

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Formánek

Fyzika jako dobrodružství poznání

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 40 (1995), No. 4, 181--191

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138433>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1995

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>

zemětřesení oním „přítelem“ z názvu tohoto článku. Máme tím na mysli např. použití seismických vln k hledání nafty nebo k prozařování (tomografii) zemského nitra, tolik potřebné k pochopení dramatických procesů proudění hmoty v zemském jádře a plášti. To je však již námět pro jinou schůzku s mocnou Seismologií.

Poděkování. Autoři děkují Prof. RNDr. V. Červenému, DrSc., Doc. RNDr. O. Novotnému, CSc., a RNDr. M. Kvasničkově za cenné připomínky k rukopisu. Jeden z autorů (J. Z.) děkuje také své mamince a dcerám, které pečovaly o srozumitelnost pro „normální“ čtenáře.

L i t e r a t u r a

- [1] ČERVENÝ, V.: Čs. čas. fyz. 33 (1983), 433.
- [2] BRDIČKA, M.: *Mechanika kontinua*. NČSAV, Praha 1959.
- [3] ŠOLC, M., ZAHRADNÍK, J.: *Astronomie, astrofyzika a geofyzika* (skripta). SPN, Praha 1987.
- [4] SCHENKOVÁ, Z., SCHENK, V., ZAHRADNÍK, J.: Čs. čas. fyz. 33 (1983), 433.
- [5] SCHENKOVÁ, Z., SCHENK, V.: *Věda a technika mládeži* 41 (1987), 15.
- [6] ZAHRADNÍK, J., MOCZO, P., HRON, F.: *Nat. Hazards* 10 (1994), 15.

Fyzika jako dobrodružství poznání

Současný pohled do mikrosvět

Jiří Formánek, Praha

Člověk od nepaměti pozoroval, co se kolem něho děje, snažil se — byť jen z pouhého pudu sebezáchovy — pochopit, jaké příčiny vyvolávají jaké následky. Zpočátku se mu to jistě příliš nedařilo, a tak většinu událostí přičítal na vrub rozmaru nadpřirozených bytostí nejrůznějšího druhu. Postupně však zjistí, že celá řada jevů se zákonitě opakuje. Tuto zkušenost začne využívat ve svůj prospěch, ale bohužel také začne vylepšovat

Prof. Ing. JIŘÍ FORMÁNEK, DrSc. (1936), Nukleární centrum MFF UK, 180 00 Praha 8, V Holešovičkách 2.

Článek reprodukuje v hrubých rysech přednášku pronesenou autorem na „Dnu otevřených dveří MFF UK“ dne 1. 11. 1994.

perspektivu svého sebezničení.¹⁾ Jistě je také fascinován krásou mnohých přírodních jevů — nádhera hvězdné oblohy ho natolik upoutává, že již v neuvěřitelně dávné minulosti postřehl celou řadu zákonitostí ve změnách poloh nebeských těles.

Léta plynou a člověk současně s tím, jak (tu více, tu méně vědomě) redukuje počet jevů přičítaných na vrub nadpřirozených sil, začíná *věřit*, že je *možno pochopit, proč* věci jsou takové, jaké jsou, a proč ta či ona příčina vyvolává takové nebo onaké následky. Pokouší se vysvětlit vše, co kolem sebe vidí, jako kombinaci několika (nemnoha) pralátek. Později spekuluje i o tom, proč jednotlivé děje probíhají tak a ne jinak. Tito dřevní *filozofové* a jejich následovníci mají velkou zásluhu na tom, že dnes již převážná většina z nás považuje téměř za samozřejmé, že svět a dění v něm jsou pochopitelné. Málokdo si uvědomuje, že se jedná o velice netriviální *předpoklad*.²⁾ Bez něj by ovšem přírodní vědy (a tedy ani fyzika) vzniknout nemohly. Přesto však zmíněné myslitele ještě za fyziky považovat nemůžeme. *Fyzikem* (nebo obecněji přírodovědcem) se stává *teprve* ten z nich, který si uvědomí, že svůj „model“ („světa“ a dění v něm), jakkoliv důmyslně vybudovaný, esteticky krásný a možná i logicky bezrozporný, musí konfrontovat se „skutečností“. Přesněji řečeno, vědcem se myslitel stává *teprve* tehdy, když začne ze svého modelu vyvozovat *vyvratitelné předpovědi* a je připraven pokorně přijmout ortel z rukou „experimentu“ (pozorování), i když by vyžadoval zavržení nejmilovanějšího dítko jeho intelektu. Bohužel ani dnes si ne všichni uvědomují, že i ten *sebekrásněji* či *hlubokomyslněji* znějící výrok nelze považovat za *vědecký*, pokud není (v principu) *vyvratitelný*.³⁾ Je ovšem pravdou, že dnes většina z nás *věří*, že přírodní zákony připouštějí takovou matematickou formulaci, která je esteticky krásná. Tento *předpoklad* se skutečně ukázal být velice inspirativní při formulaci nových ideí aspirujících na výklad „reality“. Ještě jednou však zdůrazněme, že i ten nejkrásnější a vnitřně zcela bezrozporný model můžeme považovat za fyzikální teorii *teprve* tehdy, když v jeho rámci dokážeme formulovat předpovědi, které lze konfrontovat se „skutečností“.

Od prvních spekulací dřevních filozofů uplynulo mnoho vody a bylo nasbíráno mnoho poznatků. Dnes již bezpočet experimentálních faktů mluví ve prospěch představy, že nepřeborné množství látek, které nás obklopují, všechny možné chemické děje mezi nimi probíhající a prakticky všechny jevy (s výjimkou gravitace, jaderných reakcí a radioaktivity), se kterými se v běžném životě (alespoň v „anorganickém světě“) setkáváme, lze pochopit na základě předpokladu o existenci (řádově stovky) jader a elektronu a existenci elektromagnetické interakce (samozřejmě chápaných na

¹⁾ Důmyslnější využívání prvních poznatků z mechaniky nalezneme stěží někde jinde než v oblasti zbraní a válečného „umění“. V tomto směru následující generace za našimi prapředky nijak nezaostaly.

²⁾ Nemýlím-li se, byl to A. Einstein, který se vyjádřil ve smyslu: „Nejzáhadnějším (nejnepochopitelnějším) je, že svět se zdá být pochopitelným.“

³⁾ Výroky „Existuje 12 druhů postmodernů, což jsou elementární částice, které s ničím neinteragují“, „Každou mikrosekundu vzniká 10^{24} nových Vesmírů, které náš Vesmír nijak neovlivňují“ a jim podobné mohou sice znít velice zajímavě, ale nemají co dělat ani v science fiction.

úrovni kvantové).⁴⁾ Přitom máme dobré důvody ani jádra neřadit mezi nejzákladnější kameny přírody. Víme totiž, že obrovské množství experimentálních faktů lze dobře vystihnout, považujeme-li jádra za „složená“ z protonů a neutronů navzájem vázaných silnou interakcí. Řadu let již také víme, že ani proton a neutron nelze považovat za bezstrukturní částice, ... Jaký je tedy *současný stav*?

Tab. 1. Elementární fermiony.

označení			náboj
leptony	ν_e	ν_μ	0
	e	μ	-1
kvarky	u	c	$\frac{2}{3}$
	d	s	$-\frac{1}{3}$

Odhlédneme-li od gravitace, potom naše dnešní představy o základních „stavebních kamenech“ přírody a interakcích mezi nimi vystihuje tzv. *Standardní model*. Ten se opírá o předpoklad existence elementárních částic shrnutých v tab. 1 (a jejich antičástic) doplněných ještě o tzv. kalibrační bosony γ , Z^0 , W^\pm , g a Higgsovy částice h .⁵⁾ Jejich dynamika je popisována *kvantovou chromodynamikou a GSW*⁶⁾ modelem *elektroslabých interakcí*. V obou případech se jedná o tzv. kalibrační kvantové teorie pole. S těmito velice elegantními teoriemi se mají naši studenti fyziky možnost blíže seznámit během svého studia. Zde se omezme na pouhé konstatování, že v jejich rámci jsou silné, resp. elektromagnetické, resp. slabé interakce popisovány jako důsledek výměny gluonů g , resp. fotonů γ , resp. vektorových bosonů Z^0 , W^\pm .

Jak jsme výše opakovaně zdůrazňovali, k tomu, abychom nesklouzli z fyziky do metafyziky, byla a je nezbytná experimentální konfrontace předpovědí z našich představ plynoucích. Bohužel doby, kdy k ověřování základních fyzikálních zákonů stačilo sledovat předměty padající z nakloněné věže v Pise, jsou v nenávratnu. Postupně bylo nezbytné studovat struktury a procesy na menších a menších vzdálenostech. Původně neozbrojenému oku přichází na pomoc lupa, později optický mikroskop. Rozlišovací schopnosti srovnatelné s mřížkovou vzdáleností v krystalech ($\sim 10^{-8}$ cm) však bylo možno docílit teprve s využitím Roentgenova záření. Později na scénu vstupuje *elektronový mikroskop*.

⁴⁾ To pochopitelně neznamená, že bychom dnes dokázali všechny tyto struktury a procesy kvantitativně předpovědět (vypočítat), máme však dobré důvody předpokládat, že nám v tom brání pouze *technické* obtížnosti příslušných úloh — neznáme jediný případ, který by svědčil o opaku.

⁵⁾ Higgsovým částicím připadá ve standardním modelu velice specifická role. Otázka jejich existence či neexistence má proto naprosto zásadní charakter. Zdá se čím dál tím zřejmější, že s využitím stávajících experimentálních zařízení ji nebude možno zodpovědět. Nutnost jejího řešení proto patří k hlavním motivům konstrukce colliderů příští generace.

Existenci všech ostatních výše zmíněných částic lze považovat za prokázanou.

⁶⁾ Glashow-Salam-Weinberg.

V posledním případě již hrají podstatnou úlohu kvantové jevy. Pro náš účel zde ovšem postačí, když o celé kvantové teorii víme alespoň tolik, že z ní plynou Heisenbergovy relace neurčitosti. Z nich totiž okamžitě vidíme, že pomocí testovací částice můžeme získat informaci o strukturách s prostorovým rozlišením Δx jedině tehdy, když velikost její hybnosti dosahuje alespoň hodnoty

$$q_0 \simeq \frac{\hbar}{\Delta x},$$

kde \hbar je Planckova konstanta.

K tomu, abychom si dokázali udělat kvantitativní představu o mezích rozlišovacích schopností jednotlivých zařízení, stačí, když si vedle klidových energií protonů, resp. elektronů⁷⁾

$$M_p c^2 \simeq 1 \text{ GeV}, \quad M_e c^2 \simeq 0,5 \text{ MeV}$$

zapamatujeme ještě hodnotu

$$\hbar c \simeq 200 \text{ MeV fm.}$$

Na základě známého vztahu mezi hybností \vec{q} a kinetickou energií E částice s klidovou energií $M c^2$

$$|\vec{q}| = \left[\left(\frac{E}{c} \right)^2 + 2ME \right]^{1/2} \simeq \begin{cases} E/c & \text{pro } E \gg M c^2, \\ (2ME)^{1/2} & \text{pro } E \ll M c^2, \end{cases}$$

pak již snadno pochopíme nejen to, proč rozlišovací schopnost optického mikroskopu vzroste, použijeme-li světlo kratší vlnové délky⁸⁾ 9), a proč Roentgenovo záření umožňuje studovat uspořádání krystalových mříží, ale i to, proč rozlišovací schopnost roentgenovských fotonů je horší než elektronů s toutéž (kinetickou) energií.

Uvědomíme-li si, že α -částice pocházející z rozpadu těžkých jader mají energii několika MeV, stane se nám zřejmým, proč Rutherford s jejich pomocí mohl zjistit, že v atomu existuje jádro o „poloměru“

$$\langle r \rangle_A < 30 \text{ fm.}$$

Další zvyšování rozlišovací schopnosti bylo umožněno úspěšnou výstavbou urychlovačů poskytujících částice se stále vyšší a vyšší energií. Tak v padesátých letech bylo možno na základě pružného rozptylu 1 GeV-ových elektronů změřit „poloměr“ protonu

$$\langle r \rangle_p \simeq 0,8 \text{ fm.}$$

Studium nepružných srážek 20 GeV-ových elektronů s protony poskytlo na přelomu 60. a 70. let evidenci o existenci „partonů“, které dnes identifikujeme s kvarky... Jak daleko v tomto směru můžeme ještě jít?

⁷⁾ c je rychlost světla, $\text{GeV} = 10^3 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$, $\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$

⁸⁾ Připomeňme, že monochromatickému světlu s vlnovou délkou λ odpovídají fotony s energií $E = 2\pi\hbar c/\lambda$.

⁹⁾ To věděli i naši pradědové, kteří k tomuto závěru dospěli v rámci klasické teorie.

Urychlovače, které jsou nyní v provozu, poskytují protony urychlené až na 1 TeV (TEVATRON — FNAL, USA)¹⁰⁾ a elektrony urychlené až na 50 GeV (LEP — CERN, Ženeva). Na „kruhových“ urychlovačích dnes technicky realizovatelných by bylo možno dosáhnout energie protonů okolo 20 TeV — v případě elektronů je tato energie ~ 100 GeV.

Ve výše uvedených odhadech rozlišovací schopnosti je třeba pod energií E rozumět energii testovací částice v *klidové* soustavě testovaného objektu. V klasickém uspořádání byl testovaný objekt (prakticky) v klidu v laboratorní soustavě. Nesrovnatelně vyšších hodnot energie E je ovšem možno dosáhnout, jestliže se testovaný objekt rychle pohybuje proti bombardujícímu svazku testovacích částic. Tento triviální kinematický fakt byl prakticky využitelný teprve tehdy, až byla problematika urychlování, optiky a kontroly velice intenzivních svazků zvládnuta natolik, že bylo možno docílit srážek mezi částicemi z protiběžných svazků urychlených částic. Tím nastala éra experimentů na vstřícných svazcích — éra *colliderů*.

Kvantitativní představu o tom, čeho bylo tímto způsobem dosaženo, si snadno dokáže učinit každý, kdo se seznámil se základy speciální teorie relativity alespoň natolik, aby věděl, jak spolu souvisejí hodnoty energie a hybnosti částice v různých inerciálních soustavách. Pro ilustraci uveďme alespoň jeden konkrétní příklad: Dokážeme-li realizovat výše naznačené srážky mezi 30 GeV-ovými elektrony a 820 GeV-ovými protony, máme k dispozici nástroj ke studiu struktury protonů, jehož rozlišovací schopnost může (v principu)¹¹⁾ dosáhnout hodnoty

$$\Delta x \simeq 10^{-17} \text{ cm} = 10^{-4} \text{ fm},$$

což je přibližně desetitisícina rozměru protonu! Abychom dosáhli téže rozlišovací schopnosti v případě pevného protonového terče, museli bychom mít k dispozici elektrony urychlené na 52 TeV, což je v dohledné budoucnosti naprosto vyloučeno.¹²⁾ Tyto srážky je však dnes možno realizovat na collideru HERA¹³⁾, vybudovaném v období 1984–1990 v DESY Hamburg.

Jak takové zařízení vypadá? Potom, co elektrony (případně pozitrony) a protony projdou celou řadou předurychlovačů, dostanou se do samotného prstence HERA. Zde svazky elektronů a protonů obíhají v separátních trubících, které se prolínají pouze na čtyřech „interakčních místech“.

Na leteckém snímku (obr. 1) okolí DESY je vyznačen průběh téměř 6,4 km dlouhého prstence HERA, včetně interakčních míst W , S , O , N .¹⁴⁾ Samotné prstence se nacházejí v tunelu 10–25 m pod povrchem země.

¹⁰⁾ TeV = 10^3 GeV.

¹¹⁾ Prakticky dosažitelná rozlišovací schopnost je o řád horší.

¹²⁾ Připomeňme, že „kruhové“ urychlovače elektronů přesahující 100 GeV se zřejmě nikdy stavět nebudou. Nejambicióznější projekty nové generace (lineárních) urychlovačů elektronů směřují do oblasti energií 0,5–1 TeV. Urychlovače (elektronů) s ještě vyššími energiemi prozatím spadají (a zřejmě ještě dlouho spadat budou) výhradně do oblasti science fiction.

¹³⁾ Hadron–Elektron–Ring–Anlage.

¹⁴⁾ Písmena odpovídají světovým stranám. V popředí snímku je naznačeno také umístění prstence PETRA, což je poslední stupeň kaskády předurychlovačů.

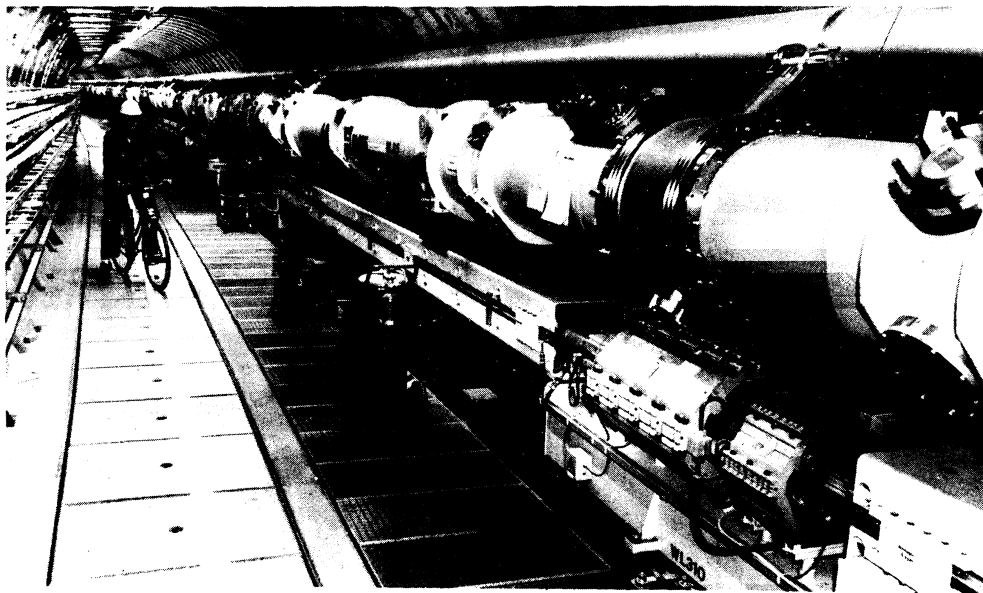


Öbr. 1. Letecký snímek okolí DESY.

Následující fotografie (obr. 2) poskytuje pohled do tohoto tunelu. Urychlovací prstence jsou vpravo. Dole obíhají elektrony, nad nimi protony.¹⁵⁾ V obou případech jsou částice rozděleny do 210 „shluků“. Přitom každý elektronový shluk představuje váleček o základně $280\ \mu\text{m} \times 37\ \mu\text{m}$ a délce 0,83 cm, tvořený $3,65 \times 10^{10}$ částicemi. U protonů jde o 10^{11} částic ve válci 8,5 cm dlouhém se základnou $265\ \mu\text{m} \times 84\ \mu\text{m}$. Elektrony na dráze udržuje 396 dipólových magnetů (každý o délce 9,185 m) vytvářejících pole 0,2745 T, doplněných 580 kvadrupólovými magnety, ... Protony na dráze udržuje 416 supravodivých dipólových magnetů (každý o délce 8,82 m), vytvářejících pole 4,65 T, doplněných 280 supravodivými 1,8 m dlouhými kvadrupólovými magnety, ... V chladícím systému supravodivých magnetů cirkuluje 13 tun kapalného He!

Vzdálenost mezi jednotlivými shluky částic je necelých 30 m. Vzhledem k tomu, že se pohybují prakticky rychlostí světla, snadno zjistíme, že k setkání elektronů s protony dochází v interakční oblasti každých 96 ns. Při každé srážce elektronu s protonem při těchto energiích obvykle dojde k produkci několika desítek částic. Již z uvedeného by mělo být zřejmé, že k tomu, aby bylo možno skutečně vytěžit informace, které potenciálně poskytuje HERA, je nezbytné disponovat velice komplexním detekčním systémem. Takové byly vybudovány na HERA dva. Jeden z nich je umístěn v interakč-

¹⁵⁾ V poslední trubici nahoře cirkuluje tekuté helium.



Obr. 2. Pohled do tunelu HERA.

ním místě N a dostal název H1.¹⁶⁾ Schematicky je znázorněn na obr. 3. (Trubice svazku prochází osou detektoru. Protony (elektrony) vstupují do detektoru zezadu (zpředu). Ke srážkám dochází v místě označeném křížkem v centrální části detektoru.) Je nejen úctyhodně mohutný,¹⁷⁾ ale i úctyhodně výkonný (jednotlivé jeho elementy poskytují téměř 3 Mb informace každých 96 ns!). Stavěl se 5 let společným úsilím několika set fyziků z desítek institucí celého světa.¹⁸⁾

O počáteční fázi kompletace detektoru si můžeme učinit představu z obr. 4, kde snadno rozpoznáme supravodivý solenoid [6]¹⁹⁾ a levou část rozevřeného ocelového pláště [10].

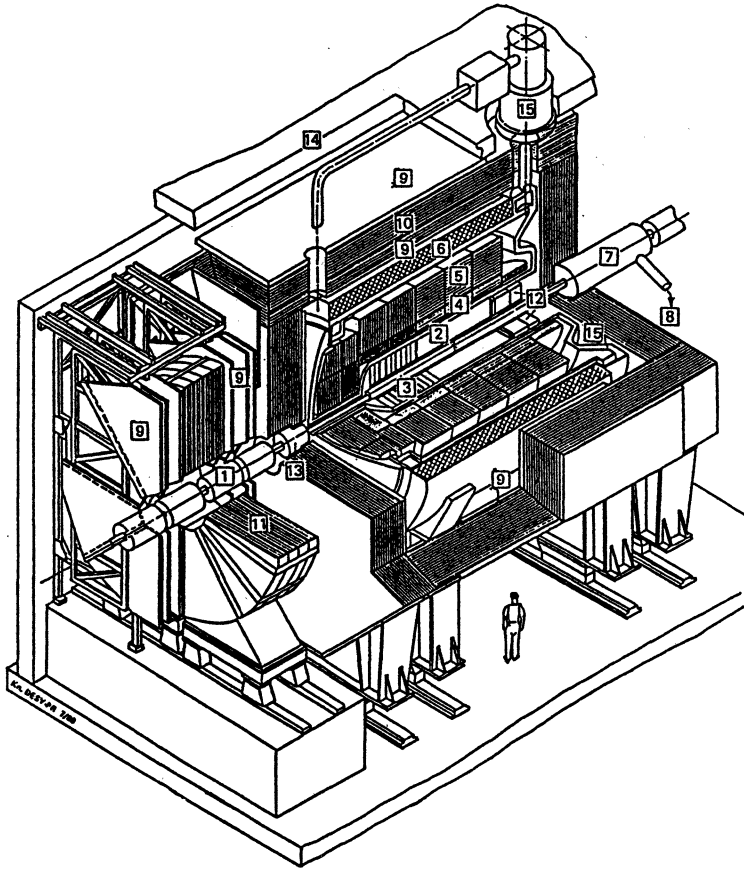
Další fotografie (obr. 5) zachycuje již pokročilejší stadium kompletace. Zcela vpravo vidíme dvoupodlažní „domek elektroniky“. Zleva se ho dotýká pravé křídlo rozevřeného ocelového pláště [10]. Za ním je pak vidět oblouk horní části supravodivého solenoidu [6], do kterého je již umístěn (otevřený) argonový kryostat [15], z něhož vystupuje montážní tunel, kterým jsou do kryostatu transportovány jednotlivé moduly kalorimetru [4], [5]. Jeden z těchto modulů (již téměř vztyčený do svislé polohy) vidíme před tunelem. Na následujícím snímku (obr. 6) je již tento modul umisťován uvnitř kryostatu [15].

¹⁶⁾ Druhý, nacházející se v místě S , se nazývá ZEUS.

¹⁷⁾ Rozměry $12\text{ m} \times 10\text{ m} \times 15\text{ m}$, hmotnost 2800 tun, 60 m^3 tekutého argonu, supravodivý solenoid o průměru 5,2 m, dlouhý 5,75 m, ~ 270 tisíc elektronických kanálů, ...

¹⁸⁾ Prakticky od samého počátku se na programu H1 podílejí i pracovníci naší fakulty. V současnosti na programu H1 spolupracuje více než 300 fyziků z 36 institucí 12 států.

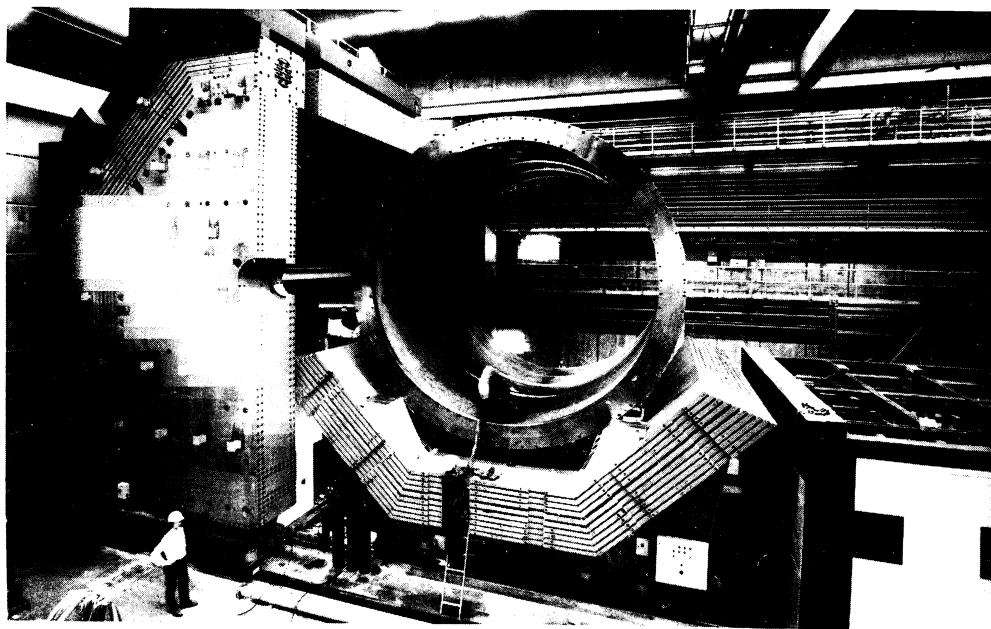
¹⁹⁾ Čísla v hranatých závorkách odpovídají číslům na obr. 3.



Obr. 3. Detektor H1.

- | | |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| [1] Trubice svazku a magnet svazku | [8] Heliová kryogenika |
| [2] Centrální dráhové komory | [9] Mionové komory |
| [3] Přední dráhové komory
a moduly přechodového záření | [10] Ocelový plášť prokládaný
streamerovými trubicemi |
| [4] Argonový elektromagnetický
kalorimetr | [11] Mionový toroidální magnet |
| [5] Argonový hadronový kalorimetr | [12] Zadní elektromagnetický kalorimetr |
| [6] Supravodivý solenoid (1,2 T) | [13] Přední kalorimetr |
| [7] Kompenzační magnet | [14] Betonové stínění |
| | [15] Argonový kryostat |

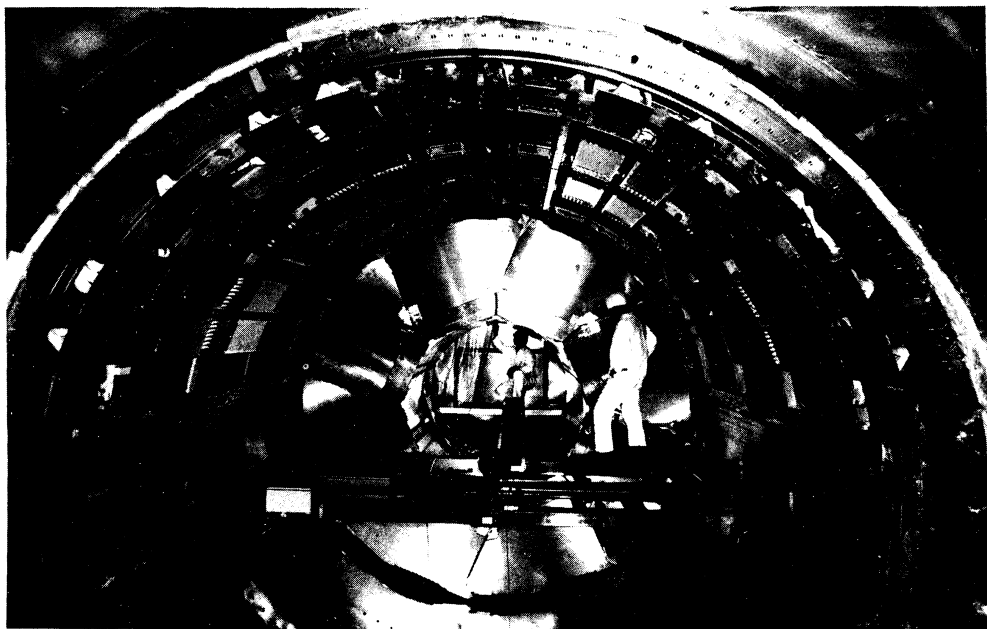
Detektor byl zkompletován v hale přiléhající k interakčnímu místu *N*. Poslední snímek (obr. 7) zachycuje jeho přemísťování z parkovací polohy „na svazek“: Zcela vzadu vlevo vidíme levé křídlo otevřeného ocelového pláště [10], vpravo od něho ze stínících bloků vystupuje kompenzační magnet [7], v jehož středu vidíme trubici, kterou do detektoru budou vstupovat protony. V transportované části uvnitř supravodivého solenoidu [6] snadno rozpoznáme čelo argonového kryostatu [15] (ve kterém je již uzavřen kalorimetr [4], [5]), jehož středem bude do detektoru vstupovat elektronový svazek.



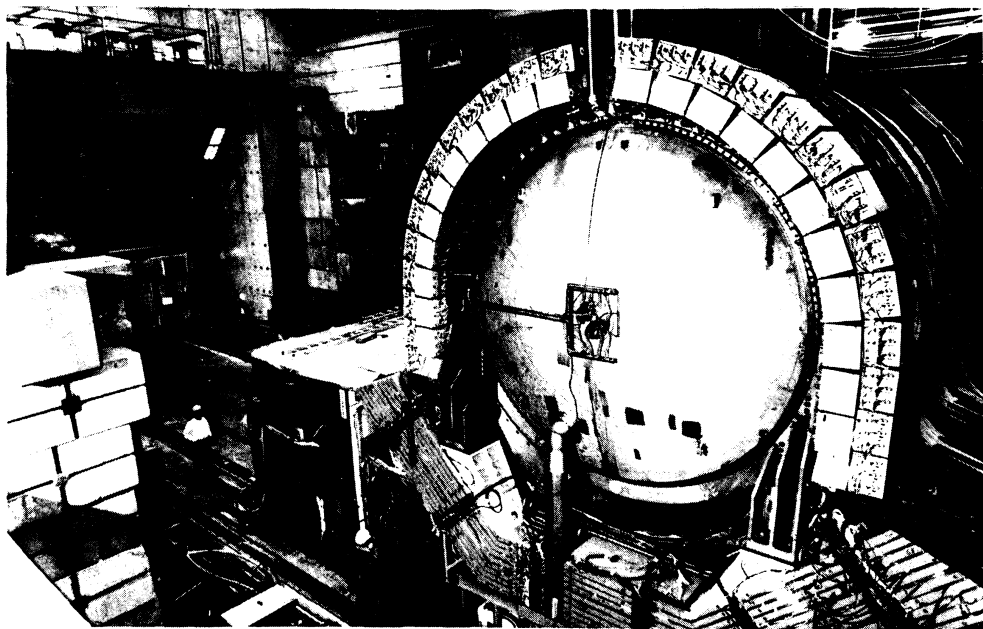
Obr. 4. Počátek kompletace detektoru H1.



Obr. 5. Pokračování kompletace detektoru H1.



Obr. 6. Modul argonového kalorimetru uvnitř kryostatu.



Obr. 7. Přesun detektoru z parkovací polohy na svazek.

Poslední snímek byl pořízen téměř před třemi lety. Od poloviny r. 1992 již H1-detektor nabírá data o nejrůznějších procesech probíhajících při srážkách vysokoenergetických elektronů s protony. Od poloviny r. 1992 tak umožňuje nahlédnout do nové, dříve nedostupné oblasti fyziky. Je dobře si uvědomit, že tohoto cíle by nebylo možné dosáhnout bez koordinovaného úsilí odborníků z mnoha oblastí — rychlou elektronikou počínaje a nejrůznějšími oblastmi speciálních technologií konče. Vedle toho obdobný objem vysoce kvalifikované práce bylo nutno vynaložit v oblasti softwaru, a to jak k zajištění chodu a kontroly detektoru, tak pro sběr, simulaci, zpracování a analýzu dat. Tyto práce ani zdaleka nekončí uvedením detektoru do provozu.

To, co jsme zde ve stručnosti uvedli o experimentu H1, by bylo možno bez velkých změn zopakovat o libovolném experimentu na kterémkoliv collideru poslední generace.²⁰⁾

Příroda svá tajemství nevydává levně. Úspěch postupného dešifrování jejích základních zákonů je nemyslitelný bez korelovaného úsilí a vzájemného ovlivňování teorie a experimentu. Experimentální data představují výzvu pro teorii, která by je měla interpretovat. Teoretické předpovědi pak nasměrovávají experimenty do oblastí, kde lze očekávat nejzávažnější informace. Být účastníkem tohoto dění znamená prožívat soudobé dobrodružství poznání, dobrodružství inspirované lidskou touhou nahlédnout do mikrosvěta a porozumět mu. Aktivní účast MFF UK nejen ve výše zmíněném programu H1, ale i v programu DELPHI realizovaném na LEP, jakož i v přípravě experimentů na LHC doširoka otvírá cestu za tímto dobrodružstvím i každému studentovi a doktorandovi naší fakulty.

Poděkování. Všechny obrázky v tomto článku otištěné mi byly poskytnuty DESY Hamburg. Rád bych touto cestou znovu poděkoval za laskavé svolení k jejich využití.

²⁰⁾ Vedle zmíněného collideru HERA se v současnosti jedná zejména o LEP (CERN, Ženeva), kde dochází ke srážkám elektronů s pozitrony, z nichž každý má energii ~ 50 GeV (později má tato energie dosáhnout ~ 100 GeV) a TEVATRON (v FNAL, USA), kde se sráží antiprotony s protony, z nichž každý má energii až 1 TeV. V r. 2008 by měl být v CERNu uveden do provozu LHC, který má umožnit srážky protonů s protony, z nichž každý má energii 7 TeV.