

VLADIMÍR WAGNER

# Nejsilnější síla

HADES studuje vlastnosti částic ve velmi horkém a hustém prostředí

„Hádes – v řecké mytologii bůh mrtvých, podsvětí a podzemních pokladů, syn Kronův a bratr Diův.“

Encyklopedický slovník

„Ve fyzice vysokých energií jsme se zaměřovali na experimenty, které soustřeďovaly stále větší a větší objem energie do oblasti se stále menšími a menšími rozměry. Abychom mohli studovat podstatu „vakua“, musíme se obrátit jiným směrem, musíme zkoumat „hromadné“ jevy pomocí rozložení vysoké hustoty energie v relativně velkém objemu.“

T. D. Lee, Rev. Mod. Phys. 47, 267, 1975

Silná interakce se od známější gravitační nebo elektromagnetické interakce liší dvěma podivnostmi: průběhem intenzity interakce v závislosti na vzdálenosti a „uvězněním“ kvarků do hadronů. Silná interakce má navíc také velmi krátký dosah. Zatímco síla elektromagnetické či gravitační interakce se vzdáleností klesá, síla silné interakce se vzdáleností roste. Snažme se kvarky v hadronu od sebe odtrhnout tím, že jim dodáváme energii, abychom je od sebe oddálili. Čím jsou od sebe dále, tím je intenzita silné interakce větší a tím více energie musíme dodat. V určitém okamžiku je tato energie tak vysoká, že stačí k produkci nového páru kvarku a antikvarku. Tyto nové částice se spojí do dvojic

nebo trojic s těmi původními. Mateřský hadron sice „roztrhneme“, ale nezískáme volný kvark, nýbrž zase jen vázané systémy několika kvarků – hadrony. V našich normálních podmínkách nízkých teplot a hustot jsou všechny kvarky uvězněny v hadronech a volný kvark se zde nemůže vyskytovat.

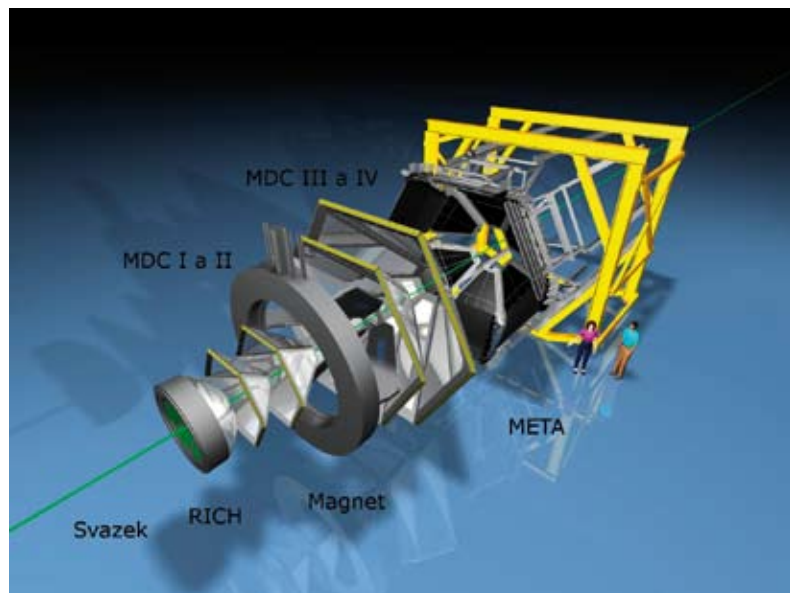
Některé vlastnosti hadronů lze popsat, když se na ně podíváme jako na objekty složené z malého počtu kvarků – baryony ze tří kvarků (antibaryony ze tří antikvarků) a mezony z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Velmi vysoká intenzita silné interakce a její podivuhodné vlastnosti však způsobují, že ve skutečnosti hadrony tvoří velmi složitý systém. Jeho nedílnou součástí je kromě „uvězněných“ kvarků i velmi komplikované vakuum, popsatelné pomocí virtuálních<sup>1</sup> gluonů, což jsou částice zprostředkující silnou interakci, a virtuálních párů kvarku a antikvarku.

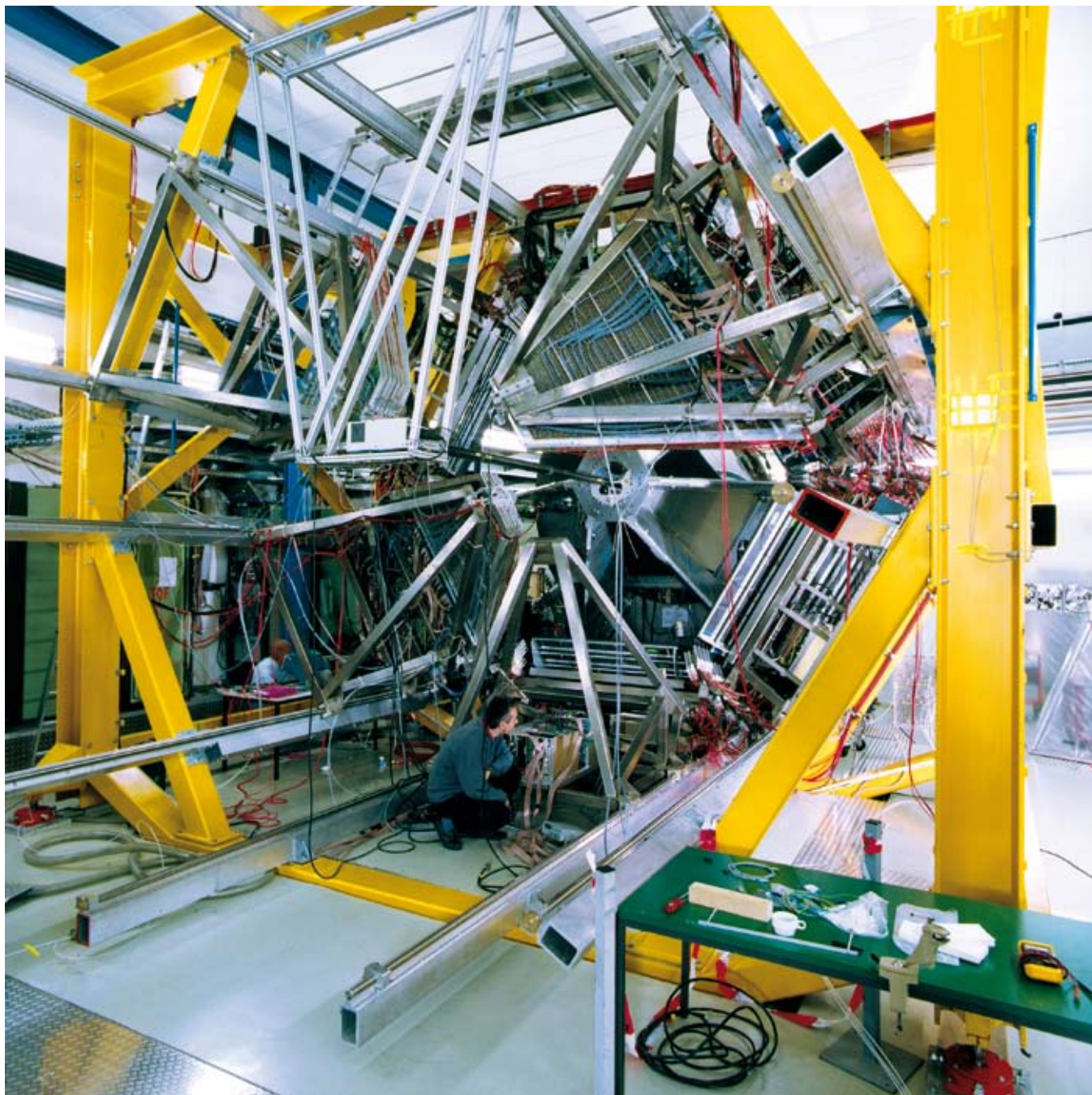
Vlastnosti silné interakce mohou i za to, že hmotnost protonu je více než o řád větší v porovnání s hmotností kvarků, z nichž se skládá.<sup>2</sup> To je podstatný rozdíl oproti tomu, co jsme dosud znali. Hmotnost vázaného atomu je dána součtem hmotností jádra a elektronů zmenšeným o hodnotu danou vazebnou energií. Stejně tak i hmotnost jádra je dána hmotností nukleonů, z nichž je složeno, zmenšenou o vazebnou energii. Nukleony tvoří více než 99,9 % normální hmoty, ze které jsou složeny hvězdy, planety i naše těla. S nadsázkou lze tvrdit, že pochopení původu jejich hmotností nám umožní zjistit, proč „nevážíme“ zhruba 2 kg, jak by vyplývalo z hmotnosti kvarků, ale podstatně více.

## Chirální symetrie

Chirální objekt se vyznačuje tím, že se jeho obraz v zrcadle liší od objektu původního. V našem případě jsou chirálními objekty kvarky. Jestliže je spin orientován ve směru pohybu částice, mluvíme o pravotočivé částici, když je orientován proti směru, mluvíme o částici levotočivé. V zrcadle se pak levotočivá částice zobrazuje jako pravotočivá a pravotočivá jako levotočivá. Co se stane, když zúčastněné částice zaměníme za jejich zrcadlové obrazy? Jestliže se po této záměně změní fyzikální zákonitosti, mluvíme o narušení chirální symetrie. V případě silně interagujících systémů by chirální symetrie platila, kdyby kvarky měly nulovou hmotnost. Hmot-

Stavba spektrometru HADES. Skládá se z Čerenkovova detektoru (RICH), čtyř vrstev mnohohrátkových driftových komor (MDC I, II, III a IV), supravodivého magnetu a stěny tvořené scintilačními detektory a systémem detektorů spršek (META). Na obrázku jsou pro větší názornost detektory povytaženy. Při měření jsou jednotlivé detektorové systémy zasunuty do sebe a dovnitř do zobrazené žluté konstrukce. (Zdroj A. Schmah, HADES)





nosti kvarků ale nejsou nulové a pro silnou interakci v našich normálních podmínkách platí, že chirální symetrie je narušena. V prostředí s velmi vysokou hustotou energie by se však – podle předpovědí kvantové chromodynamiky – mělo narušení chirální symetrie by vedlo například k zmenšování klidové hmotnosti hadronů nebo k změně jejich doby života. Proto je pro pochopení vlastností silné interakce důležité studovat hadrony v různě horkém a hustém prostředí.

#### Změny hmotnosti a doby života lehkých vektorových mezonů

Jestliže budeme mít částici, která se rozpadne uvnitř horkého a hustého prostředí, ponešou produkty rozpadu informaci o její klidové energii, a tedy i hmotnosti. Ze změřených hybností částic produkovaných v rozpadu lze klidovou hmotnost původní částice spočítat.

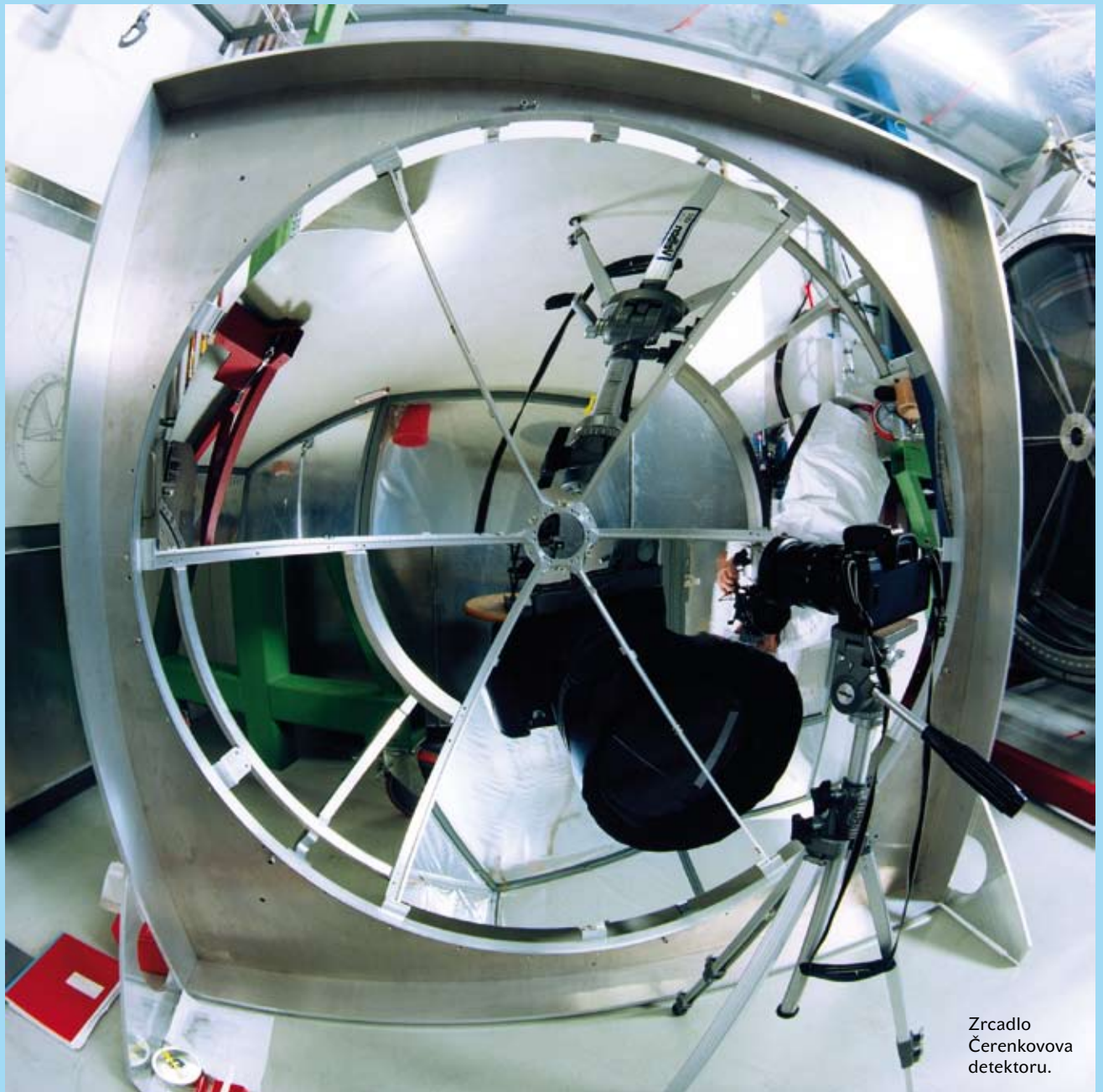
Doba života částice se dá určovat pomocí vztahu, který existuje mezi dobou života  $\tau$  a neurčitostí v určení klidové energie částice  $\Delta E (= \Delta m \times c^2)$ . Součin doby života a neurčitosti klidové energie je zhruba roven redukované Planckově konstantě  $\tau \times \Delta E \sim \hbar$ . Když tedy zobrazíme jednotlivé naměřené hodnoty klidové hmotnosti, jejich hodnoty jsou rozloženy kolem nějakého maxima. Jestliže se změní doba života částice uvnitř husté a horké jaderné hmoty, změní se i rozmazání její klidové hmotnosti. Poloha maxima v rozložení je však na stejném místě. Pokud takto

**Počáteční stadium budování spektrometru HADES.**

1) Virtuální částice – známé částice, které však díky kvantové fyzice v časovém intervalu povoleném Heisenbergovým principem neurčitosti narušují zákon zachování energie, přesněji  $\Delta E \times \Delta t$  je menší nebo rovno  $\hbar$ .

2) Má se na mysli proudová hmotnost kvarků, která vystupuje v dynamických procesech kvarků při velké předávané hybnosti. Vzhledem k tomu, že se kvarky nevyskytují v normálních podmínkách volné, je problém hmotnosti kvarku komplikovanější a souvisí s definicí tohoto pojmu. Při popisu hadronů pak lze zavést efektivní (tzv. konstituentní) hmotnost zmíněných kvarků, kterou si můžeme představit jako součet proudové hmotnosti a energie vazby dané silnou interakcí.





Zrcadlo  
Čerenkovova  
detektoru.

## Detektor Čerenkovova záření vidí jen pozitrony a elektrony

Srdcem celého spektrometru je Čerenkovův detektor RICH (Ring Imaging Čerenkov detector). Využívá toho, že v materiálu může být rychlost světla menší, než je rychlost světla ve vakuu. Částice, která se pohybuje materiálem rychlostí větší, než je rychlost světla v něm, vytváří v interakci s prostředím světelné záření. Úhel, do kterého je světlo vyzařováno, je dán poměrem rychlosti pohybu částice k rychlosti světla v daném prostředí.

Vzniká tak světelný kužel. Jeho průmětem do roviny zrcadla, kolmé ke směru pohybu částice, je kroužek. Jeho poloměr je tím menší, čím je rychlost částice menší a blíže rychlosti světla v daném prostředí. Vznikající světlo je odraženo do polohově citlivých detektorů světla velmi tenkým zrcadlem z leštěného uhlíku, který je potažen vrstvou s vysokou odrazivostí v ultrafialové oblasti, kde se vyzařuje v našem případě největší část Čerenkovova záření.

Potřebnou rychlost převyšující světelnou v použitém plynu mají díky své velmi nízké klidové hmotnosti pouze elektrony a pozitrony. Všechny ostatní částice jsou nejméně dvěstěkrát těžší, a tudíž pomalejší. Čerenkovův detektor nám tak umožňuje identifikovat elektron-pozitronové páry. Protože vidí pouze tyto částice, potřebujeme také další detektory, které by rozlišovaly různé druhy těžších částic. Další jeho nevýhodou je, že detekce, sběr a průběžná jejich analýza jsou u tohoto detektoru poměrně pomalé. Nemůže tedy sloužit k rychlé průběžné identifikaci případů, které jsou pro nás zajímavé.

určíme klidovou hmotnost dostatečného souboru částic rozpadlých uvnitř horké a husté jaderné materie, můžeme určit jak zmíněné rozmazání, tak polohu maxima.

Kdyby produkty rozpadu interagovaly s okolním jaderným prostředím, před-

ly by část své hybnosti a energie, tudíž by se informace o klidové hmotnosti mateřské částice ztratila. Proto si vybíráme jen ty rozpady, při nichž výsledné částice neinteragují silně. Takové jsou leptony, patří mezi ně například elektron, jeho partner z antisvě-



ta pozitron nebo jejich těžší kolegové mion a antimion.

Vhodnými částicemi pro zkoumání změn vlastností hadronů v hustém a horkém prostředí jsou vektorové mezony  $\rho^0$ ,  $\omega$  a  $\Phi$ , jejichž doba života zajišťuje, že se téměř všechny (nebo aspoň nějaká jejich část) rozpadají uvnitř oblasti s horkou a hustou hmotou.<sup>4</sup> Například mezon  $\rho^0$  by za svou dobu života (zhruba  $0,4 \cdot 10^{-23}$  s) urazil pouze 1,3 fm, i kdyby se pohyboval nejvyšší možnou rychlostí (rychlostí světla). Průměr středně velkého jádra (okolo molybdenu) je však zhruba 11 fm. Na dvojici elektron a pozitron se bohužel mezony  $\rho^0$  rozpadají jen v 0,0044 % všech rozpadů, téměř sto procent rozpadů jde na dva mezony  $\pi$ . Jak vytvořit podmínky pro změny hmotností a dob života hadronů a takové síto, které nám zachytí právě hledané případy?

### Jak připravit velmi horké a husté jaderné prostředí

Potřebné horké a husté jaderné prostředí můžeme získat ve srážkách těžkých jader urychlených na velmi vysoké energie. Při takových srážkách (viz Vesmír 84, 664, 2005/11) je hmota prudce ohřata a stlačena. Dosahuje teplot v řádu  $10^{12}$  K a hustot několikanásobku normální hustoty atomového jádra (zhruba  $10^{18}$  kg/m<sup>3</sup>). To je prostředí, v němž jsou hustoty a teploty dostatečně vysoké na to, aby se vlastnosti mezonů významně změnily.

Takový urychlovač těžkých jader SIS pracuje i v laboratoři GSI v Darmstadtu. Systém detektorů, který se na něm zaměřuje na lov leptonových párů složených z elektronu a pozitronu, se nazývá spektrometr HADES. Název je docela případný, protože spektrometr vlastně loví „stíny“ částic, které žily tak krátce, že po jejich zániku trvalo jejich pozůstatkům  $10^{15}$ krát déle, než se dostaly do jeho detektorů. A to už je nejspíše docela srovnatelné s poměrem mezi délkou života obyčejného člověka a věčností, kterou pak jeho duše stráví v Hádově říši.<sup>3</sup>

HADES zkoumá srážku urychleného jádra s jádrem terče, který je v klidu vůči laboratoři. Většina částic tak vyletuje ve směru původního letu svazku urychlených jader.

### Spektrometr HADES

Od spektrometru potřebujeme, aby

- z velkého množství srážek vybral jen ty, které jsou pro nás důležité,
- identifikoval elektrony a pozitrony a vydělil je z velkého množství hadronů,
- velice přesně změřil hybnost těchto elektronů a pozitronů.

Vzhledem k tomu, že potřebujeme zachytit co nejvíce dvojic elektronů a pozitronů, a tím zabránit případům, kdy nám jedna částice z dvojice unikne, musí mít detektorová sestava co největší pokrytí detekce leptonů. Je třeba se vypořádat i s tím, že musíme pracovat při velké intenzitě svazku a frekvenci srážek. Tím je určena i sestava detektorů, které spektrometr HADES tvoří. Geometrie detektorů je šestiúhelníková a každý systém detektorů se skládá ze šesti segmentů. Jeho rozměry sice nedosahují velikosti detektorových

sestav vysokoenergetických experimentů na urychlovačích v laboratoři CERN v Švýcarsku, ale i tak je výška spektrometru okolo šesti metrů a délka je také několik metrů.

V rámečcích na s. 774 a 776 si podrobněji všimneme Čerenkovova detektoru a mnohadrátových driftových komor. Vedle těchto detektorů se ve spektrometru vyskytují detektory scintilační pro určení doby letu částice,<sup>5</sup> sprškové aj. Pokud neměří přímo parametry rozpadu, je jejich úkolem vybrat pro nás zajímavé případy. Podrobněji na [www.vesmir.cz](http://www.vesmir.cz)

### Vybírají pro nás zajímavé případy aneb jehla v kupce sena

Jak bylo zmíněno, rozpadají se vektorové mezony na pár elektron a pozitron jen s velmi malou pravděpodobností. Kdyby se zapisovaly všechny reakce, nesla by zajímavou informaci velmi malá část zapsaných případů. Počet potřebných centrálních srážek jader k získání jednoho rozpadu mezonu  $\rho^0$  na pár elektron a pozitron závisí na tom, o jak těžká jádra jde, pro ta lehčí je to zhruba  $10^7$ . V experimentech je maximální možná intenzita svazku v řádu  $10^8$  jader za sekundu a zaznamenaných případů první úrovně výběru může být řádově  $10^5$  za sekundu. Počet zapsaných případů je dán průměrnou velikostí jednoho případu (zhruba 10 kB) a možnou rychlostí zápisu informace. Zhruba tak lze zapsat okolo 2000 případů za sekundu. A správnou volbu těchto zapsaných případů umožňuje druhá úroveň výběru.

Pro určování absolutních pravděpodobností různých reakcí se navíc zapisuje i malá

3) Pro srovnání – stáří vesmíru je řádu  $10^{17}$  sekund!

4) Vektorové mezony jsou mezony se spinem 1.

5) Pomocí stěny ze scintilačních detektorů lze určit i polohu průletu nabitě částice. Jedna souřadnice je určena polohou tyče, druhá jde určit z rozdílu doby, než signál dorazí k levému a pravému fotonásobiči. Přesnost ve směru kolmém na délku tyče určuje tloušťka tyče a ve směru podél délky tyče je dána časovým rozlišením detektoru, fotonásobiče a další elektroniky. Navíc ještě scintilační stěna umožňuje určit z energie, kterou v ní jednotlivé částice ztratí, velikost jejich náboje. A právě za vybudování a fungování této stěny pro určování doby letu je spolu s kolegy z Itálie odpovědná naše skupina z ÚJF AV ČR, v. v. i., v Řeži. Naši práci průběžně podporují Grantová agentura AV ČR (grant č. IAA1048304) a Grantová agentura České republiky (grant č. 202/00/1668 a naše studenty grant č. 202/03/H043) a MŠMT (projekt C7050).

**Příprava detektoru spršek, který využítá toho, že elektrony a energií vytvářejí v materiálu z těžkých atomů spršku elektronů, pozitronů a fotonů záření gama (elektromagnetickou spršku).**





## Mnohohrátové driftové komory a silný magnet určují přesně hybnost

Čím přesněji dokážeme změřit hybnosti vyletujících částic, tím přesnější je i určení klidové hmotnosti mateřského hadronu. K přesnému určení hybnosti nabitých částic, a hlavně elektronů a pozitronů, slouží systém několika vrstev mnohohrátových driftových komor a magnetu. Mnohohrátová driftová komora velice přesně určuje místo průletu nabitě čas-

Magnet, vnější část scintilační stěny a v pozadí detektory spršek

tice. Je složena z několika vrstev drátů, na které je přiloženo napětí. V každé vrstvě jsou dráty napnuté v jiném směru. Pokud v blízkosti drátu, který funguje jako elektroda, projde nabitá částice, způsobí ionizaci prostředí. Vznikající oblak elektronů pak driftuje k nejbližším elektrodám a vznikající elektrický signál se sbírá. Elektronovým oblakem bývá zasaženo i několik blízkých drátů. Místo, kde se protínají zasažené dráty z různých vrstev, udává místo průletu nabitě částice. Mnohohrátová driftová komora umožňuje určit místo průletu nabi-



Instalace mnohohrátových driftových komor za magnetem.



té částice s přesností dosahující 0,1 mm. Počet elektrod, jejichž signál je třeba vyčíst, překračuje v každém ze šesti segmentů jedné vrstvy komor tisícovku.

Po průletu prvními dvěma vrstvami komor, které jsou za Čerenkovovým detektorem, se částice dostane do magnetického pole vytvořeného supravodivým magnetem. Toto magnetické pole změní dráhu částice. Velikost změny závisí na náboji a hybnosti dané částice. Vzhledem k tomu, že v našem případě nás hlavně zajímají elektrony a pozitrony, které mají velmi vysoké energie a pohybují se rychlostmi blízkými rychlosti světla, potřebujeme velmi vysokou intenzitu pole. Proto se využívá supravodivý magnet, který vytváří magnetické pole o intenzitě zhruba 0,9 T.<sup>6</sup> Za magnetem pak následují další dvě vrstvy komor, které určí změněnou dráhu. Z průběhu změny dráhy lze pak spočítat hybnost příslušné částice, pokud víme, jaký náboj částice má.

6) Při konstrukci existujících supravodivých magnetů se využívají slitiny niobu a titanu, čímž je dána i maximální dosažitelná intenzita magnetického pole 10 T. Téměř takové intenzity magnetického pole dosahují například magnety právě budovaného největšího urychlovače LHC v laboratoři CERN. Je to více než stotisíckrát větší intenzita, než má magnetické pole Země.

část případů, které první nebo druhou úrovní výběru neprojdou, konkrétně každý stý, tisící, desetitisící... případ. Násobíme-li to příslušným poměrem, dostaneme správný obraz o zastoupení jednotlivých reakcí.

### Vadí nám kombinatorické pozadí. Co to je?

V případech, kde byly nalezeny elektrony a pozitrony, se z parametrů dvojice elektronu a pozitronu určuje klidová hmotnost. V žádném případě však nemáme jistotu, že elektron, který vybereme do páru s pozitronem, je ten správný. Detektory totiž jednak nejsou ve všech směrech, a tak některé z elektronů nebo pozitronů nezachytí. Dále se v jedné srážce může vytvořit i několik elektronů

a pozitronů. Můžeme tak spárovat nesprávnou dvojici elektronu a pozitronu. Při zpracování nelze správné dvojice od nesprávných odlišit. Ty nesprávné tak vytvářejí kombinatorické pozadí. Naštěstí lze velikost a tvar kombinatorického pozadí dobře určit, pokud se spárují dvojice elektronů, které nemohou vzniknout rozpadem částic. Další možností je párovat elektron a pozitron ze dvou různých srážek, které také nemohly vzniknout rozpadem jedné částice.

V principu by mělo být výhodnější studovat srážku co nejtěžších jader, protože se tím získává největší objem horké a husté hmoty. Prakticky však v takových případech prudce narůstá kombinatorické pozadí a rostou náro-

ky na souběžnou detekci velkého počtu částic a analýzu takových dat. Zkoumané jevy se pak v kombinatorickém pozadí ztrácejí.

### **A co první experimentální pozorování spektrometru HADES?**

Spektrometr se stavěl průběžně, a hlavně dokončování vnějších vrstev komor, které jsou velmi veliké a technicky i finančně náročné, skončilo nedávno. Teprve se všemi vrstvami komor se může spektrometr HADES přiblížit k projektované přesnosti určení hmotnosti 1%. První série měření zatím proběhla jen se třemi rovinami mnohohrátových komor, tedy s daleko menší přesností. Zatím se studovaly jen srážky velmi lehkého systému uhlík na uhlík při dvou různých energiích. V prvním případě byla kinetická energie zhruba rovna klidové energii urychlovaného jádra a v druhém případě byla dvojnásobkem. Zároveň byla tato měření doplněna o experimenty studující elementární procesy při srážkách jednotlivých nukleonů. Dva experimenty, při kterých se napřed srážely urychlené protony, a pak deuterony s kinetickou energií o trochu větší, než je jejich energie klidová s protony, mají sloužit jako referenční a jsou důležité také pro úplné osvojení všech možností spektrometru a jeho kalibraci. Ve srážkách uhlíku na uhlíku se pozoruje zvýšení počtu párů elektronu a pozitronu oproti teoretickým předpovědím bez změn vlastností hadronů. A to v oblasti hmotností, ve které ji pozoroval i předchozí experiment DLS. Získaná data indikují možnost změny vlastností mezonů, dávají zajímavé podněty pro teoretické studie a zdají se vylučovat některé z modelů. Teoretické skupiny přesvědčil souhlas dvou nezávislých experimentů (DLS a HADES) a začaly své simulace znovu analyzovat a modifikovat, aby vyřešily pozorované rozpory. Ovšem pro konkrétní závěry je třeba počkat na dokončení všech analýz, a hlavně na experimenty s dobudovaným spektrometrem.

### **Co se dá očekávat?**

I v současné době sice probíhají vylepšení spektrometru HADES, ale hlavní trumfy v dokončení systému čtyř vrstev mnohohrátových driftových komor už byly vyneseny. Proto je možné začít fyzikální měření s využitím plného potenciálu spektrometru. Hlavní možnosti pro zlepšení ještě zůstávají ve vylepšení kvality svazku, efektivitu výběru zajímavých případů a určování dalších charakteristik srážek. K tomu přispěje i přední stěna, složená z velkého počtu scintilačních detektorů. Ta bude zachycovat nabitá jádra vyletující z místa srážky, čímž určí geometrii srážky v každém konkrétním případě. Na této geometrii totiž závisí velikost, tvar, dosažená teplota a hustota i chování vzniklé horké a husté jaderné hmoty. Zůstávající slabinou je rozlišení částic ve vnitřní části scintilační stěny k určování doby letu pro srážky velmi těžkých jader s velkým počtem fragmentů a protonů. Proto se plánuje náhrada 24 velkých scintilačních detektorů systémem detektorů jiného

typu, s velkým počtem buněk umožňujících rozlišit velký počet částic.

Velmi důležitý je výzkum a pochopení srážek toho nejjednoduššího systému ještě před studiem srážek těžkých jader. V první půli tohoto roku tak byl opět proveden experiment se srážkami protonu na protonu s využitím terče z kapalného vodíku, tentokrát s téměř trojnásobně vyšší energií než v předchozím případě. Takový experiment je také vhodnou možností pro testování vlastností dokončeného spektrometru a ověření, zda dobře chápeme jeho funkci a detekční účinnost. V příštích experimentech by se mělo přecházet k stále těžším systémům, při jejichž srážkách se bude vytvářet stále větší objem horké a husté jaderné hmoty. Jak už bylo zmíněno, na budování, provozu zařízení, provedení jednotlivých experimentů i jejich analýze se podílejí i čeští fyzikové. Naši studenti při tom vypracovávají své diplomové a doktorské práce. Náš hlavní podíl se týká soustav detektorů, které umožňují určit charakter a geometrii každé jednotlivé srážky. Právě proto se zaměřujeme na studium závislosti produkce leptonových párů na těchto vlastnostech. Takové studium může přinést velmi důležité informace a s nárůstem hmotnosti srážejících se jader jeho význam poroste také.

V dlouhodobějším horizontu se v laboratoři GSI připravuje budování urychlovače SIS100/200, který by navazoval na jejich současný urychlovač SIS a umožňoval urychlovat jádra na kinetické energie zhruba o více než řád větší. Pokud by na něm pracoval modifikovaný spektrometr HADES, mohl by se dostat do oblasti velmi zajímavých hodnot fyzikálních veličin, hlavně do vysokých hustot jaderného prostředí. Přebudovaný HADES se bude muset vypořádat s tím, že v důsledku větší energie jader svazku, která budou dopadat na pevný terč, poletí ještě větší část vyletujících částic do malých úhlů vzhledem ke směru svazku. Nejdříve tak nejspíš bude pracovat v dolní oblasti hodnot energií dosažitelných pomocí urychlovače SIS100/200. Pro práci u maximálních dosažitelných energií svazku plánovaného urychlovače už bude třeba vybudovat nové detekční zařízení.

Výzkum vlastností mezonů a jejich změn v jaderné hmotě v širokém rozmezí hustot a teplot by měl přispět k pochopení základních zákonitostí, které panují v systému složeném z částic interagujících silnou interakcí. Takové systémy tvoří více než 99 % hmotnosti normální hmoty našeho vesmíru a zmíněné zákonitosti jsou nezbytné pro pochopení toho, jak tato hmotnost vzniká. Velmi horká a hustá hmota složená z hadronů se vyskytuje v řadě vesmírných objektů a byla tady krátce po počátku vesmíru. Pochopení a popsání s nimi spojených fyzikálních dějů není bez co neúplnějších znalostí teorie silné interakce – kvantové chromodynamiky – možné. Je dobře, že se i díky českým grantovým agenturám mohou čeští fyzici a studenti podílet prostřednictvím účasti v mezinárodním experimentu HADES na rozvoji této oblasti jaderné a částicové fyziky. ☺



**PŘEDSTAVUJE**

více na [www.vesmir.cz](http://www.vesmir.cz)  
**WWW+**

### **K DALŠÍMU ČTENÍ**

Martinus Veltman:

Fakta a záhady  
ve fyzice  
elementárních  
částic, Academia,  
Praha 2007

[hp.ujf.cas.cz/~wagner/](http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/)

