , pro které dnes

Snad největší předností HERA však je, že umožní studovat DIS i v oblasti velmi malých x (až po $x \simeq 5 \cdot 10^{-5}$), kde jsou soustředěny především „mořské kvarky a gluony“. HERA se tak stane nejbohatším zdrojem informací o gluonech, což nejenom podstatně obohatí naše znalosti o struktuře a interakcích na subnukleární úrovni, ale sehraje zásadní roli ve strategii konstrukce detektorů pro urychlovací komplexy příští generace (např. SSC — srov. [1]), kde charakter srážek bude určován především gluony. Nejdůležitější ovšem je, že při velice malých x dospíváme do další, kvalitativně nové, „neporuchové oblasti QCD“, oblasti, která v sobě skrývá zásadně nové informace o dynamice silných interakcí.

Všechny naše předchozí úvahy se opíraly o tzv. **standardní model**, v jehož rámci jsou elektroslabé a silné interakce popisovány GSW-modelem, resp. QCD. Úvahy, které jsme zde jen kvalitativně naznačili, byly v mnoha směrech velice detailně kvantitativně analyzovány. Bylo studováno, do jaké míry a jak přesně lze pomocí HERA získat hodnoty parametrů vystupujících ve standardním modelu a provedeno srovnání s možnostmi poskytovanými jinými zařízeními. Tyto rozborů zde ovšem opakovat nemůžeme. Pro zajímavost však alespoň uveďme, že HERA má potenciálně větší možnosti v sektoru interakcí silných než v sektoru elektroslabém, tj. přesně naopak, než by se na první pohled mohlo zdát (elektron silně neinteraguje!).

Podobně byly analyzovány možnosti HERA pro signalizaci případných odchylek od standardního modelu. Tak např. podle standardního modelu úlohu intermediálních bosonů odpovědných za elektroslabé interakce hrají pouze fotony a vektorové bosony Z^0 , W^\pm . V principu nic nebrání tomu, aby intermediálních bosonů existovalo víc. Ukazuje se, že HERA je schopna existenci takovýchto částic odhalit či vyloučit, pokud jejich klidová hmotnost nepřesáhne 470 GeV.²¹⁾

Ve standardním modelu se leptony i kvarky považují za bezstrukturní bodové částice. Byly studovány otázky, do jaké míry by se odchylky od standardního modelu vyvolané případnou složeností těchto částic daly odhalit pomocí HERA. Podobně byl analyzován vliv případné složenosti intermediálních bosonů, vliv nejrůznějších „exotických částic“ (leptokvarky, supersymetrickí partneři známých částic, ...), které se vyskytují v modelech aspirujících na překonání modelu standardního.

Pro nedostatek místa se zde blíže těmito otázkami zabývat nemůžeme. Uveďme proto jen, že šance získat cenné nové poznatky je determinována nejen energiemi a kvalitou svazků primárních částic, ale také schopností získat relevantní informace o výsledcích srážek. Odtud pak vyplývají základní požadavky, kterým musí vyhovět příslušný detektor.

existují data (z experimentů využívajících vysokoenergetické svazky e , μ , ν k bombardování pevných terčů), tj. průnik kinematických oblastí DIS, pro něž dnes existují data s oblastmi, které zpřístupní HERA (provozovaná s nominálními energiemi svazků), je nulový. K odstranění této nepříznivé situace bude zřejmě nezbytné provozovat (alespoň dočasně) HERA i při snížené energii.

²¹⁾ Pro srovnání připomeňme, že v klidové hmotnosti protonu je necelý 1 GeV!

4. Detektor H1

Odhlédneme-li od spínů, potom koncový stav po srážce je zadán specifikací jednotlivých částic včetně určení, s jakou energií a v jakém směru se ta která z nich pohybuje. Takovéto informace by tedy měl v adekvátní míře poskytovat detektor použitý v příslušném srážkovém experimentu. Co zde chápat pod termínem „adekvátní“, závisí ovšem na tom, jaké jevy chceme v daném experimentu studovat, jaké hypotézy ověřovat, jakou četnost příslušných procesů očekáváme, atd. Bližší rozbor této otázky daleko přesahuje rámec našeho článku. I bez něho však snadno odhalíme základní požadavky, kterým musí detektor pro experimenty HERA vyhovět.

Již k tomu, abychom mohli určit, zda ten který koncový stav vznikl v důsledku NC nebo CC procesu (viz. (1), (2)), musíme jednoznačně rozpoznat přítomnost elektronu, resp. neutrina v koncovém stavu. Chceme-li změřit odpovídající dvojný diferenciální účinný průřez (srov. (8)), musíme být schopni určit směr, do kterého příslušný lepton (e , resp. ν) po srážce vyletěl a jakou energii nesl. Srážkami bude často produkováno značné množství částic (shrnutých pod symbol X ve formulích (1), (2)). Převážně půjde o piony π^\pm, π^0 .²²⁾ Mohou se však mezi nimi objevit i „vzácnější částice“ (včetně částic dosud nepozorovaných). Protože se vesměs velice rychle rozpadají, nezbyvá než je vyhledávat cestou identifikace jejich rozpadových produktů. Samozřejmě, že rozhodnout o tom, zda určitá částice je či není produktem příslušného rozpadu, bývá značně obtížné. Výjimku tvoří případy, kdy tuto částici (v dané kinematické oblasti) jinak nemáme právo očekávat. Úlohu takovéto „signální“ částice hrají nejlépe miony μ^\pm .

Již z těchto prostých úvah je zřejmé, že detektor HERA by měl umožňovat rozpoznat e^\pm, μ^\pm, ν a určit jejich hybnosti. Na první pohled se může zdát, že v případě neutrina je tento požadavek nereálný. Jeho střední volná dráha totiž o mnoho řádů přesahuje rozměr jakéhokoli laboratorního zařízení (srov. [7]). Spoléhat na interakci neutrina s detektorem při určování jeho hybnosti v procesu (2) by bylo skutečně bláhové. Potřebnou informaci lze však naštěstí získat i jinak — stačí určit celkovou energii a hybnost ostatních částic v koncovém stavu. Porovnáním s hodnotami celkové energie a hybnosti počátečního stavu odhalíme „scházející“ energii a hybnost, které odneslo „nepolapitelné“ neutrino. Dospíváme tak k požadavku, aby detektor umožňoval nejen rozpoznat leptony e, μ a určit jejich hybnost, ale také určit tok energie odnášené hadrony a fotony γ kterýmkoli směrem.

Obdobné základní požadavky se dnes kladou prakticky na všechny detektory na kterémkoli collideru. Nepřekvapuje proto, že také základní rysy těchto detektorů jsou společné.

Typická je pro ně „hermetičnost“ (tj. aktivní pokrytí prakticky celého prostorového úhlu 4π) a slupkovitá struktura. Připomeňme, že studované srážky probíhají v interakční oblasti uvnitř vakuové trubice collideru. Vně této trubice pak bezprostředně následuje **centrální část** detektoru umožňující co nejpřesnější zjištění drah nabitých částic. S využitím magnetického pole pak poskytuje informaci o nábojích a hybnostech

²²⁾ π^0 se dříve, než dokáže proletět znatelnější vzdálenost, rozpadnou (zpravidla na 2 fotony) — jejich střední doba života τ je $(8,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-17}$ s. Naproti tomu, nesrovnatelně stabilnější π^\pm ($\tau \simeq 2,6 \cdot 10^{-8}$ s) mohou při GeV-ových energiích dospět značně daleko od místa svého vzniku.

těchto částic. Tento „dráhový“ detektor je „nedestruktivní“ — částice v něm ztrácejí pouze velice málo ze své energie (ionizací) a prakticky všechny z něho proniknou do následující slupky tvořené **elektromagnetickým kalorimetrem**. To již je detektor „destruktivního“ typu, který pohltí prakticky všechny elektrony (pozitrony) a fotony.

V soustavě absorpčních desek (z materiálu s vysokým atomovým číslem) zde dochází k rychlému rozvoji elektromagnetických spršek. V oblastech mezi absorpčními deskami je měřena velikost a prostorové rozložení ionizace vyvolané těmito sprškami, čímž získáváme informaci o tom, do kterých směrů a jak mnoho energie nesly elektrony (pozitrony) a fotony.

Následující slupka je představována **hadronovým kalorimetrem**, který obdobným způsobem poskytuje informaci o prostorovém rozložení toku energie nesené hadrony. Úlohu elektromagnetických spršek zde ovšem přebírají spršky hadronové.²³⁾

V poslední slupce jsou opět registrovány dráhy ionizujících částic. Bez vyvolání spršek však k ní mohou proniknout prakticky jen miony a neutrina. Poslední slupka tedy představuje **mionový detektor**.

Jakkoli je výše naznačená struktura společná prakticky všem detektorům na colliderech, její konkrétní realizace je u jednotlivých detektorů často značně odlišná.²⁴⁾

Naznačme si alespoň v nejhrubších rysech, jak jsou jednotlivé slupky realizovány u detektoru H1.

Dráhový detektor je vytvářen mnohovláknovými komorami doplněnými detektory přechodového záření. Tento centrální detektor je obklopen mohutným kryostatem plněným kapalným argonem, v němž soustavy olověných a nerezových desek tvoří absorbatory elektromagnetického, resp. hadronového kalorimetru.²⁵⁾ Samotný kryostat se nachází uvnitř supravodivého solenoidu vytvářejícího v oblasti dráhového detektoru homogenní magnetické pole $\sim 1,2$ T. V ocelovém jármu magnetu jsou zabudovány streamerové trubice určené především²⁶⁾ k identifikaci a měření hybnosti mionů. U mionů odchylojících se od protonového svazku o méně než 17° bude hybnost přesněji určována mionovým spektrometrem tvořeným soustavou driftových komor umístěných před a za ocelovým toroidálním magnetem ($B \simeq 1,5$ T).

Z konstrukčních důvodů nelze výše zmíněný argonový kalorimetr užít pro měření v bezprostřední blízkosti vakuové trubice. Proto ho v přední a zadní části doplňuje tzv.

²³⁾ U materiálů s vysokým Z je jaderná interakční délka podstatně delší (např. pro Pb více než 30krát) než délka radiální. Díky tomu může většina hadronů proniknout absorpčním materiálem, který dokáže pohltit prakticky všechny e , γ . Pro úplnost dodejme, že i hadronové spršky vzniklé již v elektromagnetickém kalorimetru lze rozpoznat, protože jsou širší a delší než elektromagnetické.

²⁴⁾ Typická pro oba detektory na HERA (H1 i ZEUS) je jejich asymetrie. Stručně řečeno, do jejich předních částí (ve směru protonového svazku) je „investováno“ podstatně víc než do části zadní. Tato markantní odlišnost od detektorů na ostatních colliderech je prostým odrazem skutečnosti, že v případě HERA se těžišťová soustava vůči laboratorní pohybuje ve směru protonového svazku rychlostí rovnou $\sim 93\%$ rychlosti světla (u všech ostatních colliderů tyto dvě soustavy splývají). Díky tomu bude zhruba 50% sekundárních částic na HERA vylétávat ve směru odchylojícím se od primárního protonového svazku o méně než 25° .

²⁵⁾ V mezerách mezi jednotlivými absorpčními deskami dochází k ionizaci argonu. Právě elektrody, s jejichž pomocí se určuje místo a velikost této ionizace, byly vyrobeny převážně u nás. Efektivně zde vytvářejí přes 50 tisíc ionizačních komor.

²⁶⁾ Trubice zde rozmístěné slouží též k určení energie hadronů, kterým se podařilo uniknout z argonového kalorimetru.

„zátkový“ kalorimetr, resp. zpětný elektromagnetický kalorimetr. Oba tyto kalorimetry (na rozdíl od argonového) pracují při pokojových teplotách. V prvním z nich jsou mezi měděnými absorpčními deskami roviny křemíkových bariérových detektorů. V druhém z nich jsou mezi olovenými absorpčními deskami roviny scintilátorů.

Doplňme tyto základní charakteristiky struktury H1 detektoru ještě několika globálními údaji, které snad napomohou čtenáři utvořit si představu o mohutnosti tohoto komplexu.

Délka \times výška \times šířka a hmotnost celého H1 detektoru je zhruba $15\text{ m} \times 12\text{ m} \times 10\text{ m}$, resp. 2800 tun. Supravodivý solenoid má vnitřní průměr 5,2 m a délku 5,75 m.²⁷⁾ Kalorimetr vyžaduje kolem 60 m^3 velice čistého tekutého argonu,

O komplexnosti celého zařízení si hrubou představu lze učinit již z toho, že zahrnuje kolem 270 tisíc elektronických kanálů.

Připomeňme, že v interakční oblasti se navzájem setkávají e a p shluky každých 96,064 ns. Během těchto 96 ns poskytnou jednotlivé elementy detektoru téměř 3 Mb digitalizované informace. Trvale zaznamenávat tak intenzivní tok informací není dosud technicky možné — není to však ani žádoucí. Nejen že by náklady na záznamové materiály přerostly únosné meze, ale — což je podstatnější — vytěžení nové relevantní fyzikální informace z těchto „surových“ dat standardními metodami „off line“ by vyžadovalo nepředstavitelně dlouhou dobu. Taková data by tedy byla prakticky bezcenná. Proto je nezbytné docílit maximálně možného odfiltrování potenciálně nezajímavých dat²⁸⁾ a předzpracování dat potenciálně zajímavých. K tomu dochází postupně na 4 úrovních (s využitím hard- i softwarových prostředků) tak, že se nakonec zaznamenává jen asi 5 případů za sekundu, a to v rozsahu cca 125 kb/případ. Již odtud musí být zřejmé, jak obrovské nároky na rychlou elektroniku, výpočetní techniku i programové zabezpečení detektor H1 klade. Adekvátní využití takového detektoru klade ovšem enormní požadavky i na další výpočetní techniku (včetně programového vybavení), která není součástí detektoru samého. Uvedme alespoň, že k tomu, aby bylo možné optimálně analyzovat detektorem poskytovaná data a realisticky kvantifikovat úroveň důvěryhodnosti závěrů na jejich základě činěných je nutno m.j. metodou Monte Carlo generovat často statisíce procesů a simulovat jejich odezvu v detektoru. O jak komplexní problematiku jde, může si čtenář učinit představu snad již z toho, že při detailním započtení vlastností reálného detektoru takováto simulace vyžaduje řádově minuty času nejvýkonnějších počítačů na generaci jediného případu. Samozřejmě, že o nic méně náročná nebude v tomto směru ani analýza reálných dat.

5. Závěr

Pokusil jsem se čtenáře seznámit s různými aspekty jednoho z vysokoenergetických

²⁷⁾ Svými rozměry ho předčí pouze supravodivý solenoid užívaný na experimentech DELPHI na e^+e^- collideru LEP v CERN Ženeva. Oba tyto solenoidy byly vyrobeny v Rutherfordově laboratoři v Anglii.

²⁸⁾ Tak např.: Přesto, že v trubici je vysoké vakuum, dochází často k srážkám protonů s reziduálním plynem. Dochází též ke srážkám urychlených částic se stěnami trubice. Takové případy je třeba maximálně odfiltrovat od studovaných $e - p$ srážek.

programů odpovídajících současné světové úrovni. V mnoha směrech jsem se vědomě dopustil drastických zjednodušení a o řadě otázek jsem se nezmínil vůbec. Toto pojednání jistě z nikoho neudělá experta subnukleární fyziky, doufám však, že po jeho přečtení již nikdo nebude šokován neuvěřitelně dlouhými seznamy jmen autorů publikací původních výsledků z této fyzikální oblasti.²⁹⁾

Pokud čtenář odhalil větší citové zabarvení, než je u pojednání tohoto druhu obvyklé, nemýlil se. Nezakrývám, že v souvislosti s projektem H1 pocívu hrdost. Hrdost nejen na to, že se českoslovenští subjaderní fyzici účastní (prvně v historii v takovémto rozsahu) světové špičkového programu, ale zejména na to, že se ho účastní jako plnoprávní partneři, a to nikoli na základě nějakého sentimentu k chudým příbuzným, ale na základě svého faktického přínosu.

Detektor H1 bude již brzy uveden do provozu. Těžiště aktivity v programu H1 se tak rychle přesouvá od hardwaru k softwaru a k fyzikální problematice v užším slova smyslu. To se pochopitelně odráží i v činnosti našich fyziků. Tak např. generování metodou Monte Carlo by v nejbližší době mělo začít i na počítači IBM 3090, který je v Praze instalován v rámci „Akademické iniciativy“. Věřím, že se již brzy budeme moci připojit na síť HEPNET a že i v jiných směrech se budou na našich pracovištích postupně vytvářet podmínky srovnatelné s podmínkami většiny ostatních institucí spolupracujících na programu H1. V každém případě se dnes dívám na budoucnost československé subnukleární fyziky mnohem optimističtěji, než když jsem psal pojednání [1].

L i t e r a t u r a

- [1] FORMÁNEK J.: *Urychlovače a collidery*. PMFA 32 (1987), 2, 66–77.
- [2] ANTOŠ J. ET AL: *Manufacture of Readout Boards for a Liquid Argon Calorimetr*. Preprint DESY 90-078 (July 1990).
- [3] *Proceedings of the HERA workshop* (Hamburg, October 12 – 14, 1987). Edited by R. D. PECCEI.
- [4] *Technical Proposal for the H1 Detector*, DESY (1986).
- [5] *H1 Technical progress Report 87* DESY (1987) a obdobné zprávy za léta 1988, 89, 90.
- [6] FORMÁNEK J.: *Slabé interakce silně přitahující Nobelovy ceny*. PMFA 31 (1986), 65–82.
- [7] FORMÁNEK J.: *Nobelova cena za fyziku 1988*. PMFA 34 (1989), 262–266.

Ak pojmy, ktoré ti dal Boh nájsť, skutočne obsahujú pravdu a užitočnú pravdu, dal ti to, čo je viac; nie je teda pochyb, že ti dá v pravý čas tiež príležitosť pre ich šírenie, čo je niečím o mnoho menším.

Odjakživa bolo mojím priáním, aby som nemal z pozemských statkov príliš mnoho, naviac iba toľko, koľko by pri rovnomernom rozdelení pripadlo na každého.

BERNARD BOLZANO

²⁹⁾ Kolektiv spolupracujících na programu H1 dnes čítá 316 fyziků z 32 institucí 11 států celého světa. Nikdo z nich si nemůže stěžovat, že by pro něj nezbylo dostatek práce — spíše naopak.