

Rupert Leitner; Michal Suk

Velké detekční systémy ve fyzice částic

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 42 (1997), No. 6, 313--324

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138098>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1997

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>

# Velké detekční systémy ve fyzice částic

*Rupert Leitner a Michal Suk, Praha*

## Úvod

Současná fyzika částic se především orientuje na doplnění dosud nezměřených parametrů standardního modelu, který spolu s kvantovou chromodynamikou tvoří teoretický rámec vysvětlující pozorované jevy, a na zkoumání jevů mimo standardní model. Protože jde o hledání těžkých částic (s klidovými energiemi až do stovek GeV) a o strukturu v malých rozměrech (řádu  $10^{-18}$  m), je nutno dosáhnout v místě interakce vysoké energie (řádu TeV). Proto již bylo postaveno několik obřích urychlovačů vstříčných svazků, např. TEVATRON ve Fermiho národní laboratoři v USA (srážky proton–antiproton při celkové energii  $E_{\text{cm}} = 1,8$  TeV), HERA v DESY v Hamburku (srážky elektron nebo positron–proton,  $E_p = 820$  GeV,  $E_e = 30$  GeV), LEP v Evropském středisku pro fyziku částic CERN (srážky elektron–positron při  $E_{\text{cm}} = 180$  GeV) a v téže laboratoři se staví urychlovač LHC (srážky proton–proton při  $E_{\text{cm}} = 14$  TeV). V urychlovačích se v několika místech vstříčné svazky kříží (pod velmi malými úhly), v těchto místech dochází k interakcím částic svazků a tam jsou také umístěny detektory částic vzniklých v interakcích. Tyto detektory jsou obvykle konstruovány tak, aby zaregistrovaly a změřily pokud možno všechny částice vzniklé při srážce. Vzhledem k různému způsobu registrace rozličných částic se detektor skládá z řady subdetektorů, které měří určité druhy částic. Proto mívá detektor „cibulovou“ strukturu — skládá se z několika vrstev různých subdetektorů. Důležitým požadavkem je hermetičnost detektoru — musí co nejtěsněji obklopotvat místo srážky, aby co nejméně částic uniklo. Detektor musí mít též velkou granularitu — zrnitost, aby bylo možno měřit s velkým prostorovým rozlišením. Zde je třeba volit kompromis, neboť velké množství kanálů (od jednotlivých elementů subdetektorů) znamená velké požadavky na elektroniku a tedy také na cenu zařízení.

Pracovníci Univerzity Karlovy, Českého vysokého učení technického a Akademie věd České republiky se podílejí na dvou velkých projektech realizovaných v CERN. Projekt DELPHI na urychlovači LEP běží již 9 let a byly zde získány významné fyzikální výsledky. V projektu ATLAS na budovaném urychlovači LHC se v současné době staví aparatura, provádějí se zkušební měření a kalibrace a celý projekt se připravuje ke spuštění v roce 2005.

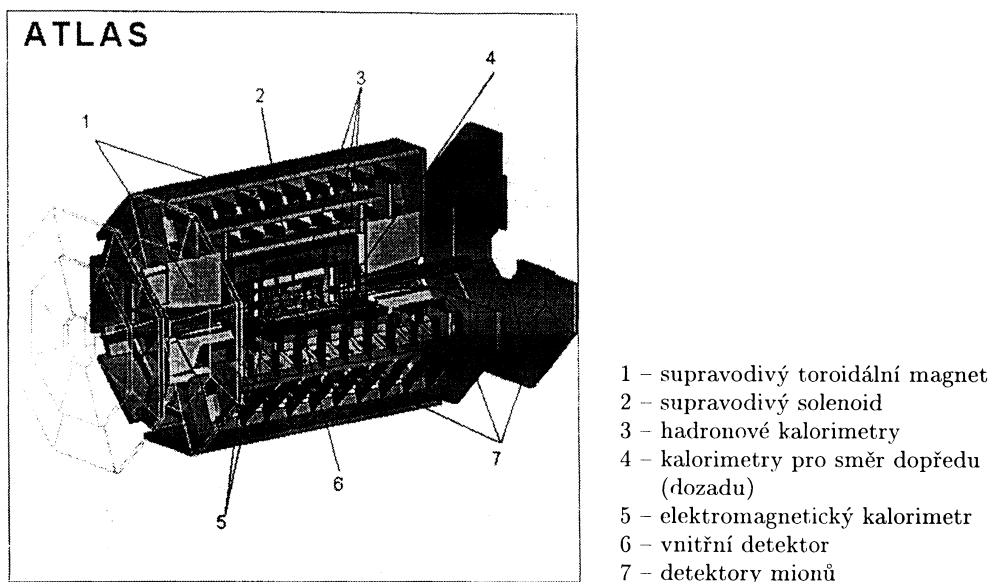
---

RNDr. RUPERT LEITNER, CSc. (1958), prof. RNDr. MICHAL SUK, DrSc. (1933), Nukleární centrum MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

## Detektor ATLAS

Detektor ATLAS [1] (A Toroidal LHC ApparatuS = toroidální zařízení na urychlovači LHC) (obr. 1) představuje soustavu subdetektorů schopných zjišťovat a měřit údaje o částicích produkovaných v interakcích protonů s protony na budovaném urychlovači vstřícných svazků LHC [2] (Large Hadron Collider) v Evropském středisku pro fyziku částic CERN, s celkovou energií v těžištové soustavě 14 TeV, což je asi 10krát více než na největším současném urychlovači TEVATRON a s asi 100krát větší frekvencí srážek, než dosahuje TEVATRON. Tyto parametry urychlovače i detektoru ATLAS otevírají novou oblast fyzikálního výzkumu, umožní získat nové údaje v rámci současného teoretického popisu a extrapolace a odhady o tom, co může být za tímto rámcem. V současné době je standardní model uznávaným teoretickým popisem základních částic hmoty a jejich interakcí. Řadu dosud neprokázaných částic a procesů mohou objevit experimenty na detektoru ATLAS:

- mechanismus přiřazení hmotnosti částicím (Higgsův boson),
- změření dalších vlastností top kvarku [3],
- zjištění původu asymetrie hmota–antihmota, narušení CP invariantnosti v procesech, v nichž se produkuje kvark b,
- měření vnitřní struktury částic považovaných za elementární,
- kromě toho bude možno pozorovat a měřit nové, dosud neobjevené procesy — např. produkci dosud nepozorovaných supersymetrických částic, velmi těžkých partnerů intermediálních bosonů W a Z a další.



Obr. 1. Detektor ATLAS.

Detektor ATLAS je konstruován tak, aby umožňoval co nejpřesnější měření

- nabitých leptonů,
- fotonů,
- neinteragujících částic — neutrin měřením chybějící energie,
- hadronových jetů (trysek),
- kvarků b.

Kromě toho ATLAS umožní úplnou rekonstrukci některých případů interakcí.

Základní schéma detektoru ATLAS odpovídá konstrukci velkých detektorů na urychlovačích vstřícných svazků. Skládá se z několika základních subdetektorů. Jsou to:

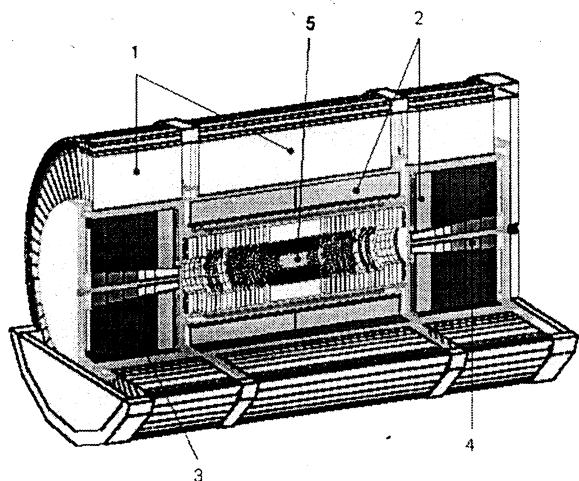
- *Vnitřní detektor*, v němž se s velkou přesností měří souřadnice drah nabitých částic. Detektor je v poli supravodivého solenoidu.
- *Kalorimetry*, které tvoří elektromagnetický kalorimetr určující energii elektromagnetické složky interakce (elektronů a kvant  $\gamma$ ) a hadronový kalorimetr, který měří energii hadronů (silně interagujících částic).
- *Mionový spektrometr*, kombinovaný se supravodivým toroidálním magnetem, v němž se s velkou přesností měří hybnosti a souřadnice mionů.

Detektor je konstruován tak, aby byl maximálně hermetický, pokrývá prostorový úhel až do  $9^\circ$  ke směru primárního svazku. Během experimentů bude detektor zdrojem velkého toku informací. Redukci množství informací a zajištění možnosti dalšího zpracování provádí systém výběru — TRIGGER, který se skládá z několika úrovní využívajících informace z různých částí detektoru. Systém sběru dat — DAQ sbírá údaje ze subdetektorů a ukládá je k dalšímu zpracování a analýze. OBJEKTIVĚ ORIENTOVANÝ SOFTWARE bude provádět rekonstrukci změřených interakcí a s jeho pomocí se získají fyzikální výsledky experimentů. Bude také zajišťovat simulaci detektoru, aby bylo možno provádět korekce na malé defekty detektoru a na určování úrovně pozadí.

## Jednotlivé části detektoru ATLAS

### VNITŘNÍ DETEKTOR

Je umístěn co nejbližší svazku a místu interakce, má tvar válce (svazek prochází osou válce) s přední a zadní „zátkou“ a uvnitř je magnetické pole s indukcí 2 T buzené supravodivým solenoidem. Je určen k měření směru pohybu a hybností nabitých částic vyslaných z místa srážky urychlených svazků (obr. 2). Hlavním cílem je změření a rekonstrukce nových částic s vysokou hmotností (např. Higgsova bosonu) a pozorování krátkožijících částic (částic obsahujících kvark b), které budou vznikat při rozpadech předpověděných Higgsových bosonů, supersymetrických částic a případně dalších dosud nepozorovaných částic. K tomu je třeba velké prostorové rozlišení, dobré



- 1 – hadronový kalorimetr Tilecal
- 2 – elektromagnetický kalorimetr accordion
- 3 – kalorimetry v zátce
- 4 – kalorimetry pro směr dopředu (dozadu)
- 5 – vnitřní detektor

Obr. 2. Uspořádání kalorimetrů a vnitřního detektoru.

impulsové rozlišení a malá hmotnost detektoru, aby nebyla příliš ovlivněna měření v dalších detektorech.

Skládá se z několika vrstev tenkých křemíkových polovodičových detektorů: „Pixelových (obdélníkových) detektorů“, kde citlivou část představují plošky rozměrů  $50 \times 300 \mu\text{m}^2$ , jejich prostorové rozlišení dosahuje  $10 \mu\text{m}$ , resp.  $50 \mu\text{m}$  ve směrech na sebe kolmých. Údaje sbírá 140 milionů kanálů. Tyto detektory jsou umístěny co nejbližší k místu srážky. Dále následují 4 vrstvy páskových křemíkových polovodičových detektorů s mezerami mezi pásy  $80 \mu\text{m}$ . Jejich prostorové rozlišení je  $20 \mu\text{m}$ , resp.  $700 \mu\text{m}$  ve směrech na sebe kolmých. Poslední vrstvu vnitřního detektoru tvoří soustava detektorů přechodového záření, které kromě měření souřadnic míst průchodu nabitě částice mohou odlišit elektrony od ostatních částic. Soustava uvedených subdetektorů je schopna změřit vzdálenost místa rozpadu částice obsahující kvark b s přesností řádu desítek mikrometrů. Impulsové rozlišení pro částice s hybností  $pc = 500 \text{ GeV}$  je asi 20 %.

Vnitřní detektor je samozřejmě technicky nesmírně náročný systém. Kromě kvality jednotlivých typů detektorů je nutno zajistit přesnou montáž, odvod velkého množství kabelů, chlazení detektorů, výběr radiačně odolných materiálů, použití spolehlivých a dlouhodobě fungujících elektronických obvodů apod.

## KALORIMETRY

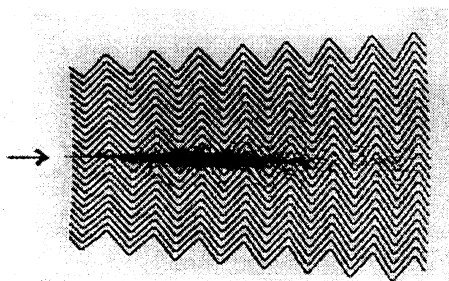
Jak už bylo uvedeno, součástí detektoru ATLAS je elektromagnetický a hadronový kalorimetr (obr. 2).

Elektromagnetický kalorimetr je tvořen olověnými absorbátory (tloušťky 1,5 mm) potaženými tenkým plechem z nerezavějící oceli, mezi absorbátory jsou vloženy odečítací elektrody a vše je v kryostatu naplněném kapalným argonem. Elektrody a ab-

sorbátory jsou tvarovány jako měch tahací harmoniky, proto se kalorimetr nazývá „accordion“. Elektrony a fotony s vysokou energií vytvářejí v olovu kaskádní spršky, v nichž se počet částic zvětšuje tvořením párů elektron–pozitron fotony a vysláním brzdného záření elektrony a pozitrony. Takto vzniklé nabitě částice ionizují kapalný argon a vzniklé elektrony a ionty vytvářejí na elektrodách signál úměrný ionizačním účinkům nabitých částic. Celý rozvoj kaskádní spršky se zastaví, jakmile energie poklesne pod kritickou hodnotu (v olovu 6,9 MeV) a převládnou ionizační ztráty u nabitých částic a Comptonův rozptyl a fotoefekt u fotonů. Z rozvoje spršky lze stanovit energii částice, která spršku vyvolala (obr. 3). Důležitou charakteristikou kalorimetrů je energetické rozlišení určující přesnost měření energie  $\sigma(E)/E$  definované vztahem platným pro všechny druhy kalorimetrů

$$\sigma(E)/E = A/E^{1/2} \oplus B/E \oplus C, \quad \text{energie } E \text{ je měřena v GeV.} \quad (1)$$

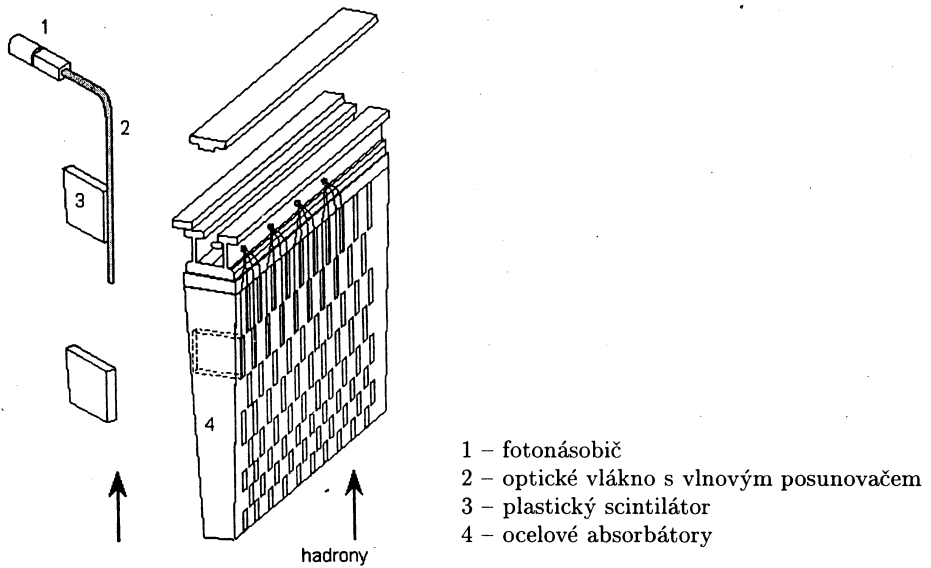
Pro elektromagnetický kalorimetr „accordion“ mají konstanty hodnoty:  $A \sim 0,1 (\text{GeV})^{1/2}$ ,  $B \sim 0,0035 \text{ GeV}$ ,  $C \sim 0,007$ . Ze vztahu (1) je vidět, že energetické rozlišení kalorimetrů se s rostoucí energií zlepšuje.



Obr. 3. Válcová část elektromagnetického kalorimetru. Accordion se simulovanou elektronovou–fotonovou kaskádní sprškou.

V elektromagnetickém kalorimetru bude možno z údajů o měření energie a směru pohybu elektronů a fotonů hledat a měřit rozpady Higgsova bosonu  $H \rightarrow \gamma\gamma$  (fotony),  $H \rightarrow ZZ$  (bosony  $Z^0$ ),  $Z \rightarrow e^+e^-$ , dále bude možno získat informace o částicích, v jejichž rozpadových produktech jsou fotony, elektrony a mesony  $\pi^0$  (rychle se rozpadající na dva fotony).

Hadronový kalorimetr je též typu heterogenního, skládá se z ocelových absorpčních desek tloušťky 4 mm, které se střídají s plastickými scintilátory tloušťky 3 mm (obr. 4). Světelný signál ze scintilátorů se pomocí optických vláken s vlnovými posunovači vede na fotonásobiče, které přeměňují světelné signály na elektrické. Vlnové posunovače mění modrofialové světlo vysílané scintilátory na žlutozelené, na které je fotokatoda fotonásobiče nejcitlivější, a jsou též nutné z důvodu geometrie přenosu signálu. Podobně jako v elektromagnetickém kalorimetru dochází k elektromagnetickým interakcím fotonů, elektronů a pozitronů, v hadronovém kalorimetru interagují hadrony, jejichž energie se měří, silnými interakcemi převážně v oceli. Produkty těchto interakcí — další hadrony vytvořené v procesu mnohonásobné produkce částic — jsou registrovány scintilátory. Z průběhu rozvoje silných interakcí v kalorimetru lze určit energii částice



Obr. 4. Schéma modulu hadronového kalorimetru Tilecal.

(hadronu), která do kalorimetru vstoupila. Zatímco střední volná dráha pro interakci fotonu nebo elektronu (positronu) v elektromagnetickém kalorimetru Accordion je  $X_0 = 5,6$  mm, je střední volná dráha pro jadernou interakci v oceli  $\lambda = 170$  mm. Aby byl v kalorimetru pohlcen proton s energií 100 GeV, musí být jeho hloubka přibližně  $7\lambda$ , zatímco pro elektromagnetický kalorimetr je třeba k pohlcení fotonu s energií 100 GeV hloubky asi  $25X_0$ , což je méně než hloubka hadronového kalorimetru. Vzhledem ke složitosti procesu mnohonásobné produkce částic, nezaregistrování některých neutrálních částic a energie evaporace jádra jsou údaje z hadronových kalorimetrů zatíženy většími fluktuacemi, což se projeví i v horším energetickém rozlišení. Hadronový válcový kalorimetr detektoru ATLAS se označuje podle scintilačních destiček (= tile) „Tilecal“. Neobvyklá je orientace scintilátorů v rovinách kolmých na směr primárních, srážejících se protonů. Energetické rozlišení pro hadronový kalorimetr Tilecal, před nímž je umístěn elektromagnetický kalorimetr Accordion, je dáno vztahem (1) s konstantami  $A \sim 0,50$  (GeV) $^{1/2}$ ,  $C \sim 0,03$ . Kalorimetr Tilecal má tvar válce s vnějším poloměrem 4,23 m, vnitřním 2,28 m, délkou centrální části 5,64 m a dvou postranních částí délky 2,88 m, celková hmotnost je 2300 tun. Je složen ze 64 modulů. Moduly jsou rozděleny na jednotlivé bloky, z nichž jsou snímány informace, jejichž celkový počet je 10 000.

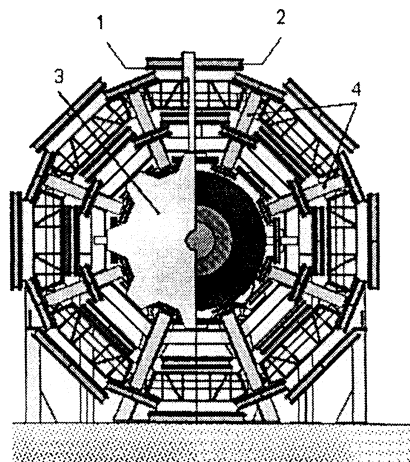
Hlavním úkolem hadronového kalorimetru je měření energie a směru pohybu jetů — trysek částic vzniklých hadronizací kvarků a měření „chybějící příčné energie“, což znamená, že v uvedeném směru byla emitována neutrální částice, nejčastěji neutrino. Mimo to kalorimetr může registrovat i jednotlivé částice.

Kromě popsanych válcových kalorimetrů jsou v systému ATLAS ještě kalorimetry pokrývající přední a zadní „zátky“ detektoru. Zde jsou jednak kalorimetry v zátkách — elektromagnetický i hadronový heterogenní s náplní kapalného argonu, jednak

kalorimetry pro oblast blízko urychlovací trubice (dopředu a dozadu), též s náplní kapalného argonu. Tyto kalorimetry jsou velmi silně radiačně zatíženy — prochází jimi velký tok částic.

## MIONOVÝ SPEKTROMETR

Pro identifikaci a měření hybnosti mionů slouží další vrstva detektoru ATLAS. Skládá se z toroidálního magnetu a několika vrstev mionových komor (obr. 5). Je umístěn nejdále od místa interakce, neboť miony patřící do skupiny leptonů interagují pouze slabě a elektromagneticky (převážně ionizačními ztrátami energie, které jsou malé), projdou vnitřním detektorem a oběma kalorimetry, zatímco elektrony, pozitrony a fotony jsou pohlceny v elektromagnetickém kalorimetru a hadrony v hadronovém kalorimetru.



- 1 – spouštěcí komory
- 2 – komory měřící souřadnice drah mionů
- 3 – čelo toroidu
- 4 – cívky válcové části toroidu

Obr. 5. Mionový spektrometr (pohled ve směru svazků).

Magnetický systém je tvořen válcovou částí toroidu se supravodivými vodiči (8 cívek délky 25 m a šířky 5 m) a dvěma čely (8 cívek délky 5 m, poloměr 11 m). Ve válcové části je maximální magnetická indukce 4 T, v čelech 4,7 T. Hmotnost celého toroidu je 1040 tun (včetně kryostatu). Celý uvedený systém magnetů budí magnetické pole nutné k přesnému změření hybnosti mionů, které budou mionovým spektrometrem procházet.

Zakřivení drah mionů se bude měřit ve třech vrstvách komor umožňujících přesné změření souřadnice průchodu částice. Z toho je pak možné určit poloměr křivosti dráhy a tedy také hybnost mionu. Detektory jsou plynem plněné driftové trubice uspořádané v několika vrstvách, v nichž se měří doba driftu elektronů z místa vzniku na anodu, a tím je určena souřadnice průchodu částice. Přesnost určení souřadnice je lepší než  $80 \mu\text{m}$ . V části čel jsou použity katodové páskové komory pracující na principu mnohohrátové proporcionální komory. Prostorové rozlišení je  $60 \mu\text{m}$ . Aby bylo možno provádět přesná měření, musí být poloha komor známa s přesností odpovídající



jejich prostorovému rozlišení. Při složitosti a rozměrech detektoru ATLAS je to úkol velmi náročný. K výběru případů interakcí obsahujících měřené jevy jsou v mionovém spektrometru umístěny spouštěcí komory. Jsou opět ve třech vrstvách a tvoří je plynem plněné ploché komory s resistivními elektrodami a plynem plněné tenké proporcionální komory. Požadavkem je časově rychlá funkce (2 až 25 ns) a slušné prostorové rozlišení.

Hlavním úkolem mionového spektrometru bude měření rozpadových kanálů Higgsova bosonu  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$  leptony, měření leptonových rozpadů těžkých partnerů bosonů  $Z$  a  $W$ , měření produktů rozpadu supersymetrických částic, měření semileptonových rozpadů kvarků  $t$  a mesonů  $B$ . Všechna měření jsou založena na identifikaci a přesném měření hybnosti mionů.

## VÝBĚR PŘÍPADŮ — TRIGGER

Míra pravděpodobnosti toho, že proběhne určitá interakce, je dána účinným průřezem, který má rozměr plochy. Protože jednotka  $m^2$  je příliš velká, užívá se v SI nezařazená jednotka barn —  $1 b = 10^{-28} m^2$ . Celkový účinný průřez interakcí protonu s protonem při energii 14 TeV je asi 100 mb, avšak procesy, které budou v detektoru ATLAS měřeny (produkce Higgsova bosonu apod.), mají účinné průřezy řádu pikobarnů. Proto je nutno provést v reálném čase výběr případů, které budou dále zpracovány a které pravděpodobně obsahují studované reakce. Věc je ještě komplikovaná tím, že ke srážkám svazků dochází každých 25 ns a při plné intenzitě nastane v průměru 25 přes sebe superponovaných interakcí a v každé z nich se narodí v průměru 80 nabitých částic. Proto je nutný systém, který vybere zajímavé případy a zajistí jejich zapsání na magnetický disk nebo pásku k dalšímu zpracování. Tuto funkci plní systém výběru případů — trigger. Jeho úkol je velmi složitý, neboť

- interval mezi srážkami (25 ns) je kratší než doba, kterou potřebuje světlo k proběhnutí detektoru ATLAS — bude tedy obtížné udělat v tomto intervalu nějaké rozhodnutí;
- možnost vzniku až 25 interakcí v jedné srážce svazků dále komplikuje rozpoznání zajímavého případu;
- trigger musí být velmi selektivní — musí redukovat frekvenci interakcí z asi  $10^9$  Hz na přibližně 100 Hz k zaznamenání na vnější paměťové médium;
- je nutné též zajistit velkou účinnost výběru řídkých fyzikálních procesů, např. Higgsův boson rozpadající se na 4 leptony je produkován v jednom z asi  $10^{13}$  případů interakcí.

Trigger se skládá z několika úrovní:

Trigger první úrovně: s použitím údajů z několika rychlých detektorů určí, zda se má interakce dále zpracovávat, a v kladném případě postoupí údaje další úrovni. Zpracování se provádí na speciálních rychlých procesorech a údaje se předávají triggeru nižší úrovně. Trigger první úrovně redukuje údaje z původní frekvence (1 GHz) na frekvenci asi 100 kHz.

Trigger druhé úrovně: údaje (ze všech subdetektorů) případů vybraných triggerem první úrovně se zapíše do paměti, kde se uchovají, dokud trigger druhé úrovně nerozhodne, zda se bude případ dále zpracovávat. Tento trigger využije údajů ze

všech subdetektorů a na základě přesnější analýzy rozhodne o dalším osudu případu. Redukuje frekvenci na přibližně 1 kHz.

Pro případy vybrané triggerem druhé úrovně se provádí rekonstrukce — spojí se údaje o daném případě zaznamenané v různých subdetektorech v jeden celek. To jsou vstupní data pro trigger třetí úrovně, kdy se na farmě počítačů v režimu „off line“ provádí úplná rekonstrukce případu — údaje o hybnostech, energiích, identitě částic atd.

## SBĚR A ZPRACOVÁNÍ ÚDAJŮ

Trigger třetí úrovně již vlastně spadá do oblasti zpracování údajů z daného případu. S použitím počítačů, obvykle farem výkonných pracovních stanic, se vytváří definitivní soubor údajů o daném případě, který se pak použije pro fyzikální analýzu. Je vyvinuta série programů, které se používají při zpracování údajů, při simulacích funkce detektoru, při simulaci náhodných interakcí apod.

## KONTROLNÍ SYSTÉMY DETEKTORU

Tento systém se vytváří k řízení a kontrole funkcí celého detektoru ATLAS. Musí monitorovat asi 100 000 parametrů charakterizujících funkci subdetektorů a informujících o stavu infrastruktury experimentu a předávat je operátorovi. Údaje zpracovává a hledá nejlepší řešení situací — radí operátorovi, co je třeba zařídít a jak to nejefektivněji provést. Dává též návrhy preventivních kroků, které by měly být provedeny, aby systém spolehlivě fungoval.

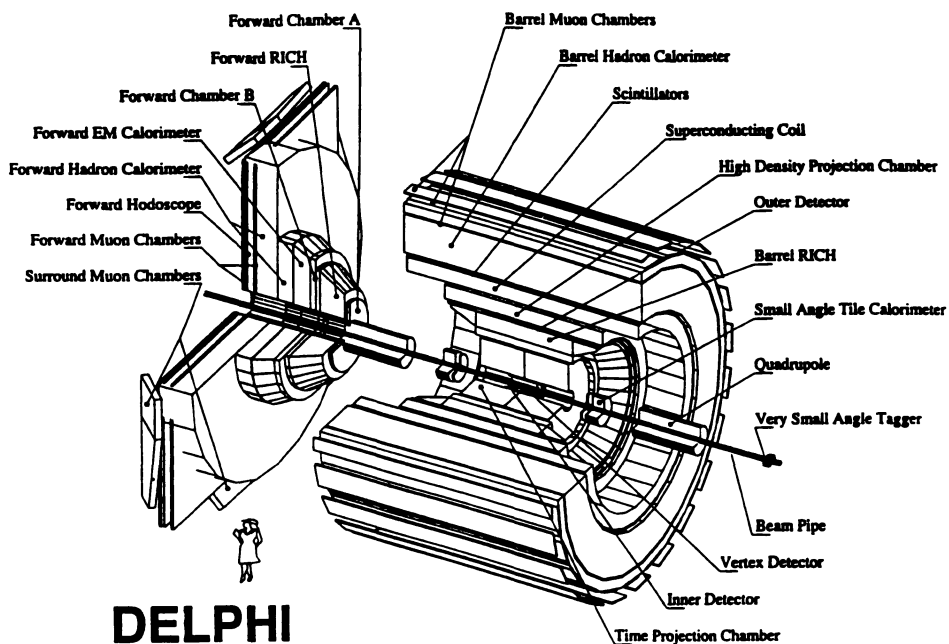
## Detektor DELPHI

Detektor DELPHI [4] je jeden ze čtyř detektorů na urychlovači vstříčných svazků elektronů a positronů LEP v evropském středisku CERN.

Urychlovač LEP zahájil provoz v roce 1989 a do roku 1994 produkoval neutrální intermediální bosony Z. Celkem bylo zaznamenáno asi 20 milionů případů rozpadu tohoto intermediálního bosonu. V roce 1995 byla zvýšena energie svazků a od roku 1996 se na urychlovači LEP ve srážkách elektronů s positrony produkují páry nabitých bosonů W.

Detektor DELPHI je optimalizován pro měření a identifikaci částic s energiemi do několika desítek GeV. Detektor se skládá z válcové centrální části — tzv. barrel a dvou zátek — end caps. Tvoří tak hermeticky uzavřený válec souosý s osou svazku (viz obr. 6).

Místo interakce je obklopeno vrcholovým detektorem (Vertex Detector) složeným z křemíkových polovodičových detektorů. Tyto detektory jsou děleny na pásy (tzv. stripové detektory) nebo na čtverečky (tzv. pixelové detektory). Pomocí soustavy těchto detektorů lze určit místo interakce (tzv. primární vrchol) a rovněž místa rozpadů těžkých částic (tzv. sekundární vrcholy) s přesností řádově 10 mikrometrů. Tak je možno rozpoznat jety způsobené těžkými kvarky, např. b jety, které obsahují těžké nestabilní částice.



## DELPHI

Obr. 6. Schéma detektoru DELPHI. Hlavní části detektoru jsou popsány v textu.

Hlavním dráhovým detektorem, který registruje dráhy nabitých částic, je tzv. Time Projection Chamber. Tento detektor měří dvě souřadnice pomocí soustavy drátových proporcionálních komor umístěných na koncích tohoto válcového detektoru. Třetí souřadnice podél osy válce je měřena pomocí doby driftu náboje od místa jeho vzniku. Detektor je umístěn uvnitř největšího supravodivého solenoidu na světě o průměru 6 m. Tento magnet vytváří homogenní pole o intenzitě 1,2 Tesla. Nabitá částice se v magnetickém poli pohybuje po šroubovici o poloměru, který je úměrný složce hybnosti kolmé k vektoru intenzity magnetického pole. Směr otáčení šroubovice záleží na znaménku náboje částice. Tímto způsobem se měří hybnost a náboj nabitých částic.

Detektor DELPHI má jedinečný systém (tzv. RICH) pro identifikaci částic, založený na měření úhlu emise Čerenkovova záření. Tento úhel závisí na rychlosti částice a jeho měření současně s měřením hybnosti částice umožňuje identifikaci elektronů, pionů, kaonů a protonů.

Elektromagnetický kalorimetr detektoru DELPHI je tzv. High Density Projection Chamber. Detektor sestává z olověného absorbátoru, který slouží k rozvoji elektromagnetické spršky. Positrony a elektrony ve spršce ionizují plynovou náplň detektoru. Elektromagnetický kalorimetr měří energii a polohu spršek vytvořených elektrony a kvanty gamma vysokých energií.

Hadronový kalorimetr je tvořen vrstvami ocelového absorbátoru, které jsou proloženy plynovými detektory, které pracují v tzv. režimu „streamer“. Celková tloušťka hadronového kalorimetru je asi 1 m.

V posledních vrstvách hadronového kalorimetru a vně celého detektoru jsou mionové komory, které jsou tvořeny soustavou driftových detektorů.

Je zřejmé, že detektor DELPHI je složitou soustavou subdetektorů, které jsou založeny na různých detekčních technikách. V následující tabulce jsou shrnuty odezvy jednotlivých subdetektorů soustavy DELPHI na jednotlivé druhy částic. Z tabulky je patrné, že kombinací signálů z různých druhů detektorů je možno identifikovat téměř všechny nabitě i neutrální částice.

Částice	Dráhový detektor	Čerenkovův detektor	Elmg. kalorimetr	Hadronový kalorimetr	Mionové detektory
<b>Nabitě:</b>					
pion	ano	signál	ano	ano	ne
kaon	ano	menší signál	ano	ano	ne
proton	ano	ještě menší s.	ano	ano	ne
elektron	ano	velký signál	ano	ne	ne
mion	ano	signál	ano	ano	ano
<b>Neutrální:</b>					
neutron	ne	ne	ano	ano	ne
K0 long	ne	ne	ano	ano	ne
gamma	ne	ne	ano	ne	ne
neutrino	ne	ne	ne	ne	ne

Pomocí detektoru DELPHI byly získány některé fundamentální výsledky současné fyziky částic. Již po prvním roce experimentování bylo měřením šířky intermediálního bosonu Z zjištěno, že existují právě tři pokolení kvarků a leptonů. Další přesná měření hmoty a šířky bosonu Z vedla k určení hmoty top kvarku ještě před jeho přímým objevem v experimentech ve Fermilab. Od roku 1996 detektor DELPHI registruje rozpady párů nabitých intermediálních bosonů W. Na všech těchto výsledcích se podílejí fyzici z MFF UK a FzÚ AV ČR.

## Závěr

Detektory ATLAS a DELPHI jsou typické soustavy subdetektorů používaných v experimentální částicové fyzice. Konstrukci takových detektorů předchází výzkumné a vývojové projekty. Tyto projekty vedou často k objevu nových technik pro detekci částic. Čeští fyzici a technici jsou v současnosti v CERN zapojeni ve výzkumných a vývojových projektech polovodičových a scintilačních detektorů. Některé techniky vyvinuté původně pro částicovou fyziku našly širší použití také v jiných oblastech. Například drátové proporcionální komory vyvinuté G. Charpakem pro experimenty v CERN se používají jako detektory rentgenového záření v medicíně. Za objev této detekční techniky byla G. Charpakovi udělena Nobelova cena za fyziku.

## Literatura

- [1] Atlas Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43, 1994.
- [2] The Large Hadron Collider Conceptual Design, CERN/AC/95-05 (LHC), 1995.
- [3] J. CHUDOBA, R. LEITNER, M. SUK: Pokroky mat., fyz. a astr. 40 (1995), 264-271.
- [4] DELPHI coll., Nucl. Instr. Meth. A 303 (1991) 233.

# 4000 let seismologie

(Hledání kořenů jedné vědecké disciplíny)

*Michal Kvasnička, Praha*

V předloňském 4. čísle časopisu *Bulletin of the Seismological Society of America* se objevil přehledný článek známého seismologa Ari Ben-Menahema<sup>1</sup>). Následující řádky jsou volnou, silně zkrácenou a na několika místech doplněnou transkripcí tohoto článku, který považuji za nejlepší a nejúplnější historický přehled seismologie publikovaný v posledních letech. Z tohoto důvodu ho také předkládám českému čtenáři.

Seismologie je vysoce interdisciplinární vědecký obor. Centrálním fenoménem, který seismologie studuje (klasifikuje, modeluje a snaží se předpovídat), je fenomén **ZEMĚTŘESENÍ**. Tento přírodní proces má velice komplikované vazby na celou řadu dalších procesů studovaných geologií, astrofyzikou, meteorologií a fyzikou. V důsledku této komplexnosti se přes enormní úsilí a výrazný pokrok v řadě dílčích problémů do dnešních dnů nepodařilo nalézt spolehlivou metodiku úspěšné předpovědi zemětřesení (tzn. předpovědi jeho velikosti, času a místa vzniku). Druhým, neméně důležitým fenoménem studovaným seismologií, je fenomén šíření seismického vlnového pole v závislosti na způsobu jeho vzniku a na vlivu prostředí, jímž se šíří.

Teoretický aparát seismologie a její registrační a experimentální metodiku formulovali přední matematici (Wiener, 1930; Lighthill, 1960), fyzici (Jeans, 1923; Born, 1925; Fock, 1946) a inženýři (LaCoste, 1934).

Zemětřesení jako přírodní událost je jev, který se svým rozsahem, průběhem a důsledky vymyká všemu, co známe z běžného života. Je to proces, který nade všechnu pochybnost dokazuje, že naše planeta Země není jen obrovským balvanem, ale že

---

<sup>1</sup>) BEN-MENAHÉM A.: *Review: A Concise History of Mainstream Seismology: Origins, Legacy, and Perspectives*. Bull. Seismo. Soc. Am. 85 (1995), 1202-1225.